ผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง

นางสาววรวินดา จุ้ยสกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Urea Concentrations on Low pH Nitrification by Trickling Filter

Miss Ravinda Chuisakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง
โดย	นางสาววินดา จุ้ยสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.กิตติคุณ ตรุยานนท์)

Chulalongkorn University

รวินดา จุ้ยสกุล : ผลของความเข้มข้นยูเรียต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง (Effects of Urea Concentrations on Low pH Nitrification by Trickling Filter) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของยูเรียช่วงความเข้มข้นสูง 50-1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ที่พีเอชต่ำเพื่อป้องกันการเกิดก๊าซแอมโมเนียโดยใช้ระบบถังโปรยกรองที่มีค่าก่อสร้างและดำเนินการต่ำ ทำการศึกษาที่ควบคุมค่าพีเอช 7 6 5 4 และที่ไม่มีการควบคุมพีเอช พบว่าเมื่อเดินระบบจนคงที่แล้วที่พีเอช 6 มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยอยู่ที่ 0.577±0.004 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ใกล้เคียงกับพีเอช 7 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยอยู่ที่ 0.617±0.018 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และสามารถบำบัดยูเรียไปเป็นไนเตรทได้จนหมด ส่วนพีเอช 5 มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยอยู่ที่ 0.005±0.005 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และพีเอช 4 ไม่มีไนเตรทเกิดขึ้นในทุกรอบการทดลอง จากอัตราไนตริฟิเคชันดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าพีเอช 6 เป็นพีเอชต่ำที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการเดินระบบจริงในถังโปรยกรองเพื่อบำบัดน้ำเสียจากห้องน้ำในสถานีบริการน้ำมัน และลดปัญหาการเกิดกลิ่นของก๊าซแอมโมเนียในระบบบำบัดได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) เท่ากับ 0.032±0.023 กรัมของแข็งแขวนลอยต่อกรัมไนโตรเจน นอกจากนี้ยังพบว่าชุดที่ไม่มีการควบคุมพีเอชไม่สามารถบำบัดยูเรียได้มากนักเนื่องจากค่าพีเอชลดลงจนต่ำกว่า 6 และยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

จากการศึกษาผลของการบำบัดยูเรียที่ความเข้มข้น 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร โดยควบคุมพีเอชเป็น 6 พบว่า สามารถบำบัดยูเรียไปเป็นไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ในทุกความเข้มข้นของการทดลอง และเมื่อเดินระบบจนคงที่แล้วมีอัตราไนตริฟิเคชันที่เป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics) ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 1.14±0.06 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และค่า K_S เท่ากับ 550.10±60.16 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบโปรยกรองซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนโดยฟิล์มชีวภาพยึดเกาะกับตัวกลางสามารถบำบัดยูเรียที่ความเข้มข้นสูงได้ถึง 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในสภาวะพีเอช 6 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2559		

5770454821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: UREA / AMMONIFICATION / NITRIFICATION / TKN / NITRIFYING BACTERIA / LOW PH / BIOFILM / TRICKLING FILTER

RAVINDA CHUISAKUL: Effects of Urea Concentrations on Low pH Nitrification by Trickling Filter. ADVISOR: ASST. PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 123 pp.

This research studied nitrification of high urea concentrations, 50-1,000 mgN/L, at low pH to prevent ammonia gas production using trickling filter of low construction and maintenance cost. Controlled pH were 7, 6, 5, 4, and uncontrolled pH throughout the experiment. Results showed that at steady state, average specific nitrification rate at pH 6 was 0.577±0.004 gN/m^2/d, similar to rate at pH 7 of 0.617±0.018 gN/m^2/d, which was the optimum pH on the growth of nitrifying bacteria transforming urea to nitrate completely. Controlled pH at 5 founded that the average specific nitrification rate of 0.005±0.005 gN/m^2/d and controlled pH at 4 did not find nitrate in every batch. Therefore, pH 6 was the most suitable low pH in trickling filter system for gas station restroom wastewater treatment which also eliminate odor of ammonia in the system with a yield of 0.032±0.023 gSS/gN. Moreover, results from uncontrolled pH showed that urea was not effectively treated since pH was decreased to lower than 6 and inhibited the nitrification process.

From the effect of treating urea concentrations of 50, 100, 200, 500, and 1,000 mgN/L by controlled pH at 6, results showed that urea was treated to nitrate completely in all experiments. At steady state, nitrification rates followed Monod kinetics with k_m of 1.14±0.06 gN/m^2/d and K_S of 550.10±60.16 mgN/L. Therefore, trickling filter which was a biological aerobic treatment system using biofilm growth media can treat high urea concentration up to 1,000 mgN/L at pH 6 effectively.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	....
		Advisor's Signature	....
Field of Study:	Environmental Engineering		
Academic Year:	2016		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะ ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.กิตติคุณ ตรุยานนท์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ติชม และแก้ไขให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณบริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกอนจุลินทรีย์ และบริษัทอาควา นิชิฮาร่า คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษาและทำวิจัยระดับปริญญามหาบัณฑิตของข้าพเจ้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฎ

สารบัญรูปภาพ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย 4

2.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย 4

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ 4

2.2.2 กระบวนการทางเคมี 6

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ 6

2.3 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ 6

2.3.1 ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน 8

2.3.2 ปฏิกิริยาแอมโมเนียมแอสซิมิเลชัน 9

2.3.3 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน 10

2.3.4 ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน 14
2.4.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 14
2.4.2 อุณหภูมิ 14
2.4.3 ค่าความเป็นกรดด่าง 15
2.4.4 สภาพความเป็นด่าง 15
2.4.5 ความเค็ม 15
2.4.6 สารพิษ 15
2.5 ระบบบำบัดทีเคเอ็น (TKN) ในน้ำเสีย 17
2.5.1. ระบบจุลินทรีย์แขวนลอย 17
2.5.2. ระบบการเจริญแบบเกาะติด 17
2.5.2.1 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ 18
2.5.2.2 ระบบโปรยกรอง 20
2.6 สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต 24
2.7 รูปแบบของจลนพลศาสตร์ 26
2.7.1 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ 26
2.7.2 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง 27
2.7.3 จลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ 27
2.7.4 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น 28
2.7.5 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์ 28
2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 33
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 33
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย 33

หน้า

3.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 35

3.1.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์ 35

3.1.4 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง 36

3.1.5 ถังปฏิกิริยา 37

3.2 แผนการทดลอง 38

3.3 การดำเนินงานวิจัย 40

3.3.1 เริ่มเดินระบบ 40

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง 41

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง 44

3.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์ 45

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 47

4.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง 47

4.1.1 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 47

4.1.2 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 50

4.1.3 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5 53

4.1.4 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4 56

4.1.5 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช 59

4.1.6 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) 62

4.1.7 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของพีเอช 64

4.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 67

4.2.1 ความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 68

4.2.2 ความเข้มข้นของยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2.3 ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 72
4.2.4 ความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 74
4.2.5 ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 77
4.2.6 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 82
5.1 สรุปผลการทดลอง 82
5.1.1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชัน 82
5.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 83
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 83
5.3 ข้อเสนอแนะ 83
รายการอ้างอิง 84
ภาคผนวก 88
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 89
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง 94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 123

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สถานะภาพทางออกซิเดชันของสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ 5

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความเข้มข้นของโลหะที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน 16

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน 16

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างความเข้มข้นของสารอนินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน............. 16

ตารางที่ 2.5 ประเภทของระบบโปรยกรอง.. 23

ตารางที่ 3.1 ธาตุอาหารเสริมที่เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 35

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1 41

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2 44

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 45

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7......................... 48

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6......................... 51

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5......................... 54

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4......................... 57

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช . 59

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield)... 63

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 และ 6 ของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น 63

ตารางที่ 4.8 อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยที่ได้จากงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น 66

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร.. 68

ตารางที่ 4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 70

หน้า

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 72

ตารางที่ 4.12 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 75

ตารางที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ 7

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับแอมโมเนียและแอมโมเนียม.. 9

รูปที่ 2.3 การเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางในระบบโปรยกรอง 18

รูปที่ 2.4 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ.. 19

รูปที่ 2.5 แผ่นหมุนที่มีส่วนจมอยู่ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 40 19

รูปที่ 2.6 การทำงานของระบบโปรยกรอง 20

รูปที่ 2.7 ตัวกลางพลาสติก.. 21

รูปที่ 2.8 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics) 26

รูปที่ 2.9 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)... 27

รูปที่ 2.10 จลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics).. 27

รูปที่ 2.11 การยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น (Substrate inhibition kinetics)........................... 28

รูปที่ 2.12 การยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์ (Product inhibition kinetics)............................. 28

รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media ของบริษัท AQUA 36

รูปที่ 3.2 ถังโปรยกรอง (Tricking Filter)... 37

รูปที่ 3.3 แผนการทดลอง.. 39

รูปที่ 3.4 การเริ่มเดินระบบ 40

รูปที่ 3.5 กราฟแสดงปริมาณทีเคเอ็นและไนเตรทที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลอง 42

รูปที่ 3.6 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง 43

รูปที่ 3.7 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง 46

รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยา
ไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7.. 49

หน้า

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 52
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5 55
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4 58
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช 61
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการหาอัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 ในรอบที่ 8 9 และ 10 64
รูปที่ 4.7 อัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 6 5 4 และชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช 65
รูปที่ 4.8 อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยที่พีเอช 7 6 5 และ 4 66
รูปที่ 4.9 สภาวะในถังโปรยกรองที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 67
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 69
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 71
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 73
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 76
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร 78
รูปที่ 4.15 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 80
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียและอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะ 81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนสูงมักจะถูกบำบัดได้ยากกว่าน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์ทั่วไป ตัวอย่างเช่น น้ำเสียที่มาจากห้องน้ำในสถานีบริการน้ำมันซึ่งมีเข้าผู้เข้าใช้บริการเป็นจำนวนมาก และส่วนใหญ่เป็นการปัสสาวะ ซึ่งในน้ำปัสสาวะมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียเรียกรวมกันว่า ทีเคเอ็น (TKN, total kjeldahl nitrogen) ในปริมาณที่สูง และไม่สามารถถูกบำบัดด้วยถังเกรอะ และถังกรองไร้อากาศสำเร็จรูปทั่วไปที่นิยมใช้ได้ เนื่องจากถังสำเร็จรูปเหล่านี้มุ่งกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเท่านั้น จึงไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากทีเคเอ็นจะไปใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง

เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายในระบบเติมอากาศ สารอินทรีย์จะปล่อยไนโตรเจนที่เหลือออกมาในรูปของแอมโมเนีย (Ammonification) ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น และส่งผลต่อเนื่องทำให้แอมโมเนียมละลายน้ำเปลี่ยนรูปมาเป็นก๊าซแอมโมเนียซึ่งระเหยออกจากน้ำทำให้มีกลิ่นฉุนรุนแรงเป็นที่น่ารังเกียจ และจัดเป็นก๊าซพิษชนิดหนึ่ง ซึ่งถ้าสามารถลดค่าพีเอชในน้ำลงจนกระทั่งปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดเปลี่ยนรูปมาเป็นแอมโมเนียมอิออน ก็จะช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นจากก๊าซแอมโมเนียได้ แต่ในการบำบัดทีเคเอ็นยังต้องอาศัยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่ต้องการการเติมออกซิเจนมากๆ และสร้างกรดขึ้นมา ซึ่งถ้าไม่มีการปรับพีเอชให้เป็นกลางจะทำให้เกิดแบคทีเรียแบบเส้นใย (Filamentous Bacteria) ส่งผลให้ตะกอนในระบบเอเอสไม่จมตัวลง และทำให้ระบบเอเอสล้มเหลวได้

ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนโดยมีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่บนผิวของตัวกลาง เป็นระบบที่ก่อสร้างง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ สามารถเดินระบบที่ค่าพีเอชต่ำๆ ได้ เนื่องจากต้องการแบคทีเรียแบบเส้นใยมากกว่าแบบแขวนลอย จึงเป็นระบบที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารอินทรีย์ไนโตรเจนสูงดังเช่นในงานวิจัยนี้ได้ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในระบบบำบัดแบบเจริญเกาะติด (Attached Growth System) สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ที่พีเอชต่ำประมาณ 4 และสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ในอัตราสูงได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบเติบโตแขวนลอย (Suspended Growth System) (De Boer และคณะ, 1991, Tarre และ Green, 2004, Tarre และคณะ, 2004 และ Gieseke และคณะ, 2006)

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ เพื่อลดปัญหากลิ่นของแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดทีเคเอ็น และความเข้มข้นของยูเรียที่มีผลต่ออัตราการบำบัด ซึ่งทำการศึกษาในระบบโปรยกรอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบโปรยกรองเพื่อบำบัดน้ำเสียจริงที่เกิดจากห้องน้ำในสถานีบริการน้ำมัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของพีเอชต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแหล่งไนโตรเจนคือยูเรีย โดยมีความเข้มข้นของยูเรีย 50-1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

1.3.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้นำมาจากบริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด

1.3.3 ใช้ถังโปรยกรอง (Trickling Filter) ทำจากพีวีซีที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร

1.3.4 ตัวกลางที่ใช้เป็นพลาสติกแบบสุ่ม (Random flow media) โดยมีความสูงของชั้นตัวกลาง 1 เมตร จำนวน 2 ชั้น คิดเป็นปริมาตรตัวกลางทั้งหมด 31.4 ลิตร

1.3.5 เดินระบบแบบทีละเท (Batch process)

1.3.6 ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 25 ลิตร

1.3.7 ควบคุมพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์

1.3.8 ทดลองเปลี่ยนค่าพีเอช 4 ค่า ได้แก่ 4 5 6 และ 7

1.3.9 ทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของยูเรีย 5 ค่า ได้แก่ 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

1.3.10 พารามิเตอร์ที่ตรวจสอบคือ พีเอช (pH) ของแข็งแขวนลอย (SS) แอมโมเนีย (NH_3) ทีเคเอ็น (TKN) ไนไตร์ท (NO_2^-) และ ไนเตรท (NO_3^-)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดทีเคเอ็นที่พีเอชต่ำ

1.4.2 สามารถนำผลการทดลองไปใช้ออกแบบระบบโปรยกรองเพื่อบำบัดทีเคเอ็นได้ที่สภาวะพีเอชต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสียแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน กรดอะมิโน ยูเรีย กรดยูริก และสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สารประกอบไนโตรเจนสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดของแหล่งน้ำได้ โดยในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ ถ้าพบสารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน (NH_3-N) หรือเรียกรวมกันว่า ทีเคเอ็น (TKN, total kjeldahl nitrogen) ในปริมาณมาก อาจแสดงว่าแหล่งน้ำนั้นมีความสกปรกและมีการปนเปื้อน เนื่องจากทีเคเอ็นมีความต้องการออกซิเจนเพื่อมาออกซิไดซ์สารประกอบไนโตรเจนให้เป็นไนเตรท หรือเรียกว่าเอ็นโอดี (NOD, nitrogenous oxygen demand) ซึ่งในน้ำเสียชุมชนความต้องการออกซิเจนโดยทีเคเอ็นนี้มากพอๆ กับความต้องการออกซิเจนจากสารอินทรีย์คาร์บอนหรือบีโอดี หรืออาจจะมากกว่าถ้าความเข้มข้นของทีเคเอ็นในน้ำเสียมีค่าสูงมากๆ เมื่อเทียบกับค่าซีโอดี รวมถึงแอมโมเนียที่อยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระก็มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำด้วย ดังนั้นสารประกอบไนโตรเจนจึงมีบทบาทสำคัญและต้องถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544 และ กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียประกอบด้วย 3 วิธี คือ

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical processes) เช่น กระบวนการไล่ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia stripping) จะกำจัดสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียเท่านั้น โดยการปรับพีเอชและอุณหภูมิของน้ำเสียให้สูงขึ้น เพื่อให้แอมโมเนียมอิออนในน้ำเสียเปลี่ยนรูปมาเป็นแอมโมเนีย แล้วจึงเติมอากาศเพื่อไล่ก๊าซแอมโมเนียออกไป ซึ่งก๊าซแอมโมเนียนี้ควรนำไปบำบัดก่อนปล่อยออกสู่อากาศ (O'Farrell และคณะ, 1972)

ตารางที่ 2.1 สถานะภาพทางออกซิเดชัน (Oxidation state) ของสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

ชนิดของไนโตรเจน	สถานะภาพทาง ออกซิเดชัน (Oxidation state)	สมบัติ
สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen) ได้แก่ ยูเรีย กรดยูริก และกรดอะมิโน	-3	- เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์สิ่งมีชีวิต - เป็นของเสียที่เกิดจากสัตว์น้ำ
ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3 gas)	-3	- เป็นของเสียที่เกิดจากสัตว์น้ำ - เป็นพิษอย่างมากต่อปลา คือทำให้ปลาไม่สามารถขับถ่ายก๊าซแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดส่งผลให้ปลามักจะอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย
แอมโมเนียมอิออน (NH_4^+)	-3	- ไม่มีพิษต่อสัตว์น้ำ - ใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ
ก๊าซไนโตรเจน (N_2 gas)	0	- เป็นก๊าซที่ไม่ละลายน้ำที่แรงดันปกติ - เป็นไนโตรเจนรูปแบบที่เสถียรที่สุด - แบคทีเรียบางกลุ่มเท่านั้นที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง
ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO gas)	+2	- ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ เมื่อร่างกาย ได้รับในปริมาณที่มากเกินไปหรือเป็นระยะเวลานานจะไปทำลายเซลล์ประสาทและทำให้หมดสติได้
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2 gas)	+4	- ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศและทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก
ไนไตรท์ (NO_2^-)	+3	- มีพิษต่อสัตว์น้ำและมนุษย์
ไนเตรท (NO_3^-)	+5	- พืชและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

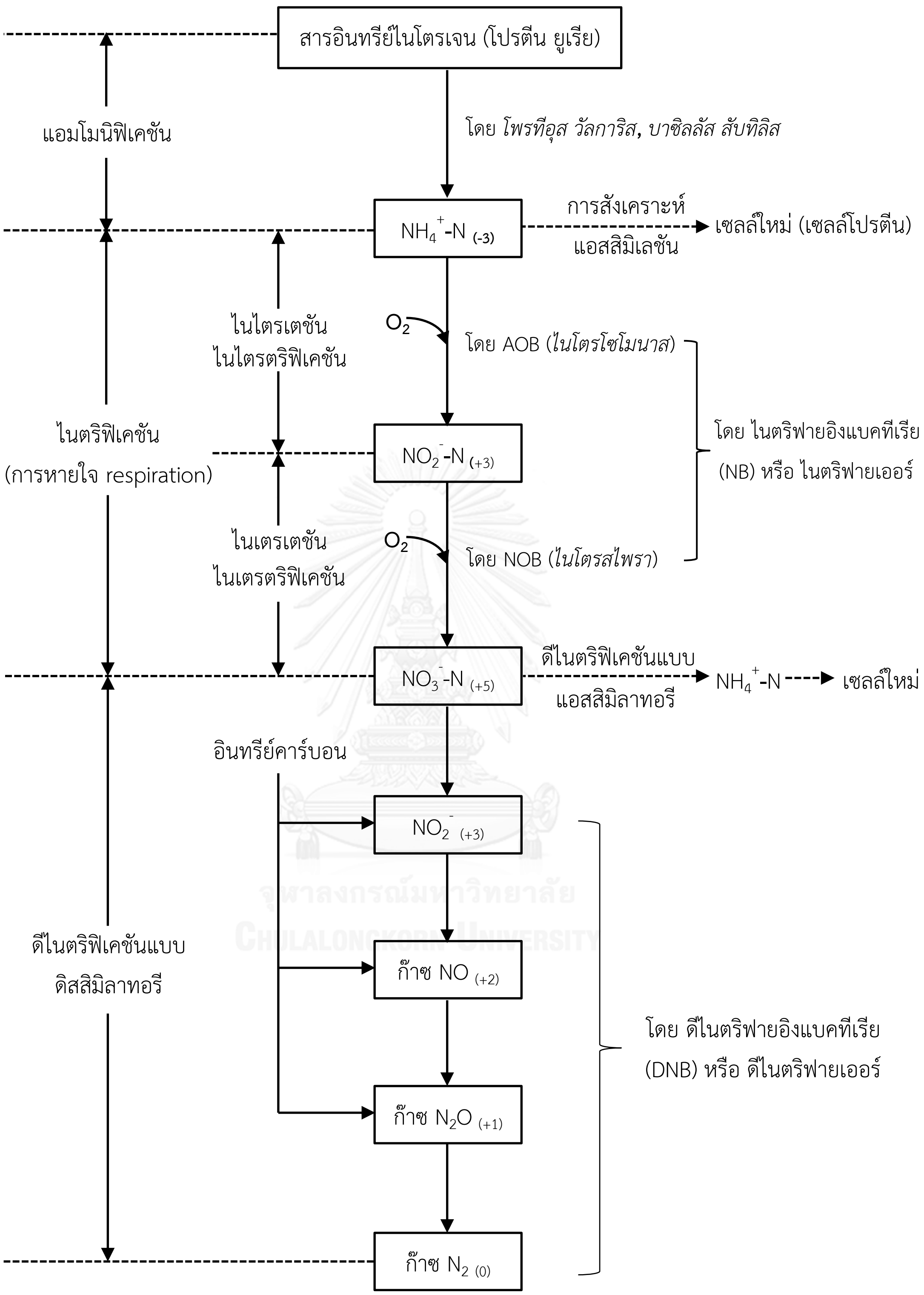
2.2.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical processes) เช่น การเติมคลอรีนในน้ำเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียและสารอินทรีย์ไนโตรเจนเพื่อไปทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นสารคลอรามีนซึ่งเป็นสารฆ่าเชื้อชนิดหนึ่ง และการแลกเปลี่ยนอิออนโดยปรับพีเอชในน้ำเสียให้ลดลง แล้วใช้ซีโอไลท์ซึ่งเป็นแร่ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง นำมากำจัดแอมโมเนียโดยแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแอมโมเนียมอิออนในน้ำเสีย (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548 และ มณีวรรณ เกตะวันดี และ สุขุม เร้าใจ, 2550)

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processes) โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน เพื่อย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจน ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนแยกตัวออกจากน้ำเสียและลอยขึ้นสู่อากาศ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

2.3 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ

ทีเคเอ็นเป็นของเสียจากเมตาบอลิซึมของโปรตีนในร่างกายมนุษย์ เมื่อปล่อยออกมากับน้ำเสียจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ ส่วนไนโตรเจนในรูปออกซิไดซ์ เช่น ไนไตร์ท และไนเตรทมีอยู่น้อยมาก ไม่ถึงร้อยละ 1

การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพอาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ทีเคเอ็นให้เป็นไนเตรทในสภาวะแอโรบิก (Aerobic) โดยสารอินทรีย์ไนโตรเจนนั้นจะต้องผ่านปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (Free ammonia, NH_3) เสียก่อน จึงจะถูกออกซิไดซ์โดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียมอิออนให้เป็นไนไตรท์ และต่อไปเป็นไนเตรท ด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยที่แอมโมเนียมเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แต่การกำจัดหรือการลดไนโตรเจนยังไม่เกิดขึ้น ยกเว้นเฉพาะไนโตรเจนส่วนที่นำไปสร้างเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งเป็นปริมาณน้อยมาก จากนั้นในสภาวะแอนอกซิก (Anoxic) แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเป็นเฮเทอโรโทรฟจะรีดิวซ์สารประกอบไนโตรเจนในรูปออกซิไดซ์นี้ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนและถูกปล่อยระบายออกสู่อากาศ โดยมีคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.3.1 ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) หรือไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen mineralization)

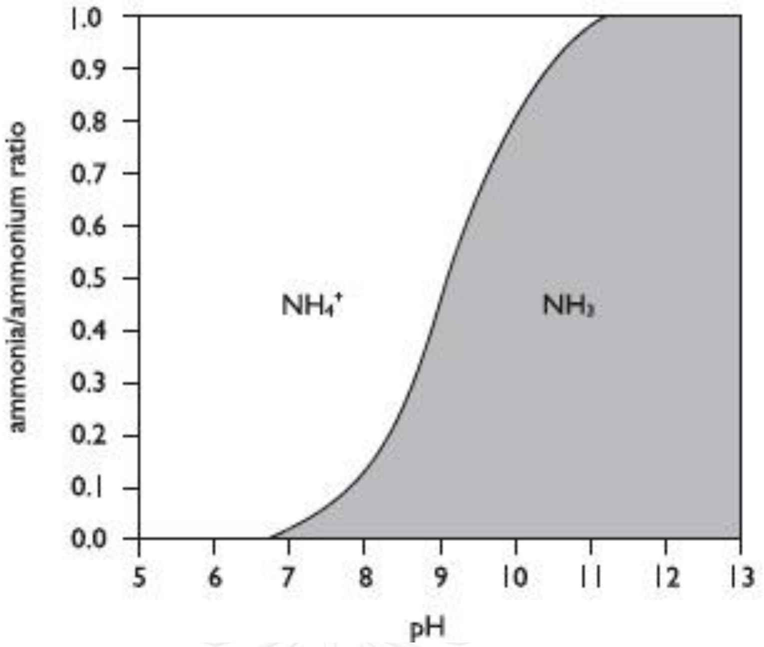
เป็นปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยานี้ เช่น แบคทีเรีย แอคทิโนมัยซีทิส ฟังไจ โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในรูปโปรตีนจากเซลล์ที่ตายแล้วและจากของเสียไปเป็นกรดอะมิโน แล้วกรดอะมิโนจึงถูกลดอะมีน (Deamination) ไปเป็นแอมโมเนียมต่อไป การไฮโดรไลซ์ของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอสก็ปล่อยแอมโมเนียออกมาได้ดังสมการ (2.1)

การเปลี่ยนรูปของยูเรียเป็นแอมโมเนีย

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow[\text{ยูรีเอส}]{\text{เอนไซม์}} 2NH_3 + CO_2 \quad (2.1)$$

นอกจากนี้แอมโมเนียสามารถผลิตขึ้นได้โดย 1) ปฏิกิริยาภายนอกเซลล์ที่มีต่อซากพืช ซากสัตว์ และอุจจาระ 2) การหายใจแบบเอนโดจีนัสของเซลล์มีชีวิตและจากซากสัตว์รวมทั้งเซลล์ที่แตก (Lysed) แล้ว แต่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักไม่อยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ เพราะที่ภาวะพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรด ซึ่งมักเป็นสภาวะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน ดังสมการ (2.2) และรูปที่ 2.2 เมื่อพีเอชถูกปรับขึ้นสูงแอมโมเนียจึงเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียอิสระ ซึ่งถูกขับออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่า “การเปลื้องแอมโมเนีย” หรือ Ammonia stripping

$$\begin{array}{ccc} NH_4^+ + OH^- & \rightleftharpoons & NH_3\,(aq) + H_2O \\ & & \uparrow\downarrow \\ & & NH_3\,(g) \end{array} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับแอมโมเนียและแอมโมเนียม
(Gay และ Knowlton, 2005)

2.3.2 ปฏิกิริยาแอมโมเนียมแอสซิมิเลชัน (Ammonium assimilation)

เป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์เซลล์ โดยจะเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียมอิออน หรือแอมโมเนียอิสระให้กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ดังสมการ (2.3)

$$NH_4^+ \longrightarrow R\text{-}NH_2 \qquad (2.3)$$

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟที่สามารถเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียม หรือไนเตรทไปเป็นโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโตหรือสร้างเซลล์ของแบคทีเรียดังกล่าว เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักอย่างหนึ่งของเซลล์แบคทีเรีย และปฏิกิริยาการใช้คาร์บอนในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตทั่วๆ ไปต้องใช้ไนโตรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ C:N ประมาณ 10:1 ปฏิกิริยานี้ทำให้ลดปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินซึ่งพืชชั้นสูงและสาหร่ายชอบใช้เป็นสารอาหารมากกว่าไนเตรทไนโตรเจน และถ้าต้องการกำจัดไนโตรเจนด้วยวิธีนี้ให้ได้ผลดีที่สุด จะต้องเดินระบบที่ภาระสูงๆ หรือมีอายุสลัดจ์ต่ำ เพื่อจะได้ผลิตเซลล์ออกมามากๆ ทำให้จุลินทรีย์ต้องดึงเอาไนโตรเจนจากน้ำเสียมาสร้างเซลล์มากขึ้น ซึ่งการที่มีปริมาณเซลล์มากนั้นก็

หมายถึงสลัดจ์ที่ต้องระบายทิ้งออกจากระบบมากด้วย แต่ถ้าหากเดินระบบที่ภาระต่ำๆ เซลล์มีอาหารไม่เพียงพอ ก็จะเกิดการออกซิไดซ์ตัวเอง (auto-oxidation) และการแตกตัว (lysis) ของเซลล์ ทำให้บางส่วนของแอมโมเนียที่ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์เซลล์กลับมาสู่ในสภาวะของเหลว และถูกถ่ายทิ้งออกไปกับน้ำทิ้งได้อีกด้วย จึงทำให้ปฏิกิริยานี้ไม่ได้รับความสนใจในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งต้องการกำจัดไนโตรเจน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544 และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

2.3.3 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เมื่อน้ำเสียผ่านปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันจนสารอินทรีย์ไนโตรเจนเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาแอสสิมิเลชันของไนโตรเจนเอาไปสร้างเซลล์ใหม่ของแบคทีเรีย ในขณะเดียวกันถ้าสารอาหารชนิดคาร์บอนลดลงจนเหลือน้อยและระบบยังอยู่ในภาวะแอโรบิก จะเกิดการหายใจ (respiration) โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้น โดยกระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ

ขั้นตอนย่อยที่หนึ่ง ไนไตรเตชัน (Nitritation) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนไตรติฟิเคชัน (Nitritification) แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนไตรท์ เรียกรวมๆ ว่า เอโอบี หรือ AOB (Ammonium oxidizing bacteria) โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่ได้แก่กลุ่ม *ไนโตรโซโมนาส* เช่น *N. europaea* และ *N. oligocarbogenes* *ไนโตรสไพรา* *ไนโตรโสคอคคัส* *ไนโตรโสโลบัส* เป็นต้น โดยมีสมการการหายใจและสมการการสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนไตรติฟิเคชัน ดังสมการ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

$$2NH_4^+ + 3O_2 \xrightarrow{\text{ไนโตรโซโมนาส}} 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ + \text{พลังงาน} \qquad (2.4)$$

$$15CO_2 + 13NH_4^+ \longrightarrow 10NO_2^- + 3C_5H_7O_2N + 4H_2O + 23H^+ \qquad (2.5)$$

สมการรวมของขั้นตอนนี้คือสมการ (2.4) รวมกับสมการ (2.5) ซึ่งได้มีการทดลองพบว่า เมื่อมียีลด์ (Yield, Y_{OBS,NH_4^+}) เท่ากับ 0.1 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจน หรือ 0.14 กรัมซีโอดีต่อกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจน จะได้เป็นสมการ (2.6)

$$80.7NH_4^+ + 114.55O_2 + 160.4HCO_3^- \longrightarrow C_5H_7O_2N + 79.7NO_2^- + 82.7H_2O + 155.4H_2CO_3 \qquad (2.6)$$

ขั้นตอนย่อยที่สอง ไนเตรเตชัน (Nitratation) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนเตรติฟิเคชัน (Nitratification) แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท เรียกรวมว่า เอ็นโอบี หรือ NOB (Nitrite oxidizing bacteria) ได้แก่กลุ่ม *ไนโตรแบคเตอร์* เช่น *N. agilis* และ *N. winogradskyi* *ไนโตรสไพรา* *ไนโตรโสคอคคัส* เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า *ไนโตรสไพรา* ปรากฏอยู่ในทั้งสองขั้นตอนย่อย และปกติมักเชื่อกันว่า *ไนโตรแบคเตอร์* เป็นแบคทีเรียหลักของขั้นตอนย่อยที่สอง แต่ได้มีการทดลองพิสูจน์ว่า *ไนโตรสไพรา* ต่างหากที่เป็นจุลินทรีย์หลักของการออกซิไดซ์ไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท โดยมีสมการการหายใจและสมการการสังเคราะห์เซลล์ในขั้นตอนไนเตรติฟิเคชัน ดังสมการ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

$$2NO_2^- + O_2 \xrightarrow{\text{ไนโตรสไพรา}} 2NO_3^- + \text{พลังงาน} \quad (2.7)$$

$$5CO_2 + NH_4^+ + 10NO_2^- + 2H_2O \longrightarrow 10NO_3^- + C_5H_7O_2N + H^+ \quad (2.8)$$

สมการรวมของขั้นตอนนี้คือสมการ (2.7) รวมกับสมการ (2.8) เมื่อยีลด์ (Y_{OBS,NO_3^-}) เท่ากับ 0.06 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนไตร์ท-ไนโตรเจน จะได้เป็นสมการ (2.9)

$$134.5NO_3^- + NH_4^+ + 62.25O_2 + HCO_3^- + 4H_2CO_3 \longrightarrow C_5H_7O_2N + 134.5NO_3^- + 3H_2O \quad (2.9)$$

เมื่อรวมสมการของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันทั้ง 2 ขั้นตอนเข้าด้วยกันจะได้ดังสมการ (2.10)

$$NH_4^+ + 1.86O_2 + 1.98HCO_3^- \longrightarrow 0.02C_5H_7O_2N + 0.98NO_3^- + 1.88H_2CO_3 + 1.04H_2O \quad (2.10)$$

จากสมการรวมของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะสรุปได้ว่า

- ได้ยีลด์รวม ($Y_{\text{รวม}}$) เท่ากับ 0.16 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจน

- ความต้องการออกซิเจนเพื่อออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนเตรทคือ 4.25 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อมิลลิกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์

- สภาพความเป็นด่าง (HCO_3^-) ที่ถูกใช้ไประหว่างออกซิไดซ์แอมโมเนียม คือ 7.07 มิลลิกรัมไบคาร์บอเนตต่อมิลลิกรัมแอมโมเนียม-ไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งถ้าน้ำมีสภาพความเป็นด่างไม่พอ ค่าพีเอชจะลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะลดลง

