ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

นางสาวสุนทรี อยู่สถาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CARBON SOURCES ON NITROGEN REDUCTION IN DENITRIFICATION PROCESS

Miss Suntaree Yoosathan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
โดย	นางสาวสุนทรี อยู่สถาน
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.... กรรมการ
(ดร. สมชาย ดารารัตน์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุนทรี อยู่สถาน : ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (EFFECT OF CARBON SOURCES ON N_2 REDUCTION IN DENITRIFICATION PROCESS)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร. พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์, 145 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้แหล่งคาร์บอน 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล มาใช้เป็นตัวให้อิเลคตรอน ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยเชื้อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นนำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียและนำมาเลี้ยงโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนในสภาวะแอนแอโรบิก เชื้อที่เลี้ยงนั้นนำมาใช้ในการทดลองโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดโดยควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ 2,000 mg/l ซีโอดี 150 mg/l พีเอช 7.5 และที่อุณหภูมิห้อง โดยแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิดควบคุมไนเตรทเริ่มต้นที่ 50 100 150 200 และ 300 mg/l จากผลการทดลองที่ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l พบว่าโซเดียมอะซิเตทสามารถลดไนเตรทได้ 99.3% และสามารถลดไนเตรทคิดเป็น 45.26 mg /g MLVSS-h. น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องสามารถลดไนเตรทได้ 91.8% คิดเป็น 37.71 mg /g MLVSS -h. และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลสามารถลดไนเตรทได้ 81.76% คิดเป็น 35.02 mg /g MLVSS-h. ดังนั้นน้ำเสียสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าจะมีอัตราการลดไนเตรทต่ำกว่าโซเดียมอะซิเตท

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

4789161020 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : CARBON SOURCE/ DENITRIFICATION/ DENITRIFYING BACTERIA

SUNTAREE YOOSATHAN: EFFECT OF CARBON SOURCES ON N_2 REDUCTION IN DENITRIFICATION PROCESS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. PONGSAK NOOPHAN, Ph.D., 145 pp.

Three carbon sources: wastewater from canned fruit juice plant, biodiesel waste and sodium acetate, were used as a carbon source and electron donor for denitrification process. Denitrifying bacteria were taken from a wastewater treatment plant. Sodium acetate as a carbon source in stock culture. Denitrifying stock culture was maintained in the synthetic medium with anaerobic condition at room temperature. In batch experiment, microbial cultures were control at 2,000 mg MLVSS/l and all experiments were conducted at COD 150 mg/l, pH 7.5 and 30-35 °C (room temperature). For each carbon source, initial nitrate were controlled at 50, 100, 150, 200 and 300 mg/l. At 200 mg/l sodium acetate, 99.3% nitrate was reduced at 45.26 mg /g MLVSS-h. Using wastewater from canned fruit juice plant nitrate reduction was 91.8% and the reduction rate was 37. mg /g MLVSS-h. Nitrate reduction by using biodiesel waste was 81.76% nitrate reduction at 35.02 mg /g MLVSS-h. was obtained. Therefore wastewater can be use as an electron donor for denitrification efficiently though lower both rate and % removal than sodium acetate.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Field of study Environmental Science Student's signature Suntaree Yoosathan

Academic year 2007 Advisor's signature C. Kositanont

Co-advisor's signature P. Noophan

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำ และให้โอกาสลูกศิษย์ได้ศึกษาในเรื่องที่สนใจ จนมีผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังได้กรุณาให้ข้อคิดต่างๆ และทักษะในการทำงาน ตลอดจนอบรมสั่งสอนการดำเนินชีวิตในสังคม อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อศิษย์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของการทำวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสลูกศิษย์ได้ศึกษาในเรื่องที่สนใจ จนมีผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และได้ให้คำปรึกษาจากประสบการณ์เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล และ ดร. สมชาย ดารารัตน์ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนวิจัยบางส่วน และให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณโรงแรมบันยันทรีที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยบางส่วน ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และบริษัท มาลี สามพราน (มหาชน) จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสีย และแหล่งข้อมูลในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ไปนำเสนอผลงานที่งาน Asian-Pacific Regional Conference on Practical Environmental Technologies APRC 2007 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ รวมทั้งครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้โอกาส และสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างอย่างดียิ่งเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................จ
กิตติกรรมประกาศ....................ฉ
สารบัญ....................ช
สารบัญตาราง....................ฌ
สารบัญรูป....................ญ

บทที่ 1 บทนำ....................1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย....................1
1.2 วัตถุประสงค์....................2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย....................2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ....................2

บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร....................3
2.1 ไนโตรเจน....................3
2.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)....................14
2.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)....................18
2.4 เทคโนโลยีในการกำจัดไนเตรทโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน....................27
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน และการสลายคาร์บอนอินทรีย์....................29
2.6 แหล่งคาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน....................30
2.7 ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน....................32
2.8 น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง....................34
2.9 น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล....................39

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย....................47
3.1 รูปแบบการวิจัย....................47
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้....................47
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง....................48
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ....................52

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล......53
4.1 การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย......53
4.2 หาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรท......55
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด คือ โซเดียมอะซิเตท
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง......56
4.4 ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากการทดลอง......79

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง......81

รายการอ้างอิง......83

ภาคผนวก......86
ภาคผนวก ก ค่า pH MLSS MLVSS และ CODในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria......87
ภาคผนวก ข การลดไนเตรทที่ MLVSS ต่าง ๆ......97
ภาคผนวก ค การลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน......99
ภาคผนวก ง การลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน......108
ภาคผนวก จ การลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน......117
ภาคผนวก ฉ การเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ......126
ภาคผนวก ช อัตราการลดไนเตรทที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ......132
ภาคผนวก ฌ ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากการทดลองและคำนวณ C/N ratio......134
ภาคผนวก ญ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ......141

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์......145

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฌ

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 วิธีการกำจัดไนโตรเจนรูปต่าง ๆ 12

2.2 กระบวนการและประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนแบบต่าง ๆ 13

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของบีโอดีห้าต่อทีเคเอ็นกับไนตริไฟอิงแบคทีเรีย........17

2.4 แสดงแหล่งพลังงานจากภายนอก สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน........31

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน........33

2.6 แสดงค่าปริมาณการใช้น้ำปริมาณน้ำเสีย ปริมาณวัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิต........37

2.7 แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิต........37

2.8 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิต........38

2.9 แสดงค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อปริมาณการใช้วัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิต...38

2.10 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบบำบัด........38

2.11 ปัญหาและสาเหตุของการเกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตและแนวทางการแก้ไขปัญหา........39

3.1 สูตรอาหารเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย........49

3.2 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล........51

3.3 พารามิเตอร์ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์น้ำจากถังเลี้ยงจุลินทรีย์........52

4.1 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องและน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล......57

4.2 ผลการทดลองการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย........60

4.3 ผลการทดลองการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย........65

4.4 ผลการทดลองการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย........69

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรทจากโซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล........77

4.6 แสดงค่า μ_{max} และ k ที่ได้จากการทดลองโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด........79

ญ

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 วัฏจักรไนโตรเจน……………………………………………………………..............6

2.2 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนที่เวลาต่าง ๆ………………………………………….....8

2.3 แสดงอัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันกับอุณหภูมิเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างๆ...........31

2.4 ปฏิกิริยารวมของการเกิดเมธิลเอสเทอร์……………………………………..……..41

2.5 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน……………………………..……42

2.6 แผนผังการผลิตไบโอดีเซล……………………………………………………..……42

2.7 เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องพัฒนาโดย วว………………………..….46

3.1 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย……………………...…..48

3.2 แหล่งคาร์บอนที่ใช้ได้แก่ โซเดียมอะซิเตท : น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง : น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล…………..……….50

4.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของ pH หลังเติมอาหาร ในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย....53

4.2 แสดงฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลอง……………………………………………….....54

4.3 แสดงอัตราการลดไนเตรทที่เวลาต่าง ๆ ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) 800 และ 1000 1300 1500 และ 2000 mg/l.. 55

4.4 แสดงอัตราการลดไนเตรทเทียบกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์…………………………………56

4.5 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ…….58

4.6 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน……..….63

4.7 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน…………67

4.8 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน............72

4.9 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน………………………………………………………………………………73

4.10 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน...75

4.11 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราการลดไนเตรทโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด..........................78

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งชุมชน และการเกษตร ก่อให้เกิดภาวะมลพิษในแหล่งน้ำและสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมมากมาย และมีการปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำและเกิดผลเสียตามมาคือ เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เป็นปุ๋ยของพืชน้ำ ทำให้พืชน้ำเจริญได้ดี และเมื่อพืชเหล่านี้ตายจะทำให้เกิดการเน่าเสีย นอกจากนี้การปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำบาดาลซึ่งเป็นแหล่งน้ำดื่มที่สำคัญ จึงเป็นภาระที่ต้องกำจัดเมื่อนำมาบริโภค ซึ่งถ้าน้ำทิ้งไม่ผ่านการบำบัดที่ได้มาตรฐานและเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมาได้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่ละลายในน้ำไม่มีประโยชน์หรือโทษต่อสัตว์น้ำ แต่ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบมีผลต่อสัตว์น้ำ ก๊าซไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์เช่น ไนเตรท ไนไตรท์ แอมโมเนีย หรือเกลือแอมโมเนีย หรืออาจอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์บางประเภท แอมโมเนียเกิดจากการสลายโปรตีนของพืชและสัตว์ รวมทั้งการสลายของเสียจากมนุษย์และสัตว์ ถ้าตรวจพบแอมโมเนียและสารประกอบไนเตรทในน้ำ แสดงว่าในน้ำมีสิ่งปฏิกูลอยู่ ปุ๋ยบางชนิดประกอบด้วย สารประกอบจำพวกไนเตรท ดังนั้นบริเวณที่ทำการเกษตรกรรมจะมีสารประกอบไนเตรทในน้ำในปริมาณที่สูง มีรายงานว่าแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนสารประกอบไนเตรทไปอยู่ในรูปไนไตรท์และก๊าซไนโตรเจนได้ โดยพบว่าปริมาณไนไตรท์ในธรรมชาตินั้นน้อยมากโดยเฉพาะที่ผิวน้ำเกือบจะไม่มี ถ้าตรวจพบไนไตรท์ในน้ำมากอาจเนื่องมาจากปนมากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพราะโรงงานอุตสาหกรรมใช้ไนไตรท์ในหม้อน้ำเพื่อป้องกันการสึกกร่อน ไนเตรทในน้ำอาจเป็นไนเตรทที่เกิดขึ้นในดินโดยแบคทีเรียจำพวกที่มีในรากถั่ว ที่สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนจากอากาศให้เป็นเกลือไนเตรทในดินและละลายในน้ำ นอกจากนี้ยังได้ไนเตรทจากการสลายของพืชและสัตว์ และยังได้จากการเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนเตรทโดยแบคทีเรียด้วย ไนเตรทช่วยให้พืชเจริญเติบโต และถ้าในน้ำนั้นมีสารฟอสเฟตปนอยู่ด้วยในปริมาณที่เหมาะสม ยิ่งทำให้จำนวน Phytoplankton และพืชอื่น ๆ ในน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า DO ลดลง

วิธีการกำจัดไนโตรเจนที่ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียวิธีหนึ่งคือ
ดีไนตริฟิเคชันทางชีวภาพ (Biological Denitrification) การบำบัดในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ต้องมีแหล่งคาร์บอนหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ จุลินทรีย์จะใช้ไนเตรทและไนไตรท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาการสร้างพลังงานแล้วเปลี่ยนรูปเป็น
ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

จากปัญหาดังที่ได้กล่าวมาจึงได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาโดยใช้
กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ประเภทดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

(Denitifying Bacteria) ในถังปฏิกิริยาในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ประเภทนี้เสียก่อน และจะมีการใช้แหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมและราคาไม่สูงนัก เนื่องจากการใช้แหล่งคาร์บอนที่เป็นสารเคมีจะมีราคาสูงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในแหล่งต่าง ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาการใช้แหล่งคาร์บอนจากน้ำเสียกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเพื่อทำให้จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียบำบัดไนเตรทได้

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการลดไนเตรทในน้ำเสียจากการใช้แหล่งคาร์บอนจากน้ำเสียกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การวิจัยนี้จัดทำในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังปฏิกิริยาทำจากท่ออะคริลิกใสทรงกระบอกปริมาตร 5 ลิตรในการเลี้ยงจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

1.3.2 การทำวิจัยมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในน้ำเสียของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4. 1. ทราบแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนโตรเจน

1.4.2. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
การตรวจสอบเอกสาร

2.1 ไนโตรเจน

2.1.1 สารประกอบไนโตรเจน

ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำมาก เพราะเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์สารหลายชนิดที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของพืชและสัตว์ สารประกอบไนโตรเจนจึงเป็นสิ่งจำกัดอย่างหนึ่งของความอุดมสมบูรณ์ในแหล่งน้ำ

ไนโตรเจนเข้าสู่แหล่งน้ำทางอากาศและจากนั้นมันก็จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบหลายรูป การเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับพวกพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำ นอกจากสารประกอบไนโตรเจนที่ถูกสร้างขึ้นเองในแหล่งน้ำแล้วก็ยังมีสารประกอบไนโตรเจนอีกส่วนที่เข้าสู่แหล่งน้ำได้จากบริเวณอื่น พวกที่มาจากแหล่งอื่นนั้นได้มาจากน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน

สารประกอบไนโตรเจนในระบบนิเวศจะเกิดการเปลี่ยนสภาพจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ และจากสารอนินทรีย์ไปเป็นสารอินทรีย์ และสารประกอบไนโตรเจนบางช่วงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจน สารประกอบไนโตรเจนที่ถูกสังเคราะห์แล้วและถูกใช้ไปโดยพืชหรือสัตว์จะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งอยู่ในเนื้อเยื่อของพืชหรือสัตว์ แต่บางส่วนจะถูกถ่ายเทออกมาได้แก่ โปรตีน ยูเรีย ยูริคแอซิด และไขมันบางชนิดที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ นอกจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนแล้ว ยังมีสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และ ไนเตรท ในน้ำจืดจะมีสารประกอบเหล่านี้อยู่เป็นจำนวนน้อย สารประกอบเหล่านี้อาจถูกใช้เป็นเครื่องชี้ความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำได้ ทั้งนี้เพราะพวกพืชสามารถใช้สารประกอบเหล่านี้ไปในการปรุงแต่งอาหารได้

สารประกอบไนโตรเจนในธรรมชาติและในระบบบำบัดน้ำเสียมีความสัมพันธ์กัน แอมโมเนียในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำเสีย ในวงจรชีวภาพแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียกลายเป็นไนไตรท์ และไนเตรท โดยการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ไนเตรทในแหล่งน้ำหรือที่มีในดินจะถูกย่อยสลายโดยสาหร่ายและพืชได้เช่นเดียวกับแอมโมเนียและแบคทีเรีย สามารถเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียโดยการเกิดปฏิกิริยาแอสสิมิเลชัน (Assimilation) เมื่อต้องการใช้แอมโมเนียเพื่อการสร้างเซลล์หรือใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจนคืนสู่บรรยากาศ (ณัฐกฤตา, 2543)

2.1.2 แหล่งที่มาของไนโตรเจน

แหล่งที่มาของไนโตรเจนในแหล่งน้ำธรรมชาติ พบว่า เกิดจากธรรมชาติ (Natural Sources) และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ (Manmade Sources)

2.1.2.1 สารประกอบไนโตรเจนที่มาจากธรรมชาติ ส่วนใหญ่มาจากแหล่งที่ไม่ชี้ชัด ได้แก่ การกร่อนของหน้าดิน (Dustfall) การไหลบ่าของน้ำป่า (Nonurban Runoff) และการเคลื่อนย้ายของตะกอนดิน (Precipitation) รวมทั้งอาจมาจากน้ำฝน และน้ำใต้ดินตลอดจนเศษซากพืชที่เน่าเปื่อย

2.1.2.2 สารประกอบไนโตรเจนที่มาจากการกระทำของมนุษย์ ส่วนใหญ่มาจากแหล่งชี้ชัด เช่น น้ำทิ้งเทศบาล (Municiple Wastewater) ซึ่งได้แก่ น้ำทิ้งที่มาจากบ้านเรือน อาคารพาณิชย์ นอกจากนั้น น้ำทิ้งจากพื้นที่การเกษตร (Drainage from Agricultural Lands) ซึ่งมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณมาก ก่อให้เกิดการสะสมของไนเตรทในน้ำใต้ดินมากขึ้น และอาจปนเปื้อนมาจากพื้นที่เลี้ยงปศุสัตว์ (Feedlots) รวมทั้งน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและของเสียจากชุมชน เช่น น้ำชะมูลฝอย (Leachate) เป็นแหล่งนำไนโตรเจนมาปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติมากที่สุด

2.1.3 ภาวะมลพิษที่เกิดจากไนโตรเจน

แม้ว่าไนโตรเจนเป็นธาตุสำคัญที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต แต่เมื่อพิจารณาในแง่สารมลพิษ ไนโตรเจนจัดเป็นธาตุที่ก่อให้เกิดมลพิษได้เช่นกัน เมื่อไนโตรเจนเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสภาพแวดล้อม ดังนี้

2.1.3.1 ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen, DO) ในแหล่งน้ำลดต่ำลง เนื่องจากออกซิเจนถูกใช้ไปในการย่อยสลายสารไนโตรเจนอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาในแหล่งน้ำ ซึ่งความเข้มข้นออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำที่ต่ำเกินไป ก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อาศัยอยู่ นอกจากนั้นยังพบว่า แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทมีความเป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำบางชนิด ซึ่งความเข้มข้นแอมโมเนียและไนไตรท์ที่มากกว่า 0.5 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีความเป็นพิษต่อปลาและการสะสมของไนเตรทในแหล่งน้ำ เป็นปัจจัยหนึ่งที่จำกัดประสิทธิภาพในการทำเกษตรกรรมใต้น้ำ (Aquaculture)

2.1.3.2 ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เป็นกระบวนการที่เกิดจากสภาพของแหล่งน้ำมีปริมาณสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากเกินไป ประกอบกับมีความเข้มข้นของแสงสว่างเพียงพอ ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำจำนวนมาก โดยเฉพาะพวกสาหร่ายสีเขียวเซลล์เดียว (Algae) ซึ่งเมื่อพืชน้ำเหล่านี้ตายลงจะเกิดการตกตะกอนสะสมในแหล่งน้ำ ผลที่ตามมาคือทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินและเกิดการสะสมของสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา

2.1.3.3 เป็นอันตรายต่อสุขภาพ น้ำที่มีปริมาณไนไตรท์และไนเตรทสูงเกิน อาจทำให้เกิดโรค Methaemoglubinemia หรือโรค Blue Babies ในทารก โดยไนไตรท์จะทำปฏิกิริยากับ

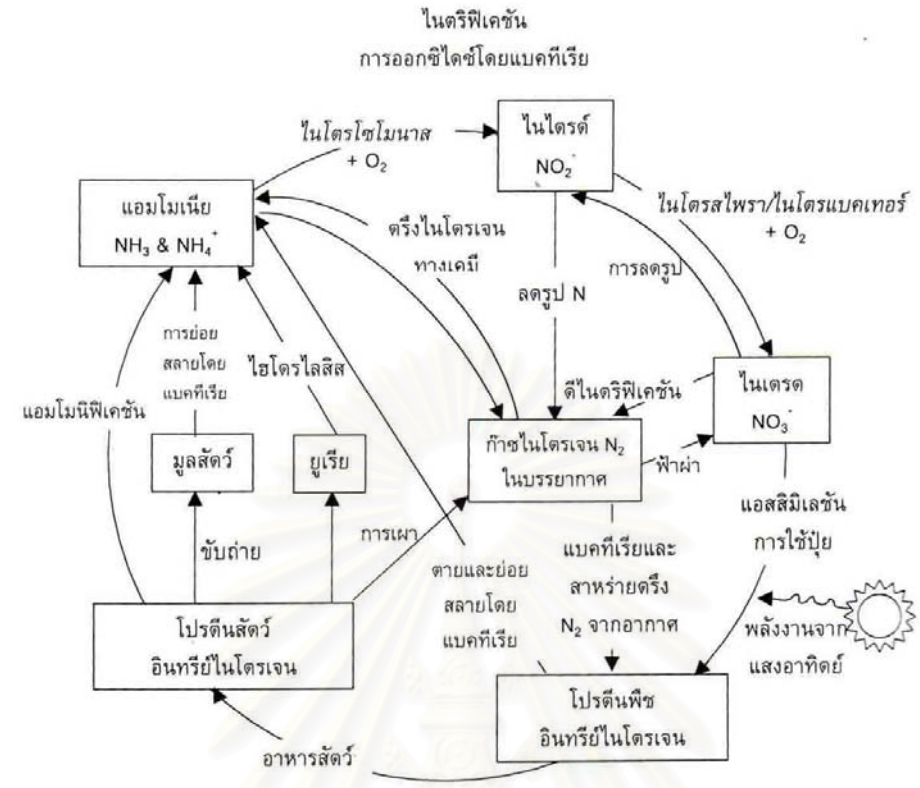
ฮีโมโกลบินในเลือดกลายเป็น Methemoglobin ซึ่งไม่สามารถรับส่งออกซิเจนในเลือดได้ ทำให้เด็กทารกมีอาการหายใจไม่ออกและตัวเขียว นอกจากนั้นการปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งประเภทไนโตรซามีน (ณัฐกฤตา, 2543)