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนี้จุลินทรีย์ทั้งสองชนิดทั้งเฮเทอโรโทรฟ เช่น *Arthrobacter* และ *Aspergillus* และออโตโทรฟจะมีบทบาททั้งคู่ แต่เมื่อเทียบกันแล้วจุลินทรีย์ชนิดออโตโทรฟจะมีบทบาทมากกว่ามาก ในบางกรณีจึงตั้งสมมุติฐานว่าบทบาทของจุลินทรีย์เฮเทอโรโทรฟ (ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนและออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนเตรท) ไม่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ของปฏิกิริยา และการที่ออโตโทรฟออกซิไดซ์ NH_4^+ ไปเป็น NO_2^- และ NO_3^- ภายใต้สภาวะแอโรบิกนั้นจะได้พลังงานออกมาด้วย ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่ได้นี้ไปดึงเอา CO_2 หรือ HCO_3^- หรือ $CO_3^=$ มาเป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป ทั้งนี้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีการปล่อย H^+ ออกมาซึ่งทำให้ระบบต้องมีสภาพด่างพอ ไม่เช่นนั้นบัฟเฟอร์จะมีไม่พอ ซึ่งทำให้พีเอชในถังปฏิกิริยาลดลง และทำให้ระบบล้มเหลวได้ อย่างไรก็ตามในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป จะไม่เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ เพราะมีบางส่วนของอินทรีย์ไนโตรเจนที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ หรือได้ไม่ง่าย ทำให้น้ำทิ้งมีอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ประมาณไม่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.3.4 ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification, DN)

เมื่อไนโตรเจนถูกเปลี่ยนรูปมาอยู่ในรูปของไนเตรทแล้ว จะสามารถถูกลดรูปหรือถูกกำจัดออกจากระบบได้ 2 ทาง คือ

วิธีที่ 1 แอสสิมิเลชัน (Assimilatory denitrification)

จุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ไนโตรเจนที่ดีที่สุดสำหรับการนี้คือไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม แต่ถ้าไม่มีแอมโมเนียมในระบบหรือมีไม่เพียงพอ จุลินทรีย์บางชนิดจะสามารถลดรูปไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียม และเอามาใช้สังเคราะห์โปรตีนได้ ในวิธีนี้ไนเตรทจะถูกดีไนตริฟายด์และลดรูปไปเป็นแอมโมเนียมด้วยเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทสหลายชนิด ก่อนจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีน หรือกรดนิวคลีอิก) ผ่านปฏิกิริยาที่เรียกว่าแอสสิมิเลชัน ขั้นตอนนี้จึงเรียกว่า ดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สองหรือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

วิธีที่ 2 ดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory denitrification)

ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ จุลินทรีย์ดีไนตริฟายเออร์เป็นได้ทั้งแบบเฮเทอโรโทรฟ และออโตโทรฟเหมือนกับในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แต่ไม่เหมือนกันที่ภาวะนี้ต้องเป็นแบบแอนอกซิก (Anoxic) คือมีไนเตรทแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ และกลับกันตรงที่ในขั้นตอนนี้เฮเทอโรโทรฟมีบทบาทมากกว่าออโตโทรฟอย่างมาก จุลินทรีย์แบบเฮเทอโรโทรฟนี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ต้องมีการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในการลดรูปของไนโตรเจนทุกขั้นตอน ตั้งแต่ไนเตรท (+5) ไปเป็นไนไตรท์ (+3) ก๊าซไนตริกออกไซด์, NO (+2) ก๊าซไนตรัสออกไซด์, NO_2 (+1) ไปจนถึงก๊าซไนโตรเจน, N_2 (0) ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกขับหรือไล่ออกจากน้ำได้ง่าย และมีรายงานว่า วิธีนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้สูงถึงร้อยละ 95 อย่างไรก็ตาม ก๊าซไนโตรเจนนี้ถ้าไปเกิดและสะสมในถังใส (Clarifier) ขั้นที่สอง ก็อาจมีผลต่อการจมของสลัดจ์ จะเกิดฟองก๊าซเกาะอยู่กับสลัดจ์ทำให้สลัดจ์ลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของถังตกตะกอนทำให้น้ำทิ้งออกไปไม่ใสได้

ดีไนตริฟายเออร์นี้เป็นได้ทั้งออร์กาโนโทรฟ (Organotroph) ได้พลังงานจากสารอินทรีย์, ลิโธโทรฟ (Lithotroph) ได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี และโฟโตโทรฟ (Phototroph) ได้พลังงานจากแสง รวมทั้งเป็นแบคทีเรียกลุ่มฟาคัลเททีฟแอนแอโรบ (Facultative anaerobic bacteria) ด้วย ซึ่งในสภาวะที่มีออกซิเจนแบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนแต่มีไนเตรท แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ หรือแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเลือกใช้ออกซิเจนถ้าในสภาวะนั้นๆ มีทั้งไนเตรทและออกซิเจน แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ออกซิเจนหรือไนเตรทจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้มีหลายกลุ่มที่ปรากฏอยู่ในรายงาน ได้แก่ *ซูโดโมนาส* (*Pseudomonas*), *บาซิลลัส* (*Bacillus*), *สปิริลัม* (*Spirillum*), *ไฮโฟไมโครเบียม* (*Hyphomicrobium*), *อะโกรแบคทีเรีย* (*Agrobacterium*), *อะซิโนแบคเตอร์* (*Acinetobacter*), *โพรไพโอโนแบคทีเรีย* (*Propionobacterium*), *ไรโซเบียม* (*Rhizobium*), *คอรีเนแบคทีเรียม* (*Corynebacterium*), *ไซโทฟาจ* (*Cytophaga*), *ไธโอบาซิลลัส* (*Thiobacillus*) และ *อัลคานิจีนส์* (*Alcaligenes*) ซึ่งพบได้มาก อยู่แล้วทั้งในดิน น้ำธรรมชาติ และน้ำเสีย

อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้ว จะไม่เกิดดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในทุกสถานการณ์ของการบำบัดน้ำเสีย ในบางกรณีจะเกิดเป็นก๊าซระดับกลางคือก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์นี้ถือว่าเป็นก๊าซมลพิษที่สำคัญในส่วนของก๊าซเรือนกระจก และควรหลีกเลี่ยงการเกิดก๊าซนี้ไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรือไม่ก็ตาม ในระบบบำบัดน้ำเสียภาวะที่จะทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ได้มากคือ การที่มีอัตราซีโอดีต่อไนเตรทไนโตรเจน (COD/NO_3^--N) ต่ำ เวลากักสลัดจ์หรืออายุสลัดจ์สั้น และพีเอชต่ำ จึงควรหลีกเลี่ยงภาวะการณ์เช่นนี้ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544 และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นผลจากการทำงานของจุลินทรีย์สองชนิด ดังนั้นต้องขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยรอบด้วย จึงต้องให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมทั้งหมดนี้เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้คงที่ตามที่ต้องการอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่สามารถมีผลต่อปฏิกิริยามีอยู่หลายอย่างดังนี้

2.4.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO)

แบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์มีความไวต่อปริมาณออกซิความเข้มข้นต่ำ จึงควรให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่ควรเติมอากาศจนมีค่ามากเกินไปเพราะจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและมีค่าดำเนินการของระบบบำบัดตามมา ดังนั้นการใช้ระบบบำบัดแบบโปรยกรองจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ เนื่องจากระบบโปรยกรองจะมีออกซิเจนในอากาศประมาณ 6-8 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายในน้ำอยู่แล้ว

2.4.2 อุณหภูมิ (Temperture)

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือช่วง 30-36 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อไนโตรแบคเตอร์มากกว่าไนโตรโซโมนาส และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันจะทำให้จุลินทรีย์ช็อกและหยุดทำงานส่งผลให้ระบบวิบัติได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.3 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)

เนื่องจากไนตริฟายอิงแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มไวต่อพีเอชมาก ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมนาส และไนโตรแบคเตอร์ คือ 5.8-8.5 และ 6.5-8.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อสภาพความเป็นด่าง ปริมาณแอมโมเนีย และปริมาณไนไตร์ทซึ่งมีความเป็นพิษต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมค่าพีเอชให้มีความเหมาะสม โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อระบบคือสภาพค่าพีเอชที่เป็นกลาง (Buchanan และคณะ, 1974 และ กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.4.4 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีการใช้สภาพด่าง ซึ่งทำให้พีเอชภายในถังปฏิกิริยาอาจจะลดลง โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีสภาพความเป็นด่างต่ำ ดังนั้นควรควบคุมให้มีสภาพความเป็นด่างคงเหลือในระบบหลังจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแล้วประมาณ 50-100 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เพื่อให้ระบบทำงานได้เป็นปกติ

2.4.5 ความเค็ม (Saltiness)

ความเค็มมีผลทางลบต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย แต่แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถที่จะปรับตัวให้เข้ากับกับความเค็มได้ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.6 สารพิษ (Toxin)

มีสารหลายชนิดที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ ไม่ว่าจะเป็นโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ จะมีผลยับยั้งที่ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างสารพิษดังแสดงในตารางที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความเข้มข้นของโลหะที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

โลหะ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ผลกระทบ
โคบอลต์	0.08-0.5	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบริสุทธิ์)
โครเมียมไตรวาเลนท์ (Cr^{+3})	>0.25 118	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบริสุทธิ์) ยับยั้งสลัดจ์ไวงานร้อยละ 75
ทองแดง	0.05-0.56 4	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบริสุทธิ์) ไม่มีผลยับยั้งสลัดจ์ไวงาน
นิกเกิล	>0.25	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบริสุทธิ์)
สังกะสี	0.08-0.5	ยับยั้งไนโตรโซโมนาส (เชื้อบริสุทธิ์)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

สารอินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)	สารอินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)
กรดฟีนอลิก	0.01	เบนซีน	13
ไทอะมีน	0.530	คลอโรฟอร์ม	18
คลอรีน	1	เอธิล อะซีเตท	18
ไนโตรยูเรีย	1	เมทานอล	160
ไธโอยูเรีย	1	ไพรูเวท	400
คาร์บาเมต	2	เอทานอล	2,400

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างความเข้มข้นของสารอนินทรีย์บางชนิดที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

สารอนินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)	สารอนินทรีย์	ความเข้มข้น (มก./ล.)
ตะกั่ว	0.5	ไซยาไนด์	16.5
ซัลไฟด์	5.0	ไฮโดรเจนซัลไฟด์	50.0
โพแทสเซียมไดโครเมต	6.0	แอมโมเนียม	1,000
แคดเมียม	14.3	โซเดียมคลอไรด์	35,000

2.5 ระบบบำบัดทีเคเอ็น (TKN) ในน้ำเสีย

ระบบที่สามารถบำบัดทีเคเอ็นในน้ำเสียได้ จะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งประกอบด้วย 2 ระบบใหญ่ๆ คือ

2.5.1. ระบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended system)

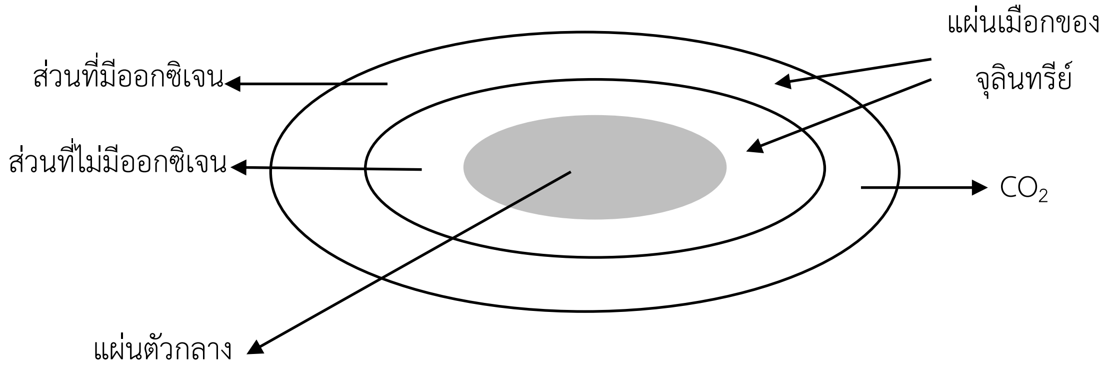
ระบบแขวนลอย คือระบบที่มีจุลินทรีย์ลอยผสมกับน้ำเสีย เช่น ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)

2.5.1.1 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)

ระบบตะกอนเร่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ใช้แบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จากนั้นจึงทำการแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีสามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ระบบตะกอนเร่งนี้ที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพราะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพที่ได้มีการศึกษามานานและทราบถึงกลไกและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังเป็นระบบบำบัดที่เหมาะสมกับพื้นที่จำกัดและมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูง แต่มีข้อเสียคือค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรหลายชนิดและมีการเติมอากาศ

2.5.2. ระบบการเจริญแบบเกาะติด (Attached growth system)

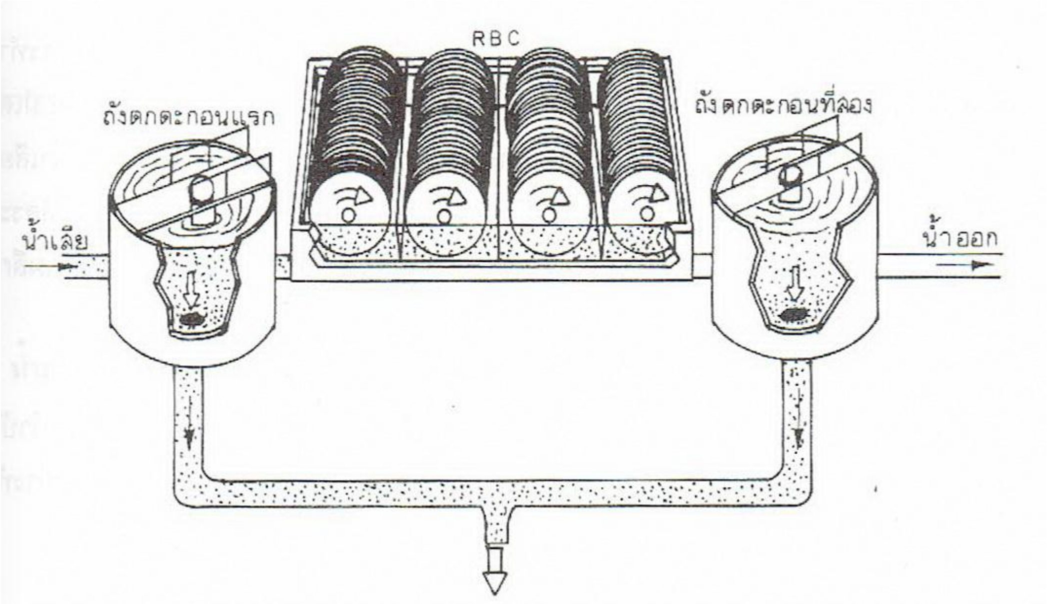
จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบนี้ส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับตัวกลางที่เหมาะสมโดยเจริญเป็นเมือกบางๆ เรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) โดยการเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์บนตัวกลางคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย ขนาด และรูปร่างของตัวกลาง ระบบการเจริญแบบเกาะติดเป็นระบบที่มีการควบคุมการทำงานได้ง่ายและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการนำเอาระบบนี้มาใช้ในโรงงานบำบัดน้ำเสียทดแทนระบบตะกอนเร่ง เช่น ระบบแผ่นชีวภาพ (Rotating Biological Contactor หรือ RBC) และระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)



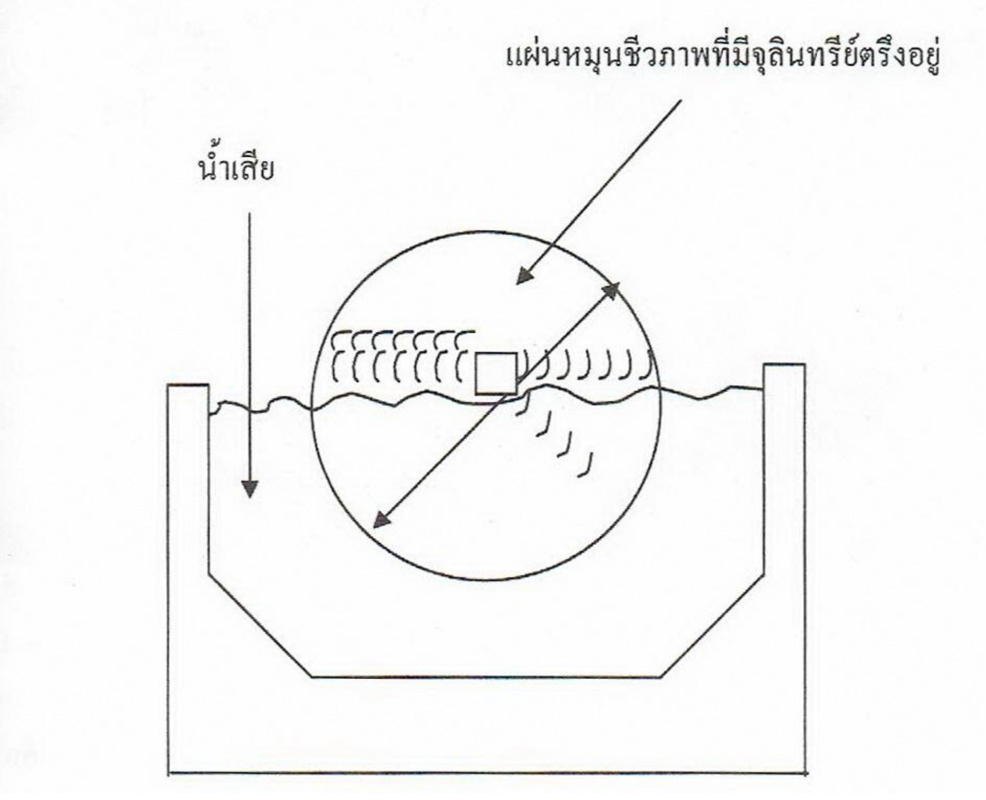
รูปที่ 2.3 การเกิดฟิล์มชีวภาพของแบคทีเรียบนผิวตัวกลางในระบบโปรยกรอง
(สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

2.5.2.1 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor หรือ RBC)

ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ มีหลักการในการบำบัดน้ำเสียและมีส่วนประกอบเหมือนกับระบบโปรยกรอง โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ตัวกลางที่ใช้เป็นที่พักอาศัยของจุลินทรีย์ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพจะประกอบด้วยแผ่นรูปทรงกลมที่ขนานกันหลายๆ อัน ยึดติดตั้งฉากอยู่ด้วยแกนหมุน ณ จุดกึ่งกลางของแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนประกอบทั้งหมดวางอยู่ในถังที่มีแกนหมุน ซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำในถังเล็กน้อย โดยมีส่วนของแผ่นจมน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 40 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จุลินทรีย์จะเจริญและเกาะอยู่บนผิวของแผ่นที่หมุนเป็นเมือกบางๆ ซึ่งแผ่นเหล่านี้จะมีผิวขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการเกาะของจุลินทรีย์ การหมุนของแกนหมุนทำให้จุลินทรีย์สัมผัสน้ำเสียและเกิดการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย การกำจัดสารอินทรีย์ส่งผลให้ฟิล์มชีวภาพบนแผ่นหมุนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันการหมุนของแผ่นจะทำให้เกิดแรงเฉือนและทำให้ฟิล์มชีวภาพหลุดออกจากแผ่น ดังนั้นการหมุนของแผ่นจึงเป็นทั้งการสร้างฟิล์มชีวภาพและการลดความหนาของฟิล์มไปด้วยกัน นอกจากนี้การหมุนของแผ่นขึ้นมาเหนือผิวน้ำยังเป็นการถ่ายเทออกซิเจนในอากาศจากภายนอกถังเข้าไปสู่ระบบอีกด้วย ถึงแม้ว่าระบบแผ่นหมุนชีวภาพนี้จะมีค่าการบำรุงรักษาและการดำเนินการที่มีราคาค่อนข้างถูกรวมทั้งดำเนินการไม่ยุ่งยาก แต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงในขั้นตอนการเริ่มสร้างระบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545 และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)



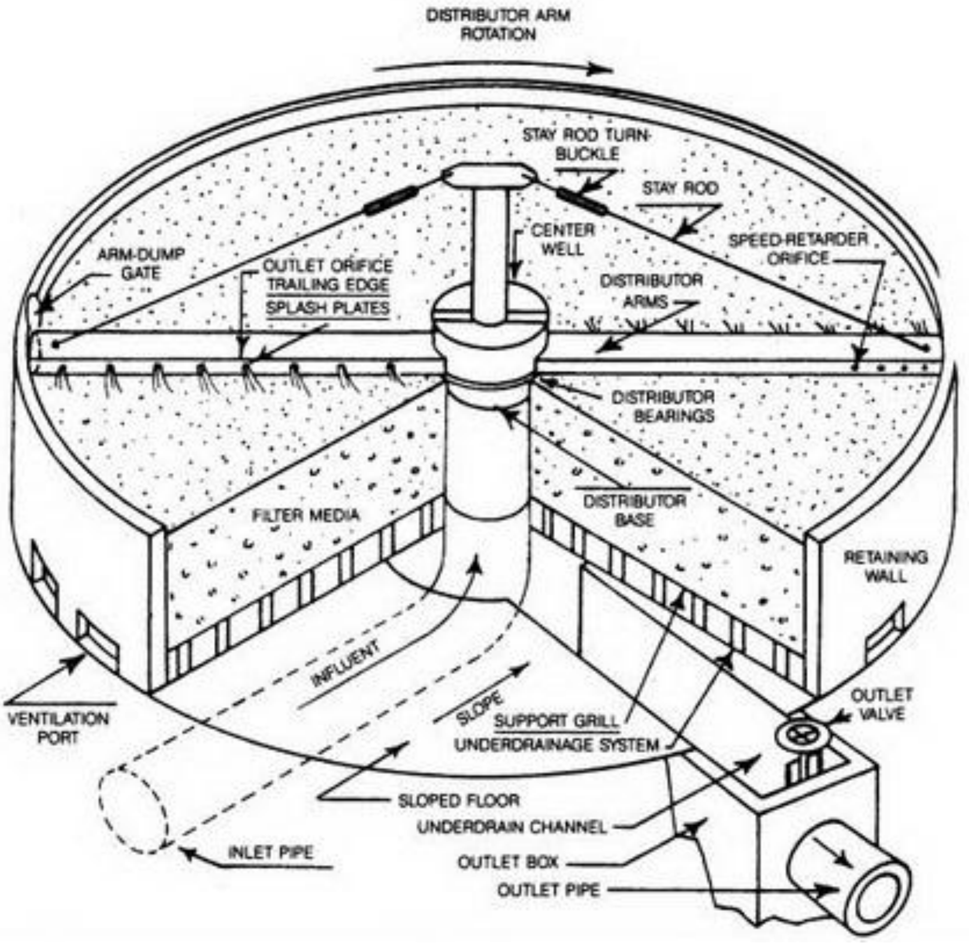
รูปที่ 2.4 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ
(สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)



รูปที่ 2.5 แผ่นหมุนที่มีส่วนจมอยู่ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 40
(สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)

2.5.2.2 ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter)

ระบบโปรยกรอง ประกอบด้วยถังที่บรรจุตัวกลางที่มีฟิล์มชีวภาพเคลือบอยู่ พร้อมที่จะย่อยสลายสารที่อินทรีย์ที่ปนเปื้อนน้ำเสีย น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วจะถูกปล่อยจากด้านบนของถังให้ไหลผ่านชั้นของตัวกลางลงสู่ด้านล่าง ในขณะที่จุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางจะใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะแพร่เข้าไปในชั้นน้ำและไปยังชั้นฟิล์มชีวภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน และที่ก้นถังจะมีน้ำเสียที่บำบัดแล้วรวมทั้งฟิล์มชีวภาพที่หลุดออกมาบางส่วน ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนสุดท้ายเพื่อแยกสลัดจ์ออกให้ได้น้ำทิ้งที่สามารถระบายทิ้งได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545 และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548)



รูปที่ 2.6 การทำงานของระบบโปรยกรอง
(Water Environment Federation, 2008)

<u>ลักษณะทางกายภาพ</u>

ระบบโปรยกรองมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ตัวกลาง ผนังล้อมรอบ ระบบจ่ายน้ำเสีย และระบบระบายน้ำใต้เครื่อง

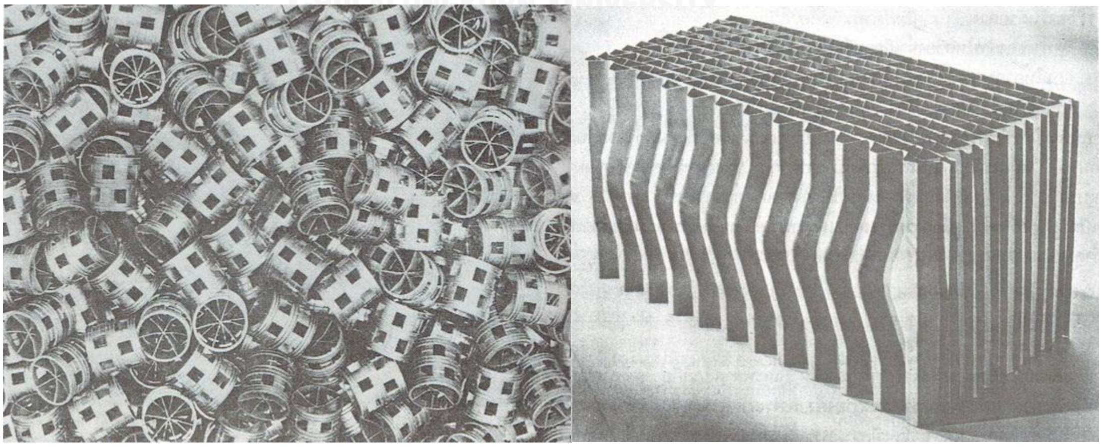
<u>ส่วนประกอบที่สำคัญ</u>

1. ตัวกลาง (Filter media)

ผิวของตัวกลางเป็นที่ที่จุลินทรีย์เจริญเติบโต มีคุณสมบัติดังนี้

- มีผิวหน้ามากสำหรับการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพ
- ยอมให้ของเหลวไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอ เป็นแผ่นบางๆ บนฟิล์มชีวภาพ
- มีช่องว่างเพียงพอสำหรับการไหลอย่างอิสระของอากาศ
- มีช่องว่างเพียงพอเพื่อนำจุลินทรีย์ที่ลอกตัวจากฟิล์มออกไปได้สะดวก
- ต้องเป็นสารเฉื่อย และไม่มีการย่อยสลายทางชีววิทยา หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- มีความเสถียรทางเคมี และทางกล

มีการทดสอบวัสดุต่างๆ จำนวนมาก แต่ที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดได้แก่ พลาสติก หินแกรนิต หรือไลม์สโตนที่บดเป็นก้อนๆ แต่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือตัวกลางพลาสติก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวหน้าจำเพาะและปริมาตรช่องว่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวกลางพลาสติก

(ธีระ เกรอต, 2539)

2. ผนัง (Wall)

ถ้าใช้ตัวกลางหินผนังจะต้องเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือวัสดุอื่นที่สามารถกักตัวกลางไว้ในที่ได้ ผนังจะต้องแข็งแรงพอเผื่อมีน้ำเต็มถัง เนื่องจากบางทีจำเป็นต้องกักน้ำไว้ให้ท่วมเครื่องกรองหิน สำหรับเครื่องกรองที่มีตัวกลางพลาสติก ต้องการการรองรับทางโครงสร้างน้อยกว่าตัวกลางหิน เพราะว่ามีความหนาแน่นต่ำ ผนังทำหน้าที่เพียงแต่กั้นน้ำกระเด็น ลดการสูญเสียความร้อนและทำให้ถังปฏิกรณ์ดูสวยงามขึ้น ดังนั้น จึงใช้วัสดุเบาๆ ได้

3. ระบบกระจายน้ำเข้า (Distribution system)

มีหน้าที่ทำให้ตัวกลางได้รับน้ำหรืออัตราไหลต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดให้สม่ำเสมอทั่วถังปฏิกรณ์ เครื่องกรองตัวกลางพลาสติกใช้ระบบจ่ายน้ำทิ้งแบบหมุนที่มีสี่แขน ที่เนื่องจากในตัวกลางพลาสติกมีช่องว่างมาก น้ำและอากาศสามารถไหลพร้อมกันได้ จึงจ่ายน้ำเสียอย่างต่อเนื่องได้ ระบบจ่ายน้ำเสียมีมากแบบให้เลือก และต้องแน่ใจว่าตัวจ่ายน้ำเสียและตัวกลางทำงานไปด้วยกันได้

4. ระบบระบายน้ำทิ้ง (Underdrain system)

ระบบระบายน้ำทิ้งทำหน้าที่ 3 อย่างคือ

- รองรับตัวกลาง
- จัดทางของการไหลของน้ำเสียจนถึงจุดระบายน้ำไม่ให้ติดขัด
- ให้อากาศผ่านเข้าทางก้นถังโปรยกรองในปริมาณเพียงพอสำหรับจ่ายออกซิเจนอย่างต่อเนื่องให้จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถัง (ธีระ เกรอต, 2539)

<u>ประเภทของระบบโปรยกรอง</u>

ระบบโปรยกรองสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามภาระปริมาณน้ำ และอัตราภาระอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

1. ระบบโปรยกรองแบบอัตราต่ำ (Low Rate)

ระบบนี้มักเป็นระบบที่มีขนาดเล็ก ความสูงของถังกรองอยู่ในช่วง 1.5-3 เมตร และมีวัสดุตัวกลางเป็นหิน ระบบนี้จะไม่มีการหมุนเวียนน้ำ ดังนั้นภาระปริมาณน้ำ และภาระอินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กันโดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนระบบนี้มักมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 ปัญหาที่สำคัญของระบบนี้คือ เรื่องกลิ่น และแมลงต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ทำให้ระบบนี้ไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย

ตารางที่ 2.5 ประเภทของระบบโปรยกรอง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

	อัตราต่ำ	อัตราสูง	อัตราสูงพิเศษ
อัตราภาระปริมาณน้ำ (ลบ.ม./ตร.ม.-วัน)	1-4	10-40	40-200
อัตราภาระอินทรีย์ (กก.บีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	0.08-0.32	0.32-1.0	0.8-6.0
ช่วงเวลาทำงาน	ไม่ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง	ต่อเนื่อง
ความสูง (เมตร)	1.5-3	1-2	4.5-12
อัตราหมุนเวียนน้ำ (ร้อยละ)	0	100-250	100-400
ชนิดตัวกลาง	หิน	หิน พลาสติก	พลาสติก
ร้อยละกำจัดบีโอดี	70-80	80-85	60-80

2. ระบบโปรยกรองแบบอัตราสูง (High Rate)

ระบบนี้สามารถทำงานโดยมีระดับของภาระปริมาณน้ำ และภาระอินทรีย์ เป็นอิสระต่อกันด้วยการปรับอัตราการหมุนเวียนน้ำ การใช้ภาระอินทรีย์สูงต้องใช้ควบคู่กับภาระปริมาณน้ำสูง โดยเฉพาะในกรณีที่มีหินเป็นวัสดุตัวกลางและมีภาระอินทรีย์สูง จุลินทรีย์จะสามารถเจริญเติบโตได้ดี ทำให้ฟิล์มชีวภาพจับตัวกันหนามากบนหิน การเพิ่มภาระปริมาณน้ำจะทำให้แผ่นฟิล์มบางลง เป็นการป้องกันการอุดตันของตัวกลาง ในกรณีที่ต้องการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นให้กับระบบตะกอนเร่ง อาจใช้ถังกรองแบบอัตราสูงที่มีวัสดุตัวกลางเป็นพลาสติก ระบบนี้หากได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมและถูกต้องจะสามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณสมบัติสูงได้โดยใช้ปริมาตรน้อยกว่าถังกรองแบบอัตราต่ำ และจะไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น และแมลง ซึ่งระบบโปรยกรองแบบอัตราสูงนี้ จะรับภาระบีโอดีได้สูงกว่าอัตราต่ำประมาณ 3-4 เท่า การหมุนเวียนน้ำทำให้ถังกรองได้รับอัตราไหลสูงกว่าแบบอัตราต่ำประมาณ 10 เท่า ถังกรองแบบนี้จะมีความสูงเพียง 1-2 เมตร และมีอัตราการหมุนเวียนน้ำประมาณร้อยละ 100-250 ข้อที่ควรระวังคือจะมีการหลุดของเมือกที่หนาเกินไป ทำให้น้ำทิ้งมีของแข็งแขวนลอยสูง

3. ระบบโปรยกรองแบบอัตราสูงพิเศษ (Super-rate Filter)

ระบบนี้มักถูกเรียกว่า Roughing Filter เนื่องจากมีหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์บางส่วนเท่านั้น ตัวกลางที่ใช้ในระบบมักเป็นตัวกลางพลาสติก ในทางปฏิบัติจะใช้เป็นระบบขั้นต้นก่อนบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

<u>ข้อดีและข้อเสียของระบบโปรยกรอง</u>

<u>ข้อดี</u>

1. เป็นระบบที่ง่ายต่อการดำเนินการ จึงเหมาะสมสำหรับสถานที่ห่างไกล หรือชุมชนเล็กๆ

2. เนื่องจากในระบบมีจำนวนจุลินทรีย์มาก จึงทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพสูงและมีความจุสำรองมากทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของน้ำเสียที่เข้ามา

3. ฟิล์มชีวภาพที่ได้จากระบบโปรยกรองมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเมื่อลอกออกจากตัวกลางจะเกิดเป็นตะกอนที่มีลักษณะคงที่ จึงสามารถตกตะกอนได้อย่างง่ายเมื่อเทียบกับตะกอนลอยที่ได้จากระบบตะกอนเร่ง

4. สามารถรับภาระเฉียบพลันของน้ำทิ้งที่เป็นพิษได้ เนื่องจากเวลากักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์สั้นกว่าหรืออาจเพราะจุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวหน้าตายแล้วลอกออก จุลินทรีย์ที่อยู่ชั้นในที่ไม่ได้สัมผัสกับสารพิษจึงทำหน้าที่ต่อไป แต่ถ้าได้รับภาระสารพิษสูงเป็นเวลานาน สารพิษก็สามารถถูกดูดซับบนฟิล์มชีวภาพได้

<u>ข้อเสีย</u>

1. เนื่องจากจุลินทรีย์เจริญเติบโตติดอยู่กับตัวกลางจึงไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของมวลจุลินทรีย์ตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปได้ ดังนั้นจึงไม่มีวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งได้ จึงต้องออกแบบไว้สำหรับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ความเข้มข้น อัตราการไหล อุณหภูมิ เป็นต้น

2. การเปลี่ยนแปลงฤดูทำให้เกิดปัญหาได้ ดังเช่นในฤดูร้อนถังโปรยกรองที่อาจจะเป็นแหล่งเพาะแมลงทำให้เกิดการรบกวนบริเวณใกล้เคียงได้ (ธีระ เกรอต, 2539)

2.6 สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต

แบคทีเรียต้องการสารอาหารต่างๆ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และวิตามิน ซึ่งมีแบคทีเรียบางชนิดสามารถสร้างสารอาหารเหล่านี้เองได้จากสารอนินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เกลือแอมโมเนีย โดยธาตุหรือสารอาหารสำคัญที่แบคทีเรียต้องการในการเจริญเติบโต มีดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 ธาตุไนโตรเจน

แบคทีเรียได้รับธาตุไนโตรเจนจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พวกออโตโทรฟจะได้จากเกลือแอมโมเนีย หรือเกลือไนเตรท หรือก๊าซไนโตรเจน ส่วนพวกเฮเทอโรโทรฟจะได้จากสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะนำธาตุไนโตรเจนไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์โปรตีน และส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ เช่น เอนไซม์ ดีเอ็นเอ อาร์เอ็นเอ เป็นต้น สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในการย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำ ถ้าน้ำเสียนั้นขาดหรือมีสารประกอบที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จึงต้องเติมสารบางอย่างที่มีธาตุไนโตรเจนลงไปด้วยเพื่อเสริมสร้างการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งสารประกอบที่ใช้กันมาก ได้แก่ ยูเรีย เนื่องจากมีธาตุไนโตรเจนค่อนข้างสูงและมีราคาถูก

2.6.2 ธาตุคาร์บอน

แบคทีเรียต้องการธาตุคาร์บอนเพื่อนำไปสร้างเป็นส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์และสร้างพลังงาน โดยแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟจะได้รับธาตุคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเฮเทอโรโทรฟจะได้จากสารอินทรีย์ต่างๆ

2.6.3 เกลือแร่ของธาตุต่างๆ

แบคทีเรียต่างชนิดจะต้องการเกลือแร่ของธาตุต่างๆ ไม่เหมือนกัน โดยเกลือแร่ที่แบคทีเรียส่วนใหญ่ต้องการ ได้แก่ เกลือแร่ของธาตุโพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) โซเดียม (Na) คาร์บอน (C) และแคลเซียม (Ca) โดยแบคทีเรียจะนำเกลือแร่ของธาตุเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ดังนี้

- โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และแมงกานีส (Mn) เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่างๆ
- ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) เป็นส่วนประกอบของโปรตีนและเอทีพี (ATP)
- เหล็ก (Fe) เป็นส่วนประกอบของระบบไซโตโครม (Cytochrome)
- โซเดียม (Na) เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่พบในแบคทีเรียที่อยู่ในทะเล
- แคลเซียม (Ca) เป็นส่วนประกอบของผนังหุ้มสปอร์

มีเกลือของแร่ธาตุบางชนิดที่แบคทีเรียต้องการในปริมาณที่น้อยมาก (Trace element) แต่ก็เป็นแร่ธาตุที่มีบทบาทในการดำรงชีวิต เช่น เกลือแร่ของธาตุโคบอลต์ (Co) มีความสำคัญในการสังเคราะห์วิตามินบี 12 และ โมลิบดินัม (Mo) มีความสำคัญในการตรึงไนโตรเจน

2.6.4 วิตามินและ Growth Factors

วิตามินเป็นสารเคมีที่ควบคุมการทำงานของร่างกาย ซึ่งร่างกายต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าขาดไปร่างกายจะทำงานผิดปกติ ส่วน Growth Factors นั้นเป็นสารเคมีที่เร่งอัตราการเจริญของแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ ดังนั้นแบคทีเรียจึงต้องการวิตามินและ Growth Factors ในการเจริญเติบโต แต่มีแบคทีเรียบางชนิดสามารถสังเคราะห์ขึ้นใช้เองได้ โดยแบคทีเรียต้องการวิตามินเพื่อนำไปทำหน้าที่หรือเป็นส่วนประกอบของโคเอนไซม์ เช่น วิตามินบี 1 (วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, 2556)

2.7 รูปแบบของจลนพลศาสตร์

รูปแบบจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดสารใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

2.7.1 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics) คือ อัตราการบำบัดจำเพาะคงที่ไม่แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่เป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.8 และมีสมการดังสมการ (2.11)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$r_S = k_0 S_0 \quad (2.11)$$

โดยที่ r_S = อัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง)

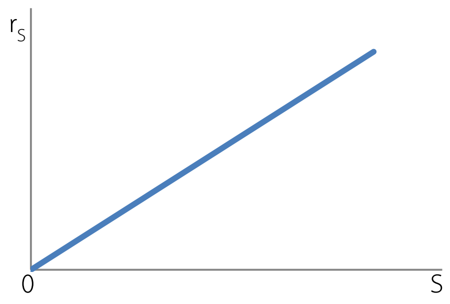
k = ค่าคงที่ของอัตราการบำบัดจำเพาะ

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น

รูปที่ 2.8 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)

2.7.2 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics) คือ อัตราการบำบัดจำเพาะแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเทียบกับสารตั้งต้น ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9 และมีสมการดังสมการ (2.12)

$$r_S = k_1S_1 \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.9 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)

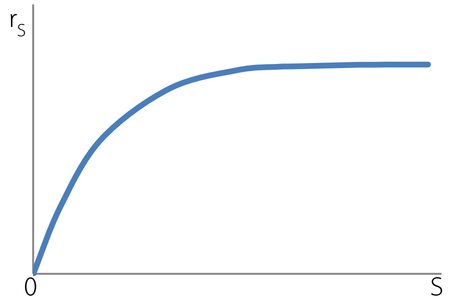
2.7.3 จลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics) เป็นสมการที่นิยมใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทางชีวภาพทั่วไป โดยจะมีลักษณะคล้ายจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งที่ความเข้มข้นต่ำ และคล้ายจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.10 และมีสมการดังสมการ (2.13)

$$r_S = k_m \frac{S}{K_S + S} \tag{2.13}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ k_m = อัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด

K_S = ความเข้มข้นของ S ที่อัตราการบำบัดจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด

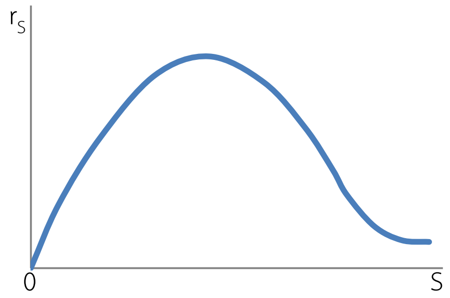


รูปที่ 2.10 จลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics)

2.7.4 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น (Substrate inhibition kinetics) เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงเกินไปจนไปยับยั้งการทำงานของปฏิกิริยา ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 และมีสมการดังสมการ (2.14)

$$r_S = k_m \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_i}} \tag{2.14}$$

โดยที่ K_i = ค่าคงที่การยับยั้งการทำงาน



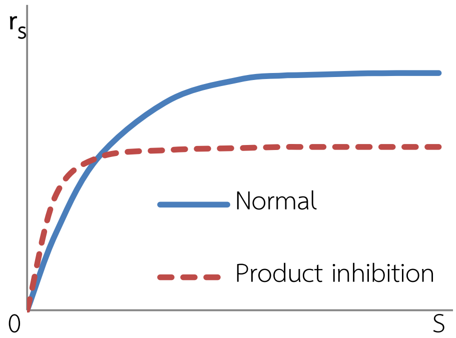
รูปที่ 2.11 การยับยั้งการทำงานโดยสารตั้งต้น (Substrate inhibition kinetics)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.5 จลนพลศาสตร์แบบถูกยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์ (Product inhibition kinetics) เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงเกินไปจนไปยับยั้งการทำงานของปฏิกิริยา ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 และมีสมการดังสมการ (2.15) (Chaplin, 2014)

$$r_S = k_m \frac{S}{K_S + \frac{K_S P}{K_i} + S} \tag{2.15}$$

โดยที่ P = ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 การยับยั้งการทำงานโดยผลิตภัณฑ์ (Product inhibition kinetics)

2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ห้องน้ำในสถานีบริการน้ำมันมีผู้เข้าใช้บริการเป็นจำนวนมาก และน้ำเสียที่ปล่อยออกมาก็มีทีเคเอ็นปนเปื้อนสูง จึงควรมีระบบบำบัดที่เหมาะสมเพื่อบำบัดน้ำเสียนี้ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งการบำบัดทีเคเอ็นต้องอาศัยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียม เปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนไตร์ทโดยเอโอบี และเปลี่ยนไนไตร์ทไปเป็นไนเตรทโดยเอ็นโอบี การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนี้จะทำให้พีเอชในระบบลดลง พีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 7.0-8.5 ควรควบคุมให้มีสภาพความเป็นด่างคงเหลือในระบบหลังจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแล้วประมาณ 50-100 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เพื่อให้ระบบทำงานได้เป็นปกติ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ซึ่งถ้าอยู่ในสภาวะที่พีเอชต่ำกว่า 6.5 จะทำให้สารตั้งต้นที่เอโอบี ใช้อยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ทั้งหมด จึงไม่มีก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และมีกลิ่นฉุนรุนแรงอยู่ (U.S. EPA, 1975) แต่ก็ทำให้ไนไตร์ท (NO_2^-) ที่เป็นสารตั้งต้นที่เอ็นโอบีใช้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรดเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดไนตรัส (HNO_2) ซึ่งสามารถยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรียได้ (Anthonisen และคณะ, 1976)

ในเชื้อบริสุทธิ์ แบคทีเรียกลุ่มเอโอบี เช่น *Nitrosomonas* จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าพีเอชต่ำกว่า 5.8 *Nitrosospira* จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 และในกลุ่มเอ็นโอบี เช่น *Nitrobacter* จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 เช่นกัน (Buchanan และคณะ, 1974) จากงานวิจัยของ Burton และคณะ (2001)ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งในเชื้อบริสุทธิ์คือ *Nitrosospira* สายพันธุ์ NPAV และเชื้อผสม คือ *Nitrosospira* สายพันธุ์ NPAV กับ *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 ในอาหารเหลวที่มียูเรียหรือแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยได้ทำการทดลองในอาหารที่มีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ ซึ่งมีพีเอชในอาหารเริ่มต้นที่ 4 5 6 7 และ 7.5 พบว่า ในอาหารที่มีแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน ทั้งเชื้อบริสุทธิ์และเชื้อผสมเกิดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 7.5 เท่านั้น แต่ในเชื้อผสมมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียมจำเพาะที่สูงกว่าในเชื้อบริสุทธิ์ประมาณ 3-4 เท่า และสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียมได้จนถึงที่พีเอชสุดท้ายต่ำกว่าคือประมาณ 4 ส่วนอาหารที่มียูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน ในเชื้อบริสุทธิ์และเชื้อผสมสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกพีเอชที่ทำการศึกษา แต่ที่พีเอช 4 5 และ 6 การออกซิไดซ์แอมโมเนียมจะหยุดลงเมื่อยูเรียถูกใช้จนหมด ที่พีเอช 7 และ 7.5 ยังสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียมต่อได้เมื่อยูเรียหมดลงแต่จะ

ถูกยับยั้งเมื่อพีเอชลดลงต่ำลง โดยมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียมจำเพาะที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าในอาหารที่มีแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน และค่าพีเอชสุดท้ายของทุกการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ระหว่าง 5-6 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในอาหารที่มีค่าพีเอชคงที่ด้วย โดยได้ทำการศึกษาในเชื้อผสมที่มียูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนที่พีเอช 5 7 และ 8 พบว่า มีการเจริญเกิดขึ้นที่พีเอช 5 และ 7 ซึ่งมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียมจำเพาะที่คล้ายคลึงกับในอาหารที่มีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ ส่วนที่พีเอช 8 ไม่มีการเจริญเกิดขึ้นตลอดการทดลอง และในอาหารที่มีแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจนศึกษาที่พีเอช 5 6 7 และ 7.5 พบว่า ไม่มีการเจริญเกิดขึ้นที่พีเอช 6 หรือต่ำกว่าและมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียมจำเพาะที่ใกล้เคียงกับในอาหารที่มียูเรีย ส่วนในเชื้อบริสุทธิ์ได้ทำการศึกษาในอาหารที่มียูเรีย และอาหารที่มียูเรียรวมกับแอมโมเนียมที่พีเอช 6.2 พบว่า ทั้งสองการทดลองนี้มีการเจริญเกิดขึ้นเมื่อยูเรียถูกใช้จนหมด แต่สุดท้ายก็ถูกยับยั้งการเจริญเติบโตเนื่องจากพีเอชต่ำ โดยมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียมจำเพาะที่ใกล้เคียงกับในอาหารที่มีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ

การบำบัดทีเคเอ็นในสภาวะที่พีเอชต่ำจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากกลิ่นของก๊าซแอมโมเนียและลดการเติมด่างได้มากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของ Hayatsu (1993) พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ในดินกรดจนถึงที่พีเอชต่ำเท่ากับ 3.3-5.1 โดยส่วนใหญ่ในดินที่พีเอชต่ำกว่าจะมีอัตราไนตริฟิเคชันที่น้อยกว่า ดินที่มีค่าพีเอช 5.1 พบอัตราไนตริฟิเคชันดีที่สุดคือ 44.9 ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดินแห้งต่อวัน และมีอีกหลายงานวิจัยที่พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำถึงประมาณ 4 ในอาหารเหลว หรือน้ำเสียสังเคราะห์ (De Boer และคณะ, 1989 และ De Boer และคณะ, 1995)

- De Boer และคณะ (1989) พบว่าเชื้อผสมของ *Nitrosospira* สายพันธุ์ AHB1 และ *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 ในอาหารเหลวที่มีแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำได้จนถึง 4.7 จากค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 7.0 และได้มีการศึกษาในอาหารที่มียูเรียหรือแอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยควบคุมพีเอชตลอดการทดลองที่ 4.5 5.0 และ 5.5 พบว่า ในอาหารที่มียูเรียเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในทุกพีเอชที่ทำการศึกษา แต่ในพีเอช 4.5 มีการผลิตไนเตรทได้ช้ากว่า ส่วนในอาหารที่มีแอมโมเนียมเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในพีเอชที่ 5.5 เท่านั้น และผลิตไนเตรทได้ช้ากว่าในอาหารที่มียูเรียมาก

- Hanada และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาโดยสร้างถัง acidophilic nitrifying sequencing-batch reactors (ANSBRs) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ที่พีเอชต่ำ โดยใช้หัวเชื้อที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของมหาวิทยาลัย และได้ทำการศึกษาในอาหารที่พีเอชเริ่มต้น 4 พบว่าในแต่ละรอบการทดลองค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.7-4.0 และอัตราไนตริฟิเคชันมีค่าน้อยมาก

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

รวมทั้งยังมีหลายงานวิจัยได้มีการศึกษาพบว่า การรวมกลุ่มของเซลล์ การเกิดฟิล์มชีวภาพ และปริมาณเซลล์ที่มีความหนาแน่นสูงจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำ (De Boer และคณะ, 1991, Tarre และ Green, 2004 และ Gieseke และคณะ, 2006)

- De Boer และคณะ (1991) ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยการรวมกลุ่มของเซลล์ ซึ่งได้ทำศึกษาในเซลล์ที่ถูกกรองให้มีขนาดน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร และเซลล์ที่ไม่ถูกกรอง พบว่า เซลล์ที่ถูกกรองเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 6 แต่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 4 ส่วนในเซลล์ที่ไม่ถูกกรองเกิดปฏิกิริยาทั้งที่พีเอช 4 และ 6

- Tarre และ Green (2004) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สภาวะพีเอชต่ำทั้งในถังปฏิกรณ์แบบจุลินทรีย์แขวนลอย และแบบเจริญเกาะติด โดยหัวเชื้อนำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจน มีความเข้มข้นอยู่ที่ 200-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และให้พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ไม่มีการปรับพีเอชตลอดการทดลอง พบว่า ในถังปฏิกรณ์แบบจุลินทรีย์เจริญเกาะติดสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ในสภาวะที่พีเอชต่ำจนถึงพีเอชสุดท้ายประมาณ 4.3 และสามารถเกิดอัตราไนตริฟิเคชันได้สูงถึง 5.6 กรัมของไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีอัตรา

ไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับ 0.55 กรัมของไนโตรเจนต่อกรัมชีวมวลต่อวัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Bonomo และคณะ (2000) และ Doyle และคณะ (2001) ที่เกิดในสภาวะพีเอชที่เหมาะสม ส่วนถังปฏิกรณ์แบบเติบโตแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้จนถึงพีเอชสุดท้ายประมาณ 3.8 แต่เกิดในอัตราไนตริฟิเคชันที่ต่ำกว่าคือ 1.1 กรัมของไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ต่อลิตรต่อวัน โดยมีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับ 0.24 กรัมของไนโตรเจนต่อกรัมชีวมวลต่อวัน

- Tarre และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์ที่ใช้อนุภาคชอล์กเป็นตัวกลางและไม่มีการเติมด่างตลอดการทดลอง โดยมีการเติมออกซิเจนที่ความเข้มข้นดีโอ 2 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ในถังที่เติมดีโอ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงกว่า 1 เท่าของถังที่เติมดีโอ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชผันผวนอยู่ที่ประมาณ 4.4-6.6 ของทั้ง 2 การทดลอง และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาโดยใช้ผงแก้ว (sinter glass) เป็นตัวกลางด้วย ซึ่งหัวเชื้อที่ใช้นำมาจากถังปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคชอล์กเป็นตัวกลางที่ควบคุมพีเอชในการเดินระบบมากกว่า 7 โดยในการทดลองนี้ได้มีการเติมด่างลงไปในปริมาณที่น้อยกว่าความต้องการในสตอยชิโอเมตริก พบว่า เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันทั้งๆ ที่พีเอชลดต่ำลงจนถึงประมาณ 4.5 และมีอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 2.3 กรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองที่ใช้อนุภาคชอล์กเป็นตัวกลาง

- Gieseke และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบแบบฟลูอิไดซ์ โดยใช้อนุภาคชอล์กเป็นตัวกลาง เริ่มต้นการทดลองที่พีเอชประมาณ 5.5 พบว่าค่าพีเอชลดลงเรื่อยๆ จนคงที่ที่ประมาณ 4.3 และสามารถผลิตไนเตรทออกมาได้ โดยมีอัตราการผลิตไนเตรทที่ประมาณ 1 กรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน

ดังนั้นจากงานวิจัยที่กล่าวมา จึงทำให้เลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบโปรยกรอง เนื่องจากเป็นระบบการเจริญแบบเกาะติด มีการเกิดฟิล์มชีวภาพซึ่งพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำได้ และเป็นระบบที่ก่อสร้างง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย

3.1.1.1 พีเอช

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.1.1.2 ของแข็งแขวนลอย

- กระดาษกรองใยแก้ว Whatman GF/C รูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- ชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- เครื่องดูดสูญญากาศ (Suction pump)
- จานระเหย (Evaporation dish)
- คีมคีบ (Forcept)
- ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- น้ำกลั่น

3.1.1.3 แอมโมเนีย และทีเคเอ็น

- น้ำกลั่น
- สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์: โซเดียมเตตระบอเรต ($Na_2B_4O_7$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- สารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก: กรดบอริก (H_3BO_3) เมทิลเรด เมทิลีนบลู เอทิลแอลกอฮอล์
- น้ำยาย่อยสลาย: โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)

- ฟีนอล์ฟธาลีนอินดิเคเตอร์
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไธโอซัลเฟต: โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$)
- ขวดเจดาห์ล (Kjeldahl) ขนาด 500 มิลลิลิตร
- เตาให้ความร้อนอยู่ในช่วง 365-370 องศาเซลเซียส
- เครื่องควบแน่น (Condencer)
- บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.1.4 ไนไตร์ท

- น้ำกลั่น
- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- ซัลฟานิลาไมด์ ($C_6H_8N_2O_2S$)
- เอ็น-(1-แนฟธิล) เอทธิลลีนไดอะมีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (NED)
- โซเดียมไนไตร์ท ($NaNO_2$)
- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- คิวเวทท์แก้ว (Cuvettes)
- เครื่องแก้วต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.1.5 ไนเตรท

- น้ำกลั่น
- โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$)
- เครื่องวัดไนเตรท
- เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาตร 25 ลิตร ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยกำหนดมีความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งกำหนดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 5 ชุด ได้แก่ 7 6 5 4 และไม่ควบคุมพีเอช โดยชุดที่ควบคุมพีเอชจะปรับพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์

การทดลองที่ 2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาตร 25 ลิตร ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยกำหนดให้มีความเข้มข้นของยูเรีย 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เลือกค่าพีเอชต่ำที่มีอัตราไนตริฟิเคชันสูงจากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลองนี้โดยปรับพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ตารางที่ 3.1 ธาตุอาหารเสริมที่เป็นส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง (Hanada และคณะ, 2014)

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น
$NaHCO_3$	168 มก./ล.
$CaCl_2.2H_2O$	10 มก./ล.
K_2HPO_4	136 มก./ล.
$MgSO_4.7H_2O$	30 มก./ล.
SL8	1 มล./ล.

3.1.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีความเข้มข้นของมวลตะกอนจุลินทรีย์ประมาณ 2,400-2,800 มิลลิกรัมต่อลิตร

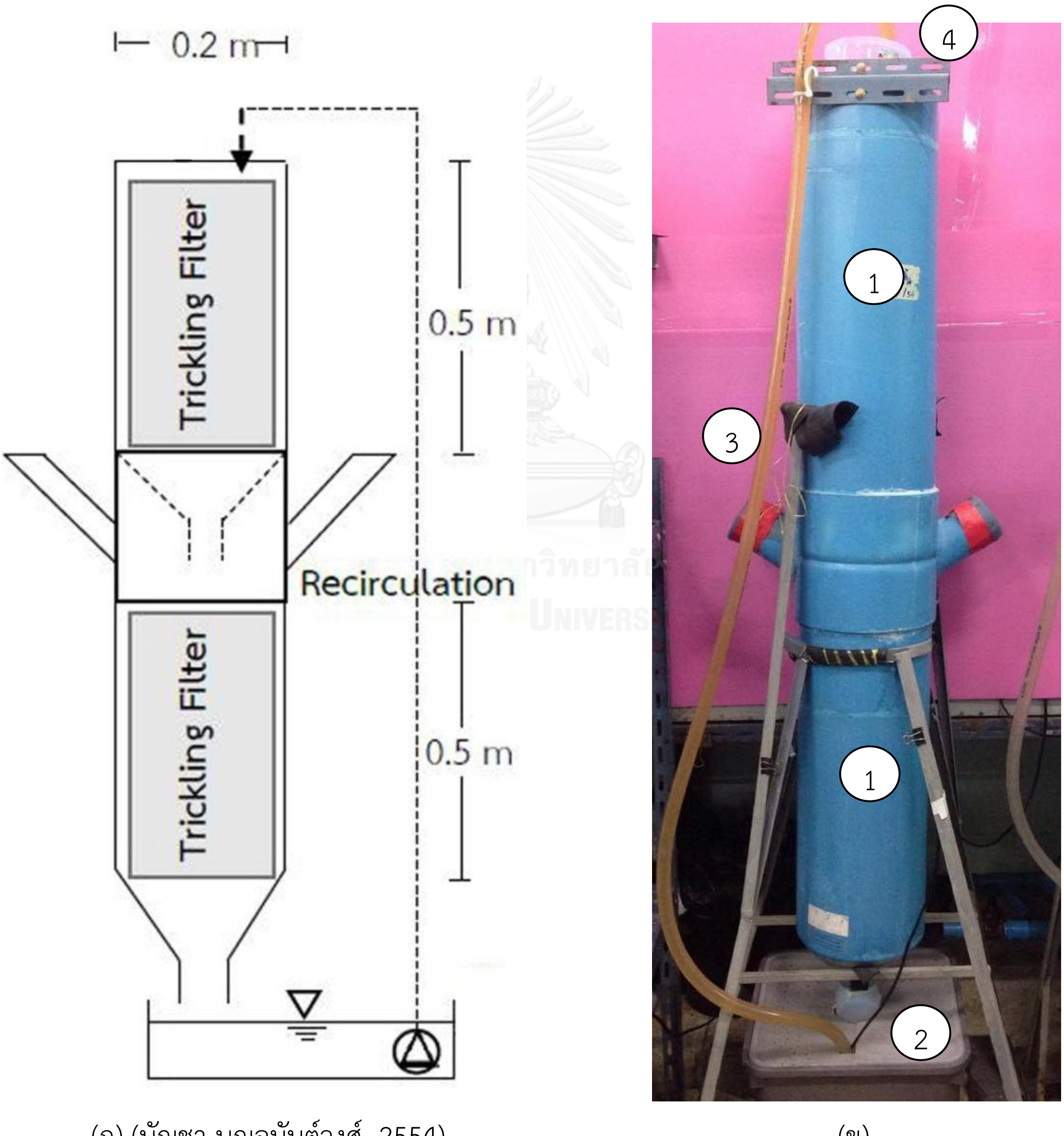
3.1.4 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตัวกลางที่ใช้ในถังโปรยกรอง ใช้ตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2.2 เซนติเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media ของบริษัท AQUA

3.1.5 ถังปฏิกิริยา

ถังโปรยกรอง (Trickling Filter) ทำจากพีวีซีที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และส่วนของตัวกลางที่มีความสูงชั้นละ 0.5 เมตร จำนวน 2 ชั้น รวมความสูงตัวกลาง 1 เมตร ซึ่งแสดงรายละเอียดภายในดังรูปที่ 3.2 (ก) การติดตั้งถังโปรยกรองและอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.2 (ข) ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 คือส่วนของตัวกลาง หมายเลข 2 คือถังใส่น้ำทิ้งที่มีเครื่องสูบน้ำเพื่อเวียนน้ำเสียในระบบไปตามหมายเลข 3 ในอัตรา 100 ลิตรต่อชั่วโมง เข้าสู่ระบบกระจายน้ำเข้าที่หมายเลข 4



(ก) (บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554) (ข)

รูปที่ 3.2 ถังโปรยกรอง (Tricking Filter)

3.2 แผนการทดลอง

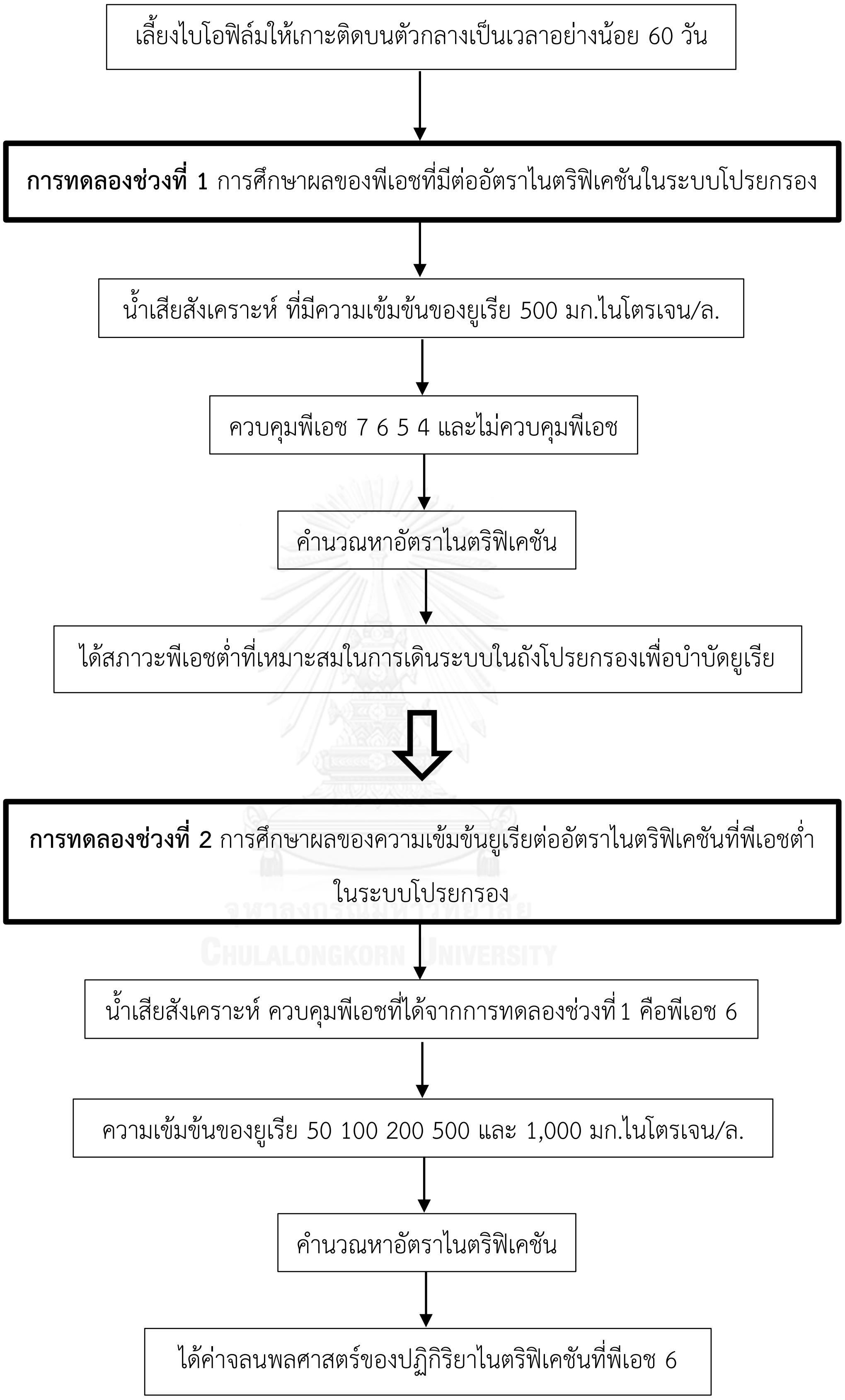
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้ทำการศึกษาผลของพีเอช และผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง

เป็นการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มียูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยมีความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ในถังโปรยกรองภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 6 5 4 และมีอีก 1 ชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง คำนวณหาอัตราไนตริฟิเคชันของแต่ละพีเอช เพื่อหาสภาวะพีเอชต่ำที่มีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงต่อการบำบัดยูเรียในถังโปรยกรอง ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.2 และรูปที่ 3.6

การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง

เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ในถังโปรยกรองภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองในช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นสภาวะพีเอชต่ำที่มีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูง คำนวณหาอัตราไนตริฟิเคชันของแต่ละความเข้มข้นยูเรีย เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำ ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.3 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.3 แผนการทดลอง

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 เริ่มเดินระบบ

ก่อนเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ได้เลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้เกาะติดกับตัวกลางเพื่อให้เกิดฟิล์มชีวภาพในถังโปรยกรองจำนวน 5 ถัง ซึ่งแต่ละถังมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.4

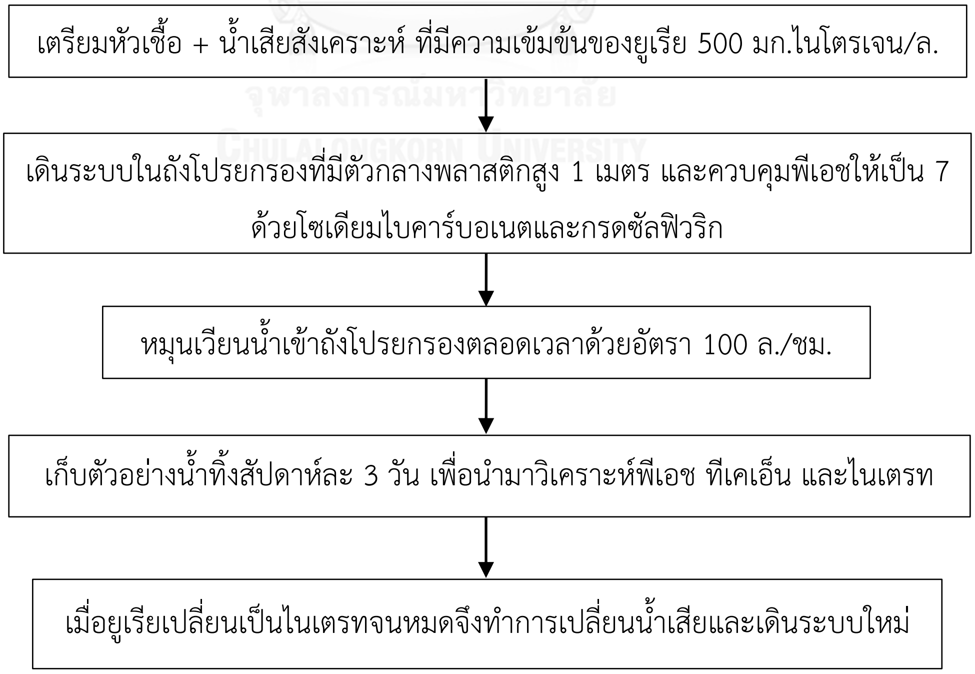
1) ผสมหัวเชื้อ 10 ลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังตารางที่ 3.1 ให้มีปริมาตรรวม 25 ลิตร

2) เดินระบบในถังโปรยกรองที่มีตัวกลางพลาสติก โดยชั้นตัวกลางมีความสูงรวม 1 เมตร ควบคุมพีเอชให้เป็น 7 โดยปรับพีเอชวันละ 2 ครั้งด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและกรดซัลฟิวริก

3) ทำการหมุนเวียนน้ำเข้าถังโปรยกรองตลอดเวลาด้วยอัตรา 100 ลิตรต่อชั่วโมง

4) ตรวจวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองสัปดาห์ละ 3 วัน วิเคราะห์ค่าพีเอช ทีเคเอ็นที่ลดลง และไนเตรทที่เพิ่มขึ้น

5) เมื่อยูเรียเปลี่ยนเป็นไนเตรทจนหมดจึงทำการเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบใหม่ โดยใช้เวลา 2 เดือนกว่า จึงเริ่มเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.4 การเริ่มเดินระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง

3.3.2.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรต้น	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
ค่าพีเอช	7 6 5 4 และไม่ควบคุมพีเอช
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในน้ำเสียสังเคราะห์	500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
อัตราการเวียนน้ำภายในถังโปรยกรอง	100 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังการทดลอง	พีเอช ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ทีเคเอ็น ไนไตร์ท และไนเตรท

3.3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.6

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาตามข้อ 3.2.2 ให้มีความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีธาตุอาหารอื่นอย่างพอเพียง จำนวน 5 ถัง โดยแต่ละถังมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 6 5 4 และไม่ควบคุมพีเอช นำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ทีเคเอ็น ไนไตร์ท และไนเตรท ของน้ำเสียก่อนเดินระบบ