2.1.4 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับโปรตีนและกรดนิวคลีอิกในเซลล์จุลชีพและพืชรวมทั้งสัตว์ จึงมีความสำคัญต่อวงจรชีวิตของสัตว์ทุกรูปแบบ แม้ว่าไนโตรเจนจะมีมากถึงร้อยละ 79 ในบรรยากาศ แต่ไนโตรเจนก็กลับเป็นธาตุที่มีอยู่อย่างจำกัดในดินและสิ่งแวดล้อมน้ำ ทำให้การเกษตรทำได้ไม่ดีนักในบางประเทศ และเนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่คงตัวมากและเปลี่ยนรูปไม่ได้ง่าย ๆ ยกเว้นบางกรณีเช่น ฟ้าผ่า หรือมีอุณหภูมิและความดันสูง จุลินทรีย์จึงมีบทบาทมากในการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียมภายใต้กระบวนการที่เรียกว่า แอมโมนิฟิเคชัน แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งจะถูกใช้ต่อไปได้ง่าย ๆ โดยพืชและสาหร่ายสีเขียว ซึ่งจะกลายเป็นอาหารของสัตว์ในวงจรชีวิตอีกขั้นหนึ่ง พืชและสัตว์เมื่อตายลงซากของมันจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลับมาเป็นแอมโมเนีย ขณะเดียวกันสัตว์ก็สามารถขับถ่ายสารอินทรีย์ออกมาซึ่งแปรรูปไปเป็นแอมโมเนียได้อีกเช่นกัน

เนื่องจากธาตุไนโตรเจนมีค่าวาเลนซี (Valency) หลายค่า ดังนั้นจึงอยู่ในรูปสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compound) ได้หลายรูปด้วยกันและสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาได้ตามสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซออกซิเจน กระบวนการเกิดมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) กระบวนการไนตริฟิเคชัน และกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันอยู่ตามธรรมชาตินั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน

ที่มา : ธงชัย, 2544

2.1.5 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของกรดอะมิโน ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของพืชและสัตว์ เมื่อมีการขับถ่ายสิ่งปฏิกูลออกมา หรือเมื่อสิ่งมีชีวิตนั้นตายลง ไนโตรเจนจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรไนโตรเจนมีทั้งกระบวนการทางชีววิทยา เคมี และฟิสิกส์ เช่น การเกิดฟ้าแลบ ฟ้าผ่า ก็สามารถเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเป็นไนเตรทได้ ส่วนกระบวนการทางชีววิทยา คือ การย่อยสลาย หรือเปลี่ยนรูปไนโตรเจนโดยการกระทำของจุลินทรีย์

การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน จากแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ไนเตรท เกิดจากการเติมออกซิเจนเข้าไป เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังสมการ

$$\text{Organic} - N + O_2 \longrightarrow NH_3 - N + O_2 \longrightarrow NO_2 - N + O_2 \longrightarrow NO_3 - N$$

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยานี้อาจเกิดในทางตรงกันข้าม ถ้ามีปริมาณออกซิเจนในน้ำน้อยออกซิเจนในสารประกอบไนเตรทจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยากลุ่ม Denitrifying Bacteria ปฏิกิริยากลุ่มนี้เรียกว่าดีไนตริฟิเคชัน ดังสมการ

$$NO_3^- + 0.833\ CH_3OH \longrightarrow 0.5\ N_2 + 0.833\ CO_2 + OH^-$$

สมการดีไนตริฟิเคชันที่มีน้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนแสดงได้ดังนี้

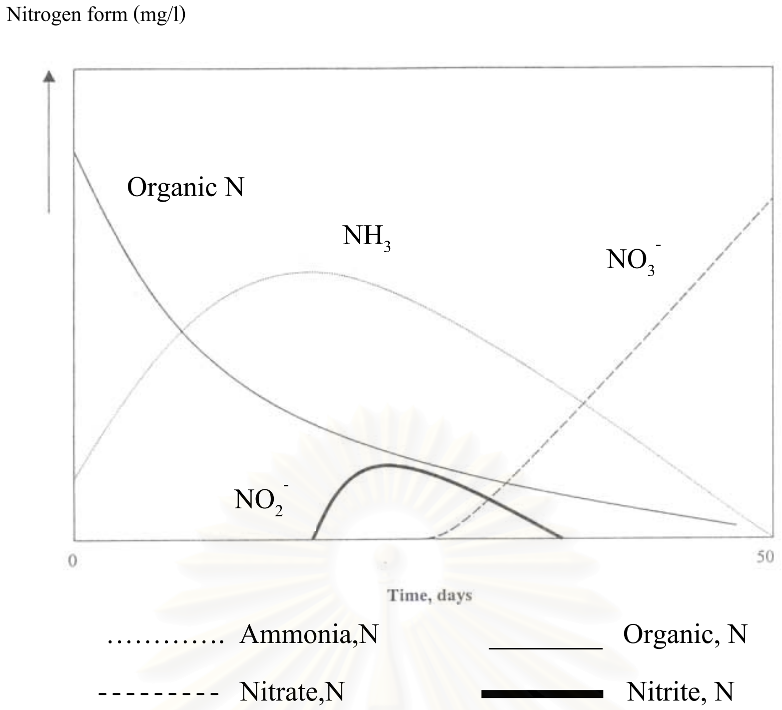
$$C_{10}H_{19}O_3N + 10\ NO_3^- \longrightarrow 10\ CO_2 + 3H_2O + NH_3 + 100\ H^+$$

สมการดีไนตริฟิเคชันที่มีอะซิเตท เป็นแหล่งคาร์บอนแสดงได้ดังนี้

$$5CH_3COOH + 8\ NO_3^- \longrightarrow 4N_2 + 10CO_2 + 6\ H_2O + 8\ OH^-$$

ในน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนไปได้หลายรูป โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาโดยในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ สารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียจะเปลี่ยนสภาพแอมโมเนียไนโตรเจน เนื่องจากการย่อยสลายโปรตีน และการ Hydrolysis ยูเรียของแบคทีเรียในเซลล์ของแบคทีเรียเองก็ประกอบไปด้วยไนโตรเจนประมาณ 12-13 % ดังนั้น แอมโมเนียบางส่วนจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเซลล์ใหม่ และหากเกิด Autooxidation และการ Lysis แอมโมเนียส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยกลับออกมาจากเซลล์แบคทีเรีย และการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนีย ให้อยู่ในรูป ไนไตรท์ และไนเตรท จะเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีความจำกัดของปริมาณออกซิเจน และถ้าหากอยู่ในสภาวะที่ขาดออกซิเจน (Anaerobic condition) ไนไตรท์และไนเตรท จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจน เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยแสดงดังรูปที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนที่เวลาต่างๆ

ที่มา : กำพล, 2536

2.1.6 รูปแบบของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย

เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนมีได้มากมายหลายรูปในวาเลนซีที่แตกต่างกันถึง 7 ค่า ได้แก่ HN_3^{-3}, N_2^{0} , $N_2^{+1}O$, $N^{+2}O$, $N_2^{+3}O$, $N^{+4}O_2$, $N_2^{+5}O_5$ ซึ่งมีผลทำให้เคมีของไนโตรเจนมีความยุ่งยากมาก โดยทั่วไปแล้วสารประกอบไนโตรเจนที่มักพบในน้ำเสีย มี 4 ชนิดด้วยกัน คือ

ก. สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-Nitrogen Compounds)

หมายถึง สารอินทรีย์ที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก ซึ่งสารพวกนี้เป็นส่วนประกอบของร่างกายพืชและสัตว์ เป็นต้น

ข. สารแอมโมเนีย – ไนโตรเจน (Ammonia-Nitrogen Compounds)

หมายถึง สารไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในรูปแอมโมเนีย (NH_3) หรือสารประกอบแอมโมเนียม (NH_4^+) ซึ่งสมดุลย์กัน โดยจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเสีย พบว่าที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7.2 จะอยู่ในรูปของ NH_4^+ และเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 7.2 จะอยู่ในรูปของ NH_3 ดังสมการ

$$NH_3 + H_2O \longleftrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

ตามธรรมชาติจะพบแอมโมเนียในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และในน้ำเสีย แอมโมเนียจำนวนมากจะเกิดจากกระบวนการดีแอมมิเนชัน (Deamination) ของสารไนโตรเจนอินทรีย์ และจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของยูเรีย นอกจากนี้ยังอาจเกิดตามธรรมชาติ โดยปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของไนเตรทภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน สำหรับในแหล่งน้ำใดที่มีปริมาณของแอมโมเนียมากเกินไปจะทำให้พืชน้ำเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกว่ายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าลดลง เป็นผลให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย

ค. สารประกอบไนไตรท์ (Nitrite-Nitrogen Compounds)

หมายถึง สารประกอบที่อยู่ในรูปของ NO_2^- ซึ่งเกิดจากการออกซิไดส์ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น โดยปกติจะพบไนไตรท์ในน้ำทิ้งที่ออกมาจากระบบบำบัดน้ำเสีย มักไม่พบตามแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากไนไตรท์เป็นอิออนที่ไม่คงตัวและเปลี่ยนเป็นไนเตรทได้เร็ว

ง. สารประกอบไนเตรท (Nitrate-Nitrogen Compounds)

หมายถึง สารประกอบที่อยู่ในรูปของ NO_3^- ซึ่งเป็นผลจากการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่นและหากอยู่ในสภาพที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินพอแล้ว สารประกอบไนเตรทนี้ จัดได้ว่าเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรมากที่สุด

โดยทั่วไปแล้วในแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะมีไนเตรทในปริมาณน้อยมาก แต่จะพบไนเตรทในปริมาณมากในน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียจะเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ ให้เป็นไนเตรท นอกจากนี้ ไนเตรทจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำเช่นเดียวกับแอมโมเนีย และถ้าหากเด็กทารกได้รับน้ำที่มีไนเตรทเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เป็นอันตรายต่อเด็กทารก เนื่องจากทำให้เกิดโรคเมทฮีโมโกลบิเนเมีย (Methemoglobinemia) ทำให้ธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงที่ปกติจะอยู่ในรูปของ Fe^{2+} ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น Fe^{3+} เม็ดเลือดแดงจึงไม่สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงร่างกายได้ ทำให้ร่างกายมีสีน้ำเงินหรือม่วง นอกจากนี้อาจทำให้ทารกหมดสติเพราะขาดออกซิเจนและอาจตายได้

2.1.7 กระบวนการบำบัดไนโตรเจน

กระบวนการบำบัดไนโตรเจนในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพ ซึ่งการที่จะเลือกใช้กระบวนการบำบัดที่เหมาะสมที่สุดเพียงแบบใดแบบหนึ่งนั้นคงกระทำได้ยาก

2.1.7.1 กระบวนการทางกายภาพ

ก. การไล่อากาศ (Air Stripping)

กระบวนการนี้ดัดแปลงมาจากการไล่ก๊าซออกจากน้ำ โดยการพ่นอากาศเข้าไปแทนที่ เป็นกระบวนการแยกก๊าซหรือสารระเหยง่ายออกจากน้ำเสียใช้ในการกำจัดแอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ระเหยเป็นไอง่ายพบว่า pH สูงกว่า 10 สามารถไล่ก๊าซแอมโมเนียออกจากน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 8.5 แต่แอมโมเนียที่กำจัดได้อาจทำปฏิกิริยาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้

ข. กระบวนการกำจัดเกลือแร่อื่น ๆ

กระบวนการกำจัดเกลือแร่อื่น ๆ ได้แก่ การแยกสลายไฟฟ้า (Electrodialysis) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) แต่กระบวนการเหล่านี้ยังมีปัญหาที่ต้องแก้ไขอยู่มาก

2.1.7.2 กระบวนการทางเคมี

ก. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ในการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ในการกำจัดแอมโมเนียและไนเตรท การบำบัดทำได้โดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามมาจับกับประจุที่ต้องการกำจัด การใช้กระบวนการนี้เพื่อกำจัดไนโตรเจนในรูปไอออน สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 80-90 แต่มีปัญหาสารอินทรีย์ในน้ำเสียมักเกาะติดอยู่กับอนุภาคเรซินที่ใช้ และเมื่อใช้งานไปนาน ๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ ซึ่งต้องมีการฟื้นสภาพเรซิน (Regenerate) ด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งก่อให้เกิดปัญหา Brine Waste ตามมาและต้องนำมาบำบัดก่อนที่จะระบายทิ้ง

ข. กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Treatment)

กระบวนการนี้สามารถลดแอมโมเนียได้มากถึงร้อยละ 80 โดยทำให้ตกตะกอนมาจากน้ำเสียในรูป $MgNH_4PO_4$

ค. การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation)

เป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย เกิดเป็นตะกอนหนักซึ่งจมตัวได้ แต่วิธีการนี้สามารถกำจัดแอมโมเนียและไนเตรทได้น้อยมาก โดยมากกำจัดได้เพียงสารอินทรีย์ไนโตรเจน

ง. การกำจัดด้วยคลอรีน (Chlorination)

โดยการเติมสารไฮโปคลอไรด์เข้าทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียในน้ำเสียได้เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะปล่อยสู่บรรยากาศ ในทางปฏิบัติ ต้องใช้คลอรีน 9-10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ต่อแอมโมเนีย 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึงร้อยละ 90 แต่มีข้อเสียคือ ไม่

สามารถกำจัดไนไตรท์ ไนเตรท และสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้และอาจมีปริมาณคลอรีนตกค้างหลังการบำบัด จึงต้องมีการบำบัดคลอรีนก่อนที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง

2.1.7.3 กระบวนการทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากไนโตรเจนในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารละลายและในรูปอนุภาค ดังนั้น การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ จึงเป็นวิธีการบำบัดที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการบำบัดที่เลือกใช้ อาจพิจารณาตั้งแต่กระบวนการบำบัดแบบง่าย ๆ เช่น Reed-Bed หรือการใช้สาหร่ายในการกำจัดไนโตรเจน โดยสาหร่ายจะใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียเป็นแหล่งอาหารและใช้ในการสร้างเซลล์ ไปจนถึงการใช้เทคโนโลยีระดับสูง เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) และระบบถังกรองชีวภาพ (Biofilter)

และวิธีการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งคือ กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันโดยไนตริฟิเคชันเป็นกลไกการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเป็นไนเตรท แบคทีเรียได้พลังงานเพื่อดำเนินกิจกรรมและการเจริญเติบโตของเซลล์จากการออกซิเดชันสารประกอบไนโตรเจน กระทำโดยแบคทีเรียชนิด Autotrophic 2 กลุ่ม คือ *Nitrosomonas spp.* ซึ่งเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ และ *Nitrobacter spp.* ซึ่งเปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนเตรท ส่วนดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศ โดยจุลินทรีย์ Autotroph หรือ Heterotroph ดีไนตริฟิเคชันได้รับความสนใจ ในขณะที่ไนตริฟิเคชันเพียงแต่เปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนเตรท

กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันนิยมใช้โดยทั่วไปในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย เนื่องจากสามารถออกแบบได้ง่าย และเพิ่มเติมเข้ากับระบบบำบัดเดิมได้ดี การดำเนินการอาจทำได้หลายแบบ โดยอาจรวมสองกระบวนการไว้ในหน่วยบำบัดเดียวหรือแยกเป็นไนตริฟิเคชันแล้วตามด้วยดีไนตริฟิเคชัน การรวมทั้งสองกระบวนการเข้าด้วยกันต้องการพื้นที่น้อยกว่า แต่อัตราการบำบัดช้า และความคงตัวมีน้อย ระบบบำบัดอาจเป็นถังแบบถังกวนหรือฟิล์มตรึง การบำบัดในระบบฟิล์มตรึงจะช่วยลดขั้นตอนการแยกสลัดจ์ได้และ การกำจัดไนโตรเจนโดยอาศัยกลไกการเกิดไนตริฟิเคชันอย่างเดียว อาจทำให้เกิดปัญหา Algae Bloom ตามมา เนื่องจากมีไนเตรทในแหล่งน้ำมากเกิน ดังนั้น เพื่อเป็นการกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสียอย่างสมบูรณ์ การเลือกใช้ทั้ง 2 กระบวนการบำบัด จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ควรพิจารณา

ตารางที่ 2.1 วิธีการกำจัดไนโตรเจนรูปต่าง ๆ

Nitrogen Compound	**Nitrogen Removal**		
	Biochemical Transformation	**Disposal**	**Assimilation**
Organic Nitrogen	Ammonification (Org.N $\rightarrow$ NH_4-N)	-	-
Ammonia Nitrogen	Nitrification (NH_4-N $\rightarrow$ NO_3-N)	-	Assimilation (NH_4-N $\rightarrow$ Protein)
Nitrite Nitrogen	Nitrification (NO_2-N $\rightarrow$ NO_3-N)	Denitrification (NO_2-N $\rightarrow$ N_2)	-
Nitrate Nitrogen	-	Denitrification (NO_2-N $\rightarrow$ N_2)	Assimilation (NH_4-N $\rightarrow$Protein)

ที่มา : Metcalf and Eddy, 1991

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 กระบวนการและประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนแบบต่าง ๆ

กระบวนการบำบัด	สารประกอบไนโตรเจน			% การกำจัดทั้งหมด
	Organic-N	NH_3-NH_4^+	NO_3^--N	
1.วิธีการบำบัดแบบดั้งเดิม				
.การบำบัดขั้นแรก	กำจัดได้ 10-20 %	ไม่มีผล	ไม่มีผล	5-10
.การบำบัดขั้นที่สอง	Urea $\longrightarrow$ NH_3-NH_4^+	กำจัดได้ $<$10%	มีผลเล็กน้อย	10-30
2.วิธีทางชีวภาพ				
Bacterial Assimilation	ไม่มีผล	กำจัดได้ 40-70%	กำจัดได้เล็กน้อย	30-70
Denitrification	ไม่มีผล	ไม่มีผล	กำจัดได้ 80-90%	70-95
สาหร่าย	มีส่วนหนึ่งเปลี่ยนเป็น NH_3-NH_4^+	เปลี่ยนเป็นเซลล์	เปลี่ยนเป็นเซลล์	50-80
Nitrification	มีผลจำกัด	เปลี่ยนเป็น NO_3^-	ไม่มีผล	5-20
บ่อออกซิเดชัน	มีส่วนหนึ่งเปลี่ยนเป็น NH_3-NH_4^+	ส่วนหนึ่งถูกกำจัดโดย Stripping	บางส่วนถูกกำจัดโดย Nitrification-Denitrification	20-90
3.วิธีทางเคมี				
Break-Point Chlorination	ไม่แน่นอน	กำจัดได้ 90-100%	ไม่มีผล	5-20
การตกตะกอนเคมี	กำจัดได้ 50-70%	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย	20-30
การดูดซับด้วยคาร์บอน	กำจัดได้ 30-50%	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย	10-20
การแลกเปลี่ยนอิออนสำหรับแอมโมเนีย	ไม่แน่นอน	กำจัดได้ 80-97%	ไม่มีผล	70-95
การแลกเปลี่ยนอิออนสำหรับไนเตรท	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย	กำจัดได้ 75-90%	70-90
4.วิธีทางกายภาพ				
การกรอง	30-95% ของส่วนที่ไม่ละลาย	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย	20-40
Air Stripping	ไม่มีผล	กำจัดได้ 60-95%	ไม่มีผล	50-90
Electrodialysis	100% ของส่วนที่ไม่ละลาย	กำจัดได้ 30-50%	กำจัดได้ 30-50%	40-50
Reverse Osmosis	กำจัดได้ 60-90%	กำจัดได้ 60-90%	กำจัดได้ 60-90%	80-90

- แอมโมเนียไนโตรเจน ประกอบด้วย NH_3 และ NH_4^+ ถ้า pH ต่ำจะอยู่ในรูป NH_4^+ ถ้า pH สูงจะอยู่ในรูป NH_3
- คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดไนโตรเจนทุกรูปที่เข้ากระบวนการ

ที่มา : Metcalf and Eddy, 1991

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการออกซิเดชันที่เกิดขึ้นทางชีววิทยาเพื่อทำการเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโนเนียให้กลายเป็นไนเตรท โดยใช้แอมโมเนียและไนไตรท์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดจากจุลินทรีย์ชนิด Nitrifying Bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Autotrophic Bacteria ที่ออกซิไดส์สารอนินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันจะประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรท์โดยอาศัยจุลินทรีย์ไนโตรโซโมแนส *(Nitrosomonas)* ในขั้นตอนนี้ยังมีไนตริไฟอิงแบคทีเรียตัวอื่นอีก เช่น *Nitrosospira, Nitrosolobus* และ *Nitrosovibrio* ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการเปลี่ยนไนไตรท์ให้เป็น ไนเตรท โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดไนโตรแบคเตอร์*(Nitrobacter)* ดังสมการ