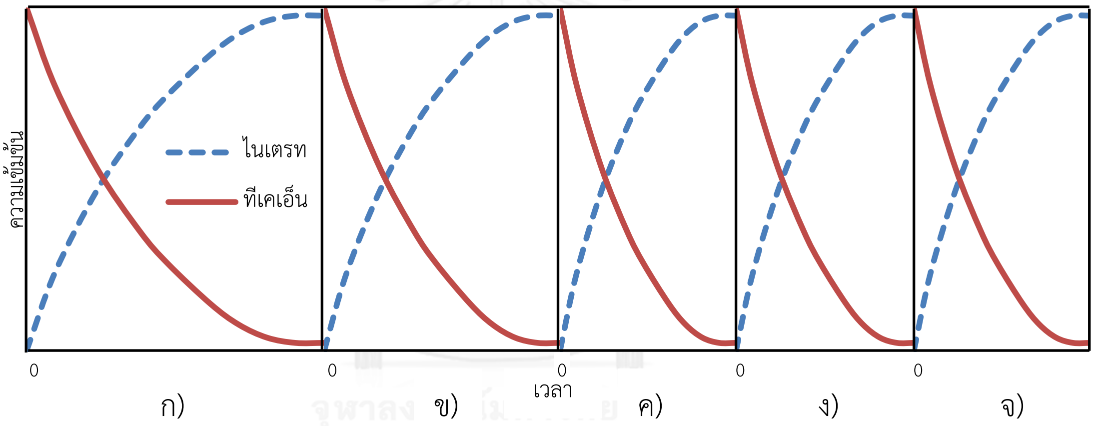
2) เดินระบบในถังโปรยกรองที่ได้มีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพให้เกาะติดอยู่บนตัวกลางไว้แล้ว ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชตามที่กำหนดไว้โดยปรับพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ยกเว้นชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

3) ทำการหมุนเวียนน้ำเข้าถังโปรยกรองตลอดเวลาด้วยอัตรา 100 ลิตรต่อชั่วโมง

4) ตรวจวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองทุกวัน วิเคราะห์ค่าพีเอช วัดค่าแอมโมเนียที่พบ ทีเคเอ็นที่ลดลง และค่าไนไตร์ท ไนเตรทที่เพิ่มขึ้นเทียบกับเวลาจนมีค่าค่อนข้างคงที่ และวัดค่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบในแต่ละรอบ

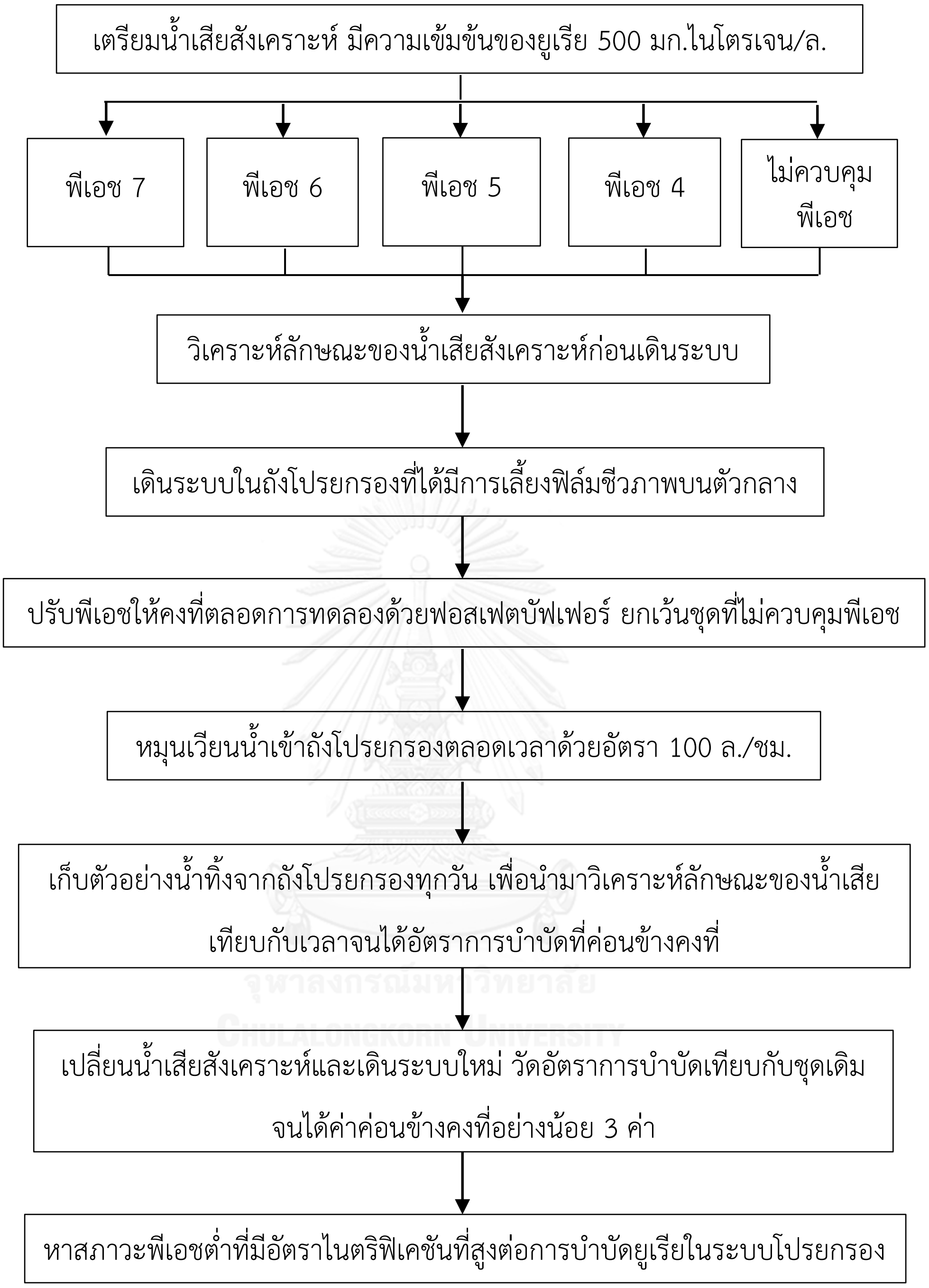
5) เปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์และเดินระบบใหม่ วัดอัตราไนตริฟิเคชันเทียบกับชุดเดิมจนได้ค่าค่อนข้างคงที่อย่างน้อย 3 ค่า

อัตราการบำบัดทีเคเอ็นที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในรอบแรก มีอัตราการบำบัดที่ช้า ปริมาณทีเคเอ็นจะลดลง และไนเตรทจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก ดังรูปที่ 3.5 ก เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบที่เกาะติดอยู่กับตัวกลางยังมีปริมาณไม่มากจึงทำให้มีการใช้ยูเรียในปริมาณที่น้อยและต้องใช้เวลานานกว่าอัตราการบำบัดทีเคเอ็นจะถึงจุดสูงสุดและคงที่ ต่อมาเมื่อเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบใหม่คาดว่าระยะเวลาที่อัตราการบำบัดทีเคเอ็นจะถึงจุดสูงสุดและคงที่ใช้เวลาน้อยกว่าในรอบแรกเนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบที่เกาะติดอยู่กับตัวกลางมีการเจริญและเพิ่มปริมาณมากขึ้นแล้วจากการเดินระบบในรอบแรกจึงทำให้ใช้ยูเรียได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 3.5 ข และเป็นเช่นนี้ต่อไปเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบใหม่จนมีอัตราการบำบัดทีเคเอ็นค่อนข้างคงที่ในทุกรอบการทดลองดังรูปที่ 3.5 ค ง และ จ



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงปริมาณทีเคเอ็นและไนเตรทที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลอง

6) ศึกษาอัตราไนตริฟิเคชันของแต่ละพีเอชใน 4 ชุดทดลอง และ 1 ชุดที่ไม่มีการควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง เพื่อหาสภาวะพีเอชต่ำที่มีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงต่อการบำบัดยูเรียในระบบโปรยกรอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.6 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง

3.3.3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรต้น	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในน้ำเสียสังเคราะห์	50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
ค่าพีเอช	เลือกค่าพีเอชต่ำที่มีอัตราไนตริฟิเคชันสูงจากการทดลองช่วงที่ 1 คือพีเอช 6
อัตราการเวียนน้ำภายในถังโปรยกรอง	100 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังการทดลอง	พีเอช ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ทีเคเอ็น ไนไตร์ท และไนเตรท

3.3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.7

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาตามข้อ 3.2.3 จำนวน 5 ถัง โดยแต่ละถังมีความเข้มข้นของยูเรีย 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และปรับพีเอชให้ได้ตามพีเอชที่เลือกมาจากการทดลองช่วงที่ 1 คือพีเอช 6 นำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย แอมโมเนีย ทีเคเอ็น ไนไตร์ท และไนเตรท ของน้ำเสียก่อนเดินระบบ

2) เดินระบบในถังโปรยกรอง และควบคุมพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลองด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์

3) ทำการหมุนเวียนน้ำเข้าถังโปรยกรองตลอดเวลาด้วยอัตรา 100 ลิตรต่อชั่วโมง

4) ตรวจวัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองทุกวัน วิเคราะห์ค่าพีเอช วัดค่าแอมโมเนียที่พบ ทีเคเอ็นที่ลดลง และค่าไนไตร์ท ไนเตรทที่เพิ่มขึ้นเทียบกับเวลาจนมีค่าค่อนข้างคงที่ และวัดค่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบในแต่ละรอบ

5) เปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์และเดินระบบใหม่ วัดอัตราไนตริฟิเคชันเทียบกับชุดเดิมจนได้ค่าค่อนข้างคงที่อย่างน้อย 3 ค่า

6) สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะ (อัตราไนตริฟิเคชันต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง) ของแต่ละความเข้มข้นเพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำ โดยใช้โปรแกรม SigmaPlot

เมื่อสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะของแต่ละความเข้มข้นแล้วคาดว่ากราฟที่ได้จะเป็นตามรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังรูปที่ 2.8-2.12

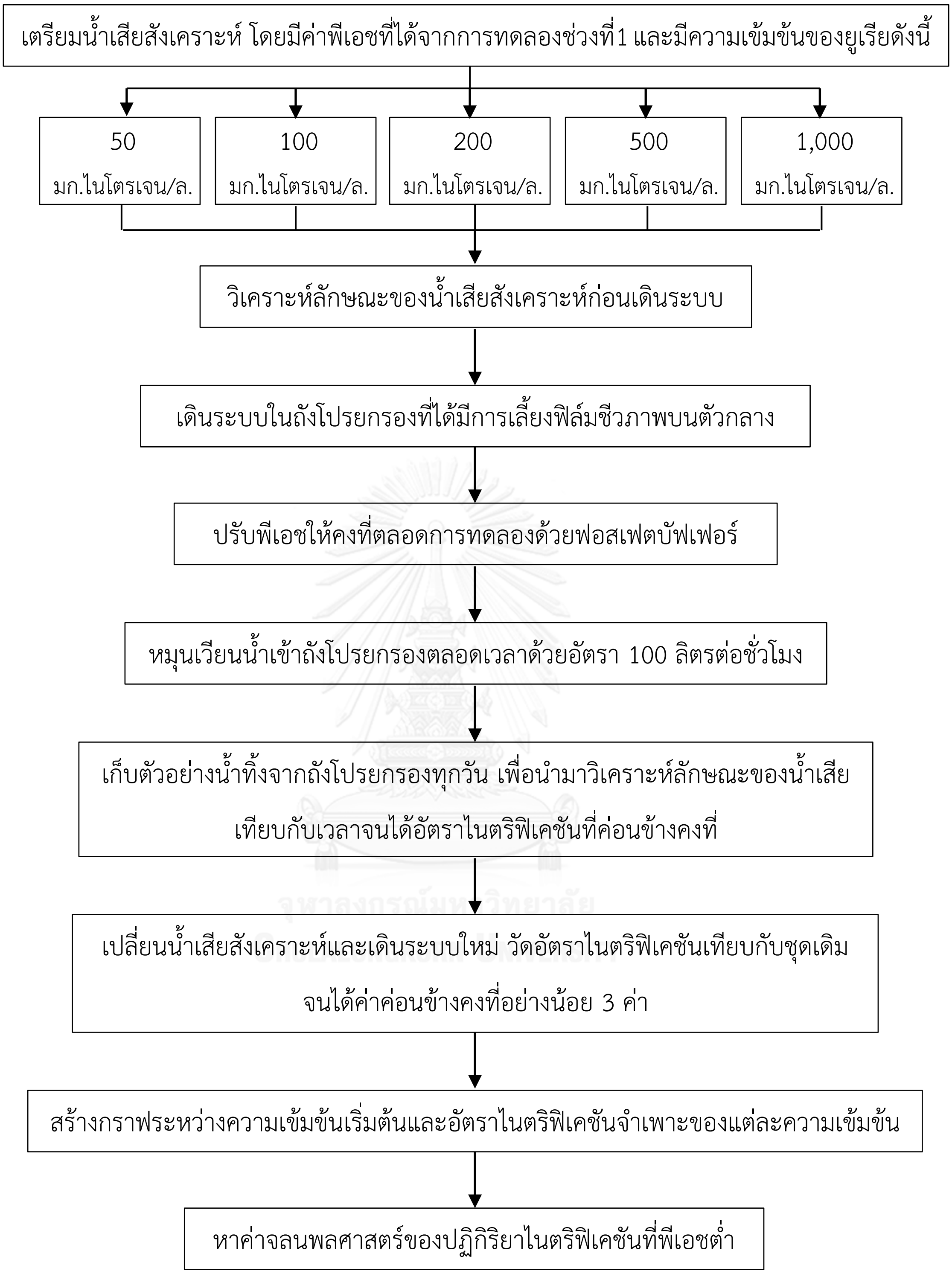
3.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ของแต่ละพารามิเตอร์ และความถี่ในการตรวจวัดของการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการตรวจ
พีเอช	-	เครื่องวัดพีเอช	ทุกวัน
ของแข็งแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองด้วยกระดาษกรองแล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส	ก่อนและหลังเดินระบบ
แอมโมเนีย	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	การกลั่นและไตเตรท	ทุกวัน
ทีเคเอ็น	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	แมคโครเจลดาห์ล	ทุกวัน
ไนไตร์ท	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	ทำให้เกิดสีและวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์	ทุกวัน
ไนเตรท	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	เครื่องวัดไนเตรท	ทุกวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.7 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำในระบบโปรยกรอง

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันในระบบโปรยกรอง

ในการทดลองช่วงนี้ได้ทำการศึกษาโดยเดินระบบในถังโปรยกรองจำนวน 5 ชุด ซึ่งในแต่ละชุดจะมีการควบคุมพีเอชที่แตกต่างกัน คือ 7 6 5 4 และชุดที่ไม่มีการควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง เพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชัน โดยก่อนเริ่มทำการทดลองในช่วงนี้ได้มีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพให้เกาะติดอยู่กับตัวกลางโดยนำหัวเชื้อมาจากบริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด เลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะพีเอชเป็นกลาง เดินระบบแบบทีละเทในถังโปรยกรองที่มีการหมุนเวียนน้ำตลอดเวลาด้วยอัตรา 100 ลิตรต่อชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นของยูเรียลดลงและเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทจนหมด จึงทำการเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบต่อเช่นเดิม ซึ่งใช้เวลาทั้งหมดในการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพเป็นเวลา 2 เดือนกว่า จึงเริ่มเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1

4.1.1 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7

การทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 10 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 123 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 8 9 และ 10 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

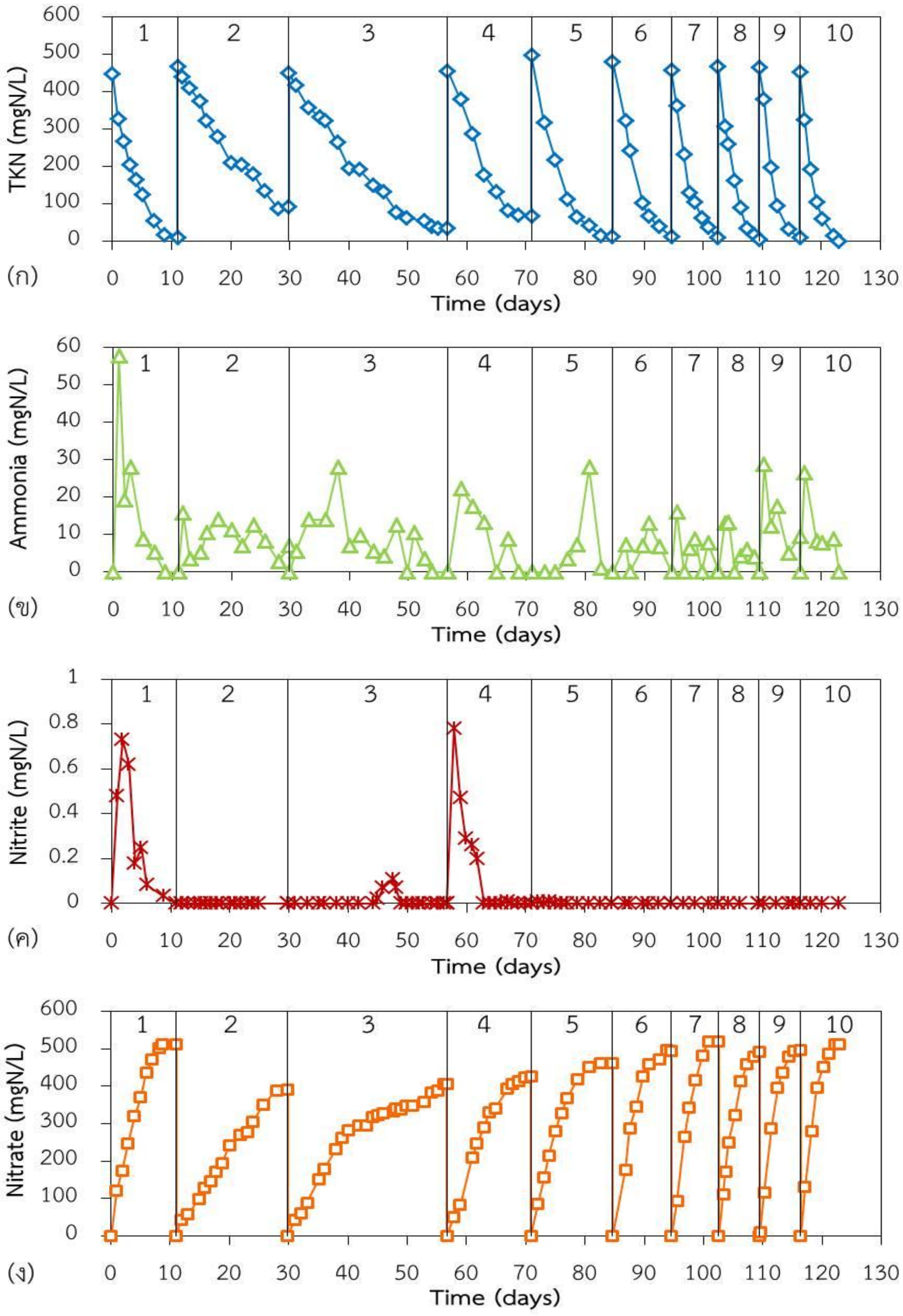
ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยด้วยวิธีการกรองและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยจะวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังเดินระบบ ซึ่งก่อนเดินระบบในทุกรอบการทดลองจะไม่พบของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย และเมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ ในแต่ละรอบจะพบว่ามีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นส่วนของฟิล์มชีวภาพที่เจริญเติบโตขึ้นเกาะติดอยู่กับตัวกลางและมีส่วนที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.1 จะพบว่าในการทดลองรอบที่ 1 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงถึง 1,113.33±50.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจเกิดจากการที่ก่อนหน้านี้เดินระบบเพื่อเลี้ยงฟิล์มชีวภาพใช้เวลามากกว่า 2 เดือน อาจจะทำให้มีชั้นฟิล์มชีวภาพเกาะติดอยู่กับตัวกลางหนามากเกินจนทำให้หลุดออกมากับน้ำเสียในปริมาณมากได้ จึงส่งผลให้การบำบัดทีเคเอ็นและการเกิดไนเตรทในรอบต่อมาคือรอบที่ 2 3 และ 4 ใช้ระยะเวลานานกว่ารอบที่ 1 ที่ใช้เวลาในการบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้จนหมดเป็นเวลา 11 วัน ส่วนรอบที่ 2 3 และ 4 ใช้เวลา 19 27 และ 15 วัน แต่ไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้หมด คงเหลืออยู่ในระบบ 89.00 35.00 และ

66.50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ และเกิดไนเตรทขึ้น 391.40 405.70 และ 425.30 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ง) ต่อมาเมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดทีเคเอ็นในแต่ละรอบจะสั้นลง และสามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้เกือบทั้งหมด คงเหลือในระบบไม่เกิน 13 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จนถึงรอบที่ 8 9 และ 10 ระบบเริ่มคงที่ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการบำบัดยูเรียไปเป็นไนเตรทได้จนหมดคือ 7 วัน

เมื่อวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำเสียพบว่ามีค่าแอมโมเนียในระบบสูงสุดไม่เกิน 60 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.1 (ข) โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบนี้เกิดจากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันที่เปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งก็คือยูเรียมาเป็นแอมโมเนีย และจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันต่อเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียที่เกิดขึ้นไปเป็นไนไตร์ท และเปลี่ยนไนไตร์ทไปเป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย แต่เนื่องจากสภาวะที่พีเอช 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และไนไตร์ทไปเป็นไนเตรทได้เร็ว จึงพบปริมาณแอมโมเนียสะสมอยู่ในระบบน้อย และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในทุกรอบไม่พบแอมโมเนียสะสมอยู่ ยกเว้นรอบที่ 2 พบเพียง 7 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เท่านั้น ส่วนไนไตร์ทเกิดขึ้นในระบบน้อยมากสูงสุดเพียง 0.78 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.1 (ค) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละรอบไม่พบไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบแสดงว่าไนติฟายอิงแบคทีเรียสามารถออกซิไดซ์ไนไตร์ทไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	1,113.33±50.33
2	0.00	613.33±20.82
3	0.00	22.50±10.80
4	0.00	21.67±5.85
5	0.00	8.33±4.71
6	0.00	18.57±2.02
7	0.00	12.14±3.03
8	0.00	13.00±4.24
9	0.00	14.00±5.66
10	0.00	29.00±7.07



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

4.1.2 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

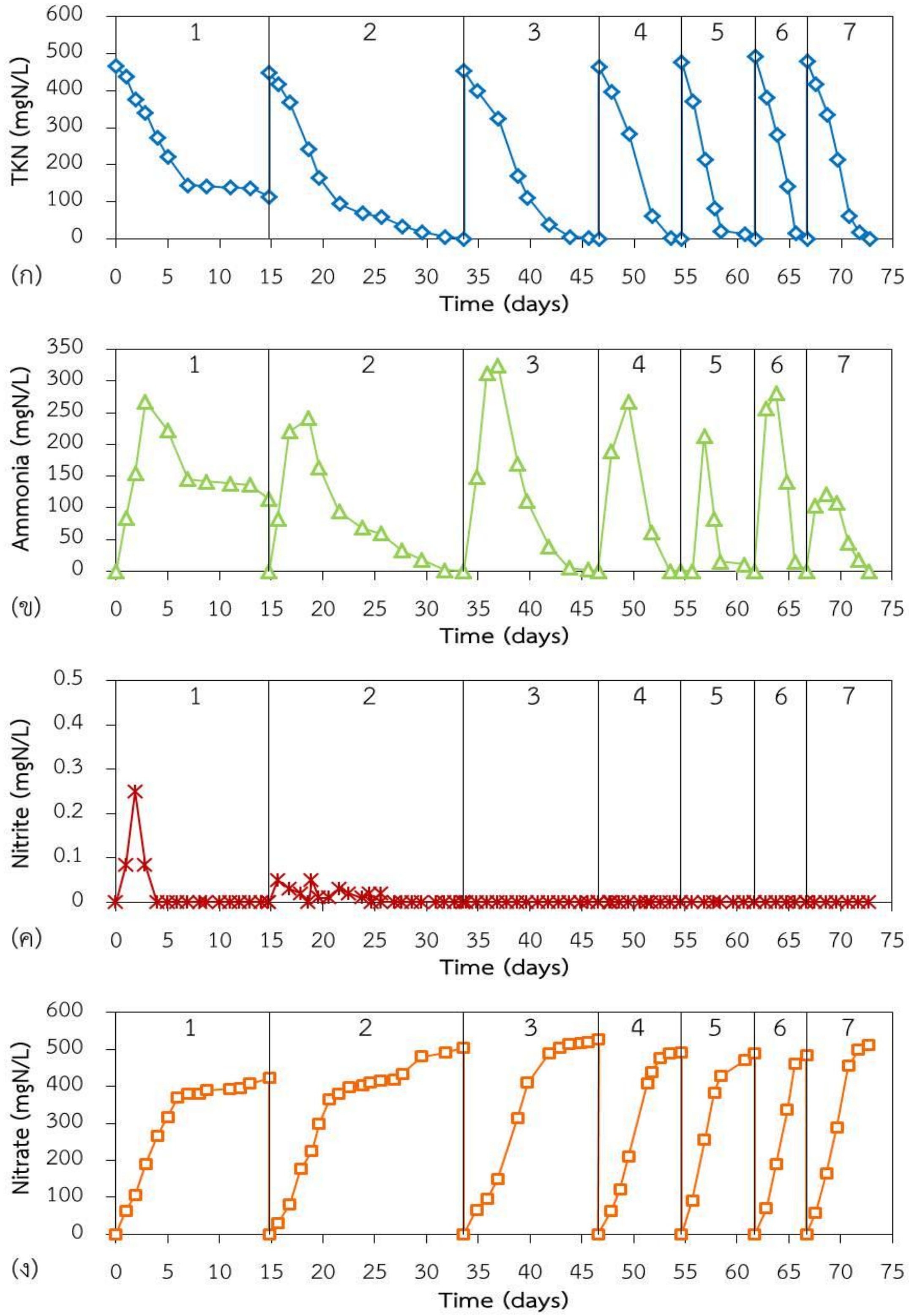
ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 7 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 73 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 5 6 และ 7 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่าการทดลองในรอบที่ 1 และ 2 มีฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสีย 80.00±7.07 และ 230.00±14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าในรอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากก่อนทำการทดลองช่วงที่ 1 ได้มีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพในน้ำเสียที่มีค่าพีเอช 7 ดังนั้นเมื่อลดพีเอชลงมาเป็น 6 ในการทดลองนี้ จึงทำให้ในการทดลองในรอบที่ 1 มีฟิล์มชีวภาพบางส่วนหลุดลอกออกมาในน้ำเสียมากกว่าปกติ และในวันสุดท้ายของการเดินระบบในรอบนี้เครื่องสูบน้ำพัง และมีกลิ่นไหม้ ซึ่งทำให้ระบบหยุดเดินหลายชั่วโมง จึงส่งผลให้การทดลองในรอบที่ 2 มีฟิล์มชีวภาพหลุดลอกออกมาในน้ำเสียปริมาณมากด้วย แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะปกติและฟิล์มชีวภาพสามารถปรับตัวกับน้ำเสียที่พีเอช 6 ได้ จะพบว่าในการทดลองตั้งแต่รอบที่ 3 เป็นต้นไป ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียหลังเดินระบบจะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก จากการวิเคราะห์ทีเคเอ็นและไนเตรท พบว่าการทดลองรอบที่ 1 ระบบเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ซึ่งยังไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดจึงเดินระบบต่อจนถึง 15 วัน แต่ทีเคเอ็นลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคงเหลือสะสมในระบบ 113.8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และสามารถเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทได้ 421.90 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเดินระบบต่อในรอบที่ 2 สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดโดยใช้เวลา 19 วัน และหลังจากนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดทีเคเอ็นสั้นลงเรื่อยๆ จนถึงรอบที่ 5 6 และ 7 ระบบเริ่มคงที่ โดยใช้เวลาในการบำบัดทีเอ็นจากความเข้มข้น 450-500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดคือ 7 5 และ 6 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ง)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

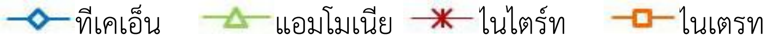
รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	80.00±7.07
2	0.00	230.00±14.14
3	0.00	47.50±10.61
4	0.00	25.00±7.07
5	0.00	22.50±3.54
6	0.00	11.67±2.89
7	0.00	1.25±0.35

ผลจากการวิเคราะห์แอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่ามีแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบสูงสุดไม่เกิน 350 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 7 มากในทุกรอบการทดลอง เนื่องจากที่พีเอช 6 นี้เป็นพีเอชต่ำ ทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียไม่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตร์ท ได้เร็วเท่าที่พีเอช 7 แต่แอมโมเนียเหล่านี้ก็ไม่ได้สะสมในระบบและสามารถสลายไปเป็นไนไตร์ทและไนไตรทได้อย่างรวดเร็ว ส่วนไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบน้อยมากสูงสุดเพียง 0.25 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.2 (ค) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละรอบไม่พบไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบ



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6



4.1.3 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 5 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 128 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 3 4 และ 5 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

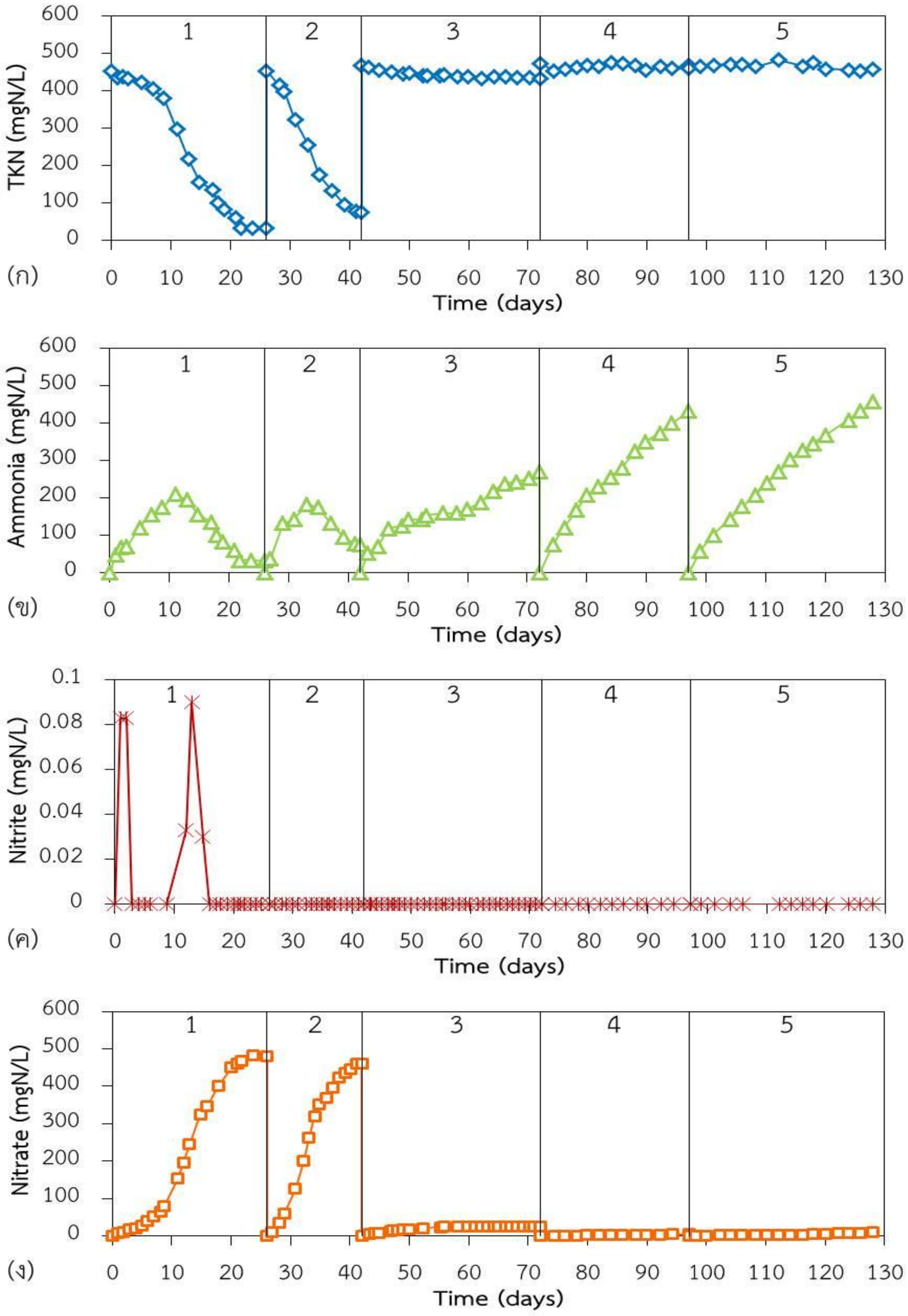
ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า การเดินระบบในรอบที่ 1 มีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียมากที่สุด คือ 192.50±10.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในรอบต่อมามีปริมาณลดน้อยลง ดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากก่อนเดินระบบมีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอช 7 ดังนั้นเมื่อทำการทดลองเดินระบบที่พีเอช 5 ซึ่งเป็นสภาวะพีเอชที่ค่อนข้างต่ำมากจึงทำให้ฟิล์มชีวภาพชั้นนอกที่สัมผัสกับน้ำเสียและไม่สามารถปรับตัวได้กับพีเอชที่ลดลงหลุดลอกออกมา แต่ยังมีฟิล์มชีวภาพบางส่วนที่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้อยู่แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะที่พีเอช 5 จึงทำให้ในการทดลองรอบที่ 1 และ 2 สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้เกือบทั้งหมด คงเหลืออยู่ในระบบ 32.20 และ 76.00 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 (ก) เมื่อถึงรอบที่ 3 ซึ่งเป็นการเดินระบบที่พีเอช 5 มาเป็นระยะเวลานานถึง 42 วัน จึงเหลือปริมาณฟิล์มชีวภาพที่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้น้อยลงเรื่อยๆ ทำให้ในรอบนี้ทีเคเอ็นสามารถเปลี่ยนเป็นไนเตรทได้น้อยลงคือมีปริมาณไนเตรทเกิดขึ้น 25 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนรอบที่ 4 และ 5 ไนเตรทเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยลงและใช้เวลานานมาก เมื่อเดินระบบผ่านไปประมาณ 30 วัน มีไนเตรทเกิดขึ้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.3 (ง) ซึ่งแตกต่างจากในงานวิจัยของ Burton และคณะ (2001) ในการทดลองที่ควบคุมพีเอช 5 สามารถบำบัดยูเรียไปเป็นไนไตรทได้ 40 เปอร์เซนต์ เนื่องจากได้มีการคัดเลือกไนตริฟายอิงแบคทีเรีย *Nitrosospira* สายพันธุ์ NPAV กับ *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 ซึ่ง *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 นี้เป็นแบคทีเรียทนกรดจึงสามารถบำบัดยูเรียไปเป็นไนเตรทได้ แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะที่พีเอชค่อนข้างต่ำมาก รวมถึงงานวิจัยของ De Boer และคณะ (1989) ก็ได้คัดเลือก *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 เช่นเดียวกันเลี้ยงรวมกับ *Nitrosospira* สายพันธุ์ NHB1 ที่พีเอช 5 สามารถบำบัดยูเรียไปเป็นไนเตรทได้ในปริมาณมาก