Nitrosomonas :

$$2\,NH_4^+ + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,NO_2^- + 4\,H^+ + 2\,H_2O$$

Nitrobacter :

$$2\,NO_2^- + O_2 \longrightarrow 2\,NO_3^-$$

ปฏิกิริยารวม :

$$NH_4^+ + 2\,O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O$$

แอมโมเนียมอิออนบางส่วนจะถูกนำไปสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์จุลินทรีย์ใหม่ ดังสมการ

ปฏิกิริยาการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ :

$$4\,CO_2 + HCO_3^- + NH_4^+ + H_2O \longrightarrow C_5H_7O_2N + 5\,O_2$$

ปฏิกิริยารวมของการเกิดออกซิเดชันและการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ :

$$NH_4^+ + 1.83\,O_2 + 1.98\,HCO_3^- \longrightarrow 0.021\,C_5H_7O_2N + 0.98\,NO_3^- + 1.041\,H_2O + 1.88\,H_2CO_3$$

แบคทีเรียกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต (Obligate aerobe) และจะได้รับพลังงานสำหรับสำหรับการเจริญเติบโตจากการออกซิไดส์อนินทรียสารจึงจัดอยู่ในพวก
เคโมออโตโทรป (chemoautrotroph) เซลล์ที่พบมีรูปร่างหลายแบบ เช่น รูปกลม รูปท่อน รูปเกลียว และรูปรี ไม่พบ endospore เซลล์ติดสีแกรมลบ สามารถเคลื่อนที่ได้ และแบคทีเรียสกุลนี้

เติบโตช้า โดยระยะเวลาที่ *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* เพิ่มจำนวนเซลล์เป็นสองเท่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 13 และ 14 ชั่วโมง ตามลำดับ จึงเป็นสาเหตุให้กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นช้า

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.2.1.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)

ในการออกซิไดส์แอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์นั้นพบว่ามีความต้องการออกซิเจน 3.22 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมของแอมโมเนียไนโตรเจน และต้องการออกซิเจนในการออกซิไดส์ไนไตรท์ 1.14 มิลลิกรัมต่อไนไตรท์ไนโตรเจนเพื่อให้กลายเป็นไนเตรทตามลำดับ ดังนั้นในทางทฤษฎีจะถือว่า nitrogenous oxygen demand (NOD) เท่ากับ 4.32 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมของแอมโมเนียไนโตรเจน แต่ในขณะเดียวกันในระหว่างขบวนการสังเคราะห์เซลล์จะมีออกซิเจนเกิดขึ้นเล็กน้อยจึงทำให้ความต้องการออกซิเจนของระบบบำบัดน้ำเสียต่ำกว่าทางทฤษฎี ซึ่งตามปกติปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดเมื่อมีออกซิเจนละลายในถังปฏิกิริยามากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ออกซิเจนละลายน้ำไม่ควรต่ำกว่า 0.5-2.0 โดยถ้ามีออกซิเจนในน้ำมากเกินพอจะทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันเร็ว แต่ถ้ามีปริมาณออกซิเจนในน้ำปริมาณต่ำจะเกิดกระบวนการรีดักชัน

2.2.1.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมของไนตริไฟอิงแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 28-36 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันสามารถเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 5-35 องศาเซลเซียส อัตราการเจริญสูงสุดจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิที่จะเกิดปฏิกิริยาได้สูงที่สุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 15-35 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะลดลงอย่างรวดเร็วและลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์เมื่ออุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันมีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำย่อยของแบคทีเรียเปลี่ยนสภาพ อีกทั้งยังสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งจะลดลงหากอุณหภูมิสูงด้วย

2.2.1.3 พีเอช

พีเอชที่เหมาะสมสำหรับ *Nitrosomonas* คือ 8.5-8.6 และสำหรับ *Nitrobacter* คือ 8.0-9.3 พีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน คือ 8.4 และ 90 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันที่ดีจะเกิดในช่วงพีเอช 7.8-8.9 พีเอชที่ไม่อยู่ในช่วง 7.0-9.8 จะทำให้อัตราการเกิด

ไนตริฟิเคชันต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันจะลดลงเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 6.3-6.7 และ 5-5.5

ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีค่าเป็นด่างเล็กน้อย กลไกที่ใช้อธิบายผลของการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่าง ammonia-ammonium และ nitrite- nitrous acid โดยแอมโมเนียอิสระ (NH_4) และกรดไนตรัสอิสระ (HNO_2) จะยับยั้งการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพราะพีเอชภายในเซลล์ของไนตริไฟอิงแบคทีเรียต่ำกว่าสภาวะแวดล้อมภายนอก แอมโมเนียอิสระจึงผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย โดยยังมีแอมโมเนียอิออน อยู่ในสภาพแวดล้อม และเมื่อพีเอชภายในเซลล์สูงกว่าสภาพแวดล้อมภายนอกกรดไนตรัสอิสระจะผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย แสดงให้เห็นความสามารถของแอมโมเนียอิสระและกรดไนตรัสอิสระที่ผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียจะยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าแอมโมเนียและไนไตรท์อิออน

2.2.1.4 ปริมาณของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

ไนตริไฟอิงแบคทีเรียมีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยตรง เกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้เป็นไนเตรท โดยจำนวนที่มีผลต่อปฏิกิริยามีค่าระหว่าง 1,000-10,000 MPN ต่อมิลลิลิตร และเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของแบคทีเรียกับอัตราส่วนของบีโอดีห้าต่อทีเคเอ็น ดังตารางที่ 3 สามารถอธิบายได้ว่าอัตราส่วนของ BOD_5/TKN จะเป็นปฏิภาคกับสัดส่วนของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

2.2.1.5 อายุตะกอน (Sludge age) ปริมาณอินทรีย์สาร (organic loading) และระยะเวลาเก็บกักน้ำ (hydraulic loading)

การที่มีปริมาณอินทรีย์สารในน้ำมาก ๆ ทำให้เชื้อกลุ่ม Autotroph ซึ่งเจริญได้ช้าจะไม่สามารถแย่งออกซิเจนได้ทันเชื้อในกลุ่ม Heterotroph ซึ่งเจริญได้รวดเร็วกว่า ต้องมีการกำจัดอินทรีย์สารให้ลดลงถึงระดับหนึ่งก่อน เชื้อกลุ่ม Autotroph จึงจะเจริญ และสามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ เนื่องจากเชื้อกลุ่ม Autotroph เจริญได้ช้าดังนั้นในระบบบำบัดต้องมีอายุตะกอนนานพอที่จะป้องกันการหลุดลอกของตะกอน (wash out) ออกจากระบบ และต้องมีระยะเวลาเก็บกักน้ำไว้ในระบบนานพอที่เชื้อจะสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ ถ้าระยะเวลาเก็บกักสั้นนอกจากเชื้อจะไม่สามารถกำจัดแอมโมเนียได้แล้วยังอาจเกิดการหลุดลอกออกจากระบบได้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของบีโอดีห้าต่อทีเคเอ็นกับไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

BOD_5/TKN	**Nitrifying Fraction**
0.5	0.35
1.0	0.21
2.0	0.12
3.0	0.083
4.0	0.064
5.0	0.054
6.0	0.043
7.0	0.037
8.0	0.033
9.0	0.029

ที่มา : Tchobanoglos and Burtan,1991

นอกจากนี้อายุตะกอนของกระบวนการต้องมีค่ามากพอเพื่อที่จะให้มีค่าบีโอดีหรือสารอินทรีย์ในน้ำต่ำ ซึ่งจะทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียเติบโตได้ สำหรับประเทศหนาวอายุตะกอนอาจสูงถึง 6 – 10 วัน แต่สำหรับประเทศไทยที่เป็นเมืองร้อนอายุตะกอนเพียงแค่ 2 – 3 วันก็สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ (ธงชัย, 2544) แต่ในปัจจุบันมักประสบปัญหาว่าจะมีวิธีการอย่างไรในการที่จะทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ เพราะอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้อินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียถูกย่อยสลายไปได้มาก จึงมีเหลือมาถึงกระบวนการ ดีไนตริฟิเคชันน้อยลง

2.2.1.6 ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์อิออน

อัตราการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับสมดุล ammonia-ammonium และ Nitrite-nitrous acid ดังที่กล่าวข้างต้น การยับยั้งเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระและกรดไนตรัส ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์อิออนในช่วงกว้างจะถูกออกซิไดส์โดยไนตริไฟอิงแบคทีเรีย และความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ปีกและเกษตรกรรมอาจอยู่ในช่วงที่จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ แอมโมเนียอิสระที่ระดับความเข้มข้น 0.1-1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 10-150 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะยับยั้งการเจริญและกิจกรรมต่าง ๆ ของเชื้อ *Nitrobacter* และ *Nitrosomonas* ตามลำดับ

2.2.1.7 ความเป็นพิษและสารที่ชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

สารที่ทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียลดลงมักมีผลกระทบต่อ *Nitrosomonas* มากกว่า *Nitrobacter* โดยที่สารดังกล่าวจะไปขัดขวางเมตาบอลิซึมของเซลล์หรือทำลายปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแบคทีเรียสามารถสร้างอาหารได้เองจากสารอนินทรีย์ บางครั้งสารอินทรีย์สามารถขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ในแง่ที่จะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำมีปริมาณน้อยลง หรือเกิดการแก่งแย่งกันระหว่างเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและเฮทเทอโรโทรบ แต่ในบางสภาวะสารอินทรีย์ก็อาจเป็นตัวเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้

2.2.1.8 ความเค็ม

ความเค็ม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีผลทางลบต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย แต่แบคทีเรียกลุ่มนี้ ก็มีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับความเค็มได้ดีพอควร จากผลการทดลองของระบบ Anoxic-aerobic พบว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถทนต่อความเค็มได้ดีกว่า Heterotroph และไนตริไฟอิงแบคทีเรียเหล่านี้จะทำงานได้ดีขึ้น หากมีเวลาปรับตัวให้เคยชินกับคลอไรด์มาก่อน

2.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรทไปเป็นก๊าซไนโตรเจนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อย โดยเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative heterotrophs ที่เจริญได้อย่างรวดเร็วและนอกจากจะสามารถรีดิวซ์ไนเตรทได้แล้วยังสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้อีกด้วย ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่มักจะพบในระบบบำบัดน้ำเสียมีอยู่หลายจีนัสด้วยกัน ดังนี้ *Acenitobacter, Achromobacter, Aerobacter, Alcaligenes, Bacillus, Cytophaga, Gluconobacter, Flavobacterium, Halobacterium, Hyphomicrobium, Micrococcus, Moraxella, Paracoccus, Propionebacteriu, Proteus, Pseudomonas, Rhodopseudomonas, Spirillum, Thiobacillus,* และ *Xanthomonas* ในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันไม่ต้องการแบคทีเรียที่มีความจำเพาะเหมือนกับในกรณีของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ด้วยเหตุนี้เองกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจึงสามารถเกิดได้ง่าย (วิฐู, 2546) โดยมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

ไนเตรทจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ส่วนไนตริกออกไซด์ (NO) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ปล่อยออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย แต่ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่งจะถูกผลิตออกมาในปริมาณน้อย ถ้ากระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรทไนโตรเจน (C/N) ไม่น้อยกว่า 3.5 และตามปกติแล้วก๊าซไนโตรเจนจะเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกปล่อยออกมา (วิฐู, 2546)

โดยไนเตรทสามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยสองวิธี ได้แก่

1. วิธีแอสสิมิเลชัน (Assimilatory Denitrification)

แบคทีเรียต้องใช้ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและสร้างเซลล์ใหม่ โดยรูปของไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ แอมโมเนียม แต่หากมีแอมโมเนียมในปริมาณไม่เพียงพอแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนไนเตรทให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมเพื่อนำมาใช้ได้

สำหรับวิธีการนี้ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียมโดยอาศัยเอนไซม์รีดักเตสหลายชนิดก่อนที่จะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ซึ่งเป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลิอิก

วิธีดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชันนี้มีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

2. วิธีดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory Denitrification)

ในวิธีนี้แบคทีเรียดีไนตริไฟอิงเป็นได้ทั้งแบบ Heterotroph และ Autotroph เหมือนกับกระบวนการไนตริฟิเคชันแตกต่างกันตรงที่กระบวนการนี้ต้องเป็นแอนอกซิก (Anoxic) คือมีไนเตรทแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระและแบคทีเรียที่มีบทบาทมากได้แก่ Heterotroph โดยแบคทีเรีย Heterotroph นี้มีความต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งของคาร์บอนและเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

จากการที่แบคทีเรียมีความต้องการคาร์บอนเพื่อใช้ในกระบวนการจึงต้องมีการพิจารณาแหล่งของคาร์บอนว่ามาจากแหล่งใด หากปริมาณคาร์บอนไม่เพียงพอแบคทีเรียจะใช้คาร์บอนที่สะสมไว้ภายใน (Endogenous Carbon) ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายของแบคทีเรียเองในขั้น Death Phase แต่อาจมีปริมาณไม่เพียงพอ ทำให้การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนลงไปให้แก่แบคทีเรียโดยอาจมาจากน้ำเสีย เศษอาหาร หรืออาจมาจากสารเคมีที่เติมลงไป เช่น เมทานอล เอทานอล อะซิติก หรือ กรดซิตริก เป็นต้น โดยปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสมและสม่ำเสมอส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้สูงสุด ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันมักเกิดไม่สมบูรณ์โดยเกิดเป็นก๊าซระดับกลาง คือ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ และก๊าซไนตรัสออกไซด์นี้ยังจัดเป็นก๊าซพิษ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ในระบบบำบัดน้ำเสียที่พบไนตรัสออกไซด์(N_2O) ได้มาก คือ ระบบบำบัดที่มีอัตราซีโอดีต่อไนเตรทไนโตรเจนต่ำ อายุสลัดจ์สั้น และพีเอชต่ำ

$$NO_3^- (aq) \xrightarrow{\text{Nitrate reductase}} NO_2^- (aq) \xrightarrow{\text{Nitrite reductase}} NO (g) \xrightarrow{\text{Nitric oxide reductase}} N_2O (g) \xrightarrow{\text{Nitrous oxide reductase}} N_2 (g)$$

วิธีการทางชีวภาพในการกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ตามลักษณะการใช้เซลล์จุลินทรีย์

1. ระบบที่มีการตรึงเซลล์ (Fixed Film Denitrification Processes)

ในระบบนี้จะมีการตรึงเซลล์ที่ถังปฏิกิริยา ซึ่งระบบนี้มีข้อดีตรงที่จะเกิดการทำลายการทำงานของระบบน้อยที่สุด และเป็นระบบที่กะทัดรัดใช้เนื้อที่ในการติดตั้งเพียงเล็กน้อย ระบบที่มีการตรึงเซลล์จะมีประโยชน์อย่างมากต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน ถังปฏิกิริยาในระบบนี้มีหลายรูปแบบ เช่น column reactors fluidized bed reactors และ anaerobic rotating biological disc reactors

2. ระบบที่เซลล์แขวนลอยอยู่ในน้ำ (Suspended Denitrification Processes)

ระบบนี้ประกอบด้วย complete mixed reactor ที่มีแท่งกวน และมีช่องเป็นถังตกตะกอนอยู่ภายในคล้ายกับถัง coagulation tank ที่มีการกวนผสมส่วนประกอบต่าง ๆ อยู่ในถังปฏิกิริยา ควรปิดฝาถังเพื่อให้ออกซิเจนละลายลงในถังน้อยที่สุด แต่ควรหลีกเลี่ยงการปิดฝาถังแน่นเกินไป เนื่องจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดก๊าซไนโตรเจนขึ้น ในระบบนี้จะมีการนำตะกอนจากถังตกตะกอนกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการรักษาปริมาณ MLSS ให้อยู่ในช่วง 1,000 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การเติมแหล่งคาร์บอนจะเติมที่ท่อน้ำเข้าระบบ

2.3.1 ประเภทของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

2.3.1.1 Autotrophic denitrification

การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการ Autotrophic denitrification ต้องอาศัย Autotrophic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างอาหารเองได้ ตัวอย่างเช่น *Thiobacillus denitrificans* การกำจัดไนเตรทด้วยวิธีนี้ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอนินทรีย์หลายชนิด เช่น CO_2, $CaCO_3$ เป็นต้น ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจึงไม่ต้องมีการเติมสารอินทรีย์ลงในระบบบำบัด

ได้มีการศึกษาการกำจัดไนเตรทออกจากน้ำใต้ดินโดยใช้เม็ดกำมะถันและเม็ดหินปูนเป็นวัสดุตัวกลางให้แบคทีเรีย *Thiobacillus denitrificans* ยึดเกาะเพื่อทำให้เกิดกระบวนการ Autotrophic denitrification ที่ใช้ซัลเฟอร์และหินปูนเป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน ตามลำดับ พบว่าระบบบำบัดดังกล่าวสามารถกำจัดไนเตรทความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราไนเตรทโหลดติดตั้ง 30-720 กรัมไนโตรเจน/ลบ.ม.-วัน และมีเวลากักเก็บน้ำตั้งแต่ 2.5-20 ชั่วโมง (มั่นสิน, 2531)

2.3.1.2 Heterotrophic denitrification

การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการ Heterotrophic denitrification ต้องอาศัย Heterotrophic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ สำหรับการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน แบคทีเรียดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยสารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต การกำจัดไนเตรทด้วยวิธีนี้จึงต้องเติมสารอินทรีย์ เช่น เอธานอล เมธานอล หรือน้ำตาล เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับแบคทีเรีย การกำจัดไนเตรทด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก ปฏิกิริยาชีวเคมีของ Heterotrophic denitrification เกิดขึ้นดังสมการ

$$NO_3^- + 5/6\ CH_3OH \longrightarrow \tfrac{1}{2}\ N_2 + 5/6\ CO_2 + 7/6\ H_2O + OH^-$$

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ใช้เฮทเทอโรโทรฟ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน ดังนี้

- Substrate nitrate denitrification

เป็นดีไนตริฟิเคชันที่ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งใดก็ได้ที่ไม่ใช่คาร์บอนในเซลล์จุลินทรีย์ สารอินทรีย์คาร์บอนอาจเป็น ซีโอดี/บีโอดีที่อยู่ในน้ำเสีย หรือเป็นสารเคมีที่เติมลงในน้ำ สารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมลงในน้ำควรเป็นสารที่ย่อยง่าย (สารประกอบคาร์บอนเดี่ยว) โดยทั่วไปนิยมใช้เมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอน

$$C_{10}H_{19}O_3N + 10\ NO_3^- \longrightarrow 5N_2 + NH_3 + 3H_2O + 10HCO_3^-$$

$$0.833CH_3OH + NO_3^- + 0.167H_2CO_3 \longrightarrow 0.5N_2 + 1.33H_2O + HCO_3^-$$

- Endogenous nitrate denitrification

ในกรณีที่ไม่มีแหล่งคาร์บอนภายนอกเซลล์ กระบวนการดีไนตริฟิเคชันยังสามารถเกิดขึ้นได้โดยเป็นดีไนตริฟิเคชันแบบที่ใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ เนื่องจากขาดแคลนแหล่งคาร์บอนภายนอก ดังสมการ

$$C_5H_7O_2N \longrightarrow CO_2 + 2N_2 + NH_3 + 4HCO_3^-$$

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งสองประเภทจะเห็นว่า Substrate nitrate denitrification เป็นปฏิกิริยาของการเจริญเติบโตของเซลล์แบบปกติที่ได้ออกซิเจนจากไนเตรท ส่วน Endogenous nitrate denitrification เป็นการย่อยสลายตัวเอง โดยทั้งสองปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะที่มีไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอน ซึ่งคล้ายกับกรณีของปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอน

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

2.3.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)

อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันเหมาะสมที่สุด เมื่อออกซิเจนละลายน้ำมีความเข้มข้นเป็นศูนย์ เนื่องจากออกซิเจนจะไปขัดขวางการสร้างเอนไซม์ไนเตรทรีดักเตส หรือยับยั้งหน้าที่ในการเป็นตัวรับอิเลคตรอน แต่ถ้ามีออกซิเจนละลายน้ำ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันก็สามารถเกิดขึ้นได้ เชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่เจริญแบบแขวนลอยควรมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรจะไม่มีผลกระทบต่อเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่เจริญในตัวกลางตรึงเซลล์ แต่ถ้ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากเกินไปจะทำให้การเจริญของเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นแผ่นฟิล์มลดต่ำลง (Gomez et al., 2000)

ได้มีการทดลองศึกษาผลของออกซิเจนต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยเพาะเลี้ยง *Comamonas* sp. ในระบบการเติมอาหารอย่างต่อเนื่อง (Continuous chemostat culture) ที่อัตราการให้ออกซิเจนระดับต่าง ๆ กัน พบว่าที่อัตราการให้ออกซิเจนต่ำหรือไม่มีออกซิเจนละลายในอาหารเหลว ไนเตรททั้งหมดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน และเมื่อมีการละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเริ่มลดลง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอิ่มตัวที่ประมาณ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร การไหลของอิเลคตรอนเป็นส่วนหนึ่งในการชักนำให้ไนเตรทเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของสภาวะที่มีออกซิเจนมีประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการคำนวณในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Patureau et al., 1996)

2.3.2.2 ความเข้มข้นของไนเตรท

ไนเตรทเป็นสารอาหารหลักสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย ไนเตรทจึงมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดและอัตราเร็วของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงและการกำจัดไนเตรทโดยจะเกิดขึ้นได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดถ้าไนเตรทมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูงเกินพอ

2.3.2.3 พีเอช

โดยทั่วไปปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เกิดที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่างอ่อน ๆ แต่ที่พีเอชต่ำเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ และพบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 6 และสูงกว่า 8 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันลดลง และจะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้สูงที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 7-7.5 แต่มีการศึกษาบางส่วนที่พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดมีค่าแตกต่างออกไปขึ้นกับเชื้อแต่ละชนิด บางครั้งพบว่าค่าพีเอชเหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 8.5

2.3.2.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยพบว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-50 องศาเซลเซียส แต่ปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดจะเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิ 35-50 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นได้ 1.5-2.0 เท่าต่อ 10 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันค่อนข้างคงที่

2.3.2.5 ชนิดและปริมาณของแหล่งคาร์บอน

Specific denitrification rates สำหรับแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งคาร์บอน ชนิดของแหล่งคาร์บอนแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แหล่งคาร์บอนภายนอกที่เติมให้กับระบบ ได้แก่ สารเคมี หรือสารอินทรีย์คาร์บอน และแหล่งคาร์บอนจากภายใน ได้แก่ แหล่งคาร์บอนจากน้ำเสียที่จะบำบัด และจาก sludge หรือตะกอนของเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัด ชนิดของแหล่งคาร์บอนจะสัมพันธ์กับอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน โดยแหล่งคาร์บอนภายนอกที่เติมให้กับระบบและแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียจะย่อยสลายได้ง่าย และมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน 0.05-0.07 ต่อวัน ซึ่งสูงกว่าแหล่งคาร์บอนที่เป็นตะกอนเซลล์จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากกว่า และจะมีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันประมาณ 0.02 ต่อวัน

สำหรับปริมาณของแหล่งคาร์บอนจะมีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดดีไนตริฟิเคชันเช่นเดียวกัน โดยถ้าสภาวะเหมาะสมและมีปริมาณคาร์บอนอย่างไม่จำกัดเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเจริญอย่างเต็มที่ อัตราเร็วของการเกิดดีไนตริฟิเคชันจะมีค่าคงที่สูงสุด แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนมีจำกัดหรือไม่เพียงพอ แบคทีเรียจะย่อยสลายตัวเองเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้อัตราเร็วของการเกิดดีไนตริฟิเคชันลดต่ำลง ปริมาณคาร์บอนนอกจากต้องเพียงพอสำหรับการกำจัดออกซิเจน (deoxygenation) ด้วย เนื่องจากน้ำที่จะผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดมักมีออกซิเจนละลายน้ำปนมาด้วยเสมอ จึงต้องใช้คาร์บอนปริมาณหนึ่งในการกำจัดออกซิเจนก่อนจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณคาร์บอนมากกว่าปริมาณคาร์บอนใน C/N ratio ตามทฤษฎี (วิฐู, 2546)

ได้มีการศึกษาอิทธิพลของแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส เอธานอล และเมธานอล ในการกำจัดไนเตรทที่ปนเปื้อนกับแหล่งน้ำผิวดิน (100 มิลลิกรัมไนเตรท/ลิตร) โดยการใช้ Denitrifying submerged filter ที่มีผลต่อการบำบัด การสะสมไนไตรท์ มวลชีวภาพ และการเจริญของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง เปรียบเทียบกันทั้ง 3 แหล่งคาร์บอน พบว่า อัตราส่วน C/N หลังจากผ่านกระบวนการบำบัดแล้วเท่ากับ 2.5 1.08 และ 1.1 ของแหล่งคาร์บอนซูโครส เอธานอล และเมธานอล ตามลำดับ แสดงว่าซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนที่ประสิทธิภาพน้อยที่สุด และปริมาณไนไตรท์ที่สะสมมีมากกว่าเอธานอลและเมธานอลอย่างชัดเจน แต่มีการเกิดมวลชีวภาพที่ดีกว่า ซึ่งอาจมีข้อเสียต่อการจับ

ตัวกันและก่อให้เกิดการอุดตันตัวกรองได้ ปริมาณแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงที่ยึดเกาะเป็นฟิล์มชีวภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เอธานอลและเมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน แต่เมธานอลมีความเป็นพิษ ดังนั้นเอธานอลจึงมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นแหล่งคาร์บอนในการกำจัดไนเตรทในระบบนี้ (Gomez et al., 2000)

2.3.2.6 อัตราส่วนของปริมาณแหล่งคาร์บอนกับไนเตรทไนโตรเจน(C/N ratio)

อัตราส่วนของปริมาณแหล่งคาร์บอนกับไนเตรทไนโตรเจนจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งคาร์บอน ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น กลูโคสหรือน้ำตาลชนิดอื่น เมธานอล เอธานอล กรดอะซิติก และเซลล์ของจุลินทรีย์เอง โดยคาร์บอนเหล่านี้ส่วนหนึ่งเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและอีกส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนเตรทไนโตรเจนที่เหมาะสมจะทำให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เช่น เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน C/N ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.5-2.5 กิโลกรัมบีโอดีต่อกิโลกรัมไนโตรเจน หรือ 2.9-3.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อกิโลกรัมไนโตรเจน ถ้าใช้เมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน C/N ratio ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 2.3-2.7 กิโลกรัมบีโอดีต่อกิโลกรัมไนโตรเจน หรือ 3.5-4.1 กิโลกรัมซีโอดีต่อกิโลกรัมไนโตรเจนหรือ 0.9-1.0 กรัมคาร์บอนต่อไนเตรทไนโตรเจน ถ้าใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน C/N ratio ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 2.0 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจน และถ้าต้องการให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในการบำบัดไนเตรทด้วยระบบ pre-denitrification จะต้องใช้ปริมาณคาร์บอนมากกว่าค่าจากการคำนวณในสมการสตอยชิโอเมตริก (stoichiometric) เพราะจะต้องใช้คาร์บอนในการออกซิไดซ์ออกซิเจนและรีดิวซ์ไนไตรท์ด้วย (วิฐ, 2546)

2.3.2.7 ความเค็ม

ความเค็มในรูปโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียอยู่บ้าง โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์อย่างรวดเร็ว (ที่ภาวะช็อค) จากผลการศึกษาพบว่าดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถทนต่อสภาพความเค็มได้ถึง 30,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.2.8 อายุตะกอน

ตามปกติแล้วเมื่ออายุตะกอนเพิ่มขึ้นอัตราการสร้างเซลล์ใหม่จะลดลง ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ต้องการในกระบวนการก็จะลดลงตามไปด้วย

2.3.2.9 ไนไตรท์

ไนไตรท์ในรูปของกรดไนตรัสอิสระ (HNO_2) คือไม่แตกตัวเป็นไอออน สามารถยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้ที่ความเข้มข้นเพียง 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้นนี้ที่พีเอช 6 - 8 จะเทียบเท่ากับไนไตรท์ในรูปที่แตกตัวเป็นไอออน ถึง 100 มก.ไนไตรท์ต่อลิตร

ผลกระทบของไนไตรท์ต่อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจึงมีไม่มาก แต่หากมีสารพิษอื่นๆที่สามารถยับยั้งการทำงานของไนโตรแบคเตอร์ ก็อาจเกิดการสะสมของไนไตรท์จนอาจเป็นอันตรายได้

2.3.2.10 โออาร์พี

จาการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราดีไนตริฟิเคชัน และโออาร์พี โดยใช้สลัดจ์จากโรงบำบัดคนละแห่งและแหล่งคาร์บอนต่างกัน ได้แก่ เอทานอล กลูโคส และอะซิเตท พบว่าส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ดังนั้นการใช้ค่าโออาร์พีเป็นตัวกำหนดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันก็สามารถทำได้แต่ต้องระวังมิให้ค่าต่ำเกินไปนัก และค่าโออาร์พีที่เหมาะสมเป็นค่าเฉพาะของสารอาหารแต่ละตัวเท่านั้น

2.3.2.11 โลหะหนัก

โลหะหนักบางชนิดช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นของโลหะหนักในปริมาณเพียงเล็กน้อย เช่น โมลิบดินัมและซีลีเนียม ซึ่งช่วยในการสร้างเอนไซม์ Formaldehyde dehydrogenase ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในเมทาบอลิซึมของเมธานอล และโมลิบดินัม ยังจำเป็นในการสังเคราะห์เอนไซม์ Nitrate reductase

2.3.3 แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Denitrifying bacteria)

แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงที่สามารถสร้างปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเลคตรอน เพื่อลดรูปไนเตรท (ตัวรับอิเลคตรอน) ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์กลุ่ม Facultative anaerobe โดยปกติพบได้ทั่วไปในธรรมชาติทั้งในดินและน้ำ ต้องการแหล่งอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการเจริญภายใต้สภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน (Wasik et al., 2001)

ลักษณะเฉพาะของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง คือ บางกลุ่มเป็น Chemoautotrophs ซึ่งสามารถใช้ไฮโดรเจนหรือรีดิวซ์สารประกอบซัลเฟอร์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และอีกพวกหนึ่งของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงเป็น Photoautotrophs คือ จุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์อาหารได้โยใช้อนินทรียสารเป็นวัตถุดิบ ส่วนพลังงานที่ใช้อาจได้มาจากแสงสว่างหรือปฏิกิริยาเคมีในขบวนการ Oxidation-Reduction สิ่งมีชีวิตกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของการตรึงสารคาร์บอนรวมทั้งสารประกอบคาร์บอน สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการนี้คือ ไนเตรทและก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ แต่แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงบางพวกสามารถรีดิวซ์ได้แค่เพียงไนไตรท์เนื่องจากขาดเอนไซม์ Nitrous oxide reductase ดังนั้น Nitrous oxide จึงเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการ (Tate, 1995)

การจัดจำแนกจุลินทรีย์เป็นแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ ไนตรัสออกไซด์ หรือก๊าซไนโตรเจนอย่างสมบูรณ์ จุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ที่สามารถรีดิวซ์ไนเตรทและก๊าซไนโตรเจนหรือไนตรัสออกไซด์ปริมาณจำกัด แม้ว่าจุลินทรีย์เหล่านี้จะจัดเป็น

แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง แต่จะเป็นกลุ่มของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงที่ไม่สมบูรณ์ โดยที่ True denitrifier ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ไนเตรทหรือไนไตรท์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจนและไนตรัสออกไซด์อย่างน้อย 80 เปอร์เซ็นต์

2. แบคทีเรียต้องมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรท ไนไตรท์หรือไนตรัสออกไซด์

3. การเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นไนตรัสออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ต้องเกิดขึ้นที่อัตราเร็วสูง นั่นคือกระบวนการที่เกิดขึ้นต้องเป็นปฏิกิริยาโดยตรง ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เป็นผลข้างเคียงของปฏิกิริยาอื่น

ได้มีการจัดจำแนกกลุ่มของ Heterotrophic bacteria ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่คัดแยกได้จากระบบบำบัดแบบ Activated sludge (Drysdale et al., 2000) เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1. True denitrifiers คือ จุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์ไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ โดยการเปลี่ยนรูปไนเตรทไปเป็นก๊าซไนโตรเจน จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะมีทั้งเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทส และไนไตรท์รีดักเทส โดยจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดในระบบคือ *Pseudomonas*

2. Incomplete denitrifiers จุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์ไนเตรทไปเป็นไนไตรท์เท่านั้น แต่ไม่สามารถรีดิวซ์ไนไตรท์ที่เกิดขึ้นต่อไปเป็นก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ขาดเอนไซม์ไนไตรท์รีดักเทส

มีรายงานการวิจัยพบว่าจุลินทรีย์ดังกล่าวนี้เป็นพวกแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Tate, 1995)

- *Alcaligenes eutropus* เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย ซึ่งจัดเป็น Facultative autotroph เนื่องจากสามารถใช้อนินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน

- บางสายพันธุ์ของ *Chromobacter* สามารถใช้ไนเตรทหรือไนไตรท์เป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้ายเปลี่ยนรูปไปเป็นไนตรัสออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ส่วน *Chromobacter violacium* สามารถรีดิวซ์ได้เพียงไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์เท่านั้น

- *Halobacterium marismortui* เป็น Halophilic denitrifier ที่คัดแยกได้จาก Dead sea

- สายพันธุ์ *Hyphomicrobium* เป็นแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงโดยใช้เมธานอลเป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิ จากการศึกษาพบว่าจุลินทรีย์ที่สามารถใช้เมธานอลที่เติมลงไปในน้ำเสียเป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้สูงสุด

- *Thiobacillus denitrificans* เป็น Sulfur oxidizing chemoautotroph ที่เจริญได้ในสภาวะไม่มีออกซิเจนและไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย

2.4 เทคโนโลยีในการกำจัดไนเตรทโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

สารประกอบไนเตรทที่ได้จากกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้น แม้จะมีพิษน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแอมโมเนียม และไนไตรท์ แต่ถ้าสะสมมากขึ้นถึงระดับหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ และถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะก่อปัญหายูโทรฟิเคชันต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นสาเหตุของโรคเมธิโมโกลบินีเมีย (methemoglobinemia) ในทารกที่ดื่มน้ำที่มีไนเตรทปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีผู้ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรทออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันอย่างกว้างขวาง และใช้ระบบบำบัดที่แตกต่างกันทั้งระบบที่ใช้เซลล์แบบแขวนลอยและแบบตรึงเซลล์ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาถึงวัสดุที่นำมาทำเป็นตัวกลางให้เชื้อยึดเกาะโดยศึกษาทั้งรูปแบบ ขนาด และพื้นที่ผิวของตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทหรืออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน

ระบบกำจัดน้ำเสียที่นำกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมาประยุกต์ใช้มีหลายระบบด้วยกัน เช่น semi-batch, fluidized bed, moving bed, rotating biological contactor แต่ที่นิยมมากที่สุดคือระบบ fluidized bed ที่มีการตรึงเซลล์ไว้กับตัวกลาง เนื่องจากให้มวลชีวภาพมากและมีอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันสูง ตัวกลางที่ใช้ตรึงเซลล์ ไนตริไฟอิงแบคทีเรียมีหลายชนิด เช่น polyvinyl alcohol, alginate beads กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจำเป็นต้องเติมแหล่งคาร์บอนจากภายนอกเพื่อทำให้กระบวนการเกิดสมบูรณ์ที่สุด แหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้มีหลายชนิด เช่น sewage เมธานอล กลูโคส อะซิเตต แลกเตต ก๊าซมีเทน เป็นต้น (วิฐ, 2546)

จากการศึกษาระบบกำจัดน้ำเสียต่าง ๆ นั้นจะยกตัวอย่างระบบที่ได้ทำการศึกษามาแล้วเช่น ระบบโรเตติงไบโอดิสซ์คอนแทคเตอร์ (rotation biodisc contactor, RBC) เพื่อกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งโดยมีการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบไนโตรเจน เช่น ผลของสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ผลของแผ่นจานหมุนต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ผลของพีเอชและความต้องการสภาพบัฟเฟอร์ที่ทำให้ระบบมีพีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการกำจัดไนเตรทต่อไปอีก โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อกำจัดไนเตรทที่ได้จากกระบวนการไนตริฟิเซัน (Boongorsrang, 1982) นอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้กับระบบ rotating biological contactor ในการกำจัดไนเตรทออกจากน้ำใต้ดิน โดยใช้แหล่งคาร์บอนสามชนิด คือ เมธานอล เอธานอล และกรดอะซิติก ในอัตราส่วน C/N ratio เป็น 2.9 2.35 และ 4.3 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าแหล่งคาร์บอนทั้งสามชนิดจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยเป็น 93 91 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่ออัตราการนำไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเป็น 76 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง (Mohseni-Bandpi and Elliott, 1998) จากการศึกษาพบว่าการใช้ระบบ

rotation biodisc contactor ในการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นระบบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าระบบที่ใช้การตรึงเซลล์ระบบอื่น แต่การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบนี้มีปัญหาคือไม่สามารถกำจัดของเสียที่อยู่ในรูปของแข็ง (solid waste) ได้

มีการทดลองโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ fluidized-bed reactor เพื่อกำจัดไนเตรทในน้ำดื่ม โดยการตรึงเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียไว้กับตัวกลางที่เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง polyacrylamide และ alginate (Chang, 1999) และการใช้ถังปฏิกิริยาแบบ fixed-film mobile bed bioreactor มาใช้กำจัดไนเตรทในน้ำเสีย โดยการตรึงเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียกับอนุภาคของดิน มีอัตราการนำไนเตรทเข้าสู่ระบบเป็น 0.6 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Chudoba, 1998) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของทั้ง 2 แบบนี้สามารถกำจัดไนเตรทในน้ำดื่มและน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และได้มีการทดลองโดยใช้ระบบ upflow biofiltration เพื่อศึกษาอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันในน้ำทิ้ง โดยการตรึงเซลล์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียกับตัวกลาง 2 ชนิด คือ granular floating polystyrene (GEP) และ polyurethane foam cubes (PFC) จากผลการทดลองพบว่า ระบบนี้ให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันสูง โดยตัวกลาง GEP จะให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 3.5 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมากกว่าตัวกลาง PFC ที่ให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันเท่ากับ 2.5 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Hwang, 2000)

ปัจจุบันมีการนำกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมาประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักนิยมนำมาใช้กับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม เช่น กุ้งกุลาดำ (Menasveta, 2001) เนื่องจากสัตว์น้ำเค็มส่วนใหญ่เป็นสัตว์น้ำทางเศรษฐกิจ (Stickney, 1994) ส่วนการนำมาใช้กับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดยังมีการศึกษากันน้อย จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพัฒนากันต่อไปอีกในอนาคต

นอกจากนี้มีการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อแก้ปัญหาการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งทำให้เกิดการสะสมไนไตรท์ และเกิดการผลิตไนตริกออกไซด์ หรือไนตรัสออกไซด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น C/N ratio ไม่เพียงพอหรือมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากเกินไป การนำคอมพิวเตอร์มาใช้ควบคุมทำให้สามารถรักษาระดับของไนเตรทให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อัตราการเติมแหล่งคาร์บอน พีเอช และอัตราการไหลให้เหมาะสม เพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดอย่างสมบูรณ์ที่สุด (Lee, 2000)

การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งนอกจากจะใช้วิธีการทางชีวภาพแล้วยังมีการใช้วิธีการทางกายภาพและวิธีการทางเคมีร่วมด้วย แต่ข้อเสียก็คือ วิธีการทางกายภาพและทางเคมีเป็นวิธีการที่มีราคาแพงกว่าวิธีการทางชีวภาพ โดยวิธีทางกายภาพที่มีการศึกษานั้นมีทำการทดลองโดยใช้วิธี dialysis ที่มีเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membrane) เป็นแบบ anion exchange membrane ที่มี selectivity ต่อไนเตรทเพื่อ

กำจัดไนเตรทออกจากน้ำใต้ดิน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีทางกายภาพในการกำจัดไนเตรท จากผลการทดลองพบว่า วิธีการนี้สามารถกำจัดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ได้น้ำที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่ต้องการ (Elhannouni, 2000) นอกจากนี้มีการทดลองโดยใช้เม็ดเจล poly (PAA-HCI) polymerhydrogel ซึ่งมีประจุบวกมาดักจับไนเตรท ไนไตรท์ และฟอสเฟต ซึ่งมีประจุลบเพื่อบำบัดน้ำจากการเลี้ยงปลา วิธีการนี้เป็นวิธีการทางเคมีที่อาศัยหลักการจับกันของสารที่มีประจุต่างกัน และจากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองในระบบเบ็ดเสร็จแล้ว ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท ไนไตรท์ และฟอสเฟตของเม็ดเจลเป็น 50+% 85+% และ 98+% ตามลำดับ เมื่อมีระยะเวลากักเก็บน้ำ 3 ชั่วโมง ในการทดลองนี้สามารถลดความเข้มข้นของไนเตรทไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน และฟอสเฟต ให้อยู่ในระดับ 10 0.08 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ (Kioussis, 2000)

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน และการสลายคาร์บอนอินทรีย์

โดยทั่วไปแล้ว แบคทีเรียที่มีความสำคัญต่อการสลายคาร์บอนและไนโตรเจนในน้ำเสีย ได้แก่ แบคทีเรีย 14 กลุ่มหลัก คือ แอโรบิกเฮเทอโรโทรฟ (Aerobic Heterotroph) แอมโมเนียออกซิไดเซอร์ (Ammonia Oxidizer) ไนไตรท์ออกซิไดเซอร์ (Nitrite Oxidizer) และดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic Matter) และแอมโมเนีย และสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน คือ ออกซิเจน (oxygen) และไนเตรท ซึ่งอัตราการทำปฏิกิริยา (Reaction Rate) ของ จุลินทรีย์ออโทโทรฟิกและเฮเทอโรโทรฟิกขึ้นกับความเข้มข้นของสารอาหาร