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำเสียเข้า	น้ำเสียออก
1	0.00	192.50±10.61
2	0.00	80.00±10.00
3	0.00	84.00±5.66
4	0.00	20.67±6.43
5	0.00	37.00±9.90

ผลจากการวิเคราะห์แอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่าในรอบที่ 1 และ 2 มีลักษณะคล้ายกับที่พีเอช 6 คือพบแอมโมเนียเกิดขึ้นและสะสมอยู่ในระบบปริมาณที่มากกว่าที่พีเอช 7 ดังรูปที่ 4.3 (ข) แต่พบไนไตร์ทในรอบที่ 1 เท่านั้น เกิดขึ้นสูงสุดเพียง 0.09 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.3 (ค) เมื่อเดินระบบมาถึงรอบที่ 3 4 และ 5 ยูเรียสามารถเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียได้ทั้งหมด แต่ใช้ระยะเวลานานถึง 30 วัน และไม่พบไนไตร์ทในระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

4.1.4 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 3 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 99 วัน ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

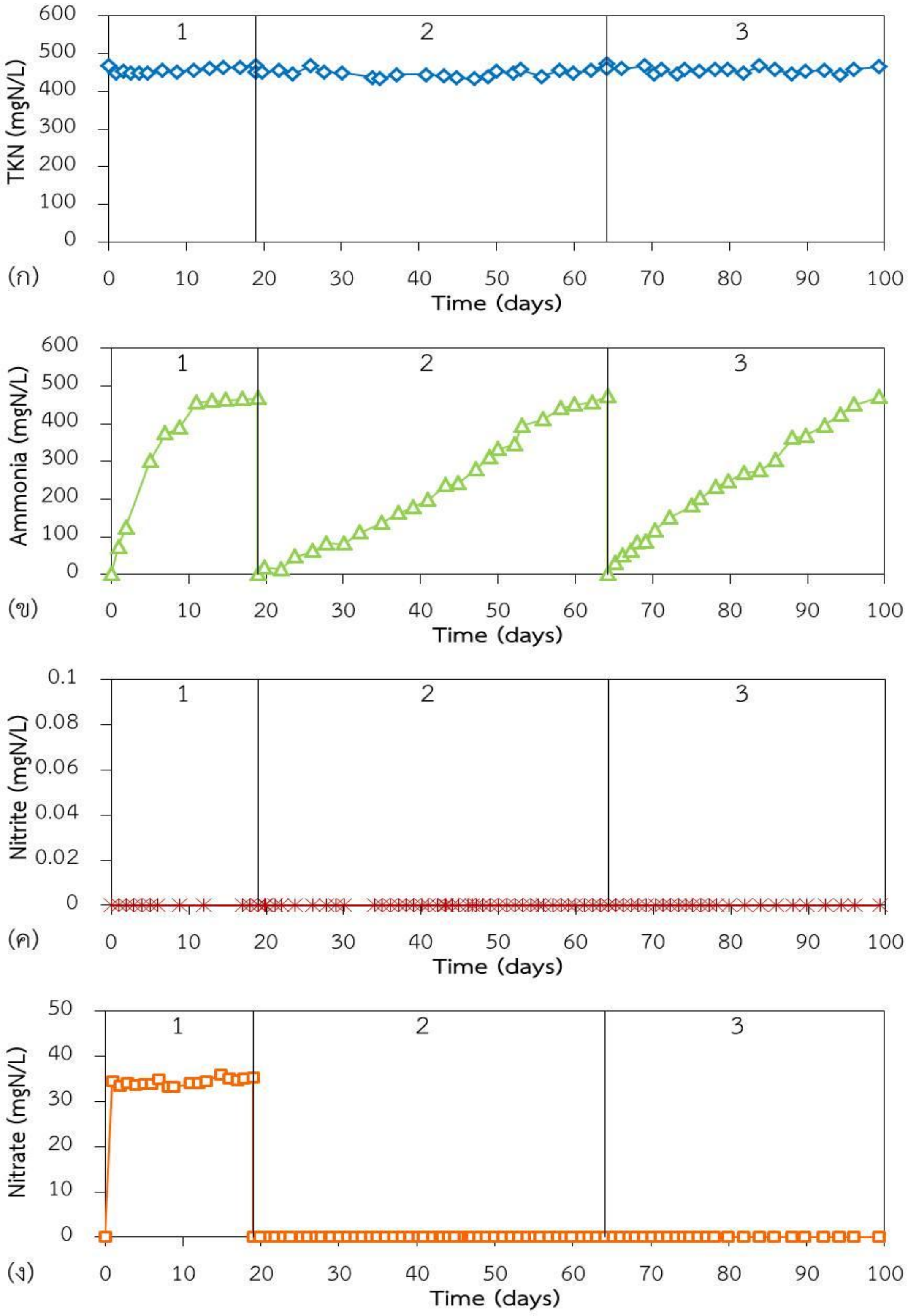
ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า การเดินระบบในรอบที่ 1 มีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียมากที่สุด คือ 520.00±28.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในรอบที่ 2 และ 3 มีปริมาณลดน้อยลง คือ 4.17±1.18 และ 5.00±4.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่พีเอช 5 ที่เนื่องมาจากก่อนเดินระบบมีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพในสภาวะที่พีเอช 7 เมื่อทำการเปลี่ยนน้ำเสียและเดินระบบจริงที่พีเอช 4 ที่เป็นสภาวะพีเอชที่ต่ำมากจึงทำให้ฟิล์มชีวภาพตายหลุดลอกออกมาในน้ำเสียปริมาณมาก และสามารถผลิตไนเตรทได้ในวันที่ 1 ที่ทำการเดินระบบเท่านั้น โดยมีไนเตรทเกิดขึ้นประมาณ 35 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร หลังจากนั้นคงที่ตลอดการทดลองไม่มีการผลิตไนเตรทเพิ่มขึ้น ส่วนในรอบที่ 2 และ 3 ทีเคเอ็นมีค่าคงที่และไม่มีไนเตรทเกิดขึ้นตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ง) สอดคล้องกับในงานวิจัยของ De Boer และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาโดยตรึงเซลล์แบคทีเรีย *Nitrosospira* สายพันธุ์ NPAV และ *Nitrobacter* สายพันธุ์ NHB1 ไว้ในเม็ดแคลเซียมแอลจิเนต และศึกษาในเซลล์แขวนลอยด้วย ที่พีเอช 4 พบว่า ไม่เกิดการผลิตไนเตรทขึ้น ทั้งในเซลล์ที่ถูกตรึงไว้ในแคลเซียมแอลจิเนตและเซลล์แขวนลอย ถึงแม้ว่าจะใช้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ทนกรดแล้วก็ตาม ซึ่งจากงานวิจัยของ De Boer และคณะ (1989) พบว่าถ้าพีเอชสูงขึ้นเป็น 4.5 จะสามารถผลิตไนตรทได้แต่ใช้ระยะเวลานานและเกิดไนเตรทในปริมาณที่น้อย แต่ในงานวิจัยของ Hanada และคณะ (2014) สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ที่พีเอชต่ำกว่า 4 ได้ โดยทำการศึกษาในถัง acidophilic nitrifying sequencing-batch reactors (ANSBRs) ในอาหารที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ 107 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นที่ 4 พบว่าในแต่ละรอบการทดลองค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.7-4.0 และอัตราไนตริฟิเคชันมีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	520.00±28.28
2	0.00	4.17±1.18
3	0.00	5.00±4.24

เมื่อวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่ายูเรียจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียจนหมดแต่จะใช้เวลานาน โดยที่ในรอบแรกจะใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 19 วัน ในรอบที่ 2 และ 3 ใช้เวลานานมากกว่า 30 วัน ดังรูปที่ 4.4 (ข) ส่วนไนไตร์ทไม่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.4 (ค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

4.1.5 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 5 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 60 วัน ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า การเดินระบบในรอบที่ 1 มีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับชุดทดลองทั้ง 4 ชุดที่ผ่านมา โดยในรอบที่ 1 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นเพียง 37.50±3.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำเสียเข้า	น้ำเสียออก
1	0.00	37.50±3.54
2	0.00	22.50±3.54
3	0.00	4.25±2.47
4	0.00	10.00±2.83
5	0.00	12.50±3.54

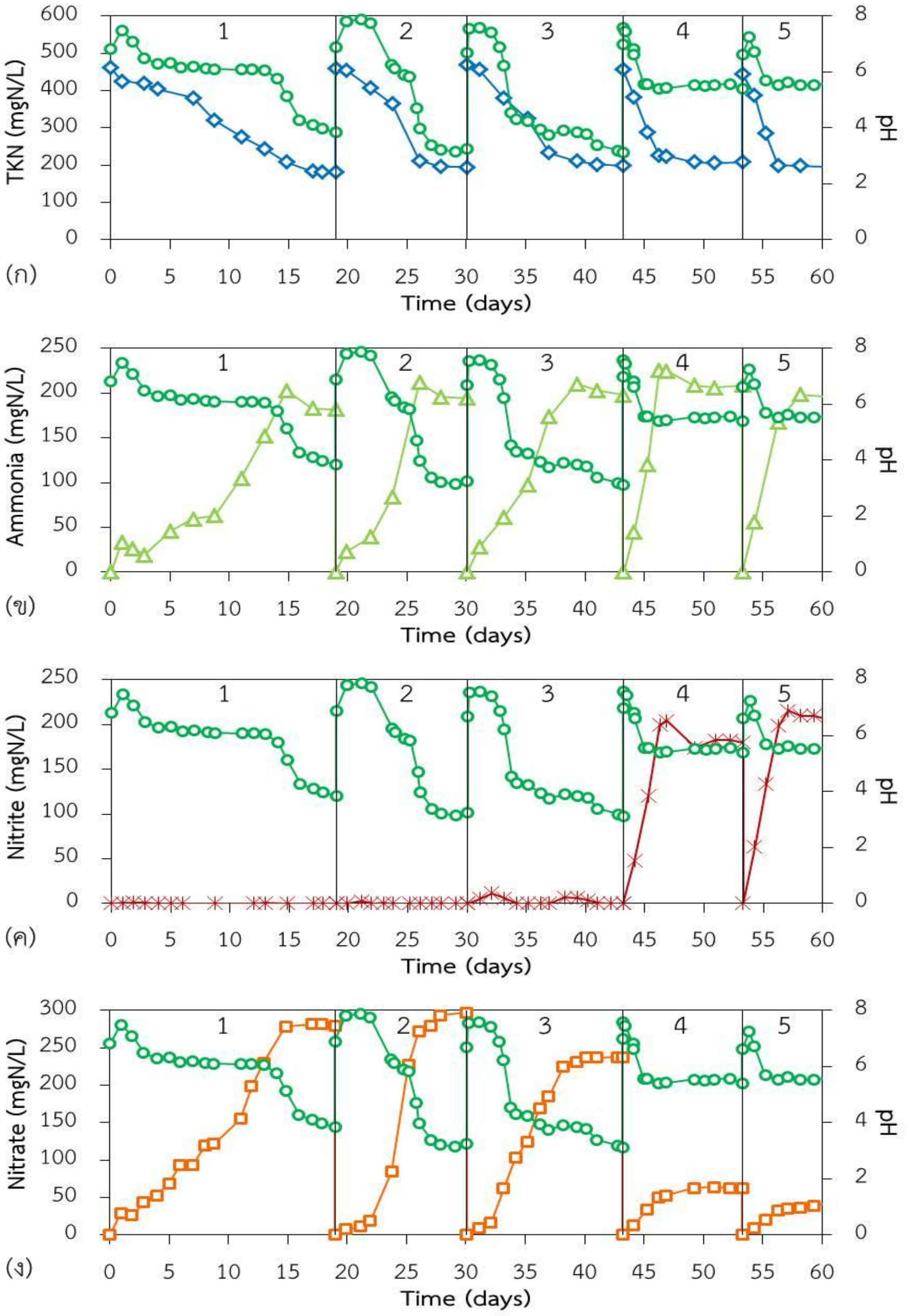
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การเดินระบบในช่วงแรกของแต่ละรอบการทดลองของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชนี้ พีเอชจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการที่ยูเรียเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียซึ่งก็คือปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันจะปล่อยด่างออกมาทำให้พีเอชในน้ำเพิ่มสูงขึ้น และหลังจากนั้นเมื่อแอมโมเนียถูกเปลี่ยนเป็นไนไตร์ทและไนเตรท พีเอชจะค่อยๆ ลดลงจนระบบคงที่ จากรูปที่ 4.5 (ก) จะพบว่า ในทุกรอบการทดลองทีเคเอ็นลดลงไปมากกว่า 50 เปอร์เซนต์ของทีเคเอ็นเริ่มต้น แต่ในการทดลองรอบที่ 1 2 และ 3 ทีเคเอ็นที่ลดลงไปสามารถเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมด คือมีไนเตรทเกิดขึ้น 270.00 297.40 และ 237.90 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 (ง) โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ที่ประมาณ 7 และพีเอชสุดท้ายที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อยู่ที่ประมาณ 3-4 ซึ่งพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้จนถึงพีเอชที่ต่ำกว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาของ De Boer และคณะ (1989), Burton และคณะ (2001) และ Tarre

และ Green (2004) โดยได้ทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 7 ไม่มีการควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้จนถึงที่พีเอช 4.8 5.9 และ 4.3 ตามลำดับ ส่วนในการทดลองรอบที่ 4 และ 5 จะพบว่ามีไนเตรทเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก คือ 62.33 และ 42.20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ และพีเอชสุดท้ายที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อยู่ที่ประมาณ 5.5 เนื่องจากทีเคเอ็นที่ลดลงไม่ได้เปลี่ยนเป็นไนเตรททั้งหมดแต่เปลี่ยนไปเป็นไนไตร์ทปริมาณที่สูงถึง 200 มิลิลกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.5 (ค) ซึ่งถ้ามีไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบมากจะมีความเป็นพิษต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย จึงทำให้ยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตได้ จากการวิเคราะห์แอมโมเนีย พบว่าในทุกรอบการทดลองระบบจะเริ่มคงที่เมื่อยูเรียเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียจนหมด ดังรูปที่ 4.5 (ข) สอดคล้องกับในงานวิจัยของ Burton และคณะ (2001) ที่ระบุไว้ว่าในชุดที่ไม่ได้มีการควบคุมพีเอชปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลงเมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียเกิดขึ้นสมบูรณ์

ผลจากการทดลองในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชนี้ แสดงให้เห็นว่า ถ้าไม่มีการควบคุมพีเอชในการเดินระบบในถังโปรยกรองเพื่อบำบัดทีเคเอ็น จะทำให้ไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้ในระยะยาวดังผลที่กล่าวไปข้างต้นที่พบว่าเมื่อเดินระบบไปจนถึงรอบที่ 4 และ 5 มีไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบปริมาณมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมพีเอชให้เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท พีเอช

4.1.6 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield)

เมื่อนำค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยตั้งแต่รอบที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มคงที่เทียบกับปริมาณทีเคเอ็นที่ใช้ไปในแต่ละรอบจะสามารถหาค่ายีลด์ได้ ดังตารางที่ 4.6 โดยที่พีเอช 7 ปริมาณของแข็งแขวนลอยจะเริ่มคงที่ในรอบที่ 3 ถึง 10 ส่วนที่พีเอช 6 จะเริ่มคงที่ในรอบที่ 4 ถึง 7 โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 และ 7 มีค่ายีลด์เท่ากับ 0.032±0.023 และ 0.040±0.017 กรัมเอสเอสต่อกรัมไนโตรเจน ตามลำดับ เมื่อนำค่ายีลด์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ดังตารางที่ 4.7 จะพบว่าโดยปกติแล้วในสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในระบบเจริญเติบโตแบบแขวนลอยจะมีค่ายีลด์อยู่ที่ 0.1-0.15 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนโตรเจน (Tchobanoglous และคณะ, 2004) รวมถึงในงานวิจัยของ Blackburne และคณะ (2007) ก็ได้ทำการศึกษาในระบบเจริญเติบโตแบบแขวนลอยเช่นกันพบว่ามีค่ายีลด์อยู่ในช่วง 0.14-0.18 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนโตรเจน จะเห็นว่ามีค่ายีลด์สูงกว่าในงานวิจัยนี้มาก เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เดินระบบในถังโปรยกรองซึ่งเป็นระบบแบบมีฟิล์มชีวภาพเกาะติดอยู่กับตัวกลาง รวมถึงผลจากการที่ในระบบมียูเรียความเข้มข้นที่สูงมากถึง 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นพิษต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย จึงส่งผลทำให้ในระบบมีของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียน้อยกว่าตามไปด้วย และผลที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าที่พีเอช 6 มีค่ายีลด์ที่ต่ำกว่าพีเอช 7 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Blackburne และคณะ (2007) ที่ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6.8 6.9 7.0 และ 7.1 พบว่า ค่ายีลด์จะเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น แต่ผลที่ได้จากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5 ไม่นำมาคิดเพราะไม่เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในภายหลัง รวมถึงที่พีเอช 4 และชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield)

Batch	pH 7			pH 6		
	SS (mg/L)	TKN ที่ใช้ไป (mg-N/L)	Yield (gSS/gN)	SS (mg/L)	TKN ที่ใช้ไป (mg-N/L)	Yield (gSS/gN)
1	1,113.33±50.33	437.50		80.00±7.07	351.75	
2	613.33±20.82	380.00		230.00±14.14	448.00	
3	22.50±10.80	415.80	0.054	47.50±10.61	452.76	
4	21.67±5.85	390.25	0.056	25.00±7.07	465.00	0.053
5	8.33±4.71	484.75	0.017	22.50±3.54	476.00	0.047
6	18.57±2.02	469.35	0.040	11.67±2.89	492.45	0.024
7	12.14±3.03	447.30	0.027	1.25±0.35	479.85	0.003
8	13.00±4.24	463.05	0.028			
9	14.00±5.66	454.35	0.031			
10	29.00±7.07	452.55	0.064			
Yield	0.040±0.017			0.032±0.023		

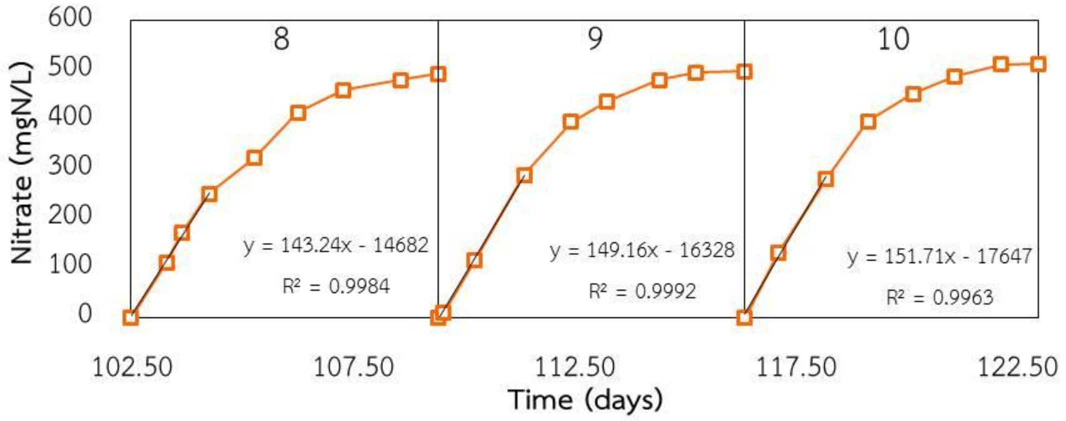
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 และ 6 ของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน	Yield (gSS/gN)	Yield (gVSS/gN)	
	งานวิจัยนี้ (2017) (TKN 500 mgN/L)	Tchobanoglous และคณะ (2004)	Blackburne และคณะ (2007) (TKN 48.7 mgN/L)
พีเอช 6.0	0.032±0.023	-	-
พีเอช 6.8	-	-	0.14±0.005
พีเอช 6.9	-	-	0.15±0.005
พีเอช 7.0	0.040±0.017	0.1-0.15	0.15±0.005
พีเอช 7.1	-	-	0.18±0.007

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

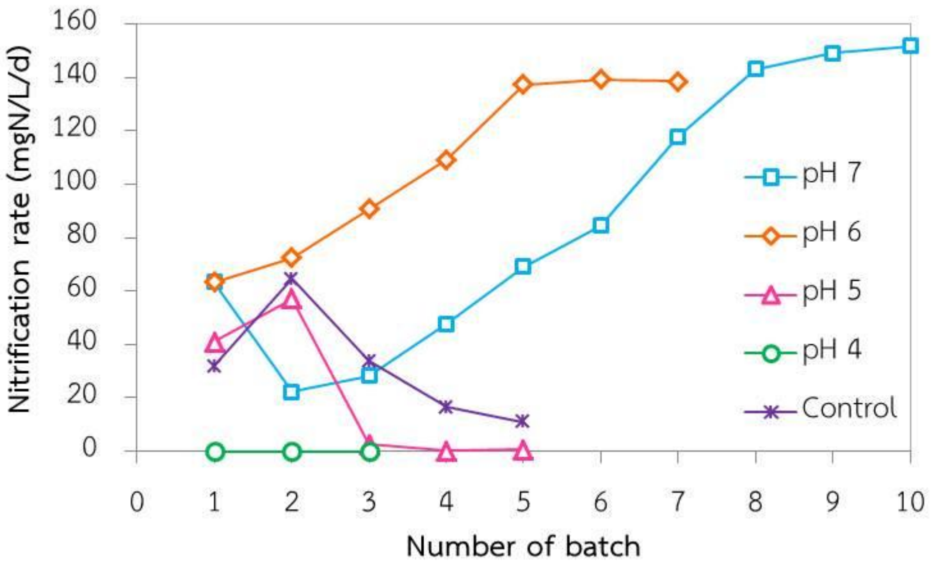
4.1.7 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของพีเอช

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียไปเป็นไนไตร์ท และไนไตร์ทไปเป็นไนเตรท ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราไนตริฟิเคชันได้จากค่าความชันเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรงของกราฟความเข้มข้นของไนเตรทเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด ดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการหาอัตราไนตริฟิเคชันในการทดลองรอบที่ 8 9 และ 10 ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 ซึ่งระยะเวลาที่เป็นเส้นตรงจะอยู่ในช่วง 2 วันแรกของการทดลอง โดยมีอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 143.24 149.16 และ 151.71 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Prinčič และคณะ (1998) ที่ได้ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะที่พีเอช 7-8 และมีความเข้มข้นของออกซิเจน 20 เปอร์เซนต์ พบว่ามีอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 174 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน



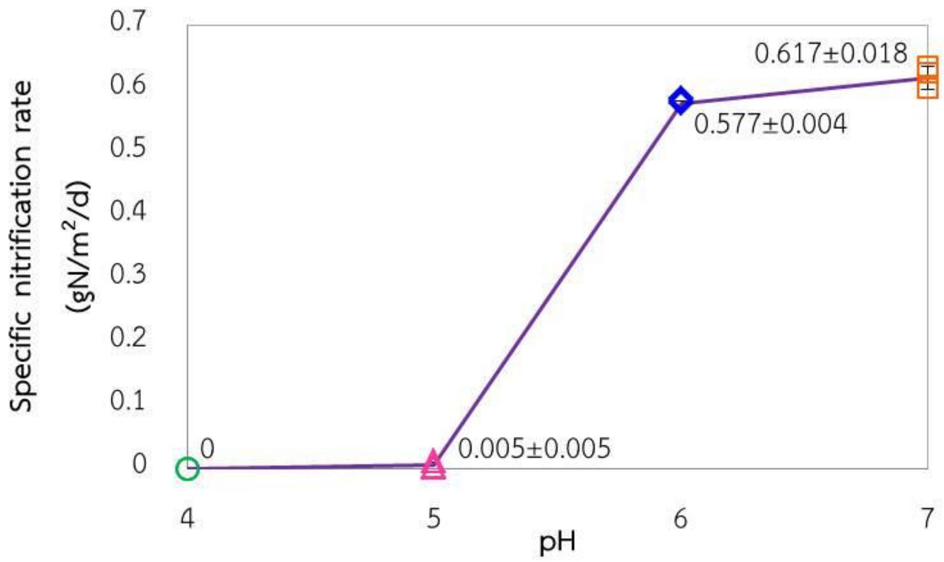
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการหาอัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 ในรอบที่ 8 9 และ 10

เมื่อหาอัตราไนตริฟิเคชันในทุกรอบของการทดลองจะพบว่าที่พีเอช 7 อัตราไนตริฟิเคชันตั้งแต่รอบที่ 2 เป็นต้นไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการทดลองจนเริ่มคงที่ในรอบที่ 8 9 และ 10 ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่พีเอช 6 เล็กน้อย โดยอัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่พีเอช 7 และเริ่มคงที่ในรอบที่ 5 6 และ 7 มีค่าอยู่ที่ 137.43 139.41 และ 138.62 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 5 และในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช พบว่าในรอบที่ 2 อัตราไนตริฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้นจากรอบที่ 1 แต่เมื่อเดินระบบต่อในรอบที่ 3 4 และ 5 มีค่าลดลงจนคงที่ โดยที่พีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 2.53 0.17 และ 0.55 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ และในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชมีค่าลดลงมาจนถึง 10.94 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน และสุดท้ายที่พีเอช 4 ไม่มีไนเตรทเกิดขึ้น



รูปที่ 4.7 อัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7 6 5 4 และชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

เมื่อนำอัตราไนตริฟิเคชันจาก 3 รอบการทดลองที่ระบบคงที่ของชุดทดลองทั้ง 4 ชุด มาหาอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะโดยนำค่าอัตราไนตริฟิเคชันของรอบการทดลองที่พีเอชคงที่เทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกลาง ที่พีเอช 7 พบว่ามีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 0.617±0.018 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน รองลงมาคือที่พีเอช 6 มีค่าเท่ากับ 0.577±0.004 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่พีเอช 7 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนที่พีเอช 5 และ 4 มีค่าน้อยมาก คือ 0.005±0.005 และ 0 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตร ต่อวัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bovendeur (1989) ที่ได้ทำการศึกษาในระบบโปรยกรองที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 4-5 กรัมต่อวัน พบว่า พีเอชที่ลดลงมีผลทำให้ฟิล์มชีวภาพมีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะที่ลดลงตามไปด้วย โดยได้ทำการทดลองที่พีเอช 6 7 และ 8 มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะอยู่ที่ 0.2 0.56 และ 0.71 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าอัตราไนตริฟิเคชันที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่างานวิจัยของ Bovendeur (1989) เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.8 อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยที่พีเอช 7 6 5 และ 4

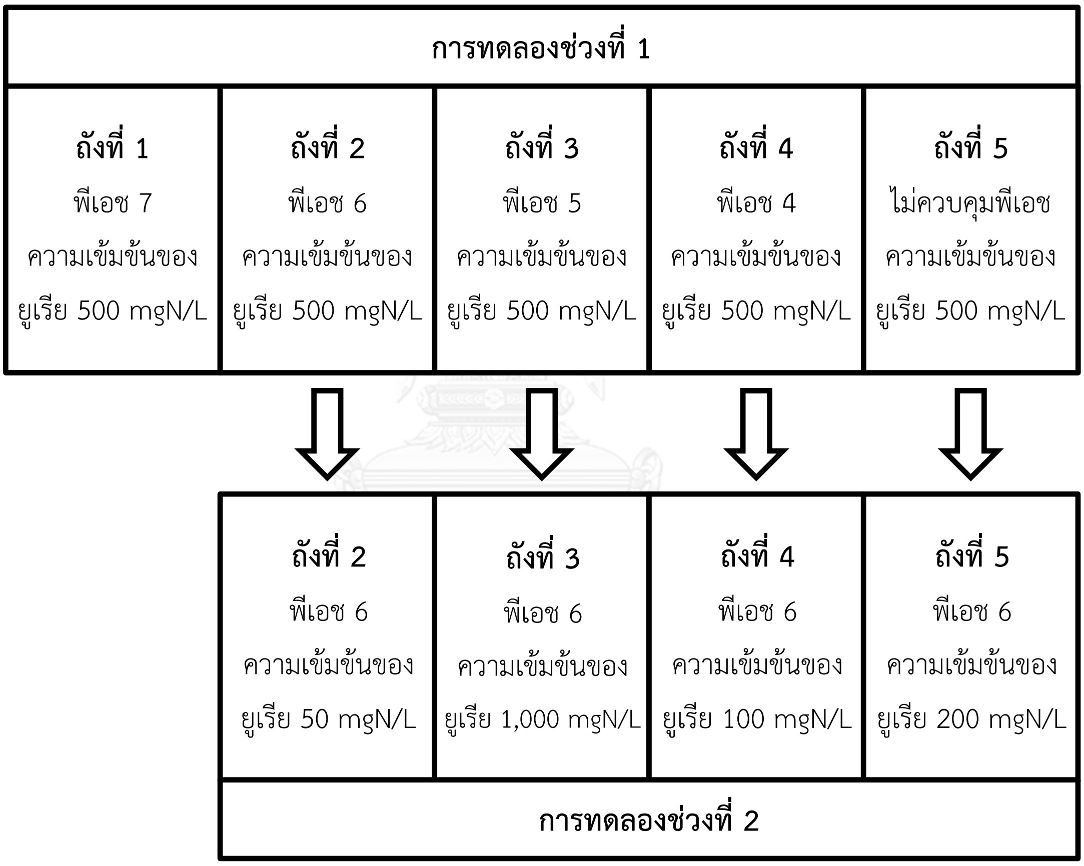
ตารางที่ 4.8 อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ยที่ได้จากงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น

พีเอช	**อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะ (g-N/m^2/d)**	
	งานวิจัยนี้ (2017)	**Bovendeur (1989)**
4	0.000±0.000	-
5	0.005±0.005	-
6	0.577±0.004	0.20±0.10
7	0.617±0.018	0.56±0.09
8	-	0.71±0.06

ดังนั้น พีเอชต่ำที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เดินระบบในการทดลองช่วงที่ 2 เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำ คือพีเอช 6 เนื่องจากมีอัตราไนตริฟิเคชันที่ใกล้เคียงกับที่พีเอช 7 ซึ่งเป็นสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย และที่พีเอช 6 นี้ยังทำให้แอมโมเนียอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออนที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Gay และ Knowlton, 2005) จึงลดปัญหาการเกิดกลิ่นของก๊าซแอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียได้

4.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

ในการทดลองช่วงนี้ได้ทำการศึกษาโดยเดินระบบในถังโปรยกรองจำนวน 5 ชุด ซึ่งในแต่ละชุดจะมีความเข้มข้นของยูเรียแตกต่างกัน คือ 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และควบคุมพีเอชเป็น 6 ซึ่งเป็นค่าพีเอชต่ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 โดยถังโปรยกรองที่ใช้ในการทดลองช่วงนี้ได้เดินระบบต่อจากการทดลองช่วงที่ 1 ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สภาวะในถังโปรยกรองที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

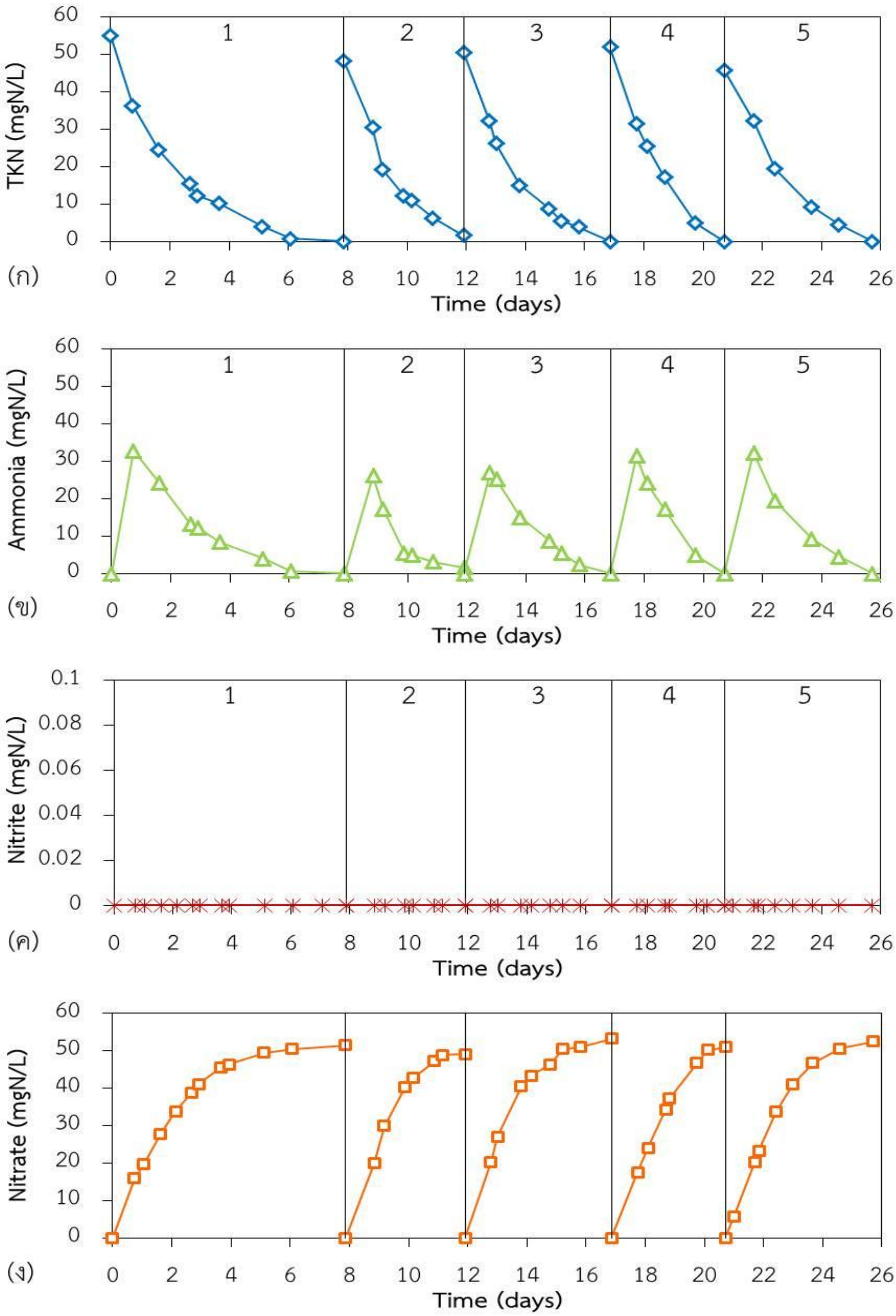
4.2.1 ความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 5 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 26 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ตั้งแต่รอบที่ 2 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า ในแต่ละรอบการทดลองมีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียปริมาณน้อยและมีค่าไม่แตกต่างกันมาก อยู่ในช่วง 7-12 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.9 โดยในรอบที่ 1 จะใช้เวลาในการเดินระบบนานที่สุดคือ 8 วัน เนื่องจากความเข้มข้นของยูเรียที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเดินระบบในรอบที่ผ่านมาของการทดลองที่ 1 ที่ใช้ยูเรียที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร แต่เมื่อไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่อยู่ในฟิล์มชีวภาพสามารถปรับตัวได้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของยูเรียที่ลดลง 10 เท่า จึงทำให้ในรอบที่ 2 3 4 และ 5 ใช้เวลาในการเดินระบบสั้นลง คือประมาณ 4-5 วัน ดังรูปที่ 4.10 (ก) และ (ง) ซึ่งจะพบว่าระบบเริ่มคงที่ตั้งแต่รอบที่ 2 ของการทดลอง และสามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อนำมาวิเคราะห์แอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่า ยูเรียสามารถเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียได้ทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 1 ของทุกรอบการทดลอง ดังรูปที่ 4.10 (ข) และไม่พบไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบในทุกรอบการทดลอง ดังรูปที่ 4.10 (ค)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