การสลาย (Degradation) ของสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพสามารถเกิดได้ทั้งภายใต้สภาวะที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและ ดีไนตริฟิเคชันตามลำดับ ซึ่งทั่วไปแล้วยิลด์พลังงานที่ได้จากสภาวะการสลายสารคาร์บอนอินทรีย์แบบใช้อากาศ (Aerobic Oxidation) มีค่าสูงกว่าในสภาวะไม่ใช้อากาศหรือสภาวะแอนอกซิก (Anoxic Denitrification) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าสภาพแอนอกซิกมีความจำเป็นต่อการเกิดดีไนตริฟิเคชัน (ณัฐกฤตา, 2543)

นอกจากความต้องการใช้คาร์บอนอินทรีย์และอนินทรีย์ เพื่อการเจริญเติบโตและเป็นแหล่งพลังงานแล้ว แบคทีเรียยังมีความจำเป็นต้องใช้ไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโตและเป็นแหล่งพลังงานเช่นกัน ไนโตรเจนอนินทรีย์ที่สามัญที่สุด คือ แอมโมเนียและไนเตรท ซึ่งแบคทีเรียสามารถใช้แอมโมเนียสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนเพื่อเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ได้โดยตรง และถ้ามีไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนเพียงแหล่งเดียว แบคทีเรียจะรีดิวซ์ไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียโดยผ่านขั้นตอน Assimilatory Nitrite Reduction ก่อนที่แบคทีเรียจะนำไปใช้ได้

2.6 แหล่งคาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

แหล่งคาร์บอนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ที่ใส่ลงไปนั้นสามารถได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

ก. แหล่งคาร์บอนจากภายใน

แหล่งคาร์บอนจากภายในมักจะหมายถึงตัวน้ำเสียและเซลล์จุลินทรีย์ โดยปกติแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานจากภายในเองก็เพียงพอต่อการนำไปใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน แต่ในขั้นตอนนี้อาจจะทำให้สารอินทรีย์ที่มีอยู่น้ำเสียเองหมดไป จึงมักมีความจำเป็นต้องเติมแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานจากภายนอกให้แก่เชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียในขั้นตอนดีไนตริฟิเคชัน

ข. แหล่งคาร์บอนจากภายนอก

แหล่งคาร์บอนจากภายนอก จะเป็นสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น เมธานอล กลูโคส ตะกอนจุลินทรีย์ เป็นต้น พบว่าการใช้น้ำหมักของ primary sludge waste และ swine waste จะเป็นสับสเตรทที่ดีกว่าสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เมื่อเปรียบเทียบกับเมธานอล และกรดอะซิติก เมธานอลจะเป็นแหล่งคาร์บอนภายนอกที่มักนิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันสูง และสามารถกำจัดได้โดยการให้อากาศ แต่ก็ยังมีสารอินทรีย์ชนิดอื่นอีกที่สามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูกกว่า เช่น กลูโคส เป็นต้น (วิฐู, 2546)

ปริมาณของแหล่งคาร์บอนที่ใช้ส่วนใหญ่จะแสดงในรูปอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและ ไนเตรทไนโตรเจน (C/N ratio) โดยแหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกันก็จะมีค่า C/N ratio ที่แตกต่างกันไปด้วย แต่ส่วนมากค่า C/N ratio จะอยู่ในช่วง 1.5-5 (ศิริวัฒน์, 2544) และจากการศึกษาแหล่งคาร์บอน 4 ชนิดคือ เมธานอล กรดอะซิติก กลูโคส และกรดเบนโซอิก และ C/N ratio ของแหล่งคาร์บอนแต่ละชนิดที่ทำให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน สมบูรณ์ โดยพบว่า C/N ratio ของเมธานอลเท่ากับ 0.9-1.0 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจน C/N ratio ของกรดอะซิติก เท่ากับ 1.9 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจน C/N ratio ของกลูโคสเท่ากับ 2.0 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจน และ C/N ratio ของกรดเบนโซอิก เท่ากับ 3.0 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจน (Her and Huang, 1995)

จากการที่แบคทีเรียมีความต้องการคาร์บอนเพื่อใช้ในกระบวนการจึงต้องมีการพิจารณาแหล่งของคาร์บอนว่ามาจากแหล่งใด หากปริมาณคาร์บอนไม่เพียงพอแบคทีเรียจะใช้คาร์บอนที่สะสมไว้ภายใน (Endogenous Carbon) ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายของแบคทีเรียเองในขั้น Death Phase แต่อาจมีปริมาณไม่เพียงพอ ทำให้การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนลงไปให้แก่แบคทีเรียโดยอาจมาจากน้ำเสีย เศษอาหาร หรืออาจมาจากสารเคมีที่เติมลงไป เช่น เมทานอล เอทานอล อะซิติก หรือ กรดซิตริก เป็นต้น โดยปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสมและสม่ำเสมอส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้สูงสุด โดยการวิจัยครั้งนี้จะเป็นการนำน้ำเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารเช่นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำผลไม้มาเป็นแหล่งคาร์บอนและน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลให้กับจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเปรียบเทียบกับโซเดียมอะซิเตท เพื่อเป็น

การหาแหล่งคาร์บอนอื่นที่มีราคาไม่สูงและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงแทนแหล่งคาร์บอนที่เป็นสารเคมี ซึ่งมีราคาสูงกว่า

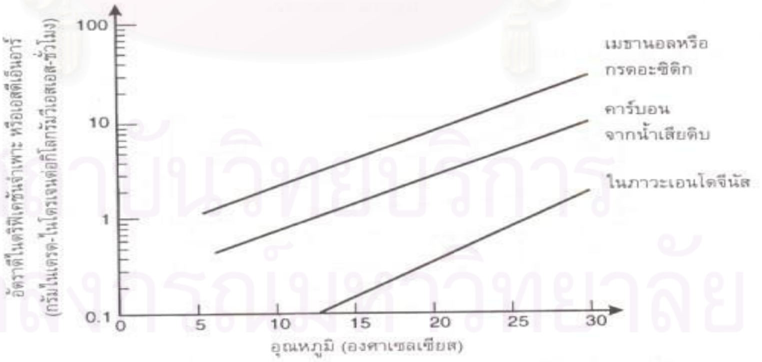
ตารางที่ 2.4 แสดงแหล่งพลังงานจากภายนอก สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

แหล่งพลังงานจากภายนอก สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
กรดอะซิติก
เมทานอล
กากน้ำตาล
สารอินทรีย์ในน้ำเสีย
น้ำเสียโรงเบียร์
กระดาษหนังสือพิมพ์
กลูโคส
ขี้เลื่อย
น้ำผลไม้
น้ำเสียโรงสุรา
อะซิโตน

หมายเหตุ : ที่พิมพ์ตัวหนาหมายถึงที่นิยมใช้กัน

ที่มา : ธงชัย, 2544

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าอุณหภูมิและปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมส่งผลต่ออัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงอัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันกับอุณหภูมิ เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างๆ

ที่มา : ธงชัย, 2544

2.7 ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันใช้สมการโมโนด์มาทำนายประสิทธิภาพของระบบ เมื่อไนเตรทเป็นสารที่ต้องการเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจน จึงมุ่งไปในกรณีที่พยายามให้สับสเตรทไม่เป็นตัวจำกัด (หรือ $S >> K_s$) หรือพยายามทำให้สมการดีไนตริฟิเคชันเป็นสมการอันดับศูนย์ (ธงชัย, 2544) หากใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก เช่น เมธานอล หรือ กรดอะซิติก มาเติมเข้าระบบ ก็จะป้องกันไม่ให้เกิดการจำกัดของสับสเตรทได้ แต่ถ้าใช้น้ำเสียมาเป็นแหล่งคาร์บอนก็อาจมีผลหรือขีดจำกัดต่อ(คือลด)อัตราการกำจัดไนเตรทได้ อย่างไรก็ตามต้องอย่าเอากรณีนี้ไปสับสนกับการที่มีสับสเตรทไม่พอ (shortage) ซึ่งในกรณีหลังนี้กระบวนการจะหยุด เพราะจะเกิดการจำกัดแบบสัมบูรณ์ (absolute limitation) ทั้งนี้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะมีสับเสตรทอยู่ 2 ชนิด คือ ไนเตรทและอินทรีย์คาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นตัวดีไนตริฟายสารไนเตรทให้เป็นไนโตรเจน ดังนั้นสมการโมโนด์รวมของดีไนตริฟิเคชัน คือ

$$\mu_{DN} = \mu_{m,DN}\{S/(K_s + S)\}\ \{S_{NO3}/(K_{NO3} + S_{NO3})\}$$

เมื่อ μ_{DN} = อัตราการโตจำเพาะของดีไนตริฟายเออร์ มีหน่วยเป็นกรัมมวลชีวที่ผลิตได้ต่อวันต่อกรัมมวลชีวของดีไนตริฟายเออร์, วัน$^{-1}$

S = ความเข้มข้นของสับสเตรทอินทรีย์คาร์บอน เช่น ซีโอดี หรือบีโอดี, มิลลิกรัมต่อลิตร

S_{NO3} = ความเข้มข้นของสับสเตรทไนเตรท, มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตร

K_{NO3} = ความเข้มข้นของสับสเตรทไนเตรทที่อัตราโตจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราโตจำเพาะสูงสุด, มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตร

แต่เนื่องจาก K_{NO3} มีค่าต่ำมาก คือ 0.16 มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตรสำหรับระบบสลัดจ์กัมมันต์แบบแขวนลอย และ 0.06 มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตรสำหรับระบบฟิล์มตรึง (fixed film) อัตราของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจึงไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไนเตรทนักถ้าค่าไนเตรท-ไนโตรเจนในระบบเท่ากับหรือมากกว่า 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นอัตราโตจำเพาะของดีไนตริฟายเออร์จึงอาจลดรูปลงเป็นเพียง

$$\mu_{DN} = \mu_{m,DN}\{S/(K_s + S)\}$$

และถ้ามีอินทรีย์สารมากพอ ($S >> K_s$) สมการก็จะลดรูปเพิ่มเติมอีกเป็น

$$\mu_{DN} = \mu_{m,DN}$$

ถ้าเป็นระบบสลัดจ์ไวงานหรือเอเอส และใช้เมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าค่า K_s มีค่าไม่มากนัด และเนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอนที่ดีกว่าไนเตรท พลังงานที่ได้ออกมาจากการหายใจแบบแอโรบิกจึงสูงกว่าแบบแอนอกซิก ค่ายีลด์แท้ (true yield) หรือ Y_{DN} จึงน้อยกว่า Y_{AER} ใน

ระบบแอโรบิกและหากใช้เมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอนพบว่า Y_{DN} จะเท่ากับ 0.16 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม ซีโอดีที่ถูกกำจัดไป และจะได้อัตราการใช้สับสเตรทไนเตรทโดยดีไนตริฟายเออร์ดังนี้

$$\{d(S_{NO3})/dt\} / X = (1/Y_{DN}) \{(\mu_{m,DN}S)/(K_s + S)\}$$

$$= \mu_{DN} / Y_{DN}$$

เมื่อ $d(S_{NO3})/dt$ = อัตราการลดไนเตรท, มิลลิกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนต่อลิตร-วัน

Y_{DN} = ยีลด์ของเฮเทอโรทรอฟ, กรัมวีเอสเอส ต่อกรัมไนเตรท-ไนโตรเจนที่ถูกกำจัด

อัตราการลดไนเตรทนี้ส่วนใหญ่จะเรียกกันในชื่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน (DNR) ซึ่งถ้าเทียบมวลวีเอสเอสก็เรียกเป็นอัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ หรือ SDNR หรือ U_{DN} และบางทีก็เรียกกันในชื่ออัตราการใช้ไนเตรทจำเพาะ หรือ specific nitrate utilization rate (SNUR) ทั้งนี้พีเอชในถังปฏิกิริยาควรอยู่ในช่วง 7.0-7.5 มิฉะนั้นแล้วอัตราก็จะลดลงไปตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

สัมประสิทธิ์	สัญลักษณ์	หน่วย	ช่วง	เสนอแนะ
อัตราเติบโต	$\mu_{m,DN}$	วัน$^{-1}$	5-10 (เมธานอล)	-
จำเพาะสูงสุด			3-6 (น้ำเสีย)	-
			0.3-0.9	0.3
			3-13	4-6
อัตราการใช้	$U_{m,DN}$	กรัมซีโอดี/กรัม	- (20^{o}C)	10.3
สับสเตรทจำเพาะ		วีเอสเอส-วัน		
สูงสุด		กรัมNO_3-N/กรัม	0.03-0.11 (15-27 ^{O}C)	-
		วีเอสเอส-วัน	0.017-0.048(15-27 ^{O}C,	-
			เอนโดจีนัส)	
			0.21-0.32 (25^{O}C,เมธานอล)	-
			0.12-0.90 (20^{O}C,เมธานอล)	-
ค่า K_s ของ	K_{NO3}	มก.NO_2^-ต่อลิตร	0.2-0.5	-
สารอาหาร		มก.NO_3^-ต่อลิตร	0.06-0.20	0.1
		มก.NO_x^-ต่อลิตร	0.06-0.5	0.2-0.5
	K_{DO}	มก.O_2ต่อลิตร	0.1-0.5	-
			0.1-0.28	0.1-0.2
	$K_{เมธานอล}$	มก.ซีโอดีต่อลิตร	5-10	-

ที่มา : ธงชัย, 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (ต่อ)

สัมประสิทธิ์	สัญลักษณ์	หน่วย	ช่วง	เสนอแนะ
ค่า K_s ของ สารอาหาร	K_{COD}	มก.ซีโอดีต่อลิตร	10-20	10-20
			- (20°C)	9.1
			10-180	10-20
			0.4-0.9	0.8
ค่ายีลด์	Y_{DN}	มก.วีเอสเอส/มก. NO_3^- ต่อลิตร	0.4-0.9	0.8
		มก.ซีโอดี/มก.ซีโอดี	0.5-0.65 (เมธานอล)	-
			0.4-0.6 (น้ำเสีย)	-
		มก.ซีโอดี/มก. NO_3^- ต่อลิตร	1.6-1.8 (น้ำเสีย)	-
		มก.วีเอสเอส/มก.ซีโอดี	- (20°C)	0.18
		มก.ซีโอดีมวลชีว/มก. ซีโอดี	0.46-0.69	0.67
ค่า ส.ป.ส. การเน่าเปื่อย	$K_{d,DN}$	วัน$^{-1}$	0.05-0.10	-
			0.04-0.08	0.04
			- (20°C)	0.04
			-	0.05

ที่มา : ธงชัย, 2544

2.8 น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง

อุสาหกรรมผลไม้กระป๋อง จัดอยู่ในกลุ่มของอุตสาหกรรมอาหารโดยการนำผลไม้สดนำมาแปรรูปเป็นอาหารกระป๋อง และสามารถนำน้ำผลไม้มาผลิตเป็นน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิต จากการสำรวจสถิติการส่งออกของประเทศไทยสินค้าส่งออกประเภทผลไม้บรรจุกระป๋องประจำปี พ.ศ. 2542 พบว่ามีการส่งออกผลไม้กระป๋องมีปริมาณ 25,472 เมตริกตันเป็นมูลค่า 784.4 ล้านบาท (สันทัด, 2545)

การผลิตเพื่อเพิ่มรายได้ในอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม น้ำเสียเป็นปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เนื่องจากมีปริมาณการใช้น้ำสูงเกือบทั้งกระบวนการผลิต ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบก่อให้เกิดน้ำเสียซึ่งมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนสูง จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำทิ้งมีค่าความสกปรกวัดในรูป BOD_5 จากอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมีค่าความสกปรก 114,530 ตันต่อปี (ศูนย์สารสนเทศ, 2539) โดยน้ำเสียส่วนใหญ่ถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ใกล้เคียงกับโรงงาน ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

แก่โรงงานและชุมชน กรณีที่น้ำเสียถูกปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานก็ต้องเลือกใช้ระบบบำบัดให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียและคุณสมบัติของน้ำเสีย มิฉะนั้นก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน (เฉลิมราช, 2536)

การแก้ปัญหามลพิษทางน้ำจากอุตสาหกรรมอาหารที่ทำการผลิตผลไม้กระป๋อง สามารถลดปริมาณน้ำเสียได้ถึง 50% หลังจากการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ สามารถประหยัดเงินลงทุน นอกจากนี้ยังมีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่าน ที่ได้ทำการศึกษาถึงแนวทางในการพิจารณานำน้ำเสียที่ทำการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การพิจารณาลดปริมาณและความเข้มข้นของมลพิษเป็นน้ำเสีย น่าจะเป็นกลยุทธใหม่สำหรับการอนุรักษ์และรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ โดยน้ำเสียที่นำมานั้นมาจาก บริษัท มาลี สามพราน (มหาชน) จำกัด โดยมีข้อมูลการศึกษาปริมาณการใช้น้ำและวัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิตของน้ำเสียดังนี้

2.8.1 การใช้น้ำในแต่ละกระบวนการผลิต

เนื่องจากโรงงานมีผลิตภัณฑ์หลายชนิด ที่เราสนใจในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ สายการผลิตสับปะรดกระป๋อง สายการผลิตผลไม้กระป๋อง โดยจะมีกำลังการผลิตไม่เท่ากัน จากการศึกษาวิจัยพบข้อสังเกตและข้อมูลที่น่าสนใจ จากตารางที่ 2.6 พบว่า ณ ช่วงที่ทำการศึกษาแต่ละสายการผลิตมีการใช้น้ำแตกต่างกัน และกำลังการผลิตแตกต่างกัน สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีการใช้น้ำ 308 ลบ.ม./วัน มากกว่าสายการผลิตผลไม้กระป๋องที่ใช้น้ำ 274 ลบ.ม./วัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบว่าเหตุผลที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีการใช้น้ำมากเนื่องจากกำลังการผลิตสูงสุดโดยดูจากปริมาณวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตสูงถึง 377 ตัน/วัน และในกระบวนการผลิตปกติของผลไม้กระป๋อง เกิดน้ำเสียค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขบวนการล้างและชนิดของผลไม้ หากเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำต่อปริมาณวัตถุดิบ พบว่าก็ทำให้ทราบว่าในสายการผลิตผลไม้กระป๋องมีการใช้น้ำ 8.56 ลบ.ม./ตันวัตถุดิบ ในขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องจะใช้น้ำน้อยกว่าคือ 0.8 ลบ.ม./ตันวัตถุดิบ ทั้งนี้อาจจะอธิบายได้ว่า ปริมาการผลิตจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้น้ำกล่าวคือ หากกำลังการผลิตสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณการใช้น้ำต่อปริมาณวัตถุดิบลดลง นอกจากนี้สิ่งที่น่าพิจารณาอีกอย่างหนึ่งคือ สายการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องมีการใช้น้ำในปริมาณที่สูงมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ เช่น ผสมในน้ำผลไม้ รวมทั้งใช้ไปในการทำความสะอาดเครื่องจักรอุปกรณ์ (สันทัด, 2545)

2.8.2 ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต

จากตารางที่ 2.6 พบว่า กระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋อง หรือผลไม้กระป๋องมีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณที่สูง โดยปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นต่อตันวัตถุดิบในสายการผลิตผลไม้กระป๋องมีค่าสูงถึง 6.95 ลบ.ม./ตันวัตถุดิบ ในขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีน้ำเสียเกิดขึ้นเพียง 0.65 ลบ.ม./ตันวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตของสายการผลิตสับปะรดกระป๋อง หรือผลไม้กระป๋อง น้ำเสียจะเกิดใน

ปริมาตรประมาณ 80% ของน้ำใช้ อาจเป็นเพราะอยู่ในผลิตภัณฑ์ หรือเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่ง

2.8.3 คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต

จากตารางที่ 2.7 พบว่า น้ำเสียเกิดขึ้นจากสายการผลิตมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกัน การผลิตผลไม้กระป๋องน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าความสกปรกสูงมาก คือมีค่าซีโอดี 2,581 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่าสารแขวนลอยในน้ำเสียจากสายการผลิตสับปะรดกระป๋อง และผลไม้กระป๋องมีค่าสูงถึง 130 และ 169 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อาจจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตในแต่ละสายการผลิต รวมทั้งชนิดของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ หากเป็นผลไม้กระป๋องแล้วเนื่องจากความหลากหลายของชนิดผลไม้ และคุณภาพของผลไม้ ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการล้างมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกได้สูง ส่วนกรณีของน้ำผลไม้ น้ำเสียอาจจะมีการปนเปื้อนน้ำผลไม้มาก ในขั้นตอนการผลิต การบรรจุ และล้างทำความสะอาดเป็นต้น