รอบที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำเสียเข้า	น้ำเสียออก
1	0.00	11.43±2.86
2	0.00	7.14±1.17
3	0.00	8.57±2.02
4	0.00	9.29±3.03
5	0.00	7.62±2.97



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

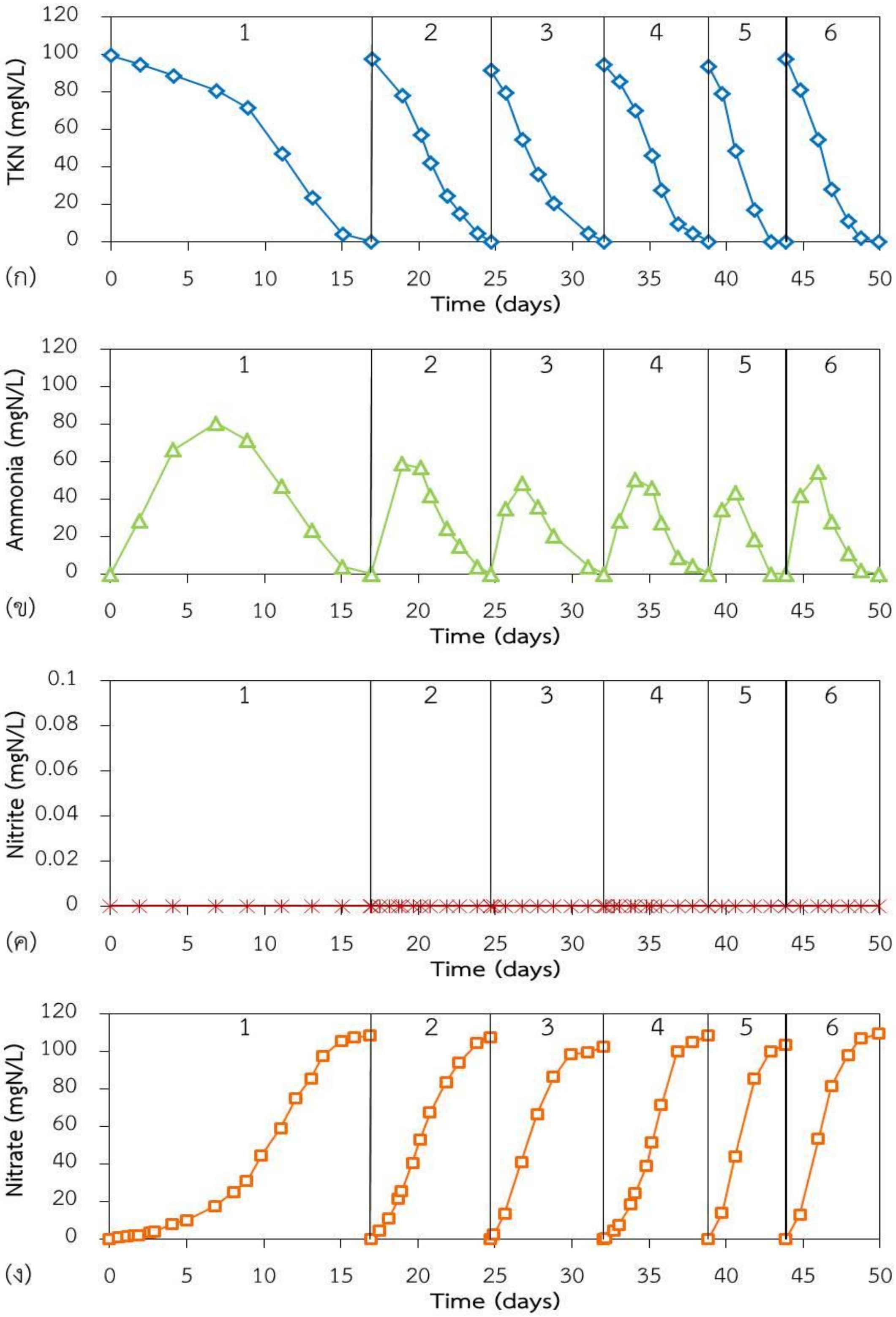
4.2.2 ความเข้มข้นของยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 6 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 50 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 4 5 และ 6 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า ในแต่ละรอบการทดลองมีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียมีค่าไม่แตกต่างกันมาก อยู่ในช่วง 11-32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.10 โดยในรอบที่ 1 ใช้เวลาในการเดินระบบนานถึง 17 วัน จึงสามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 4.11 (ก) และ (ง) จะเห็นว่าในช่วง 9 วันแรกของการเดินระบบในรอบที่ 1 ทีเคเอ็นจะค่อยๆ ลดลงสัมพันธ์กับไนเตรทที่ค่อยๆ เกิดขึ้น ซึ่งในระยะนี้คือช่วงปรับตัวของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (lag phase) ที่ปรับตัวกับน้ำเสียใหม่ที่มีความเข้มข้นของยูเรียลดลง 5 เท่า และพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นจากเดิมพีเอช 4 เป็นพีเอช 6 จึงส่งผลให้ในวันที่ 7 พบว่ายูเรียเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียได้จนหมดและสะสมอยู่ในระบบสูงถึง 80.75 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.11 (ข) เมื่อไนตริฟายอิงแบคทีเรียปรับตัวได้จึงทำให้ตั้งแต่วันที่ 9 เป็นต้นไปมีไนเตรทเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (exponential phase) และทีเคเอ็นก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน การทดลองในรอบต่อมาจึงใช้ระยะเวลาในการบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทสั้นลงเรื่อยๆ จนใช้เวลาสั้นที่สุดเพียง 5 วันเท่านั้น โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 4 5 และ 6 ส่วนแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในรอบอื่นๆ พบว่า ใช้เวลาเพียง 2 วัน ยูเรียก็สามารถเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้จนหมด โดยมีแอมโมเนียสะสมอยู่ในระบบระหว่างการทดลองไม่เกิน 60 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และไม่พบไนไตร์ทตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.11 (ค)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	25.71±1.17
2	0.00	18.35±6.27
3	0.00	23.87±4.46
4	0.00	11.04±10.10
5	0.00	14.94±4.59
6	0.00	32.00±22.63



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

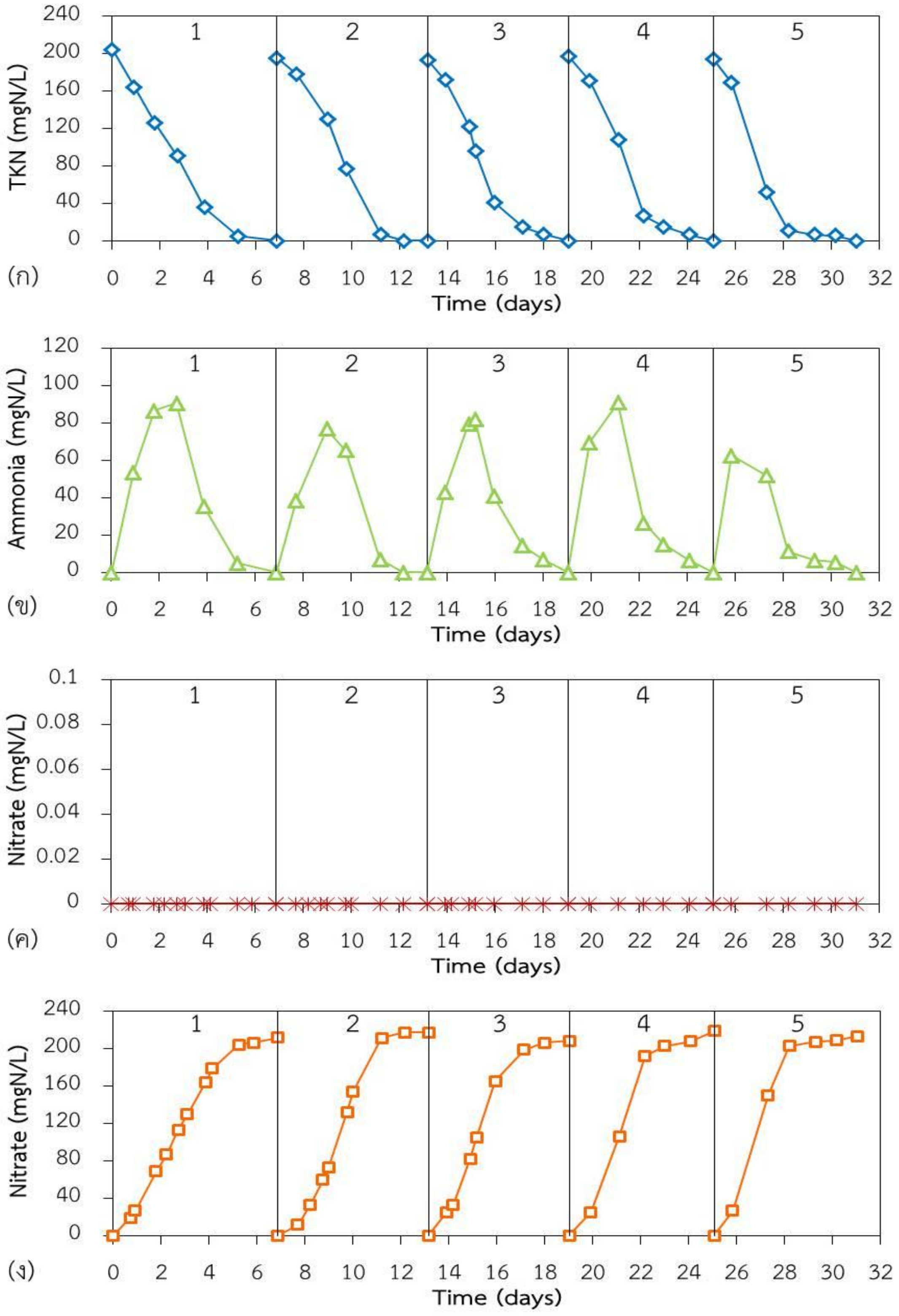
4.2.3 ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 5 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 31 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 4 5 และ 6 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า มีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร โดยในแต่ละรอบการทดลองมีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียมีค่าไม่แตกต่างกันมาก อยู่ในช่วง 6-23 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.11 เมื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ พบว่าในแต่ละรอบการทดลองใช้เวลาในการเดินระบบไม่แตกต่างกัน โดยในรอบที่ 1 ใช้เวลานานที่สุด คือ 7 วัน ซึ่งมากกว่ารอบอื่นๆ ที่ใช้เวลาในการเดินระบบ 5-6 วัน ก็สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้จนหมด ดังรูปที่ 4.12 (ก) และ (ง) จะเห็นว่าความเข้มข้นของทีเคเอ็นที่ลดลงและไนเตรทที่เกิดขึ้นรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบของรอบที่ 1 มีลักษณะแตกต่างกับรอบต่อมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่เหมือนดังเช่นการทดลองที่ความเข้มข้นของยูเรีย 50 และ 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องจากการเดินระบบในรอบที่ผ่านมาใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของยูเรียต่างกันไม่มาก คือสูงกว่าการทดลองนี้เพียง 2.5 เท่า และพีเอชที่ใช้ในการเดินระบบในรอบที่แล้วมาจากชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช ซึ่งสามารถบำบัดทีเคเอ็นได้มากกว่า 50 เปอร์เซนต์ของทีเคเอ็นเริ่มต้นแต่ด้วยพีเอชที่ต่ำลงมาถึง 5.5 ทำให้ไปสะสมอยู่ที่ไนไตร์ทปริมาณมากและยับยั้งการทำงานของระบบ เมื่อเดินระบบต่อในการทดลองนี้ที่พีเอชสูงขึ้นคือพีเอช 6 จึงทำให้สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนแอมโมเนียและไนไตร์ทที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่า ในทุกรอบการทดลอง ยูเรียสามารถเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียได้จนหมดภายใน 2-3 วัน ดังรูปที่ 4.12 (ข) และไม่พบไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.12 (ค)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	22.86±6.23
2	0.00	6.67±2.18
3	0.00	11.43±2.02
4	0.00	16.77±5.47
5	0.00	10.71±3.03



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท
ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

4.2.4 ความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

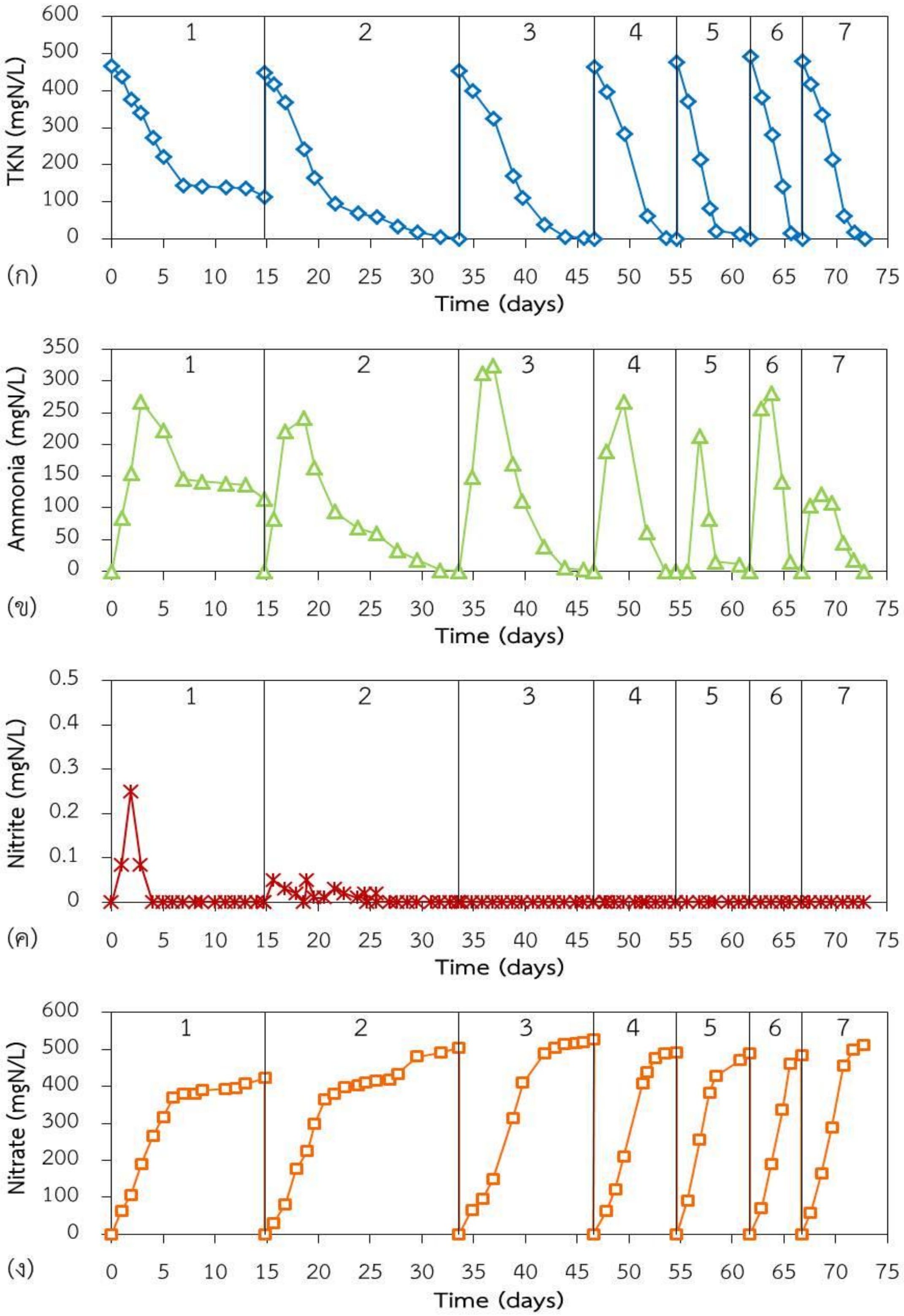
ใช้ผลการทดลองจากการทดลองในช่วงที่ 1 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 7 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 73 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 5 6 และ 7 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบพบว่า การทดลองในรอบที่ 1 และ 2 มีฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสีย 80.00±7.07 และ 230.00±14.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าในรอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.12 เนื่องจากก่อนทำการทดลองช่วงที่ 1 ได้มีการเลี้ยงฟิล์มชีวภาพในน้ำเสียที่มีค่าพีเอช 7 ดังนั้นเมื่อลดพีเอชลงมาเป็น 6 ในการทดลองนี้ จึงทำให้ในการทดลองในรอบที่ 1 มีฟิล์มชีวภาพบางส่วนหลุดลอกออกมาในน้ำเสียมากกว่าปกติ และในวันสุดท้ายของการเดินระบบในรอบนี้เครื่องสูบน้ำพังและมีกลิ่นไหม้ ซึ่งทำให้ระบบหยุดเดินหลายชั่วโมง จึงส่งผลให้การทดลองในรอบที่ 2 มีฟิล์มชีวภาพหลุดลอกออกมาในน้ำเสียปริมาณมากด้วย แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะปกติและฟิล์มชีวภาพสามารถปรับตัวกับน้ำเสียที่พีเอช 6 ได้ จะพบว่าในการทดลองตั้งแต่รอบที่ 3 เป็นต้นไป ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียหลังเดินระบบจะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก จากการวิเคราะห์ทีเคเอ็นและไนเตรทพบว่าการทดลองรอบที่ 1 ระบบเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ซึ่งยังไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดจึงเดินระบบต่อจนถึง 15 วัน แต่ทีเคเอ็นลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคงเหลือสะสมในระบบ 113.8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และสามารถเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทได้ 421.90 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเดินระบบต่อในรอบที่ 2 สามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดโดยใช้เวลา 19 วัน และหลังจากนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดทีเคเอ็นสั้นลงเรื่อยๆ จนถึงรอบที่ 5 6 และ 7 ระบบเริ่มคงที่ โดยใช้เวลาในการบำบัดทีเอ็นจากความเข้มข้น 450-500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรไปเป็นไนเตรทได้ทั้งหมดคือ 7 5 และ 6 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ง)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	80.00±7.07
2	0.00	230.00±14.14
3	0.00	47.50±10.61
4	0.00	25.00±7.07
5	0.00	22.50±3.54
6	0.00	11.67±2.89
7	0.00	1.25±0.35

ผลจากการวิเคราะห์แอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่ามีแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบสูงสุดไม่เกิน 350 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.13 (ข) ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 7 มากในทุกรอบการทดลอง เนื่องจากที่พีเอช 6 นี้เป็นพีเอชต่ำ จึงทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียไม่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตร์ท และเปลี่ยนไนตร์ทไปเป็นไนเตรทได้เร็วเท่าที่พีเอช 7 แต่แอมโมเนียเหล่านี้ก็ไม่ได้สะสมในระบบและสามารถสลายไปเป็นไนไตร์ทและไนไตรทได้อย่างรวดเร็ว ส่วนไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบน้อยมากสูงสุดเพียง 0.25 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.13 (ค) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละรอบไม่พบไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบ



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท ไนเตรท

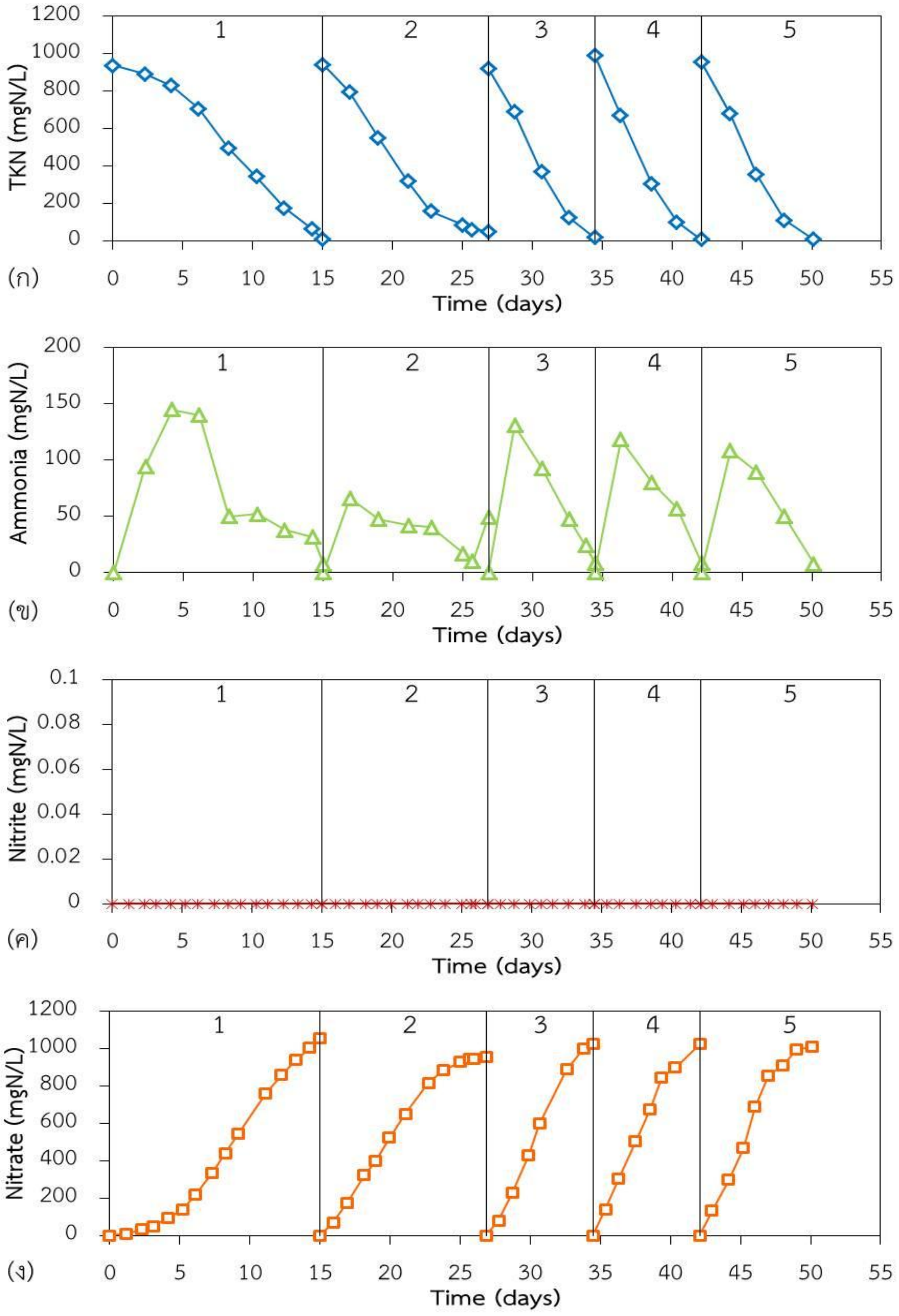
4.2.5 ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ในการทดลองนี้ได้ทำการเดินระบบเป็นจำนวน 5 รอบการทดลอง ใช้เวลาในการเดินระบบทั้งหมด 35 วัน โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 3 4 และ 5 ผลการจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระบบมีดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า การทดลองในรอบที่ 1 และ 2 มีปริมาณฟิล์มชีวภาพที่หลุดลอกออกมาในน้ำเสียใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 4.13 แต่ในรอบที่ 3 4 และ 5 มีค่าแตกต่างไปคือสูงกว่าประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาในการเดินระบบที่สั้นกว่าเช่นกัน โดยในรอบที่ 1 ใช้เวลาในการเดินระบบนานถึง 15 วัน เนื่องจากในช่วง 5 วันแรกของการทดลองเป็นช่วงที่ไนตริฟายอิงแบคทีเรียปรับตัวกับน้ำเสียใหม่ (lag phase) ที่มีความเข้มข้นที่เพิ่งสูงขึ้น 2 เท่าและพีเอชที่เพิ่มขึ้นจากเดิมพีเอช 5 เป็นพีเอช 6 โดยมีไนเตรทเกิดขึ้นเพียง 137.6 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อแบคทีเรียปรับตัวได้แล้วจะสามารถบำบัดทีเคเอ็นไปเป็นไนเตรทได้อย่างรวดเร็ว (exponential phase) จนถึงวันที่ 15 มีไนเตรทเกิดขึ้นถึง 1,056 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีทีเคเอ็นคงเหลือในระบบเพียง 7.3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ง) เมื่อวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียและไนไตร์ท พบว่าในระหว่างเดินระบบมีแอมโมเนียสะสมอยู่ในระบบสูงสุดไม่เกิน 150 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร แสดงว่า ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ยูเรียเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียได้ช้ากว่าการที่ไนตริฟายอิงแบคทีเรียออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตร์ทและไนเตรท ดังรูปที่ 4.14 (ข) ส่วนไนไตร์ทไม่พบตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.14 (ค)

ตารางที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

รอบที่	**ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	น้ำเสียเข้า	**น้ำเสียออก**
1	0.00	6.30±3.74
2	0.00	6.58±4.07
3	0.00	16.28±6.47
4	0.00	15.98±5.79
5	0.00	12.59±10.62

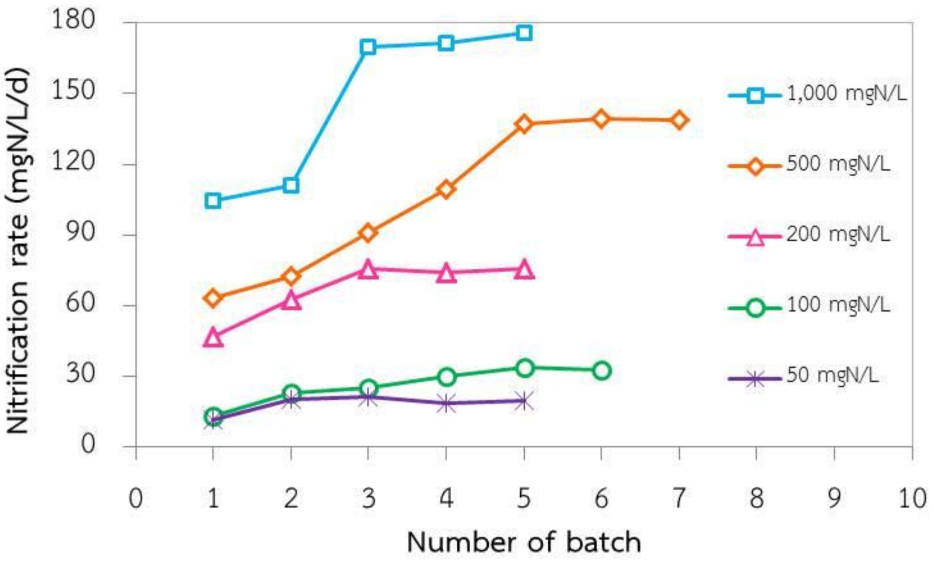


รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท

ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

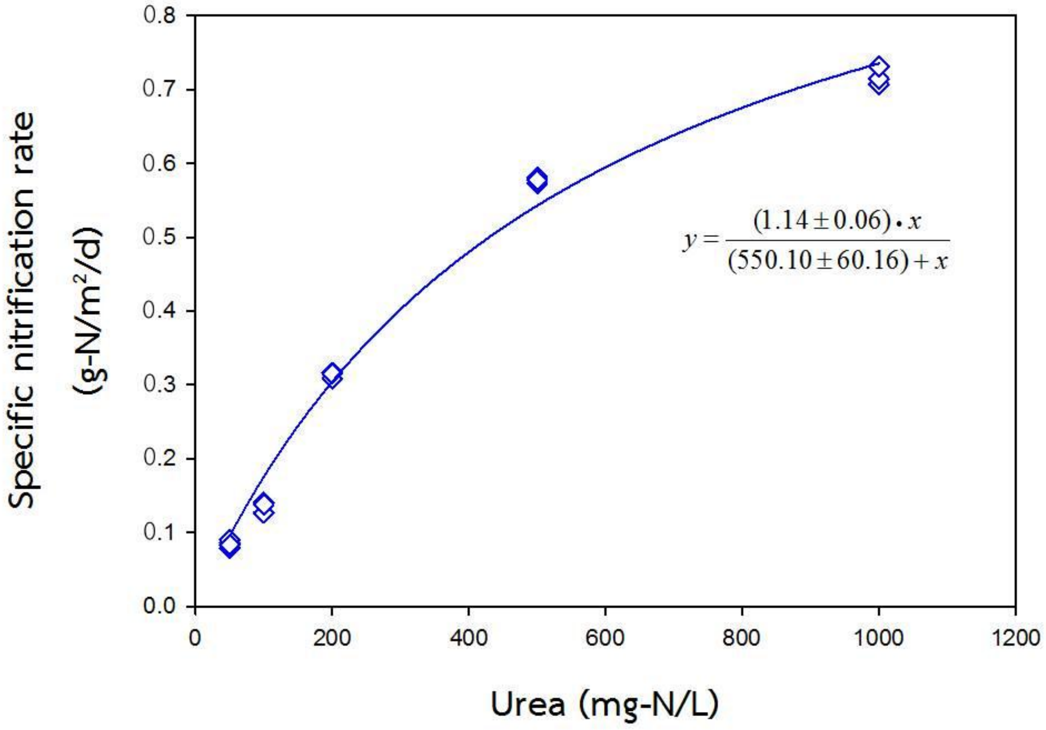
4.2.6 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย

เมื่อนำอัตราไนตริฟิเคชันของแต่ละรอบการทดลองมาสร้างกราฟเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในการทดลองจะพบว่า ที่ทุกความเข้มข้นของยูเรียมีอัตราไนตริฟิเคชันที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการทดลอง โดยความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร มีอัตราไนตริฟิเคชันที่เริ่มคงที่ในรอบการทดลองที่ 2 3 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 20.49 21.60 18.91 และ 19.98 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ที่มีอัตราไนตริฟิเคชันเริ่มคงที่ในรอบที่ 4 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 30.38 33.74 และ 33.12 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าความเข้มข้นของยูเรียมากขึ้นจะมีผลให้อัตราไนตริฟิเคชันมากขึ้นตามไปด้วย ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จะมีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงกว่า 2 เท่าของความเข้มข้นยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร โดยระบบเริ่มคงที่ในรอบที่ 3 4 และ 5 มีอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 75.92 74.02 และ 75.65 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าในงานวิจัยของ Prinčič และคณะ (1998) โดยได้ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะที่พีเอช 6 แต่มีอัตราไนตริฟิเคชันที่ต่ำกว่ามากคือมีค่าเท่ากับ 7 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน อาจเนื่องมาจากในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาในถังโปรยกรองที่มีฟิล์มชีวภาพที่สามารถทนต่อพีเอชไม่เหมาะสมได้ดีกว่าเซลล์แบบแขวนลอย ส่วนที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร มีค่าดังที่กล่าวไปในการทดลองช่วงที่ 1 และพบว่ามีอัตราไนตริฟิเคชันที่สูงกว่าความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรเกือบ 2 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tarre และ Green (2004) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแอมโมเนียลงไป ทำให้อัตราไนตริฟิเคชันสูงขึ้นตามไปด้วย และสุดท้ายที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร มีอัตราไนตริฟิเคชันในรอบที่ 3 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 169.67 171.43 และ 175.56 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ไม่มากนักเมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ และเมื่อเปรียบเทียบกับในงานวิจัยของ Prinčič และคณะ (1998) ที่ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของแอมโมเนีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะพีเอชที่เหมาะสมพบว่า มีอัตราไนตริฟิเคชันเท่ากับ 163 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับในการทดลองมาก



รูปที่ 4.15 อัตราไนตริฟิเคชันในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรีย

ดังนั้น เมื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะและความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียโดยโปรแกรม SigmaPlot โดยใช้อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะใน 3 รอบ ที่ระบบคงที่ ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียที่สูงขึ้น แต่จะเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นยูเรียสูงขึ้นมาก และได้กราฟเป็นไปตามจนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics) โดยมีค่าอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด (k_m) เท่ากับ 1.14±0.06 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และค่าความเข้มข้นของซับเสตรท (S) ที่อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด (K_S) เท่ากับ 550.10±60.16 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshioka และคณะ (1982) ได้ทำการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแบคทีเรียกลุ่มเอโอบีที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียม 0.015 0.130 1.2 12 และ 120 มิลลิโมลาร์ พบว่าเป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ โดยมีค่า k_m เท่ากับ 0.58 ต่อวัน และค่า K_S เท่ากับ 0.2 มิลลิโมลาร์ของแอมโมเนียม



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียและอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชัน เพื่อหาสภาวะพีเอชต่ำที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เดินระบบจริงในถังโปรยกรองเพื่อลดปัญหากลิ่นของก๊าซแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการบำบัด และนำพีเอชต่ำที่เหมาะสมนี้มาใช้เดินระบบในการศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่ออัตราไนตริฟิเคชัน โดยสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชัน

- การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาโดยควบคุมพีเอชที่ 7 6 5 และ 4 มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ย คือ 0.617±0.018 0.577±0.004 0.005±0.005 และ 0.000±0.000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ

- ในการทดลองที่พีเอช 6 และ 7 เมื่อเดินระบบจนอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) สามารถบำบัดทีเคเอ็นจากความเข้มข้น 450-500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ไปเป็นไนเตรทได้เกือบทั้งหมด โดยมีทีเคเอ็นคงเหลืออยู่ในระบบไม่เกิน 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนที่พีเอช 4 และ 5 ไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้

- ในชุดที่ไม่ควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง ไม่สามารถบำบัดทีเคเอ็นได้ในระยะยาว มีไนไตร์ทสะสมอยู่ในระบบปริมาณมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมพีเอชให้เหมาะสม

- พีเอชต่ำที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการเดินระบบจริงในถังโปรยกรองเพื่อลดปัญหาการเกิดกลิ่นของก๊าซแอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสีย คือ พีเอช 6 และมีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Yield) เท่ากับ 0.032±0.023 กรัมของแข็งแขวนลอยต่อกรัมไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียที่มีต่ออัตราไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

- การทดลองนี้เดินระบบในสภาวะที่พีเอช 6 และได้ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของยูเรีย 5 ความเข้มข้น คือ 50 100 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร มีอัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะเฉลี่ย คือ 0.084±0.005 0.135±0.007 0.313±0.004 0.577±0.004 และ 0.718±0.013 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามจลนพลศาสตร์แบบโมโนด์ (Monod kinetics) โดยมีค่า k_m เท่ากับ 1.14±0.06 กรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และค่า K_S เท่ากับ 550.10±60.16 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้ทราบว่าในสภาวะที่พีเอช 6 ระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นได้ดีไม่แตกต่างจากสภาวะพีเอชที่เหมาะสม และได้ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดทีเคเอ็นที่พีเอช 6 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบโปรยกรองเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทีเคเอ็นสูง เช่น ห้องน้ำในสถานีบริการน้ำมัน หรือห้องน้ำสาธารณะ เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ในการเดินระบบจริงควรติดตั้งชุดควบคุมพีเอชแบบอัตโนมัติ เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทีเคเอ็นสูงจะส่งผลให้พีเอชเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็ว และต้องใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาณมากในการควบคุมพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลอง

- ควรมีการหมุนวนน้ำภายในถังรับน้ำเสีย เนื่องจากถ้าเดินระบบจริงน้ำเสียจะมีปริมาณมากทำให้ถังรับน้ำเสียมีขนาดใหญ่ จึงอาจเกิดพื้นที่ที่มีการหมุนเวียนน้ำเพื่อไปบำบัดไม่ทั่วถึง

- น้ำทิ้งที่ได้จากระบบโปรยกรองมีความเข้มข้นของไนเตรทสูง ต้องนำไปบำบัดต่อด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อกำจัดไนเตรทให้เปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมโรงงานอุตสาหกรรม และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรุงเทพฯ, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ธีระ เกรอต. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย : การบำบัดทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บัญชา บุญอนันต์วงศ์. 2554. การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มณีวรรณ เกตะวันดี และ สุขุม เร้าใจ. 2550. "การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยแมงกานีสซีโอไลต์." วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี **10**(2): 59-69.

วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี. 2556. ชีววิทยาพื้นฐานสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาษาอังกฤษ

Anthonisen, A. C., R. C. Loehr, T. B. S. Prakasam, and E. G. Srinath. 1976. "Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid." Journal (Water Pollution Control Federation) **48**(5): 835-852.

Blackburne, R., V. M. Vadivelu, Z. Yuan, and J. Keller. 2007. "Kinetic characterisation of an enriched Nitrospira culture with comparison to Nitrobacter." Water Research **41**(14): 3033-3042.

Bonomo, L., G. Pastorelli, E. Quinto, and G. Rinaldi. 2000. "Tertiary nitrification in pure oxygen moving bed biofilm reactors." Water Sci Technol **41**(4-5): 361-368.

Bovendeur, J. 1989. Fixed-biofilm reactors applied to waste water treatment and aquacultural water recirculating systems, Bovendeur.

Buchanan, R. E., N. E. Gibbons, S. T. Cowan, J. G. Holt, J. Liston, R. G. E. Murray, C. F. Niven, A. W. Ravin, and R. Y. Stanier. 1974. Bergey's manual of determinative bacteriology. Baltimore, Md., Williams & Wilkins.

Burton, S. A., and J. I. Prosser. 2001. "Autotrophic ammonia oxidation at low pH through urea hydrolysis." Appl Environ Microbiol **67**(7): 2952-2957.

De Boer, W., P. J. Gunnewiek, M. Veenhuis, E. Bock, and H. J. Laanbroek. 1991. "Nitrification at Low pH by Aggregated Chemolithotrophic Bacteria." Appl Environ Microbiol **57**(12): 3600-3604.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

De Boer, W., P. A. Klein Gunnewiek, and H. J. Laanbroek. 1995. "Ammonium-oxidation at low pH by a chemolithotrophic bacterium belonging to the genus Nitrosospira." Soil Biology and Biochemistry **27**(2): 127-132.

De Boer, W., and H. J. Laanbroek. 1989. "Ureolytic nitrification at low pH by Nitrosospira spec." Archives of Microbiology **152**(2): 178-181.

Doyle, J., S. Watts, D. Solley, and J. Keller. 2001. "Exceptionally high-rate nitrification in sequencing batch reactors treating high ammonia landfill leachate." Water Science and Technology **43**(3): 315-322.

Gay, S. W., and K. F. Knowlton. 2005. "Ammonia emissions and animal agriculture." [online]. Available from: https://www.pubs.ext.vt.edu/442/442-110/442-110.html [2016, March 16]

Gieseke, A., S. Tarre, M. Green, and D. de Beer. 2006. "Nitrification in a biofilm at low pH values: role of in situ microenvironments and acid tolerance." Appl Environ Microbiol **72**(6): 4283-4292.

Hanada, A., T. Kurogi, N. M. Giang, T. Yamada, Y. Kamimoto, Y. Kiso, and A. Hiraishi. 2014. "Bacteria of the candidate phylum TM7 are prevalent in acidophilic nitrifying sequencing-batch reactors." Microbes Environ **29**(4): 353-362.

Hayatsu, M. 1993. "The lowest limit of pH for nitrification in tea soil and isolation of an acidophilic ammonia oxidizing bacterium." Soil Science and Plant Nutrition **39**(2): 219-226.

O'Farrell, T. P., F. P. Frauson, A. F. Cassel, and D. F. Bishop. 1972. "Nitrogen Removal by Ammonia Stripping." Journal (Water Pollution Control Federation) **44**(8): 1527-1535.

Prinčič, A., I. Mahne, F. Megušar, E. A. Paul, and J. M. Tiedje. 1998. "Effects of pH and oxygen and ammonium concentrations on the community structure of nitrifying bacteria from wastewater." APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY **64**(10): 3584-3590.

Tarre, S., M. Beliavski, N. Denekamp, A. Gieseke, D. de Beer, and M. Green. 2004. "High nitrification rate at low pH in a fluidized bed reactor with chalk as the biofilm carrier." Water Science and Technology **49**(11-12): 99-105.

Tarre, S., and M. Green. 2004. "High-rate nitrification at low pH in suspended- and attached-biomass reactors." Appl Environ Microbiol **70**(11): 6481-6487.

Tchobanoglous, G., F. Burton, and D. H. Stensel. 2004. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill.

U.S. EPA. 1975. "Process Design Manual for Nitrogen Control." [online]. Available from: http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED162870.pdf [2016, January 5]

Water Environment Federation. 2008. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. New York: McGraw-Hill.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรองใยแก้ว Whatman GF/C รูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ไปอบในตู้อบความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนักก่อนกรองน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2. นำกระดาษกรองที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแล้วมาวางบนกรวยกรองบุชเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศแล้วเทตัวอย่างน้ำลงไปเพื่อกรองตัวอย่าง ฉีดน้ำกลั่นล้างกระบอกตวงซึ่งมีของแข็งแขวนลอยติดอยู่ เทน้ำลงไปอีกครั้ง และกรองจนแห้ง

3. นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างแล้วไปอบในตู้อบความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนักหลังกรองน้ำตัวอย่าง

วิธีการคำนวณหาของแข็งแขวนลอย ดังสมการ ก-1

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}} \qquad \text{ก-1}$$

เมื่อ A = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนกรองน้ำตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองหลังกรองน้ำตัวอย่าง (กรัม)

ก.2 การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจนโดยวิธีกลั่นและไตเตรท

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ เตรียมโดยละลายโซเดียมเตตระบอเรต ($Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$) 9.5 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร แล้วตวงมา 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 นอร์มอล ลงไป 88 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร

2. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม เตรียมโดยละลายเมทิลเรด 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วละลายเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกัน

3. สารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก เตรียมโดยละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 20 กรัม ในน้ำกลั่น และเติมอินดิเคเตอร์ผสม 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

<u>ขั้นตอนการวิเคราะห์</u>

1. ใส่เม็ดลูกแก้ว 3 ลูก น้ำตัวอย่าง 4 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรรวม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดเจดาห์ล ปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าเท่ากับ 7 แล้วเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 25 มิลลิลิตร (ถ้าเป็นแบลงค์ไม่ต้องใส่น้ำตัวอย่าง ให้ใส่น้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ลงในขวดเจดาห์ลแทน)

2. ตวงสารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่

3. นำขวดเจดาห์ลต่อเข้ากับเครื่องกลั่น โดยให้ปลายหลอดที่ต่อเพื่อนำไอน้ำออกมาจุ่มอยู่ใต้สารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก

4. เปิดเตาให้ความร้อนเพื่อกลั่นสารละลายในขวดเจดาห์ล จนได้ปริมาตรในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริกและสารละลายที่กลั่นได้รวมเป็น 150 มิลลิลิตร (ถ้ามีแอมโมเนีย สารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว)

5. นำน้ำที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่มาไตเตรทด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มอล จนได้จุดยุติ สารละลายเป็นสีม่วง

<u>วิธีการคำนวณหาแอมโมเนียไนโตรเจน</u> ดังสมการ ก-2

$$\text{แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times 280}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}} \qquad \text{ก-2}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทแบลงค์ (มิลลิลิตร)

ก.3 การวิเคราะห์ทีเคเอ็นโดยวิธีแมคโครเจลดาห์ล

การเตรียมสารเคมี

1. น้ำยาย่อยสลาย เตรียมจากละลายโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 134 กรัม และคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) 7.3 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 134 มิลลิลิตร ลงไป รอให้เย็นลง เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการตกผลึก

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไธโอซัลเฟตเตรียมจากละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัม และโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ใส่เม็ดลูกแก้ว 3 ลูก น้ำตัวอย่าง 4 มิลลิลิตร และเติมน้ำยาย่อยสลาย 25 มิลลิลิตร ลงในขวดเจดาห์ล แล้วนำไปต้มให้เดือดในเตาให้ความร้อนจนได้สารละลายใสไม่มีควัน (ถ้าเป็นแบลงค์ให้ใส่น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง)

2. ทิ้งให้เย็นลง เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ฟีนอลฟ์ธาลีน 10 หยด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไธโอซัลเฟต 25 มิลลิลิตร

3. ตวงสารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่

4. นำขวดเจดาห์ลต่อเข้ากับเครื่องกลั่น โดยให้ปลายหลอดที่ต่อเพื่อนำไอน้ำออกมาจุ่มอยู่ใต้สารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริก

5. เปิดเตาให้ความร้อนเพื่อกลั่นสารละลายในขวดเจดาห์ล จนได้ปริมาตรในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายอินดิเคเตอร์กรดบอริกและสารละลายที่กลั่นได้รวมเป็น 150 มิลลิลิตร

6. นำน้ำที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่มาไตเตรทด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มอล จนได้จุดยุติสารละลายเป็นสีม่วง

วิธีการคำนวณหาทีเคเอ็น ดังสมการ ก-3

$$\text{ทีเคเอ็น (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times 280}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}} \qquad \text{ก-3}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทแบลงค์ (มิลลิลิตร)

ก.4 การวิเคราะห์ไนไตร์ทไนโตรเจน

การเตรียมสารเคมี

1. น้ำยาทำให้เกิดสี เตรียมจาก 85 เปอร์เซ็นต์ กรดฟอสฟอริก 100 มิลลิลิตร และซัลฟานิลาไมด์ 10 กรัม เติมลงในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร เมื่อซัลฟานิลาไมด์ละลายหมดแล้วเติมเอน-(1-แนฟทิล) เอทธิลลีนไดอะมีนไดไฮโดรคลอไรด์ 1 กรัม ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

2. สารละลายมาตรฐานไนไตร์ท เตรียมจากโซเดียมไนไตร์ท

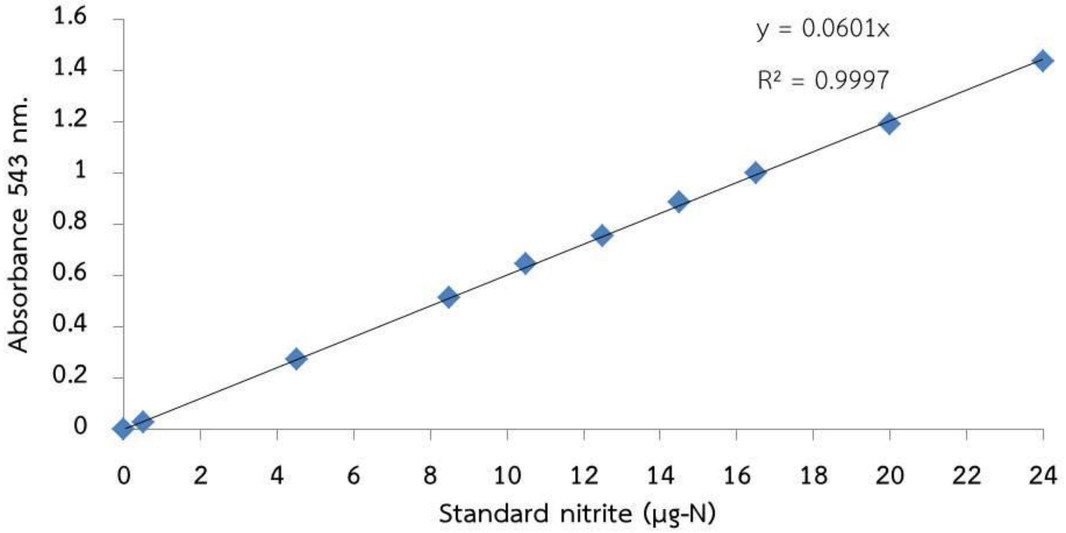
ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองใยแก้ว Whatman GF/C รูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร เพื่อกำจัดสีและความขุ่น

2. ปิเปตน้ำตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร

3. เติมน้ำยาทำให้เกิดสี 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จึงนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร

4. นำค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปเทียบกับค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานไนไตร์ท ดังรูปที่ ก-1 เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณไนไตร์ทไนโตรเจน



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตร์ทไนโตรเจน

<u>วิธีการคำนวณหาไนไตร์ทไนโตรเจน</u> ดังสมการ ก-4

$$\text{ไนไตร์ทไนโตรเจน (มก./ล.)} = \frac{\text{ไนไตร์ทไนโตรเจนที่เทียบได้จากกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัม)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}} \qquad \text{ก-4}$$

ก.5 การวิเคราะห์ไนเตรทไนโตรเจน

<u>การเตรียมสารเคมี</u>

1.สารละลายไอเอสเอ เตรียมจากแอมโมเนียมซัลเฟต 2 โมลาร์ โดยชั่งแอมโมเนียมซัลเฟต 26.428 กรัม นำไปละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

2. สารละลายมาตรฐานไนเตรท เตรียมจากโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)

<u>ขั้นตอนการวิเคราะห์ไนเตรทไนโตรเจน</u>

1. ทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดไนเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานไนเตรทที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยเทสารละลายมาตรฐานไนเตรทปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และเติมสารละลายไอเอสเอลงไป 1 มิลลิลิตร

2. เทน้ำตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกให้มีค่าต่ำกว่า 4 และเติมสารละลายไอเอสเอลงไป 1 มิลลิลิตร กด Read เพื่ออ่านค่าไนเตรทไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก-2 เครื่องวัดไนเตรท Combination Nitrate Electrode ของ Mettler toledo

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง

จากการทดลองช่วงที่ 1 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ตอนเริ่มต้นและระหว่างการทดลอง ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะพีเอชที่ 7 6 5 4 และ ไม่ควบคุมพีเอช ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 7

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/11/59	0	29.5	448.00	0.00	0.00	0.00	448.00
11/11/59	0.96	31.7	329.00	57.75	0.48	119.80	449.28
12/11/59	1.88	31.4	267.00	19.25	0.73	173.60	441.33
13/11/59	2.85	32.1	206.50	28.00	0.62	247.70	454.82
14/11/59	3.96	32.1	165.00		0.18	319.90	485.08
15/11/59	5.00	32.3	124.25	8.75	0.25	370.50	495.00
16/11/59	5.96	32.4			0.08	437.20	
17/11/59	6.96	31.7	56.00	5.25		472.30	528.30
18/11/59	8.08	32.5				502.90	
19/11/59	8.76	31.9	17.50	0.00	0.03	511.60	529.13
20/11/59	10.00	31.9					
21/11/59	11.01	31.9	10.50	0.00		512.20	522.70
27/11/59	11.01	29.6	469.00	0.00	0.00	0.00	469.00
28/11/59	11.83	31.7	441.00	15.75	0.00	42.02	483.02
29/11/59	12.97	31.6	411.25	3.50	0.00	56.55	467.80
30/11/59	14.04	30.7			0.00		
1/12/59	14.83	30.9	374.50	5.25		99.26	
1/12/59	15.14	31.2			0.00		
2/12/59	15.83	31	322.75	10.50	0.00	129.60	452.35
3/12/59	16.83	30.9			0.00	146.20	
4/12/59	17.76	31.1	280.00	14.00	0.00	171.20	451.20
5/12/59	18.75	30.9			0.00	193.60	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
6/12/59	20.02	30.6	211.40	11.20	0.00	241.30	452.70
7/12/59	20.75	30.5			0.00		
7/12/59	20.93	30.6					
8/12/59	21.80	30.3	205.80	7.00	0.00	269.70	475.50
8/12/59	21.83	30.3					
9/12/59	23.09	30.8			0.00	277.50	
10/12/59	23.88	30.7	180.0	12.60	0.00	305.00	485.00
11/12/59	24.88				0.00		
12/12/59	25.72	29.7	134.40	8.40		351.40	485.80
13/12/59	27.13	30.3					
14/12/59	28.00	31.1	92.40	2.80		389.00	481.40
15/12/59	29.01	31.3					
16/12/59	29.80	29.8	89.00	7.00	0.00	391.40	480.40
17/12/59	29.80		450.80	0.00	0.00	0.00	450.80
17/12/59	30.03	29.4					
18/12/59	31.03	30.3	417.20	5.60	0.00	42.40	459.60
19/12/59	32.06	30.4				61.46	
20/12/59	33.09	31.4	358.96	14.00	0.00	89.09	448.05
21/12/59	34.02	31.20					
22/12/59	35.02	31.80	333.20		0.00	150.5	483.70
23/12/59	35.94	32.00	323.40	14.00	0.00	178.80	502.20
24/12/59	36.97						
25/12/59	38.03	32.20	264.50	28.00	0.00	232.00	496.50
26/12/59	39.06	32.20				262.30	
27/12/59	40.01	32.00	195.44	7.00	0.00	282.30	489.34
28/12/59	41.09	30.50					
29/12/59	41.81	30.20	191.80	9.80	0.00	293.90	474.10
30/12/59	43.07	29.80				294.60	
31/12/59	44.01						
1/1/60	44.19	30.40	151.00	5.60	0.00	317.00	468.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
1/1/60	45.01	30.30			0.02	323.50	
2/1/60	45.86	30.40	131.60	4.20	0.07	329.00	460.67
3/1/60	47.01						
4/1/60	47.63	30.4			0.11	332.10	
4/1/60	48.05	31.00	78.75	12.60	0.07	340.60	419.42
5/1/60	48.94	31.00			0.00	336.70	
6/1/60	49.84	30.10	63.70	0.00	0.00	348.80	412.50
7/1/60	50.94	30.60		10.50	0.00	347.50	
8/1/60	52.01				0.00		
9/1/60	52.76	30.3	54.60	3.50	0.00	358.00	
10/1/60	54.01	30.3	40.00	0.00	0.00	383.20	423.20
11/1/60	55.15	30.4	35.00		0.00	389.00	
12/1/60	56.13	31.1			0.00	405.50	
13/1/60	56.72	31.0	35.00	0.00	0.00	405.70	440.70
17/1/60	56.72	28.9	456.75	0.00	0.00	0.00	456.75
18/1/60	57.89	31.3			0.78	50.70	
19/1/60	58.93	31.5	379.75	22.40	0.47	82.72	462.94
20/1/60	59.86	31.7			0.29		
21/1/60	60.93	31.8	288.75	17.50	0.26	208.20	497.21
22/1/60	61.77	31.3			0.20	245.80	
23/1/60	62.93	29.9	177.80	13.30	0.00	289.60	467.40
24/1/60	63.90	30.2			0.00	330.40	
25/1/60	64.89	30.9	134.05	0.00	0.00	340.60	474.65
26/1/60	65.85	31.0			0.00		
27/1/60	66.90	30.9	82.33	8.75	0.01	392.90	475.24
28/1/60	67.69	30.6			0.00	405.20	
29/1/60	68.77	30.5	70.00	0.00	0.00	413.60	483.60
30/1/60	69.93	30.7			0.00	424.80	
31/1/60	70.90	31.2	66.50	0.00	0.00	425.30	491.80
1/2/60	70.90	29.0	497.00	0.00	0.00	0.00	497.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
2/2/60	72.07	31.4			0.01	85.65	
3/2/60	73.07	30.9	318.50	0.00	0.00	156.20	474.70
4/2/60	73.91	30.8			0.01	215.00	
5/2/60	74.95	30.9	218.75	0.00	0.00	279.30	498.05
6/2/60	76.04	31.2			0.00	328.80	
7/2/60	77.00	31.5	113.75	3.50	0.00	369.10	482.85
8/2/60	78.03	31.0					
9/2/60	78.66	30.9	64.05	7.35	0.00	418.30	482.35
10/2/60	80.03						
11/2/60	80.69		41.65	28.00	0.00	450.80	492.45
12/2/60	81.83						
13/2/60	82.69		15.75	1.05	0.00	460.90	476.65
14/2/60	84.03						
15/2/60	84.63		12.25	0.00	0.00	461.90	474.15
1/3/60	84.63	30.3	481.95	0.00	0.00	0.00	481.95
2/3/60	85.73	32.1					
3/3/60	86.81	32.0	322.25	7.35	0.00	176.50	498.75
4/3/60	87.58	32.5	241.85	0.00	0.00	288.60	530.45
5/3/60	88.60	32.5				345.10	
6/3/60	89.80	32.4	102.20	7.00	0.00	427.50	529.70
7/3/60	90.75	33.0	67.55	12.95	0.00	459.60	527.15
8/3/60	91.75						
9/3/60	92.55	32.6	39.90	6.65	0.00	471.10	511.00
10/3/60	93.76	32.0				498.00	
11/3/60	94.59	32.7	12.60	0.00	0.00	495.00	507.60
15/3/60	94.59	30.4	457.10	0.00	0.00	0.00	457.10
16/3/60	95.54	33.2	363.20	16.10		92.31	455.51
17/3/60	96.75	32.8	234.15	0.00	0.00	264.70	498.85
18/3/60	97.60	32.8	130.55	6.30		343.40	473.95
19/3/60	98.64	33.0	105.00	8.75	0.00	417.10	522.10

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
20/3/60	99.77	32.7	63.70	0.00		481.60	545.30
21/3/60	100.75						
22/3/60	100.84	32.9	38.50	7.70	0.00	520.90	559.40
23/3/60	102.50	33.6	9.80	0.35	0.00	520.00	529.80
26/3/60	102.50	31.5	469.00	0.00	0.00	0.00	469.00
27/3/60	103.30	31.6				110.90	
27/3/60	103.65	31.4	308.70	12.95		170.80	479.50
28/3/60	104.26	31.8	255.75	13.30	0.00	250.30	506.05
29/3/60	105.30	32.4	161.70	0.00		322.50	484.20
30/3/60	106.27	32.5	90.65	4.20	0.00	413.60	504.25
31/3/60	107.30	33.2	36.40	5.95		459.10	495.5
1/4/60	108.58	32.4	17.15	4.00		479.70	496.85
2/4/60	109.43	32.4	5.95	0.00	0.00	492.90	498.85
4/4/60	109.43	29.9	464.50	0.00	0.00	0.00	464.50
4/4/60	109.55	31.3				9.73	
5/4/60	110.26	31.3	381.50	28.70	0.00	116.00	497.50
6/4/60	111.38	32.2	198.10	12.25		288.00	486.10
7/4/60	112.44	32.3	94.50	17.50	0.00	394.90	489.40
8/4/60	113.25	32.3				437.10	
9/4/60	114.42	33.1	31.50	4.90	0.00	479.60	511.10
10/4/60	115.26	33.0			0.00	495.10	
11/4/60	116.36	33.5	10.15	9.45	0.00	497.20	507.35
12/4/60	116.36	31.4	452.55	0.00	0.00	0.00	452.55
13/4/60	117.12	34.0	328.45	26.60		130.80	459.25
14/4/60	118.20	33.8	195.36		0.00	280.20	475.56
15/4/60	119.15	33.3	106.40	8.40		396.50	502.90
16/4/60	120.16	33.2	59.15	7.70	0.00	451.60	510.75
17/4/60	121.11					487.40	
18/4/60	122.15		15.40	8.75		510.90	526.30
19/4/60	122.98		0.00	0.00	0.00	512.00	512.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/11/59	0.00	29.7	465.50	0.00	0.00	0.00	465.50
11/11/59	0.96	31.5	437.50	84.00	0.08	63.33	500.91
12/11/59	1.88	30.8	377.25	154.00	0.25	105.80	483.30
13/11/59	2.85	31.8	341.25	267.75	0.08	188.80	530.13
14/11/59	3.96	31.7	273.00		0.00	265.00	538.00
15/11/59	5.00	32.0	222.50	222.50	0.00	316.80	539.30
16/11/59	5.96	32.2			0.00	370.80	
17/11/59	6.96	31.6	145.25	145.25	0.00	380.00	525.25
18/11/59	8.08	32.2			0.00	380.10	
19/11/59	8.76	31.5	141.75	141.75	0.00	390.00	531.75
20/11/59	10.00	31.5			0.00		
21/11/59	11.01	31.6	138.25	138.25	0.00	393.40	531.65
22/11/59	11.97	31.7			0.00	395.50	
23/11/59	12.96	31.2	136.50	136.50	0.00	407.00	543.50
24/11/59	14.05	32.0			0.00		
25/11/59	14.80	31.7	113.75	113.75	0.00	421.90	535.65
27/11/59	14.80	30.4	448.00	0.00	0.00	0.00	448.00
28/11/59	15.62	31.6	418.25	82.25	0.05	29.31	447.61
29/11/59	16.76	31.4	369.00	220.50	0.03	81.00	450.03
30/11/59	17.83	30.7			0.02	176.00	
1/12/59	18.62	30.8	241.50	241.50	0.00		
1/12/59	18.93	31.0			0.05	224.60	
2/12/59	19.62	30.9	164.50	164.50	0.01	299.20	463.71
3/12/59	20.62	30.7			0.01	365.60	
4/12/59	21.55	30.8	94.50	94.50	0.03	380.80	475.33
5/12/59	22.54	30.8			0.02	398.20	
6/12/59	23.81	30.4	68.60	68.60	0.01	402.70	471.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
7/12/59	24.54	30.4			0.02	410.90	
7/12/59	24.72	30.1			0.00		
8/12/59	25.59	30.1	59.50	59.50	0.02	415.00	474.52
8/12/59	25.62	30.1			0.00		
9/12/59	26.88	30.6			0.00	418.00	
10/12/59	27.67	30.6	33.88	32.20	0.00	433.80	467.68
11/12/59	28.67				0.00		
12/12/59	29.51	29.7	18.20	18.20	0.00	480.20	498.40
13/12/59	30.92	30.1			0.00		
14/12/59	31.79	30.8	5.60	1.40	0.00	491.00	496.60
15/12/59	32.80	31.1			0.00		
16/12/59	33.59	29.6	0.00	0.00	0.00	504.60	504.60
17/12/59	33.59		452.76	0.00	0.00	0.00	452.76
17/12/59	33.82	29.0			0.00		
18/12/59	34.82	30.0	399.40	148.40	0.00	66.80	466.20
19/12/59	35.85	30.5		313.25	0.00	96.00	
20/12/59	36.88	31.2	324.40	324.40	0.00	148.20	472.60
21/12/59	37.81				0.00		
22/12/59	38.81	31.8	169.75	169.75	0.00	313.90	483.65
23/12/59	39.73	31.7	110.60	110.60	0.00	409.30	519.90
24/12/59	40.76				0.00		
25/12/59	41.82	31.9	39.20	39.20	0.00	488.20	527.40
26/12/59	42.85	31.9			0.00	503.00	
27/12/59	43.80	31.7	5.60	5.60	0.00	514.00	519.60
28/12/59	44.88	30.2			0.00	517.00	
29/12/59	45.60	29.5	2.80	2.80	0.00	520.40	523.20
30/12/59	46.60	29.1	0.00	0.00	0.00	528.10	
30/12/59	46.60		465.00	0.00	0.00	0.00	465.00
31/12/59	47.68				0.00		
1/1/60	47.86	29.9	396.20	189.00	0.00	63.65	459.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
1/1/60	48.68	30.1			0.00	121.40	
2/1/60	49.54	30.2	284.20	267.40	0.00	209.20	493.40
3/1/60	50.68				0.00		
4/1/60	51.31	30.1			0.00	407.30	
4/1/60	51.73	30.8	61.60	61.60	0.00	437.90	499.50
5/1/60	52.62	30.8			0.00	476.40	
6/1/60	53.52	30.2	2.80	0.00	0.00	489.10	491.90
7/1/60	54.61	30.3	0.00	0.00	0.00	490.50	490.50
9/1/60	54.61	28.3	476.00	0.00	0.00	0.00	476.00
10/1/60	55.69	30.3	369.95	0.00	0.00	91.39	461.34
11/1/60	56.83	30.5	213.85	213.85	0.00	254.50	468.35
12/1/60	57.82	30.8	82.60	82.60	0.00	383.10	465.70
13/1/60	58.40	30.8	21.00	15.40	0.00	426.90	447.90
14/1/60	59.69				0.00		
15/1/60	60.75	30.8	12.60	10.50	0.00	470.00	482.60
16/1/60	61.69	31.0	0.00	0.00	0.00	489.60	489.60
24/1/60	61.69	28.4	492.45	0.00	0.00	0.00	492.45
25/1/60	62.82	30.8	380.80	256.67	0.00	70.12	450.92
26/1/60	63.77	30.9	281.75	281.75	0.00	189.50	471.25
27/1/60	64.83	30.5	140.50	140.50	0.00	336.10	476.60
28/1/60	65.62	30.4	15.00	15.00	0.00	461.50	476.50
29/1/60	66.69	30.3	0.00	0.00	0.00	484.60	484.60
1/2/60	66.69	31.5	479.85	0.00	0.00	0.00	479.85
2/2/60	67.56	32.1	416.50	103.60	0.00	58.25	474.75
3/2/60	68.66	32.4	334.95	122.15	0.00	163.90	498.85
4/2/60	69.65	32.1	213.85	108.50	0.00	289.20	503.05
5/2/60	70.77	31.9	61.25	44.45	0.00	455.90	517.15
6/2/60	71.74	32.4	17.85	17.85	0.00	499.00	516.85
7/2/60	72.74	32.4	0.00	0.00	0.00	512.80	512.80

ตารางที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 5

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/11/59	0	29.8	453.25	0.00	0.00	0.00	453.25
11/11/59	0.96	31.6	435.75	47.25	0.08	8.59	444.42
12/11/59	1.88	30.9	439.25	66.50	0.08	11.13	450.46
13/11/59	2.85	31.8	432.25	70.00	0.00	16.65	448.90
14/11/59	3.96	31.9			0.00	20.94	
15/11/59	5.00	32.2	423.00	120.75	0.00	28.39	451.39
16/11/59	5.96	32.1			0.00	41.00	
17/11/59	6.96	31.9	406.00	155.75		52.08	458.08
18/11/59	8.08	32.2				65.04	
19/11/59	8.76	31.5	380.00	175.00	0.00	79.62	459.62
20/11/59	10.00	31.5					
21/11/59	11.01	31.7	297.50	210.00		154.90	452.40
22/11/59	11.97	31.8			0.03	196.60	
23/11/59	12.96	31.9	218.75	194.25	0.09	244.80	463.64
24/11/59	14.05	31.8					
25/11/59	14.80	31.5	155.75	155.75	0.03	324.90	480.68
26/11/59	15.94	32.0			0.00	347.90	
27/11/59	17.01	32.0	135.25	135.25	0.00		
28/11/59	17.83	31.9	99.75	99.75	0.00	400.00	499.75
29/11/59	18.97	31.7	84.00	84.00	0.00		
30/11/59	20.04	31.2			0.00	450.00	
1/12/59	20.83	31.3	61.25	61.25	0.00		
1/12/59	21.14	31.3			0.00	460.70	
2/12/59	21.83	31.2	33.25	33.25	0.00	467.00	500.25
3/12/59	22.83	31.0			0.00		
4/12/59	23.76	31.0	33.50	33.50	0.00	482.30	515.80
5/12/59	24.75	30.7			0.00		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
6/12/59	26.02	30.4	32.20	32.20	0.00	479.40	511.60
7/12/59	26.02	28.4	453.25	0.00	0.00	0.00	453.25
8/12/59	26.90	30.3		36.75			
8/12/59	26.92	30.3			0.00	9.86	
9/12/59	28.19	30.6	414.40		0.00	35.28	449.68
10/12/59	28.97	31.0	399.00	131.60	0.00	59.01	458.01
11/12/59	29.97				0.00		
12/12/59	30.81	30.2	322.00	142.80	0.00	125.40	447.40
13/12/59	32.22	30.6			0.00	200.90	
14/12/59	33.09	31.3	254.80	183.40	0.00	263.20	518.00
15/12/59	34.10	31.6			0.00	319.60	
16/12/59	34.90	29.7	175.00	175.00	0.00	352.20	527.20
17/12/59	35.88				0.00		
17/12/59	36.11	29.8			0.00	370.10	
18/12/59	37.11	30.4	131.60	131.60	0.00	396.00	527.60
19/12/59	38.15	30.9			0.00	422.70	
20/12/59	39.17	31.6	95.20	95.20	0.00	435.60	530.80
21/12/59	40.10	31.5			0.00	445.30	
22/12/59	41.10	32.1	77.00	77.00	0.00	461.60	538.60
23/12/59	42.02	31.9	76.00	76.00	0.00	461.60	537.60
30/12/59	42.02	27.7	468.00	0.00	0.00	0.00	468.00
31/12/59	43.10				0.00		
1/1/60	43.28	29.9	463.80	53.20	0.00	4.83	468.63
1/1/60	44.10	30.2			0.00	7.05	
2/1/60	44.96	30.4	454.75	70.00	0.00	8.96	461.80
3/1/60	46.10				0.00		
4/1/60	46.73	30.4		119.00	0.00	12.71	
4/1/60	47.15	30.8	450.00		0.00	14.10	464.10
5/1/60	48.04	31.0			0.00	15.94	
6/1/60	48.94	30.4	445.00	126.00	0.00	16.70	461.70