นอกจากนี้หากพิจารณาปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นในแต่ละวันในแต่ละสายการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.8 พบว่าสายการผลิตผลไม้กระป๋องจะผลิตสิ่งสกปรกในรูปของบีโอดีหรือซีโอดีสูงสุด คือ 335 และ566 กก./วัน ตามลำดับ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากกำลังการผลิตในแต่ละสายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีปริมาณสูงสุดโดยดูได้จากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต แต่เมื่อพิจารณาความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสายการผลิต ดังตารางที่ 2.9 พบว่าสายการผลิตผลไม้กระป๋องนั้นมีค่าความสกปรกในรูปซีโอดีสูงสุดคือ 18 กก.ซีโอดี/ตันวัตถุดิบ ในขณะที่สายการผลิตสับปะรดกระป๋องมีค่าความสกปรกเกิดขึ้นต่ำสุดคือ 1.03 กก.ซีโอดี/ตันวัตถุดิบ อาจอธิบายได้ว่าในสายการผลิตผลไม้กระป๋องนั้น หากเป็นผลไม้ชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สับปะรดแล้วอาจจะมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกในวัตถุดิบค่อนข้างสูง รวมทั้งความหลากหลายของชนิดและขนาดของผลไม้ ทำให้ขั้นตอนการผลิตเกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกค่อนข้างสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าปริมาณการใช้น้ำปริมาณน้ำเสีย ปริมาณวัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิต

ข้อมูลที่ทำการศึกษา		กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
		สับปะรด	ผลไม้ชนิดอื่น
ปริมาณน้ำใช้ ลบ.ม./วัน	เฉลี่ย	308	274
ปริมาณวัตถุดิบ ตัน/วัน	เฉลี่ย	377	32
ปริมาณน้ำเสีย ลบ.ม./วัน	เฉลี่ย	246	219
น้ำที่หายในกระบวนการผลิต ลบ.ม./วัน	เฉลี่ย	62	55
ปริมาณการใช้น้ำ/ตันวัตถุดิบ ลบ.ม./ตัน	ช่วง	0.66-1.05	4.60-12.86
	เฉลี่ย	0.82	8.56
ปริมาณน้ำเสียที่เกิด/ตันวัตถุดิบ	ช่วง	0.5-0.8	3.7-10.3
ลบ.ม./ตัน	เฉลี่ย	0.65	6.95
%ปริมาณน้ำเสีย/น้ำใช้	ช่วง	75.76-76.19	80.34-84.45
	เฉลี่ย	79.27	81.19
%น้ำที่หายในกระบวนการผลิต	เฉลี่ย	20.73	18.81

ที่มา : สันทัด, 2545

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิต

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง	
	สับปะรด	ผลไม้ชนิดอื่น
pH	4.47	5.48
ปริมาณน้ำเสีย ลบ.ม./วัน	246	219
BOD_5 มก./ล.	820	1523
COD มก./ล.	1583	2581
TKN มก./ล.	11	18.57
SS มก./ล.	130	169
FOG มก./ล.	-	-

ที่มา : สันทัด, 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิต

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	**กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง**	
	สับปะรด	**ผลไม้ชนิดอื่น**
ปริมาณน้ำเสีย ลบ.ม./วัน	246	219
BOD_5 กก./วัน	204	335
COD กก./วัน	391	566
TKN กก./วัน	2.79	4.10
SS กก./วัน	32.19	36.33
FOG กก./วัน	-	-

ที่มา : สันทัด, 2545

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อปริมาณการใช้วัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิต

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	**กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง**	
	สับปะรด	**ผลไม้ชนิดอื่น**
ปริมาณวัตถุดิบ ตัน/วัน	377	-
BOD_5 กก./ตัน	0.54	10.52
COD กก./ตัน	1.03	18
TKN กก./ตัน	0.008	0.13
SS กก./ตัน	0.08	1.17

ที่มา : สันทัด, 2545

ตารางที่ 2.10 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบบำบัด

คุณสมบัติของน้ำเสีย	**ค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางผลิต**					
	pH	**BOD_5 มก./ล.**	**COD มก./ล.**	**TKN มก./ล.**	**SS มก./ล.**	**FOG มก./ล.**
ก่อนผ่านระบบบำบัด	5.27	2965	6320	30	144	11
หลังผ่านระบบบำบัด	7.5	9	43	7	13	-
ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	<5.5-9.0	<20	<120	<100	<30-50	<100
ประสิทธิภาพการบำบัด(%)	-	99.7	99	77	91	100

ที่มา : สันทัด, 2545

ตารางที่ 2.11 ปัญหาและสาเหตุของการเกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตและแนวทางการแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่เกิด	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ไขปัญหา
-มีปริมาณการใช้น้ำสูงในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดและการแปรรูปวัตถุดิบ เช่น การตัดแต่งเบื้องต้นของการผลิต การปอกเปลือก -ความสกปรกที่เกิดจากการเจือปนของเศษวัตถุดิบและน้ำเชื่อม -ในแต่ละกระบวนการผลิตมีค่าความสกปรกวัดในรูป pH BOD_5 COD TKN SS และ FOG สูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง	-ความแตกต่างของผลไม้และองค์ประกอบของผลไม้ -ผลไม้มีหลายขนาด -ผลไม้ที่ไม่ได้มาตรฐาน -วิธีการล้างทำความสะอาดโดยผู้ปฏิบัติงาน -ขั้นตอนและความถี่ในการล้าง -เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการล้างทำความสะอาด	-เลือกวิธีการคัดแยกผลไม้ที่ไม่ได้มาตรฐานออกจากกระบวนการผลิต -เลือกวิธีการแยกของเสียออกจากกระบวนการผลิต เช่น มีการใช้ถาดหรือตะแกรงรองรับสิ่งสกปรกจากการแปรรูป มีการใช้สายพานลำเลียงวัตถุดิบเพื่อลดการสูญเสียจากการขนถ่าย มีการตั้งตะแกรงดักสิ่งสกปรกบริเวณท่อระบายน้ำในกระบวนการผลิต **-นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาหมุนเวียนใช้ซ้ำ**

ที่มา : สันทัด, 2545

2.8.4 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากโรงงานจะมีการออกแบบระบบบำบัดเป็นระบบเอเอส (activated sludge system) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตทั้งหมดจะถูกสูบมารวมกันและเข้าสู่ในการบำบัดน้ำเสียข้างต้น รวมทั้งระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานค่อนข้างสูง ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี และซีโอดี สูงถึง 99.7% และ 99% ตามลำดับ และน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงาน ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าโรงงานมีระบบบำบัดที่ออกแบบมามีความเหมาะสมดีทั้งทางด้านกระบวนการบำบัดและกำลังบำบัด

2.9 น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

2.9.1 กระบวนการไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล เป็นชื่อเรียกที่หมายถึงเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นพืชผลจากเกษตรกรรม โดยผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไบโอดีเซล เป็นสารเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างน้ำมันพืช หรือน้ำมัน/ไขมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์ การเรียกชื่อสารเอสเทอร์ที่ได้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยา จะเรียกสารที่ได้ว่า เอทิลเอสเทอร์ อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลเป็นคำรวมที่ใช้เรียกสารเอสเทอร์เหล่านี้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนจากพืช ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงล้วน ๆ หรือใช้ผสมกับน้ำมันดีเซล เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลก็ได้ โดยที่อัตราการผสมสามารถใช้ผสมได้ตั้งแต่อัตราส่วนร้อยละ 5 ขึ้นไป สำหรับไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันดีเซล จะเรียกชื่อตามอัตราส่วนโดยปริมาตรของการผสม เช่นเชื้อเพลิงที่มีไบโอดีเซลร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 โดยปริมาตร เรียกว่า B20 เป็นต้น ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช/ไขมันสัตว์นี้ เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเผาไม้ได้อย่างสมบูรณ์ และไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ในเครื่องยนต์ดีเซล (พิสมัย และ ลลิตา, 2549)

ตามทฤษฎี กระบวนการผลิตไบโอดีเซล หรือการสังเคราะห์สารเอสเทอร์จากน้ำมันพืช/ไขสัตว์ ทำได้ 3 วิธี คือ

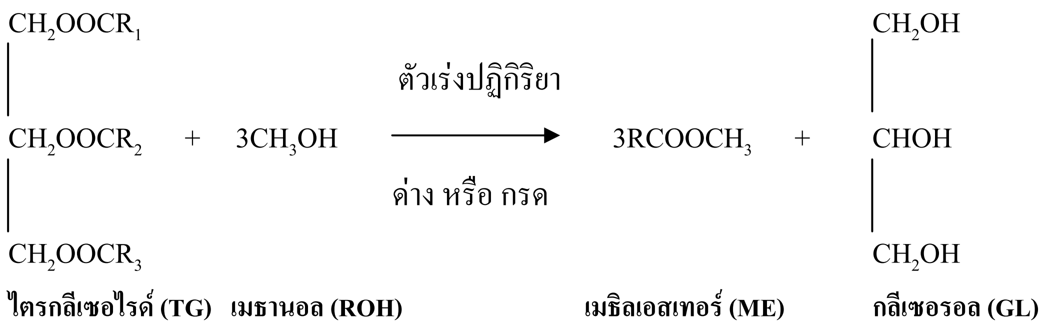
1. การทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ โดยใช้เบส หรือกรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) สารเร่งปฏิกิริยาจะทำงานในตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยที่เมื่อใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เบสจะเร่งปฏิกิริยาในตำแหน่งของแอลกอฮอล์ โดยการนำโปรตรอนออกจากแอลกอฮอล์ และเมื่อใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา กรดจะเร่งปฏิกิริยาในตำแหน่งที่เป็นกลุ่ม Carbonyl โดยให้โปรตรอนในตำแหน่งที่เป็น Carbonyl หรือ –C=O ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดว่องไวขึ้น

2. การทำปฏิกิริยาของน้ำพืชกับแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา

3. ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำมันพืช/ไขสัตว์ให้เป็นกรดไขมัน และให้กรดไขมันทำปฏิกิริยาต่อกับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นเอสเทอร์

โดยทั่วไปแล้ว น้ำมันพืชในปริมาณ 100 ส่วน ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ 10 ส่วน โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย จะได้ไบโอดีเซลในปริมาณ 100 ส่วน และกลีเซอรีน 10 ส่วน ในกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน นิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ส่วนกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน มักใช้กรดกำมะถัน หรือกรดฟอสฟอริก เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยผสมสารเร่งปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ก่อนส่งเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืช ปฏิกิริยารวมของการผลิตไบโอดีเซล หรือการเกิดเมทิลเอสเทอร์ แสดงในรูปที่ 2.4

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรม อาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบกระบวนการผลิต แต่มักเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยารวมของการเกิดเมธิลเอสเทอร์

- ❖ เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้สภาวะในการผลิตที่อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่าการใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา
- ❖ เป็นกระบวนการที่ให้ผลได้ หรือ yield สูง และควบคุมการผลิตได้ง่าย
- ❖ ไม่ต้องใช้วัสดุที่ต้องทนต่อความดันสูง ในการสร้างอุปกรณ์การผลิต ทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์การผลิตต่ำลง

อย่างไรก็ตามในการผลิตต้องคำนึงถึงการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้ผลได้สูงสุด นอกจากนั้นแล้วยังต้องให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนดด้วย เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำสุด มีราคาที่สามารถแข่งขันได้ และมีผลิตภัณฑ์ที่สามารถจำหน่ายได้ในเชิงพานิชย์ ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลได้ (yield) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (พิสมัย และ ลลิตา, 2549)ได้แก่

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์
- ชนิดและความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา
- การผสมสารตั้งต้น
- ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

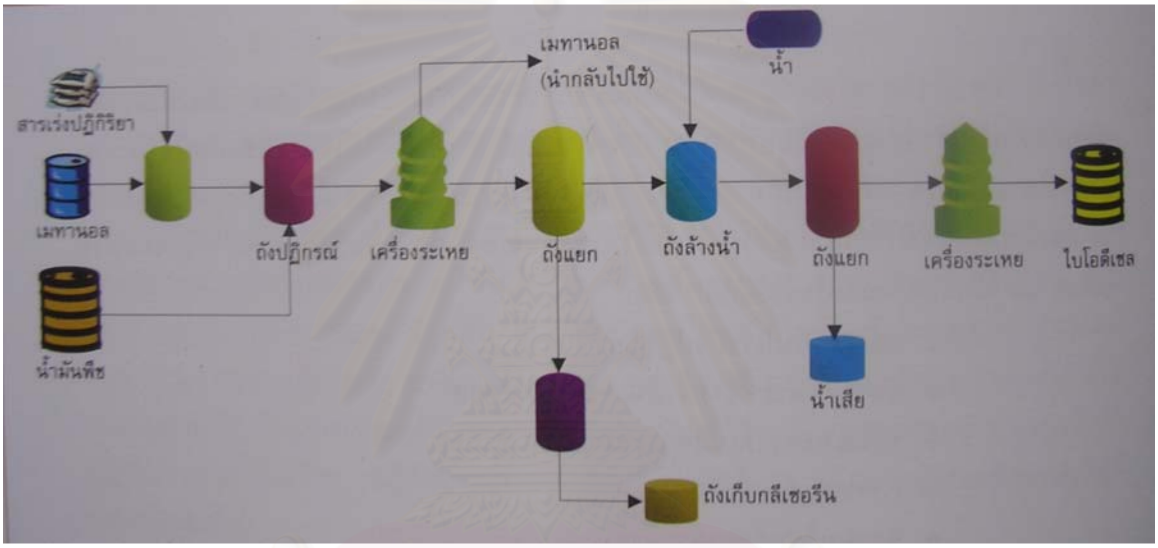
ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันจากรูปที่ 2.5 นั้นประกอบด้วย ปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก น้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์ (TG) ทำปฏิกิริยากับเมธานอล (ROH) เกิดเป็น เมทิลเอสเทอร์ (ME) หรือไบโอดีเซลกับไดกลีเซอไรด์ (DG) จากนั้นไดกลีเซอไรด์ (DG) ทำปฏิกิริยากับเมธานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับโมโนกลีเซอไรด์ ในขั้นตอนสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์ (MG) ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล ฉะนั้นในการผลิตไบโอดีเซล เมื่อทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ จะสามารถควบคุมปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ไม่ให้หลงเหลือในไบโอดีเซลเกินที่มาตรฐานกำหนดได้ รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันในแต่ละขั้นตอน

TG	+	ROH	⟶	ME	+	DG
DG	+	ROH	⟶	ME	+	MG
MG	+	ROH	⟶	ME	+	GL

ตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน

โดยทั่วไป กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแผนผังการผลิตไบโอดีเซล แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 แผนผังการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

2.9.2 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลเป็นอุตสาหกรรมในโลก มีการใช้เมล็ดเรพ เป็นวัตถุดิบในปริมาณสูงสุด มีส่วนแบ่งในการผลิตถึง 80% รองลงมาได้แก่ น้ำมันเมล็ดทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง ในส่วนแบ่งชนิดละ 10% ในสหภาพยุโรป น้ำมันจากเมล็ดเรพนับว่าเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล รองลงมาได้แก่ น้ำมันเมล็ดทานตะวัน ซึ่งทำการผลิตในประเทศฝรั่งเศส ขณะที่อเมริกาใช้น้ำมันใช้แล้ว (waste vegetable oil – WVO) และน้ำมันจากเมล็ดถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากน้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้แล้ว ยังมีการใช้น้ำมันปาล์มและไขสัตว์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนด้วย

ประเทศมาเลเซีย เป็นประเทศที่มีการปลูกปาล์มมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ได้ประกาศนโยบายเชื้อเพลิงเหลวแห่งชาติในปี พ.ศ. 2549 ที่จะมีการส่งเสริมให้มีการผลิตไบโอดีเซลจาก

น้ำมันปาล์มขึ้นในประเทศมาเลเซีย และมุ่งเน้นที่การส่งออก ซึ่งจากนโยบายดังกล่าว อาจจะทำให้ส่วนแบ่งในการใช้น้ำมันเมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบในปริมาณสูงสุดในการผลิตไบโอดีเซลเชิงอุสาหกรรมของโลกเปลี่ยนไปได้ในอนาคต

2.9.3 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

เทคโนโลยีที่ใช้การผลิตไบโอดีเซล แบ่งได้เป็น 3 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification process) ที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมธานอล มีข้อดีคือ เป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำกว่า 2 บรรยากาศ ผลได้ของปฏิกิริยาสูงถึง 98% แต่กระบวนการนี้จะไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมากรดไขมันอิสระสูง เนื่องจากจะเกิดสบู่ และส่งผลให้ผลได้ (yield) ของกระบวนการผลิตลดลง

2. กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification process) ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมธานอล จะสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิดและค่ากรดไขมันอิสระทุกระดับ แต่ข้อด้อยคือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่า

3. กระบวนการ 2 ขั้นตอน (Two-stage process) ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน เป็นการแก้ปัญหาจุดด้อยของ 2 กระบวนการข้างต้น กล่าวคือ สามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง ในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานต่ำ โดยหลักการคือ ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันให้เป็นสารเอสเทอร์ก่อน ที่เป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จากนั้นจึงใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะใช้พลังงานต่ำกว่ากระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว แต่หากวัตถุดิบมีค่ากรดสูงมาก ๆ กระบวนการในขั้นตอนแรกจะใช้เวลามากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของไบโอดีเซลสูงขึ้นตามไปด้วย

2.9.3.1 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ ในปัจจุบัน มีการผลิตอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ แบบไม่ต่อเนื่อง แบบต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน และแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอนที่ใช้ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และทรานเอสเทอริฟิเคชันควบคู่กันไป

ก. เทคโนโลยีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch technology) มีข้อดีคือ ราคาถูก แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจมีความไม่สม่ำเสมอ และมีกำลังการผลิตต่อครั้งไม่มากนัก

ข. เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยวิธีทรานเอสเทอริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ พื้นที่ในการติดตังน้อยกว่าแบบไม่ต่อเนื่อง

ด้วยอัตรากำลังการผลิตเท่ากัน แต่จะมีการลงทุนสูงกว่า เนื่องจากต้องมีระบบควบคุมการผลิตให้มีการผลิตที่สอดคล้องกันทั้งกระบวนการ

ค. เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอน เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอน เป็นการใช้กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันในช่วงแรก และใช้กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันเป็นขั้นตอนที่สอง ซึ่งวิธีการนี้จะมีความเหมาะสมกับวัตถุดิบทุกชนิด โดยเฉพาะน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง

ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซล จะต้องพิจารณาถึงหลายปัจจัยกล่าวคือ ชนิดและประเภทของวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ และได้ปริมาณสูง มีคุณภาพสม่ำเสมอ รวมถึงการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำด้วย

2.9.3.2 การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มทำการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 หน่วยงานของรัฐหลายหน่วยงานได้พัฒนาระบบการผลิตไบโอดีเซลทั้งแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง โดยใช้วัตถุดิบหลายชนิดเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันสบู่ดำ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ในปี พ.ศ. 2546 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้พัฒนาชุดต้นระบบผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง มีขนาดกำลังการผลิต 18 ลิตรต่อครั้ง ภายใต้ ***"โครงการวิจัยและพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนสารเติมแต่งที่เพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลกำมะถันต่ำ"*** ซึ่งเป็นโครงการที่ร่วมมือ 3 หน่วยงานคือ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท ปตท. จำกัด มหาชน โดยได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแหล่งชาติ วช. การศึกษาได้ใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันมะพร้าว และปาล์มสเตียรีน เป็นวัตถุดิบ ชุดผลิตไบโอดีเซลเครื่องแรกที่เป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องนี้ ถึงแม้ไม่มีระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติสามารถทำงานได้ดี และผลิตไบโอดีเซลได้คุณภาพตามมาตรฐาน แต่ต้องควบคุมการผลิตอย่างใกล้ชิด จึงจะผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพสม่ำเสมอตามมาตรฐาน

โครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลา ได้ดำเนินการทดลองศึกษาการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ตั้งแต่วันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2543 โดยในเบื้องต้นเป็นการทดลองนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เกษตรกรรม เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องตัดหญ้า ฯลฯ ซึ่งผลการทดลองส่วนใหญ่ให้ข้อสรุปตรงกัน คือ สามารถนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ในระยะยาวอาจก่อให้เกิดปัญหากับเครื่องยนต์ ในการใช้งานน้ำมันพืชจึงต้องกำจัดสิ่งเหล่านั้นออกจากน้ำมันก่อน โดยกระบวนการเอทธิลเอสเทอริฟิเคชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ไบโอดีเซล โดยโรงงานไบโอดีเซลในโครงการฯ ได้ก่อตั้งขึ้นเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2547 ได้รับความร่วมมือจากกรมอู่ทหารเรือ กลุ่มบริษัทแสงโสม โรงงานยาสูบ บริษัทราชาไบโอดีเซลและบริษัทบางจาก

ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) วัตถุดิบในการผลิต คือ น้ำมันพืชใช้แล้วจากฝ่ายเครื่อง สำนักพระราชวัง เอทธิลแอลกอฮอล์ 99.5% ซึ่งผลิตได้ในโครงการและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 90 นาที มีผลได้ (yield) ประมาณ 90% กำลังการผลิตไบโอดีเซล 500 ลิตรต่อสัปดาห์ ไบโอดีเซลที่ได้ใช้กับรถยนต์ และเครื่องกำเนิดไอน้ำของโครงการฯ ผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) จากกกระบวนการคือ กลีเซอรอล โครงการฯ จะได้ทำการศึกษาวิจัย เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ส่วนน้ำมันจากพืชอื่น ๆ ที่โครงการฯ กำลังทดลองศึกษาในปัจจุบัน คือ สบู่ดำ โดยจะศึกษาในด้านการผลิตเป็นไบโอดีเซล และการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

ปัจจุบันโรงงานไบโอดีเซล ตั้งอยู่ในโครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา และอยู่ในความรับผิดชอบของหัวหน้าฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร (นางคะเอื้อง บุญญสิริ)

นอกจากนั้นแล้วกรมอู่ทหารเรือ โดยการสนับสนุนของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้พัฒนาชุดการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง มีขนาดกำลังการผลิต 2,000 ลิตรต่อครั้ง ในการผลิตไบโอดีเซล วัตถุดิบที่ใช้ คือ น้ำมันพืชใช้แล้วและเมทานอล มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ในกรผลิตประกอบด้วยถังผสมสารเคมี ถังปฏิกรณ์ เครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อแยกกลีเซอรีน และเหวี่ยงแยกน้ำ ถังล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และถังบรรจุไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ชุดการผลิตนี้ติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่

ในปีเดียวกันสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่อง พร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติ ภายใต้ ***“โครงการศึกษาออกแบบการจัดตั้งโรงงานผลิตไบโอดีเซลนำร่องระดับชุมชน”*** ซึ่งเป็นโครงการที่ วว. ได้รับการสนับสนุนจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเป็นการผลิตแบบต่อเนื่องชนิดเคลื่อนที่ได้ หรือ Mobile unit โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่อง และผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสากล นอกจากนั้นยังต้องการให้เป็นชุดผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชน หรือใช้เป็นชุดสาธิตการผลิตไบโอดีเซลในสถานที่ต่าง ๆ

เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องนี้ มีขนาดกำลังการผลิตไบโอดีเซล 150 ลิตรต่อวัน ได้ออกแบบให้สามารถใช้เป็นฐานสำหรับการออกแบบโรงงานผลิตไบโอดีเซลขนาดกำลังการผลิตระดับโรงงานได้ โดยมีความมั่นใจว่าเมื่อขยายกำลังการผลิตแล้ว ยังสามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ ใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ พบว่า เครื่องสามารถทำงานได้ดีและเดินได้ดีติดต่อกันอย่างต่อเนื่องตามตัวเลขที่ออกแบบไว้ทุกประการ สามารถผลิตได้ไบโอดีเซลมีผลได้ (yield) 90% อนึ่งในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ประเทศไทยยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศ ในการศึกษานี้จึงได้เปรียบเทียบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับ

มาตรฐาน ASTM 6751 ซึ่งพบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานทุกประการ

รูปที่ 2.7 เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องพัฒนาโดย วว.
เจ้าของโครงการ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

- การวิจัยและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตไบโอดีเซล

วว.ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ พบว่า น้ำมันมะพร้าวมีคุณสมบัติในการนำมาใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลมากที่สุด โดยได้ดำเนินการออกแบบจัดสร้าง ติดตั้ง และทดสอบ เครื่องปฏิกรณ์ และทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และ สภาวะการทำงานต่างๆ ของชุดอุปกรณ์สั่งจ่ายสาร ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ และดำเนินการวิเคราะห์ ข้อมูลการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งผลที่ได้นำไปสู่ จุดเริ่มต้นในการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

- การศึกษาและวิจัยสารเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

วว. ได้ทำการศึกษาและวิจัยสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม เพื่อใช้ในกระบวนการ ทรานเอสเทอริฟิเคชัน ของน้ำมันมะพร้าวดิบในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสความดันบรรยากาศ โดยใช้สารโพแทสเซียม คาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสารทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสมในการผลิตแบบไบโอดีเซลได้ดี นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวเพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่ได้

- การศึกษาและวิจัยวิธีการและมาตรฐานในการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

วว. ได้ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับ mono-,di,tri- gryceride และแอลกอฮอล์ที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซล ที่ผลิตจากวัตถุดิบในประเทศ โดยทำการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรีนอิสระและค่ากลีเซอร์รีนรวมในตัวอย่างไบโอดีเซลด้วยวิธีการ Enzymatic Analysis เปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี และทำการสรุปข้อมูลผลการวิจัยเพื่อจัดทำเอกสาร วิธีการมาตรฐานในการตรวจสอบวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ในห้องปฏิบัติการโดยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียใช้แบบจำลองของระบบเอเอสบีอาร์ (anaerobic sequencing batch reactor; ASBR) เพื่อเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความสามารถในการลดไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการเลี้ยงครั้งนี้มากจาก ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งได้ทำการเลี้ยงเชื้อมาแล้วระยะหนึ่ง โดยทางมหาวิทยาลัยศิลปากรนำเชื้อมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรัตนโกสินทร์ กรุงเทพมหานคร ในการเลี้ยงเชื้อในถังปฏิกิริยานั้นจะใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

เมื่อทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ได้ระยะหนึ่งแล้ว จะนำเชื้อจากถังมาศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอนอื่น ๆ โดยแหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล โดยจะเปรียบเทียบกับโซเดียมอะซิเตท ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องนำมาจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง มาลี สามพราน นครปฐม และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลนำมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วว.) โดยจะนำเชื้อจากในถังมาทดลองแบบ Batch โดยเติมแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด และศึกษาประสิทธิภาพการลดไนเตรทที่ความเข้มข้นไนเตรทต่าง ๆ กัน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. ถังปฏิกิริยา ทำจากท่ออะคริลิกใส ส่วนสูงของถังปฏิกิริยาเท่ากับ 30 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร ที่มีปริมาตรรวมขนาด 5 ลิตร ปริมาตรที่ใช้เลี้ยงเชื้อ 4 ลิตร

2. เครื่องกวนแท่งแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็ก เครื่องกวนที่ใช้เป็นของยี่ห้อ Velp ซึ่งความเร็วรอบที่ใช้ในการทำงาน 60 รอบต่อนาที แท่งแม่เหล็กมีความยาว 5 เซนติเมตร

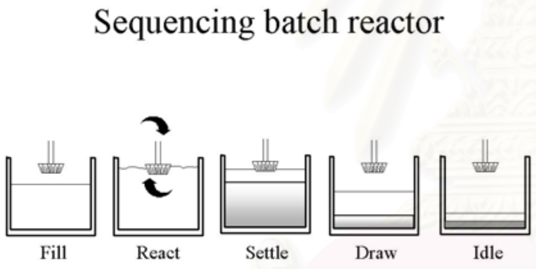
3. ถังน้ำพลาสติก

4. สายยาง

5. เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ EDT INSTRUMENTS รุ่น BA 350
- เตาซีโอดี (COD Reactor) ยี่ห้อ HACH รุ่น DRB 200
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 211 D

- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น BJ 1000 C
- เครื่องมือวัดอุณหภูมิ(Thermometer)
- เครื่องกรองสุญญากาศ
- เครื่องวัด ORP ยี่ห้อ Metteler Toledo
- เครื่องอังน้ำ (Water Bath)
- เครื่อง Ion Chromatography ยี่ห้อ Metrohm
- เตาอบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- เตาเผาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
- โถดูดความชื้น KATT
- กระดาษกรอง GF/C และกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- เครื่องแก้วชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.1 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

3.3.1.1 นำตะกอนจุลินทรีย์จากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยาขนาด 5 ลิตร ซึ่งทำจากท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร

3.3.1.2 นำอาหารที่เตรียมสำหรับจุลินทรีย์ ปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร และปรับพีเอชให้เหมาะสม เติมลงในถังปฏิกิริยาและทำการกวนผสมตะกอนจุลินทรีย์และอาหารเข้าด้วยกัน

3.3.1.3 ในการเปลี่ยนอาหารต้องทำทุกวัน สามารถทำได้โดยตกตะกอนจุลินทรีย์ (ปิดเครื่องกวนผสม) ประมาณ 30 นาที แล้วดูดส่วนใสที่ได้ออกมาประมาณ 2 ลิตร วัดค่า pH

3.3.1.4 นำอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ซึ่งปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร เติมลงในถังปฏิกิริยา

3.3.1.5 ทำการกวนผสมตะกอนจุลินทรีย์และอาหารเข้าด้วยกัน ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7.5-8.0 ด้วย 1N HCl และ 1N NaOH

3.3.1.7 การเปลี่ยนอาหาร วัด pH ทุกวัน และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นไนเตรท ซีโอดี Mixed Liquor Suspended Solids และ Mixed Liquor Volatite Suspended Solids เป็นประจำทุกสัปดาห์

3.3.2 สูตรอาหารเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

ตารางที่ 3.1 สูตรอาหารเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

สารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
$NaNO_3$	606
CH_3COONa	1000
KH_2PO_4	100
$CaCl_2$	25
$FeCl_3$	5
$MgSO_4.7H_2O$	25
pH	8.4

หมายเหตุ - อาหารเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นของไนเตรท 100 มก./ล. และใช้น้ำประปาในการปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร เนื่องจากการใช้น้ำ DI จะสิ้นเปลืองมาก

3.3.3 หาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรท (ธงชัย, 2544)

3.3.3.1 เตรียมตะกอนจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้น 800 1000 1300 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาล้างด้วยน้ำประปาที่เติมแร่ธาตุไปให้ได้คล้ายกับน้ำเสียที่ทดลองเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาจากความดันออสโมซิสที่เปลี่ยนแปลงไป ล้างเช่นนี้ 1-3 ครั้งแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

3.3.3.2 วัดอุณหภูมิน้ำไว้รายงานประกอบค่า Nitrate uptake rate และ Specific nitrate uptake rate (SNUR)

3.3.3.3 ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 0.2 ด้วย 1M HCl และ 0.75 M NaOH

3.3.3.4 เติม $NaNO_3$ ให้ได้ความเข้มข้นรวมประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ซีโอดีต่อเอ็นประมาณ 3-9)

3.3.3.5 เติมแหล่งคาร์บอนคือ โซเดียมอะซิเตท ให้มีซีโอดีประมาณ 60 - 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.3.6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตรทุก 10 นาที ในชั่วโมงแรก และทุก 20 นาทีในชั่วโมงถัดไป ทำไปจนครบ 4 ชั่วโมง (จะได้ 15 ตัวอย่างภายใน 4 ชั่วโมง)

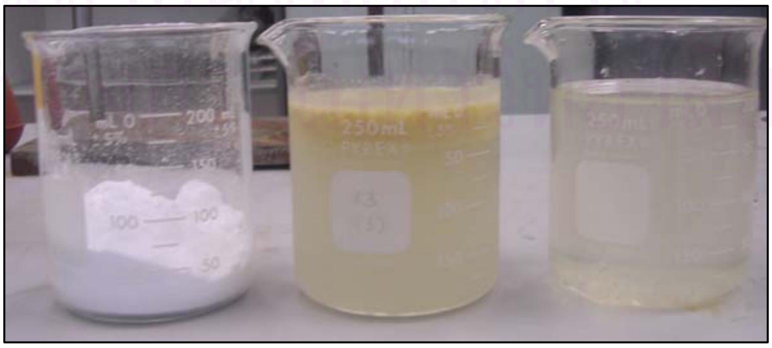
3.3.3.7 กรองตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกระดาษกรอง GF/C และกรองซ้ำด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน วิเคราะห์หาค่าไนเตรททันที

3.3.3.8 ทำการทดลองชุดควบคุม โดยใช้วิธีเดียวกันแต่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน ในทุกความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ทดลอง

3.3.3.9 นำค่าปริมาณไนเตรทที่ได้มาเขียนกราฟที่เวลาต่าง ๆ ของแต่ละความเข้มข้นของจุลินทรีย์ สังเกตลักษณะของกราฟ และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของไนเตรทเทียบกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์

3.3.3.10 คำนวณค่า Nitrate uptake rate (NUR) และ Specific nitrate uptake rate (SNUR) จะทราบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด คือ โซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง



รูปที่ 3.2 แหล่งคาร์บอนที่ใช้ได้แก่
โซเดียมอะซิเตท : น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง : น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

3.3.4.1 วิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องโดยวิเคราะห์ค่า C/N ratio องค์ประกอบและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.3.4.2 เตรียมตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมจากข้อ 2 ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร วัด pH

3.3.4.3 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยให้มีความเข้มข้นของไนเตรท 50 100 150 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5 $\pm$ 0.2

3.3.4.4 นำตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมมาทดลองแบบ Batch โดยเติมแหล่งคาร์บอนจากโซเดียมอะซิเตท วัด pH เริ่มต้น

3.3.4.5 วัดอุณหภูมิน้ำไว้รายงานประกอบค่า Nitrate uptake rate และ Specific nitrate uptake rate (SNUR)

3.3.4.6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตรทุก 10 นาที ในชั่วโมงแรก และทุก 20 นาทีในชั่วโมงถัดไป ทำไปจนครบ 4 ชั่วโมง (จะได้ 15 ตัวอย่างภายใน 4 ชั่วโมง)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

ที่	พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
1	pH	-	pH meter
2	อุณหภูมิ	^oC	Thermometer
3	COD	mg/l	Closed Reflux, Titration Method
4	สภาพด่าง	mg/L as $CaCO_3$	Titration Method
5	TKN	mg/l	Distillation, Titration Method
6	ไนไตรท์	mg/l	Ion Chromatography
7	ไนเตรท	mg/l	Ion Chromatography
8	คลอไรด์	mg/l	Ion Chromatography
9	ซัลเฟต	mg/l	Ion Chromatography
10	ฟอสเฟต	mg/l	Ion Chromatography
11	Total Organic Carbon	mg/l	เครื่อง TOC
12	Solids (TS TSS TDS FS VS)	mg/l	Standard Method

3.3.4.7 กรองตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกระดาษกรอง GF/C และกรองซ้ำด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน วิเคราะห์หาค่าไนเตรททันที

3.3.4.8 ทำการทดลองชุดควบคุม โดยใช้วิธีเดียวกันแต่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน ในแต่ละความเข้มข้นของไนเตรทที่ทดลอง ทำซ้ำอย่างละ 3 ชุด ในแต่ละการทดลอง

3.3.4.9 ทำการทดลองเช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนจากโซเดียมอะซิเตทเป็นน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดค่าไนเตรทในน้ำเสียของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์น้ำจากถังเลี้ยงจุลินทรีย์

ที่	พารามิเตอร์	หน่วย	ความถี่	วิธีวิเคราะห์
1	pH	-	ทุกวัน	pH meter
2	อุณหภูมิ	^{o}C	ทุกสัปดาห์	Thermometer
3	COD	mg/l	ทุกสัปดาห์	Closed Reflux, Titration Method
4	ไนไตรท์	mg/l	ทุกสัปดาห์	Ion Chromatography
5	ไนเตรท	mg/l	ทุกสัปดาห์	Ion Chromatography
6	MLSS	mg/l	ทุกสัปดาห์	Standard Method
7	MLVSS	mg/l	ทุกสัปดาห์	Standard Method
8	ORP	mg/l	ทุกสัปดาห์	ORP meter

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดไนเตรทในน้ำเสีย โดยสถิติเชิงพรรณนา เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

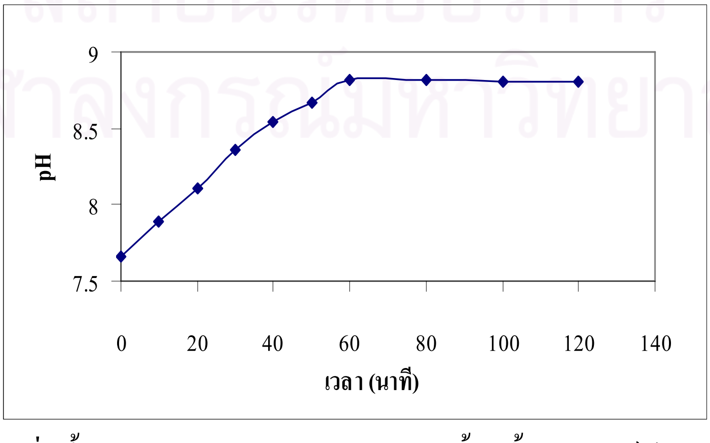
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล

4.1 การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ได้นำตะกอนจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียมาจาก ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร ก่อนที่จะนำตะกอนมาใช้ในการทดลองนั้นต้องเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีความสามารถในการลดไนเตรทได้ระยะหนึ่งก่อน โดยการนำเชื้อมาเลี้ยงในถังปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลองของระบบเอเอสบีอาร์ (anaerobic sequencing batch reactor; ASBR) โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน มีการเติมอาหารให้กับเชื้อ 2 รอบต่อวัน โดยมีวงจรของระบบในการเลี้ยงประมาณ 12 ชม.ต่อการเปลี่ยนอาหาร 1 รอบ โดยอาหารเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นของไนเตรท 100 mg/l เนื่องจากให้มีค่าใกล้เคียงกับไนเตรทในน้ำเสียทั่วไปที่มีค่าประมาณ 100 mg/l

ตลอดช่วงการทดลองทุกสัปดาห์ พบว่าเมื่อเลี้ยงเชื้อไปเรื่อย ๆ ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งค่า MLVSS จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าในถังปฏิกิริยามีตะกอนจุลินทรีย์มากน้อยเพียงใด ดังนั้นเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งจะต้องทำการพิจารณาค่า MLVSS ความเร็วในการตกตะกอนและสีของตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อให้มีปริมาณที่เหมาะสม จากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ได้ควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้อยู่ในช่วง MLSS ประมาณ 5000 mg/l และ MLVSS ประมาณ 3000 mg/l ตลอดช่วงการทดลอง และ ซีโอดีในถังปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 300-500 mg/l

ในถังปฏิกิริยาในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียตลอดช่วงทำการทดลองโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนในการเลี้ยงพบว่า อาหารที่เติมให้แก่จุลินทรีย์มีค่าไนเตรทที่ 100 mg/l แต่ค่าไนเตรทในน้ำออกตลอดช่วงการทดลองพบว่ามีค่าประมาณ 0 mg/l แสดงให้เห็นว่าเชื้อจุลินทรีย์ดีไนติฟายอิงในถังปฏิกิริยานั้นมีประสิทธิภาพในการลดไนเตรทในน้ำเสียได้ดี โดยสามารถนำแหล่งคาร์บอนไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตได้ โดยไนเตรทจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้ายในสภาวะที่ไม่มีไนเตรท และมีก๊าซเกิดขึ้น



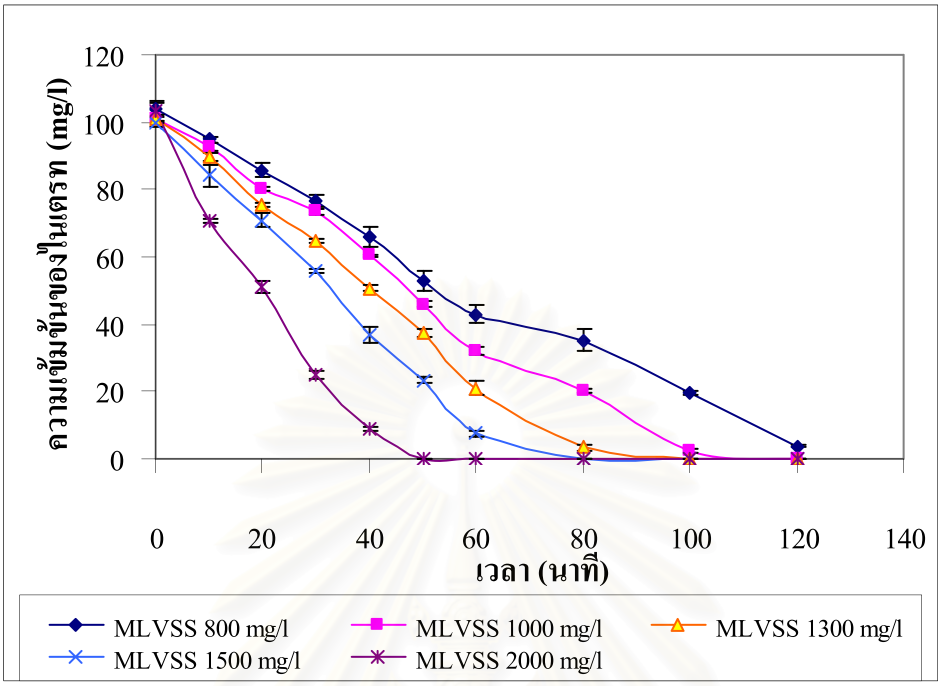
รูปที่ 4.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของ pH หลังเติมอาหาร ในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