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
7/1/60	50.03	30.8	448.00	143.50	0.00	17.04	465.04
8/1/60	51.10				0.00		
9/1/60	52.27	30.3	440.00	142.80	0.00	20.25	460.25
10/1/60	53.10	30.3	440.25	154.00	0.00		440.25
11/1/60	54.24	30.6			0.00		
12/1/60	55.23	30.8	440.00		0.00	23.43	463.43
13/1/60	55.81	30.7	442.75	159.25	0.00	24.00	466.75
14/1/60	57.10				0.00		
15/1/60	58.16	31.1	437.00	159.60	0.00	24.54	461.54
16/1/60	59.10	31.5			0.00		
17/1/60	59.90	31.5	437.00	170.24	0.00	24.35	461.35
18/1/60	61.19	31.4			0.00	24.33	
19/1/60	62.23	31.8	432.25	189.00	0.00	24.58	456.83
20/1/60	63.16	31.8			0.00	24.78	
21/1/60	64.23	31.6	439.00	218.40	0.00	25.00	464.00
22/1/60	65.07	31.7			0.00	25.00	
23/1/60	66.23	31.0	437.00	238.35	0.00	25.00	462.00
24/1/60	67.20	30.8			0.00	25.00	
25/1/60	68.19	31.2	436.60	243.60	0.00	25.00	461.60
26/1/60	69.15	31.3			0.00	25.00	
27/1/60	70.20	31.1	435.00	252.93	0.00	25.00	460.00
28/1/60	70.99	31.0			0.00	25.00	
29/1/60	72.07	30.8	433.45	270.67	0.00	25.00	458.45
1/2/60	72.07	28.2	473.70	0.00	0.00	0.00	473.70
2/2/60	73.31	31.3					
3/2/60	74.31	31.1	453.95	75.25	0.00	0.70	454.65
4/2/60	75.15	31.4					
5/2/60	76.20	31.4	458.50	120.75	0.00	1.00	459.50
6/2/60	77.28	31.2					
7/2/60	78.24	31.6	464.00	166.95	0.00	1.40	465.40

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
8/2/60	79.27						
9/2/60	79.90	31.8	469.00	207.55	0.00	1.90	470.90
10/2/60	81.27						
11/2/60	81.93	31.0	466.90	230.30	0.00	2.10	469.00
12/2/60	83.07						
13/2/60	83.93	30.9	474.95	255.85	0.00	2.30	477.25
14/2/60	85.27						
15/2/60	85.87	31.2	473.20	281.05	0.00	2.46	475.66
16/2/60	87.27						
17/2/60	88.10	31.6	467.25	325.50	0.00	2.70	469.95
18/2/60	89.27						
19/2/60	89.82	31.5	455.00	351.40	0.00	3.30	458.30
20/2/60	91.27						
21/2/60	92.23	31.3	465.50	373.80	0.00	3.90	469.40
22/2/60	93.20	32.5					
23/2/60	94.27	32.6	460.95	400.40	0.00	4.30	465.25
24/2/60	95.20	32.3					
25/2/60	96.27						
26/2/60	97.08	32.4	468.95	432.25	0.00	4.80	473.75
2/3/60	97.08	30.3	461.00	0.00	0.00	0.00	461.00
3/3/60	98.23	32.3				0.80	
4/3/60	99.00	32.9	466.55	57.75	0.00		466.55
5/3/60	100.02	33.0				0.90	
6/3/60	101.21	32.9	469.25	101.50	0.00		469.25
7/3/60	102.16	33.1				2.08	
8/3/60	103.16						
9/3/60	103.97	32.6	471.65	143.15	0.00	2.32	473.97
10/3/60	105.18	31.9					
11/3/60	106.01	32.7	469.70	176.75	0.00	2.33	472.03
12/3/60	106.96	32.8					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
13/3/60	108.23	32.8	465.00	207.55	0.00	2.40	467.40
14/3/60	109.21	32.3					
15/3/60	110.18	33.2		241.15		2.65	
16/3/60	110.96	33.6					
17/3/60	112.17	32.9	482.30	270.20	0.00	3.35	485.65
18/3/60	113.01	32.7					
19/3/60	114.05	32.9		303.10	0.00	3.06	
20/3/60	115.19	33.0					
21/3/60	116.16		466.00	327.25	0.00	3.62	469.62
22/3/60	116.25	33.1					
22/3/60	117.04	33.1					
23/3/60	117.91	33.6	475.00	346.15	0.00	4.37	479.37
24/3/60	119.22	32.7					
25/3/60	120.08	32.6	459.00	368.55	0.00	5.72	464.72
26/3/60	121.13	32.9					
27/3/60	122.23	31.6				6.76	
28/3/60	122.84	31.8					
29/3/60	123.88	32.2	456.00	409.00	0.00	8.03	464.03
30/3/60	124.85	32.7					
31/3/60	125.88	33.3	454.00	432.00	0.00	8.93	462.93
1/4/60	127.16	32.3					
2/4/60	128.01	32.5	458.00	458.00	0.00	9.96	467.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 4

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/11/59	20.00	0.00	469.00	0.00	0.00	0.00	469.00
11/11/59	19.00	0.96	448.00	73.50	0.00	34.54	482.54
12/11/59	17.00	1.88	452.50	124.25	0.00	33.46	485.96
13/11/59	16.30	2.85	448.00		0.00	34.01	482.01
14/11/59	19.00	3.96	448.00		0.00	33.63	481.63
15/11/59	20.00	5.00	448.00	301.00	0.00	33.91	481.91
16/11/59	19.00	5.96			0.00	33.99	
17/11/59	19.00	6.96	455.00	374.50		34.98	489.98
18/11/59	22.00	8.08				33.24	
19/11/59	14.30	8.76	452.00	388.50	0.00	33.25	485.25
20/11/59	20.00	10.00					
21/11/59	20.30	11.01	456.75	456.75		34.08	490.83
22/11/59	19.30	11.97			0.00	34.13	
23/11/59	19.00	12.96	460.25	460.25		34.49	494.74
24/11/59	21.30	14.05					
25/11/59	15.30	14.80	463.25	463.25		35.99	499.24
26/11/59	18.45	15.94				35.23	
27/11/59	20.30	17.01	464.75	464.75	0.00	34.80	499.55
28/11/59	16.00	17.83			0.00	35.10	
29/11/59	19.30	18.97	467.25	467.25	0.00	35.40	502.65
7/12/59	18.30	18.97	450.80	0.00	0.00	0.00	450.80
8/12/59	15.30	19.85	450.80	19.25	0.00		450.80
8/12/59	16.00	19.87			0.00	0.00	
9/12/59	22.30	21.14			0.00	0.00	
10/12/59	17.10	21.92	456.40	14.00	0.00	0.00	456.40
11/12/59	17.10	22.92				0.00	
12/12/59	13.30	23.76	445.20	47.60	0.00	0.00	445.20

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (℃)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
13/12/59	23.20	25.17				0.00	
14/12/59	20.00	26.04	469.00	62.16	0.00	0.00	469.00
15/12/59	20.30	27.05				0.00	
16/12/59	15.30	27.85	450.80	82.60	0.00	0.00	450.80
17/12/59	15.00	28.83				0.00	
17/12/59	20.40	29.06			0.00	0.00	
18/12/59	20.45	30.06	449.40	81.20	0.00	0.00	449.40
19/12/59	21.30	31.10				0.00	
20/12/59	22.00	32.12		110.60		0.00	
21/12/59	20.30	33.05				0.00	
22/12/59	20.30	34.05	436.80		0.00	0.00	436.80
23/12/59	18.30	34.97	434.00	137.20	0.00	0.00	434.00
24/12/59	19.00	36.00			0.00	0.00	
25/12/59	20.45	37.06	444.00	162.40	0.00	0.00	444.00
26/12/59	21.35	38.10			0.00	0.00	
27/12/59	20.00	39.04		179.20	0.00	0.00	
28/12/59	22.05	40.13			0.00	0.00	
29/12/59	15.30	40.85	444.50	197.40	0.00	0.00	444.50
30/12/59	21.45	42.10			0.00	0.00	
31/12/59	20.00	43.04			0.00	0.00	
1/1/60	0.25	43.22	440.25	236.60	0.00	0.00	440.25
1/1/60	20.00	44.04			0.00	0.00	
2/1/60	16.45	44.89	436.00	242.20	0.00	0.00	436.00
3/1/60	20.00	46.04			0.00	0.00	
4/1/60	11.00	46.67			0.00	0.00	
4/1/60	21.00	47.08	434.00	278.88	0.00	0.00	434.00
5/1/60	18.45	47.98			0.00	0.00	
6/1/60	16.00	48.87	440.00	311.08	0.00	0.00	440.00
7/1/60	18.30	49.97	454.60	332.50	0.00	0.00	454.60
8/1/60	20.00	51.04			0.00	0.00	

วันที่	วันที่ ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
9/1/60	24.00	52.21	448.75	346.50	0.00	0.00	448.75
10/1/60	20.00	53.04	458.00	395.36	0.00	0.00	458.00
11/1/60	23.30	54.18			0.00	0.00	
12/1/60	23.00	55.17			0.00	0.00	
13/1/60	13.00	55.75	440.00	411.00	0.00	0.00	440.00
14/1/60	20.00	57.04			0.00	0.00	
15/1/60	21.30	58.10	456.00	441.00	0.00	0.00	456.00
16/1/60	20.00	59.04			0.00	0.00	
17/1/60	15.00	59.83	450.00	450.00	0.00	0.00	450.00
18/1/60	22.00	61.12			0.00	0.00	
19/1/60	23.00	62.17	456.05	456.05	0.00	0.00	456.05
20/1/60	21.40	63.10			0.00	0.00	
21/1/60	23.00	64.17	472.50	472.50	0.00	0.00	472.50
24/1/60	21.20	64.17	462.00	0.00	0.00	0.00	462.00
25/1/60	22.00	65.20		30.33	0.00	0.00	
26/1/60	21.00	66.16	460.95	49.70	0.00	0.00	460.95
27/1/60	22.30	67.22		63.00	0.00	0.00	
28/1/60	17.20	68.00		84.00	0.00	0.00	
29/1/60	19.10	69.08	468.00	86.33	0.00	0.00	468.00
30/1/60	23.00	70.25	446.95	117.60	0.00	0.00	446.95
31/1/60	22.40	71.22	459.00		0.00	0.00	459.00
1/2/60	22.40	72.22		151.55	0.00	0.00	
2/2/60	23.15	73.25	446.00		0.00	0.00	446.00
3/2/60	23.10	74.25	458.50		0.00	0.00	458.50
4/2/60	19.30	75.09		182.00	0.00	0.00	
5/2/60	20.30	76.13	453.00	201.60	0.00	0.00	453.00
6/2/60	22.45	77.22			0.00	0.00	
7/2/60	21.30	78.17	457.80	232.40	0.00	0.00	457.80
8/2/60	22.00	79.20					
9/2/60	13.20	79.84	457.45	247.45	0.00	0.00	457.45

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/2/60	22.00	81.20					
11/2/60	14.00	81.87	450.00	269.50	0.00	0.00	450.00
12/2/60	17.20	83.00					
13/2/60	14.00	83.87	468.00	275.45	0.00	0.00	468.00
14/2/60	22.00	85.20					
15/2/60	12.45	85.81	457.75	304.50	0.00	0.00	457.75
16/2/60	22.00	87.20					
17/2/60	18.05	88.04	446.45	362.25	0.00	0.00	446.45
18/2/60	22.00	89.20					
19/2/60	11.34	89.76	453.70	367.50	0.00	0.00	453.70
20/2/60	22.00	91.20					
21/2/60	21.19	92.17	456.45	394.80	0.00	0.00	456.45
22/2/60	20.30	93.13					
23/2/60	22.00	94.20	442.75	424.55	0.00	0.00	442.75
24/2/60	20.40	95.14					
25/2/60	18.15	96.04	459.00	450.45	0.00	0.00	459.00
26/2/60	17.55	97.02					
27/2/60	22.00	98.20					
28/2/60	22.15	99.21	465.85	470.00	0.00	0.00	465.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของชุดที่ไม่ควบคุมพีเอช

วันที่	วันที่ทดลอง	พีเอช	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/11/59	20.00	6.81	462.00	0.00	0.00	0.00	462.00
11/11/59	19.00	7.50	425.25	33.25	0.49	29.38	455.12
12/11/59	17.00	7.10		26.25	0.90	26.16	
13/11/59	16.30	6.50	420.00	19.25	0.50	43.70	464.20
14/11/59	19.00	6.29	404.25		0.00	52.96	457.21
15/11/59	20.00	6.32		45.50	0.00	68.87	
16/11/59	19.00	6.15			0.00	93.59	
17/11/59	19.00	6.18	381.50	59.50		92.87	474.37
18/11/59	22.00	6.12				120.00	
19/11/59	14.30	6.10	320.25	63.00	0.02	121.60	441.87
20/11/59	20.00						
21/11/59	20.30	6.08	276.50	105.00		154.90	431.40
22/11/59	19.30	6.08			0.02	198.80	
23/11/59	19.00	6.07	245.00	152.25	0.40	230.30	475.70
24/11/59	21.30	5.75					
25/11/59	15.30	5.15	208.25	203.00	0.20	278.30	486.75
26/11/59	18.45	4.29					
27/11/59	20.30	4.10	183.25	183.25	0.00	281.90	465.15
28/11/59	16.00	3.97	182.00		0.00	281.70	463.70
29/11/59	19.30	3.86	182.00	182.00	0.00	280.00	462.00
7/12/59	18.30	6.90	459.75	0.00	0.00	0.00	459.75
8/12/59	15.30	7.80	455.00	22.75	0.11		
8/12/59	16.00	7.80				7.55	465.51
9/12/59	22.30	7.89			2.96	11.33	
10/12/59	17.10	7.74	407.40	39.20	0.30	18.51	426.45
11/12/59	17.10				0.54		
12/12/59	12.00	6.26					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

วันที่	วันที่ทดลอง	พีเอช	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
12/12/59	13.30		365.00	84.00	0.02	84.44	449.46
12/12/59	17.00	6.14					
13/12/59	13.30	5.91					
13/12/59	23.20	5.84			0.00	226.90	
14/12/59	15.10	4.70					
14/12/59	20.00	3.98	212.00	212.00	0.00	272.30	484.30
15/12/59	20.30	3.39			0.00	279.10	
16/12/59	15.30	3.22	196.00	196.00	0.01	293.40	489.41
17/12/59	15.00						0.00
17/12/59	20.40	3.14			0.01		
18/12/59	20.45	3.24	194.60	194.60	0.01	297.40	492.01
22/12/59	18.00	6.70	470.40	0.00	0.00	0.00	470.40
22/12/59	21.15	7.56					
23/12/59	18.30	7.59	456.40	28.00	5.24	8.65	461.64
24/12/59	19.00	7.43			11.23	15.98	
25/12/59	12.00	6.89					
25/12/59	20.45	6.23	379.40	61.60	5.91	62.41	447.72
26/12/59	11.20	4.55					
26/12/59	21.35	4.30			0.00	102.80	
27/12/59	20.00	4.23	325.36	98.00	0.00	124.40	449.76
28/12/59	22.05	3.95			0.00	169.60	
29/12/59	15.30	3.75	232.90	173.60	0.00	184.80	417.70
30/12/59	21.45	3.90			6.62	225.40	
31/12/59	20.00						
1/1/60	0.25	3.84	210.56	210.56	6.51	231.00	448.07
1/1/60	20.00	3.79			3.93	236.70	
2/1/60	16.45	3.39	203.00	203.00	0.82	236.70	440.52
3/1/60	20.00				0.27		
4/1/60	11.00	3.20				237.90	
4/1/60	21.00	3.13	198.24	198.24	0.29	237.90	436.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	พีเอช	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
9/1/60	17.20	7.00	457.80	0.00	0.00	0.00	457.80
9/1/60	18.00	7.60		0.00			
9/1/60	24.00	7.46					
10/1/60	15.00	6.81					
10/1/60	20.00	6.62	383.00	44.80	47.92	13.28	444.20
11/1/60	15.40	5.58					
11/1/60	23.30	5.58	289.50	120.75	120.13	33.97	443.60
12/1/60	23.00	5.40	225.75	225.75	199.33	50.25	475.33
13/1/60	13.00	5.43	224.70	224.70	204.33	52.66	481.69
14/1/60	20.00						
15/1/60	21.30	5.54	208.60	208.60	174.38	62.89	445.87
16/1/60	20.00	5.49					
17/1/60	15.00	5.54	206.36	206.36	182.70	63.70	452.76
18/1/60	22.00	5.57			182.36	62.82	
19/1/60	23.00	5.41	208.60	208.60	180.00	62.33	450.93
24/1/60	22.00	6.61	445.20	0.00	0.56	0.00	445.76
25/1/60	12.30	7.25					
25/1/60	22.00	6.71	387.00	56.00	63.06	9.36	459.42
26/1/60	21.00	5.69	287.00		133.28	20.86	441.14
27/1/60	22.30	5.54	199.50	168.00	199.17	32.60	431.27
28/1/60	17.20	5.62			215.31	35.36	
29/1/60	19.10	5.53	198.33	198.33	209.82	35.99	444.14
30/1/60	23.00	5.55			209.82	38.90	
31/1/60	22.40	5.57	196.00	196.00	206.32	42.20	444.52

จากการทดลองช่วงที่ 2 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ตอนเริ่มต้นและระหว่างการทดลอง ที่ความเข้มข้นของยูเรีย 50 100 200 และ 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะพีเอชที่ 6 ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ข-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของยูเรีย 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
1/3/60	0.00	30.6	55.05	0.00	0.00	0.00	55.05
2/3/60	0.74	31.5	36.40	32.90	0.00	15.91	52.31
2/3/60	1.05				0.00	19.81	
3/3/60	1.62	31.8	24.50	24.15	0.00	27.82	52.32
3/3/60	2.14	32.0			0.00	33.88	
4/3/60	2.66	32.1	15.40	13.30	0.00	38.72	54.12
4/3/60	2.90	32.5	12.25	12.25	0.00	41.04	53.29
5/3/60	3.67	32.0	10.15	8.40	0.00	45.65	55.80
5/3/60	3.93	32.5			0.00	46.37	
6/3/60	5.12	32.4	4.00	4.00	0.00	49.49	53.49
7/3/60	6.07	32.8	0.70	0.70	0.00	50.47	51.17
8/3/60	7.07				0.00		
9/3/60	7.87	32.2	0.00	0.00	0.00	51.44	51.44
12/3/60	7.87	30.1	48.30	0.00	0.00	0.00	48.30
13/3/60	8.83	32.7	30.45	26.25	0.00	19.93	50.38
13/3/60	9.18	32.4	19.20	17.15	0.00	29.97	49.17
14/3/60	9.88	32.8	12.25	5.60	0.00	40.37	52.62
14/3/60	10.17	32.5	10.95	4.90	0.00	42.86	53.81
15/3/60	10.87		6.30	3.15	0.00	47.27	53.57
15/3/60	11.14	32.4			0.00	48.86	
16/3/60	11.91	32.8	1.70	1.70	0.00	49.14	50.84
18/3/60	11.91	30.9	50.60	0.00	0.00	0.00	50.60
19/3/60	12.78	31.1	32.20	26.95	0.00	20.35	52.55

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
19/3/60	13.01	32.5	26.25	25.20	0.00	27.12	53.37
20/3/60	13.80	32.7	15.05	15.05	0.00	40.42	55.47
20/3/60	14.14	32.3			0.00	43.32	
21/3/60	14.80	32.2	8.80	8.80	0.00	46.35	55.15
22/3/60	15.20	32.6	5.50	5.50	0.00	50.50	56.00
22/3/60	15.80	32.9	3.85	2.45	0.00	50.96	54.81
23/3/60	16.87		0.00	0.00	0.00	53.20	53.20
26/3/60	16.87	31.3	52.00	0.00	0.00	0.00	52.00
27/3/60	17.74	31.5	31.50	31.50	0.00	17.49	48.99
27/3/60	18.09	31.2	25.55	24.15	0.00	24.07	49.62
28/3/60	18.70	31.3	17.15	17.15	0.00	34.38	51.53
28/3/60	18.82	31.6			0.00	37.40	
29/3/60	19.74	31.8	4.90	4.90	0.00	46.72	51.62
30/3/60	20.12	31.3			0.00	50.23	
30/3/60	20.71	32.4	0.00	0.00	0.00	51.00	51.00
1/4/60	20.71	29.6	45.85	0.00	0.00	0.00	45.85
1/4/60	20.99	32.0			0.00	5.70	
2/4/60	21.71	31.7	32.29	32.29	0.00	20.17	52.46
2/4/60	21.84	32.1			0.00	23.33	
3/4/60	22.42	31.2	19.41	19.41	0.00	33.89	53.30
3/4/60	23.00	32.3			0.00	41.16	
4/4/60	23.67	32.2	9.28	9.28	0.00	46.69	55.97
5/4/60	24.58	31.0	4.53	4.53	0.00	50.67	55.20
6/4/60	25.70	32.2	0.00	0.00	0.00	52.52	52.52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของยูเรีย 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
2/3/60	0.00	30.3	99.40	0.00	0.00	0.00	99.40
3/3/60	0.58	31.3				0.87	
3/3/60	1.09	31.8				1.40	
4/3/60	1.62	31.8				1.93	
4/3/60	1.86	32.1	94.70	28.70	0.00	1.93	96.63
5/3/60	2.63	31.6				3.34	
5/3/60	2.88	32.2				3.85	
6/3/60	3.67	32.0					
6/3/60	4.08	32.3	88.75	66.50	0.00	8.01	96.76
7/3/60	5.03	32.5				10.16	
8/3/60	6.03						
9/3/60	6.83	32.0	80.75	80.75	0.00	17.68	98.43
10/3/60	8.04	31.6				24.96	
11/3/60	8.87	32.2	71.40	71.40	0.00	30.82	102.22
12/3/60	9.83	32.3				44.50	
13/3/60	11.09	32.2	46.90	46.90	0.00	59.26	106.16
14/3/60	12.08	32.3				75.06	
15/3/60	13.05	32.4	23.30	23.30	0.00	85.65	108.95
16/3/60	13.82	32.7				97.54	
17/3/60	15.03	32.3	4.00	4.00	0.00	105.70	109.70
18/3/60	15.88	32.4				107.60	
19/3/60	16.92	32.5	0.00	0.00	0.00	108.70	108.70
22/3/60	16.92	29.4	97.50	0.00	0.00	0.00	97.50
23/3/60	17.50	30.9			0.00	4.16	
23/3/60	18.08	32.0			0.00	10.78	
24/3/60	18.75	32.1			0.00	21.19	
24/3/60	18.96	31.7	78.05	58.85	0.00	25.54	103.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
25/3/60	19.67	30.8			0.00	40.53	
25/3/60	20.13	32.3	57.05	57.05	0.00	52.89	109.94
26/3/60	20.79	32.0	41.80	41.80	0.00	67.43	109.23
27/3/60	21.84	32.0	24.30	24.30	0.00	83.72	108.02
28/3/60	22.66	31.8	15.00	15.00	0.00	94.20	109.20
29/3/60	23.83	32.5	4.20	4.20	0.00	104.50	108.70
30/3/60	24.67	32.5	0.00	0.00	0.00	107.80	107.80
1/4/60	24.67	30.6	91.35	0.00	0.00	0.00	91.35
1/4/60	24.92	32.5			0.00	2.33	
2/4/60	25.64	32.3	79.45	35.00	0.00	13.51	92.96
3/4/60	26.72	32.9	54.60	48.30	0.00	41.07	95.67
4/4/60	27.72	32.9	36.05	36.05	0.00	66.59	102.64
5/4/60	28.79	32.8	20.30	20.30	0.00	86.43	106.73
6/4/60	29.91	32.0			0.00	98.70	
7/4/60	31.04	33.4	4.20	4.20	0.00	99.37	103.57
8/4/60	32.04	33.2	0.00	0.00	0.00	102.70	102.70
10/4/60	32.04	30.7	94.50	0.00	0.00	0.00	94.50
10/4/60	32.18	32.0			0.00	0.54	
11/4/60	32.68	32.4			0.00	4.62	
11/4/60	33.04	33.5	85.45	28.70	0.00	7.57	93.02
12/4/60	33.81	32.8			0.00	18.26	
12/4/60	34.09	32.4	69.85	50.75	0.00	24.61	94.46
13/4/60	34.84	31.3			0.00	39.19	
13/4/60	35.19	31.2	45.90	45.90	0.00	51.46	97.36
14/4/60	35.80	31.3	27.45	27.45	0.00	71.34	98.79
15/4/60	36.84	31.6	9.20	9.20	0.00	100.20	109.40
16/4/60	37.81	32.2	4.55	4.55	0.00	105.10	109.65
17/4/60	38.84	32.6	0.00	0.00	0.00	108.80	108.80
18/4/60	38.84	30.9	93.45	0.00	0.00	0.00	93.45
19/4/60	39.72	33.0	79.10	34.65	0.00	13.91	93.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
20/4/60	40.59	32.7	48.65	43.40	0.00	43.95	92.60
21/4/60	41.84	33.4	16.80	18.55	0.00	85.48	102.28
22/4/60	42.87	33.1	0.00	0.00	0.00	100.20	100.20
23/4/60	43.86	32.7	0.00	0.00	0.00	103.70	103.70
24/4/60	43.86	31.4	97.65	0.00	0.00	0.00	97.65
25/4/60	44.78	32.9	81.10	42.00	0.00	13.02	94.12
26/4/60	45.98	33.3	54.30	54.30	0.00	53.42	107.72
27/4/60	46.84	33.0	28.00	28.00	0.00	81.33	109.33
28/4/60	47.93	33.5	11.10	11.10	0.00	98.20	109.30
29/4/60	48.73	32.7	1.75	1.75	0.00	107.00	108.75
30/4/60	49.88	33.4	0.00	0.00	0.00	109.60	109.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของยูเรีย 200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
2/3/60	0.00	31.5	204.30	0.00	0.00	0.00	204.30
3/3/60	0.70	32.4			0.00	18.86	
3/3/60	0.91	33.1	164.55	53.55	0.00	26.43	190.98
4/3/60	1.78	32.2	126.00	86.80	0.00	68.50	194.50
4/3/60	2.21	32.2			0.00	86.77	
5/3/60	2.71	32.1	90.65	90.65	0.00	113.50	204.15
5/3/60	3.07	32.9			0.00	130.00	
6/3/60	3.84	32.8	35.70	35.70	0.00	164.00	199.70
6/3/60	4.12	32.3			0.00	179.00	
7/3/60	5.22	30.8	5.05	5.05	0.00	204.50	209.55
8/3/60	5.84	31.0			0.00	206.40	
9/3/60	6.87	31.3	0.00	0.00	0.00	212.00	212.00
13/3/60	6.87	30.0	195.65	0.00	0.00	0.00	195.65
14/3/60	7.69	31.2	178.00	38.50	0.00	11.55	189.55
14/3/60	8.21	31.8			0.00	33.03	
15/3/60	8.74	31.7			0.00	59.54	
15/3/60	8.98	31.9	130.55	77.00	0.00	72.82	203.37
16/3/60	9.74	31.8	77.35	65.45	0.00	132.10	209.45
16/3/60	10.00	32.3			0.00	154.40	
17/3/60	11.19	32.3	7.00	7.00	0.00	211.60	218.60
18/3/60	12.14	32.4	0.00	0.00	0.00	217.50	217.50
19/3/60	13.14		0.00	0.00	0.00	217.70	217.70
24/3/60	13.14	30.5	193.55	0.00	0.00	0.00	193.55
25/3/60	13.89	33.0	171.85	43.05	0.00	24.76	196.61
25/3/60	14.18	32.3			0.00	33.31	
26/3/60	14.88		122.50	79.80	0.00	82.03	204.53
26/3/60	15.15	32.5	95.95	82.25	0.00	104.80	200.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
27/3/60	15.92	32.7	40.95	40.95	0.00	165.20	206.15
28/3/60	17.13	32.3	14.35	14.35	0.00	199.00	213.35
29/3/60	17.98	32.5	7.00	7.00	0.00	206.70	213.70
30/3/60	19.02	32.6	0.00	0.00	0.00	208.30	208.30
5/4/60	19.02	31.0	197.40	0.00	0.00	0.00	197.40
6/4/60	19.90	33.7	170.80	69.65	0.00	25.11	195.91
7/4/60	21.10	34.0	108.15	91.00	0.00	106.30	214.45
8/4/60	22.16	34.1	26.55	26.55	0.00	192.27	218.82
9/4/60	23.00	33.9	15.05	15.05	0.00	202.83	217.88
10/4/60	24.06	32.2	6.65	6.65	0.00	208.24	214.89
11/4/60	25.06	33.3	0.00	0.00	0.00	219.20	219.20
15/4/60	25.06	30.5	194.25	0.00	0.00	0.00	194.25
16/4/60	25.83	33.0	168.90	62.65	0.00	26.57	195.47
17/4/60	27.29	33.0	51.80	51.80	0.00	150.57	202.37
18/4/60	28.19	33.0	11.20	11.20	0.00	202.95	214.15
19/4/60	29.28	32.6	6.65	6.65	0.00	207.72	214.37
20/4/60	30.15	31.3	5.60	5.60	0.00	209.00	214.60
21/4/60	31.02	31.9	0.00	0.00	0.00	213.70	213.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณทีเคเอ็น แอมโมเนีย ไนไตร์ท และไนเตรท ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของยูเรีย 1,000 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
10/4/60	0.00	31.1	936.60	0.00	0.00	0.00	936.60
11/4/60	1.20	34.5			0.00	9.22	
12/4/60	2.25	34.4	893.10	94.50	0.00	33.06	926.16
13/4/60	3.09	34.5			0.00	51.38	
14/4/60	4.16	32.5	829.50	144.90	0.00	95.16	924.66
15/4/60	5.16	33.3			0.00	137.60	
16/4/60	6.13	33.1	705.60	140.00	0.00	220.60	926.20
17/4/60	7.33	33.2			0.00	334.70	
18/4/60	8.26	33.1	496.70	49.90	0.00	441.90	938.60
19/4/60	9.16				0.00	545.50	
20/4/60	10.25	32.6	343.60	51.80	0.00		
21/4/60	11.12	31.3			0.00	760.80	
22/4/60	12.25	32.3	176.50	37.80	0.00	859.60	1036.10
23/4/60	13.26	32.1			0.00	939.30	
24/4/60	14.25	32.6	63.60	31.50	0.00	1004.00	1067.60
25/4/60	15.00	32.4	7.30	7.30	0.00	1056.00	1063.30
25/4/60	15.00	29.8	941.06	0.00	0.00	0.00	941.06
26/4/60	15.95	31.9			0.00	71.31	
27/4/60	16.92	32.4	796.95	66.15	0.00	172.00	968.95
28/4/60	18.13	31.5			0.00	324.60	
29/4/60	18.96	33.1	550.50	47.25	0.00	400.00	950.50
30/4/60	19.95	33.7			0.00	523.40	
1/5/60	21.09	33.6	318.90	41.74	0.00	651.80	970.70
2/5/60	21.87	33.6			0.00		
3/5/60	22.73	33.0	159.10	40.16	0.00	817.00	976.10
4/5/60	23.83	32.3			0.00	886.10	
5/5/60	25.04	30.6	85.40	16.80	0.00	929.90	1015.30

วันที่	วันที่ทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ทีเคเอ็น (mgN/L)	แอมโมเนีย (mgN/L)	ไนไตร์ท (mgN/L)	ไนเตรท (mgN/L)	ไนโตรเจนรวม (mgN/L)
6/5/60	25.71	31.9	60.90	9.80	0.00	947.00	1007.90
6/5/60	25.99	30.4			0.00	946.10	
7/5/60	26.84	31.1	49.50	49.50	0.00	954.70	
8/5/60	26.84	29.8	922.95	0.00	0.00	0.00	922.95
9/5/60	27.74	32.4			0.00	81.21	
10/5/60	28.72	32.9	689.85	130.70	0.00	228.20	918.05
11/5/60	29.86	32.1			0.00	430.00	
12/5/60	30.65	33.1	369.30	92.90	0.00	597.80	967.10
13/5/60	31.50	32.8			0.00		
14/5/60	32.60	31.9	124.60	47.60	0.00	890.80	1015.40
15/5/60	33.81	30.8		23.80	0.00	1000.00	
16/5/60	34.48	31.6	18.20	8.40	0.00	1028.00	1046.20
16/5/60	34.48		992.60	0.00	0.00	0.00	992.60
17/5/60	35.37	29.5			0.00	141.60	
18/5/60	36.31	31.4	670.60	118.30	0.00	305.40	976.00
19/5/60	37.51				0.00	504.00	
20/5/60	38.56	31.5	304.50	79.80	0.00	677.00	981.50
21/5/60	39.37	31.7			0.00	847.00	
22/5/60	40.35	31.7	99.40	56.70	0.00	899.00	998.40
23/5/60	41.37	32.0			0.00		
24/5/60	42.10	32.1	8.40	8.40	0.00	1024.00	1032.40
24/5/60	42.10	29.5	957.80	0.00	0.00	0.00	957.80
25/5/60	42.96	31.5			0.00	132.40	
26/5/60	44.17	31.6	680.40	108.00	0.00	299.00	979.40
27/5/60	45.21	31.8			0.00	467.80	
28/5/60	46.02	32.0	356.55	89.50	0.00	689.50	1046.05
29/5/60	47.00	32.0			0.00	856.70	
30/5/60	48.02	32.6	109.80	49.80	0.00	913.10	1022.90
31/5/60	49.00	32.4			0.00	997.50	
1/6/60	50.13	32.2	7.40	7.40	0.00	1011.00	1018.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรวินดา จุ้ยสกุล เกิดเมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557

การเผยแพร่งานวิจัยนี้ได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2560 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ และนำเสนอผลงานในหัวข้อ “ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่พีเอชต่ำโดยระบบโปรยกรอง”

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University