จากรูปที่ 4.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของ pH หลังเติมอาหารในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในถังปฏิกิริยา โดยทำการบันทึกค่า pH หลังเติมอาหารเป็นเวลา 120 นาที เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง pH ซึ่งจากรูปพบว่า ค่า pH จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเพิ่มขึ้นสูงในช่วง 60 นาทีแรก เป็นไปตามสมการกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เมื่อไนเตรทมีค่าลดลงค่า pH จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย หลังจาก 60 นาที พบว่าค่า pH มีค่าคงที่ อาจกล่าวได้ว่า ค่าไนเตรทลดลงจนเกือบหมดทำให้ pH ไม่เพิ่มสูงขึ้นและมีค่าคงที่ แต่การเพิ่มขึ้นของ pH ในช่วงแรกนั้น อาจเพิ่มสูงถึงที่ pH 9 ได้ ซึ่งอาจส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน หรือการลดค่าไนเตรทนั้นลดลงได้ เนื่องจาก pH มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน จึงควรมีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7.4-8.4 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ทำให้อัตราการลดไนเตรท และการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดี และพบว่าหลังจากเติมอาหารให้กับเชื้อจุลินทรีย์แล้วนั้น เกิดฟองก๊าซขึ้นด้วย จากการลดลงของไนเตรท ค่า pH ที่เพิ่มขึ้น และ ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนั้น แสดงว่าเชื้อที่เลี้ยงนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้จริง เราจึงหาค่าปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรทต่อไป

รูปที่ 4.2 แสดงฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

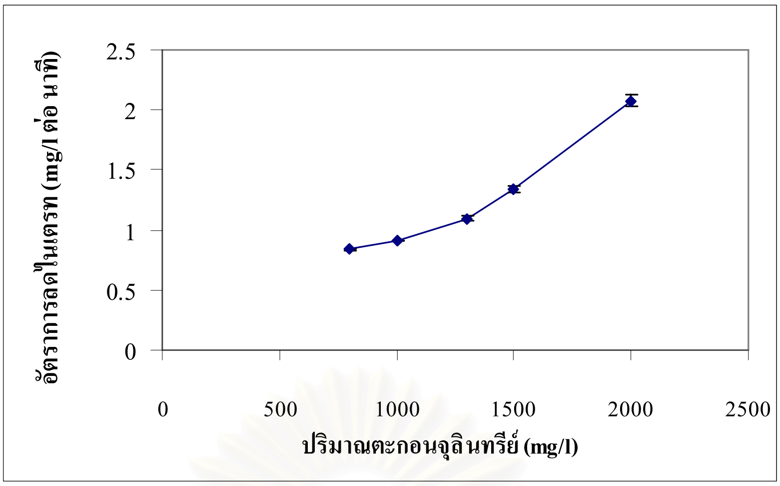
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 หาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรท



รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการลดไนเตรทที่เวลาต่าง ๆ ที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) 800 และ 1000 1300 1500 และ 2000 mg/l

จากรูปที่ 4.3 แสดงอัตราการลดไนเตรท โดยใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่างกัน คือ 800 1000 1300 1500 และ 2000 mg/l ที่มีความเข้มข้นของไนเตรทไนโตรเจน 100 mg/l โดยพบว่าปริมาณไนเตรทจะค่อย ๆ ลดลง และที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) สูงขึ้น อัตราการลดไนเตรท (ความชันของกราฟ) จะเพิ่มขึ้น จากรูปจะเห็นว่า MLVSS ที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้อัตราการย่อยสลายไนเตรทไนโตรเจนแตกต่างกัน โดยที่ MLVSS 800 1000 1300 1500 และ 2000 mg/l มีอัตราการลดไนเตรท 0.84 0.91 1.10 1.34 และ 2.08 mg/l ต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจาก MLVSS 2000 mg/l มีอัตราการลดไนเตรทสูงที่สุด (รูปที่ 4.4) จึงเลือกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดไนเตรทและ MLVSS นี้ไม่เป็นเส้นตรง อาจเป็นเพราะเมื่อ MLVSS จำนวนน้อย การเปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนโตรเจนมีประสิทธิภาพด้อยกว่าที่ MLVSS สูง ๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่า MLVSS มากกว่าหรือเท่ากับ 1300 mg/l ความสัมพันธ์ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการลดไนเตรทเทียบกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์

4.3 ศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนต่อประสิทธิภาพในการลดไนเตรทโดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด คือ โซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง

เมื่อทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ได้ระยะหนึ่งแล้ว จะนำเชื้อจากถังมาศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอนอื่น ๆ โดยแหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล โดยจะเปรียบเทียบกับโซเดียมอะซิเตท

4.3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องและน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

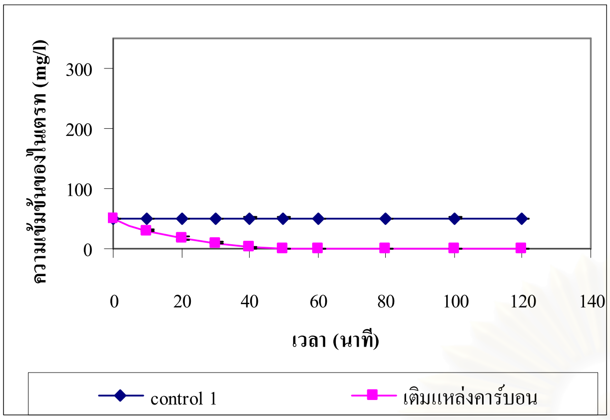
จากการวิเคราะห์น้ำเสีย (ตารางที่ 4.1) พบว่า ปริมาณคาร์บอนของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องมีค่า 1,039 mg/l และค่า COD 3,200 mg/l มีค่าสูงเนื่องจากกำลังผลิตในการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องมีค่าสูง นอกจากนี้พบว่าสารแขวนลอยในน้ำเสียจากการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องซึ่งมีค่า 49.8 mg/l เนื่องจากมีความหลากหลายของชนิดผลไม้ และคุณภาพของผลไม้ โดยมีค่า C/N ratio 49.48 แต่ pH ของน้ำเสียมีค่า 4.59 ซึ่งเป็นกรด เมื่อนำมาใช้ควรปรับ pH ให้เหมาะสมเสียก่อน และอิออนต่าง ๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และซัลเฟต พบว่ามีค่า 0.0 10.0 0.0 11.25 8.0 และ 16.25 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่สูงมากนัก ปริมาณของแข็ง TS TSS TDS FS และ VS มีค่า 16.25 1,000 49.8 950.2 200 และ 800 mg/l ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลมีค่า 5,782 mg/l และค่าซีโอดี 28,800 mg/l ซึ่งมีค่าที่สูงมาก โดยมีค่า C/N ratio 28.07 แต่ pH ของน้ำเสียมีค่า 5.55 ซึ่งเป็นกรด เมื่อนำมาใช้ควรปรับ pH ให้เหมาะสมเช่นเดียวกัน

ตารางที่4.1 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องและน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

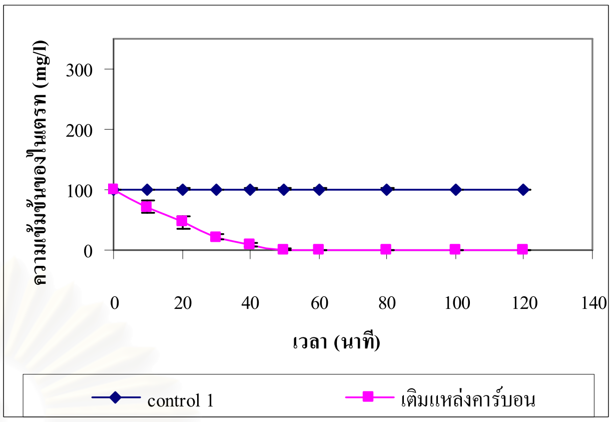
พารามิเตอร์	น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	น้ำเสียกระบวนการไบโอดีเซล	หน่วย
pH	4.59	5.55	-
Temperature	26.6	25.8	^{o}C
ลักษณะ	ไม่มีสี, ขุ่นเล็กน้อย	ขาวขุ่นมีตะกอนลอย	-
COD	3200	28,800	mg/l
TKN	21.0	206	mg/l
TOC	1,039	5,782	mg/l
Alkalinity	188	572	mg/l as $CaCO_3$
C/N ratio	49.48	28.07	g C/ g N
Nitrate	0.0	0.0	mg/l
Nitrite	10.0	0.0	mg/l
Fluoride	0.0	8.0	mg/l
Phosphate	11.25	0.0	mg/l
Sulphate	8.0	13.0	mg/l
Chloride	16.25	4.75	mg/l
TS	1000	16600	mg/l
TSS	49.8	12131.73	mg/l
TDS	950.2	4468.27	mg/l
FS	200	800	mg/l
VS	800	10400	mg/l

และอิออนต่าง ๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต และซัลเฟต พบว่ามีค่า 0.0 0.0 8.0 0.0 13.0 และ 4.75 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่สูงมากนัก ปริมาณของแข็ง TS TSS TDS FS และ VS มีค่า 16,600 12,131.73 4,468.27 800 และ 10,400 mg/l ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงเนื่องจากในกระบวนการผลิตอาจเกิดกากของแข็งจากวัตถุดิบที่นำมาใช้ การนำไปใช้จึงควรแยกของแข็งออกเสียก่อนแล้วจึงนำส่วนที่เป็นน้ำที่ไม่มีกากของแข็งไปใช้ และการนำไปใช้จึงควรมีการบำบัดปริมาณของแข็งในขั้นตอนอื่น ๆ ด้วย จากค่า C/N ratio นั้นพบว่าเมื่อนำไปใช้ในการลดไนเตรทจริง ๆ นั้น เราต้องมีการเติมไนโตรเจนลงไปเพื่อที่เราจะทำการลดไนโตรเจนดังกล่าว ทำให้ C/N ratio นั้น ยิ่งมีค่าต่ำลง เนื่องจากไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการทดลองเราเติมไนโตรเจนในสัดส่วนที่เท่ากันทำให้ C/N ratio ลดลงในอัตราส่วนที่เท่ากัน ทำให้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องยังมีค่า C/N ratio สูงกว่าน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเช่นเดิม จึงไม่มีผลต่อการทดลอง

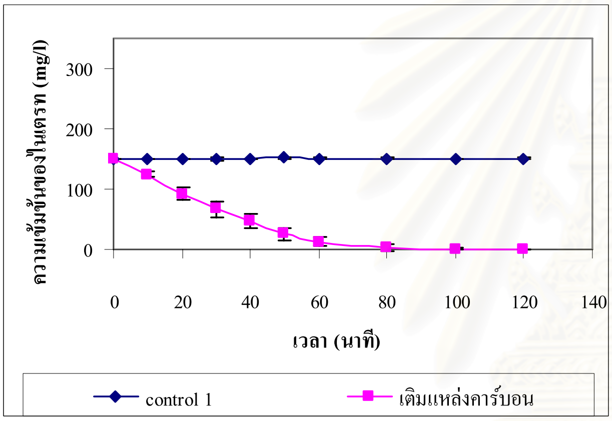
4.3.2 ผลการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน



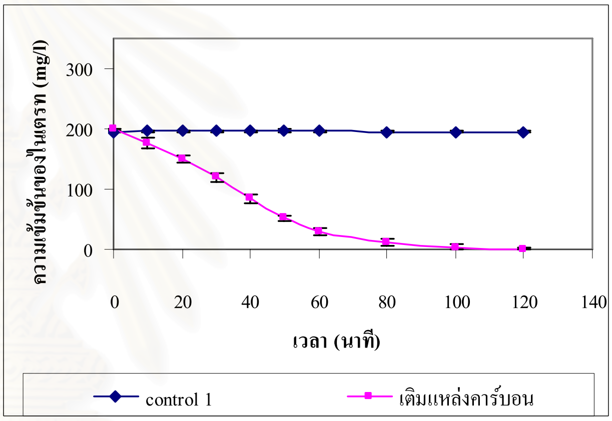
a.



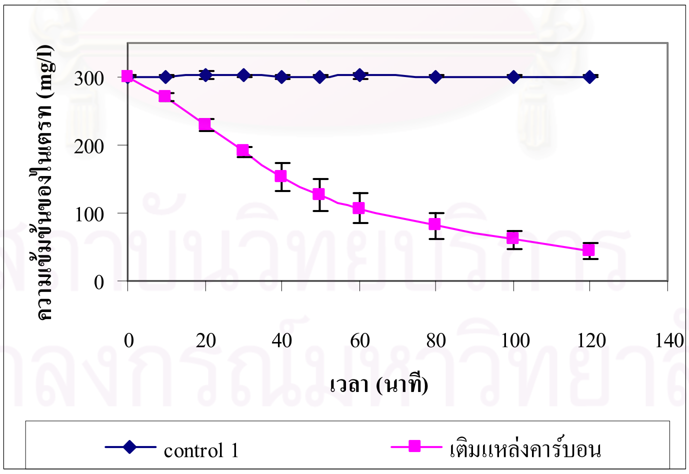
b.



c.



d.



e.

รูปที่ 4.5 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

จากการทดลองใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียนั้น พบว่าโซเดียมอะซิเตทสามารถเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี โดยโซเดียมอะซิเตทที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีค่า C/N ratio เท่ากับ 3.43 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และปริมาณจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ใช้ประมาณ 2000 mg/l เท่ากันทุกการทดลอง และควบคุมค่าซีโอดีให้อยู่ที่ประมาณ 150 mg/l ที่ความเข้มข้นไนเตรทต่าง ๆ

จากรูป 4.5-a. พบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l เชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่มีโซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน สามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l ภายในเวลา 50 นาที และมีการทดลองชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอนคือโซเดียมอะซิเตท พบว่า ไนเตรทไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ มีค่าประมาณเท่าเดิมตลอดการทดลอง ดังนั้นเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก โดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 1 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.5-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน สามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l เช่นเดียวกัน แต่ภายในเวลาประมาณ 50 นาที และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทเช่นกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรกโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 1.98 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.5-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน สามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l เช่นเดียวกัน ภายในเวลาประมาณ 80-100 นาที และการทดลองชุดคบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทเช่นกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 2.5 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.5-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 1.40 mg/l ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่น้อยมาก และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม

จากรูป 4.5-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน สามารกำจัดไนเตรท ได้แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาทีมีความเข้มข้นประมาณ 43.25 mg/l และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนค่าไนเตรทเช่นเดิม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 85.65% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรกโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้งคิดเป็น 3.49 mg/l ต่อนาที

จากการทดลองโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่า ที่ปริมาณไนเตรทเริ่มต้นสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการกำจัดไนเตรทให้หมดไปมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทสูงมากขึ้น แต่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และโซเดียมอะซิเตทหรือแหล่งคาร์บอนที่เติมลงไปนั้นยังมีค่าเท่าเดิม ทำให้ค่า C/N ratio ลดลง จึงมีคาร์บอนไม่พอที่ใช้ในการ

กำจัดไนเตรท แต่ถ้าดูอัตราการลดไนเตรทต่อนาทีในช่วง 50 นาทีแรกที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่ายิ่งความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้น อัตราการลดไนเตรท/นาที จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไนเตรทเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยไนเตรทเป็นสารอาหารหลักสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเนื่องจากแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย ไนเตรทจึงมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดและอัตราเร็วของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงและการกำจัดไนเตรท โดยจะเกิดขึ้นได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดถ้าไนเตรทมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูงเกินพอ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย

พารามิเตอร์		ไนเตรทเริ่มต้น (mg/l)				
		50	100	150	200	300
ไนเตรท (mg/l)	เริ่ม	50.55	100.66	150.42	200.52	301.41
	หลัง	0	0	0	1.40	43.25
	ลดได้	50.55	100.66	150.42	199.12	258.16
	%ลดไนเตรท	100 %	100 %	100 %	99.30 %	86.65 %
ซีโอดี (mg/l)	เริ่ม	135	145.11	157	147.56	129.33
	หลัง	79.57	80.44	80.33	86.23	80.22
	ลดได้	55.43	64.67	76.67	61.33	49.11
	%ลดซีโอดี	41.06 %	44.57 %	48.83 %	41.56 %	37.97 %
pH	เริ่ม	7.75	7.73	7.84	7.69	7.73
	หลัง	8.38	9.18	9.43	9.47	9.53
NUR (mg NO_3^-N/hr.)		64.12	114.4	93.54	110.57	129.09
SNUR (mg NO_3^-N/g MLVSS-hr.)		31.82	55.95	45.48	53.52	63.15
MLSS (mg/l)		2441	2417	2301	2409	2504
MLVSS (mg/l)		2011	2057	2069	2072	2076
อุณหภูมิ (^oC)		30.4	30.4	34.0	30.4	30.4
pH Bacteria		7.5	7.5	7.5	7.54	7.56
pH Media		8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
ORP (mV)		-309	-286	-305	-313	-307

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง สรุปได้ดังตาราง โดยทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l จะปรับ pH จุลินทรีย์ก่อนทำการทดลองที่ 7.5 และ pH media ที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปรับ pH ให้อยู่ที่ 8.4 และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ประมาณ 2000 mg/l ให้เท่ากันทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยที่ไนเตรทเริ่มต้น 50.55 mg/l ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถลดไนเตรทได้จนหมดคิดเป็น 100% ส่วนซีโอดีสามารถกำจัดได้ 41.06 % เมื่อคิดค่า nitrate uptake rate (NUR) คิดเป็น 64.12 mg NO_3^{-}N/hr. และ specific nirate uptake rate (SNUR) คิดเป็น 31.82 mg NO_3^{-}N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.75 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 8.35 แสดงว่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปตามทฤษฎีของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เมื่อเปลี่ยนจากไนเตรทเป็นไนโตรเจนก๊าซจะมีการผลิตด่างขึ้นและค่า ORP มีค่าประมาณ -300 mV ซึ่งมีค่าต่ำเนื่องจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็น anaerobic process

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 100.66 mg/l สามารถลดไนเตรทได้หมดเช่นเดียวกัน คิดเป็น 100% ซีโอดีสามาระกำจัดได้ 44.57 % ค่า NUR เท่ากับ 114.4 mg NO_3^{-}N/hr. และ SNUR มีค่า 55.95 mg NO_3^{-}N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.73 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.18 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 150.42 mg/l สามารถลดไนเตรทได้หมดเช่นเดียวกัน คิดเป็น 100% ซีโอดีกำจัดได้ 48.83 % ค่า NUR เท่ากับ 93.54 mg NO_3^{-}N/hr. และ SNUR มีค่า 45.48 mg NO_3^{-}N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.84 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 8.35

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 200.52 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 199.12 mg/l คิดเป็น 99.30% ซีโอดีกำจัดได้ 41.56 % ค่า NUR เท่ากับ 110.57 mg NO_3^{-}N/hr. และ SNUR มีค่า 53.52 mg NO_3^{-}N/ g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.69 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.47

และที่ไนเตรทเริ่มต้น 301.41 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 258.16 mg/l คิดเป็น 86.65% ซีโอดีกำจัดได้ 37.97 % ค่า NUR เท่ากับ 129.09 mg NO_3^{-}N/hr. และ SNUR มีค่า 63.15 mg NO_3^{-}N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลอง 7.73 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.53

จากค่า nitrate uptake rate (NUR) และ specific nirate uptake rate (SNUR) นั้น ค่า NUR คืออัตราการจับใช้ไนเตรท และ SNUR คืออัตราการใช้ไนเตรทเทียบกับมวลจุลินทรีย์และเวลา และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนจากน้ำเสียดิบในรูปที่ 2.3 ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันคือประมาณ 30 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่า SNUR เป็น 10 mg NO_3^{-}N/g MLVSS-hr. พบว่าจากการทดลองโดยใช้โซเดียมอะซิเตท มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากคาร์บอนจากน้ำเสียดิบ และพบว่าที่ไนเตรทเริ่มต้น 301.41 mg/l มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทน้อยที่สุด คือไม่สามารถกำจัดไนเตรทที่ความเข้มข้นสูงได้หมด แต่ถ้าคิดเป็นค่า SNUR แล้วมีค่ามากที่สุด อาจเนื่องมาจากปริมาณไนเตรทที่กำจัดมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบ

กับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เท่ากัน นั่นแสดงว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทสูง ๆ ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียยังมีประสิทธิภาพสูงพอในการกำจัดไนเตรท จากการทดลองถ้าต้องการกำจัดไนเตรทที่ความเข้มข้นสูงให้หมดนั้น อาจต้องมีการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้เพิ่มขึ้น หรืออาจเพิ่มปริมาณแหล่งคาร์บอนมากขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และแหล่งคาร์บอนเป็นปัจจัยหนึ่งในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน คือสำหรับปริมาณของแหล่งคาร์บอนจะมีผลต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน โดยถ้าสภาวะเหมาะสมและมีปริมาณคาร์บอนอย่างไม่จำกัดเชื้อดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเจริญอย่างเต็มที่ อัตราเร็วของการเกิดดีไนตริฟิเคชันจะมีค่าคงที่สูงสุด แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนมีจำกัดหรือไม่เพียงพอแบคทีเรียจะย่อยสลายตัวเองเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้อัตราเร็วของการเกิดดีไนตริฟิเคชันลดต่ำลง

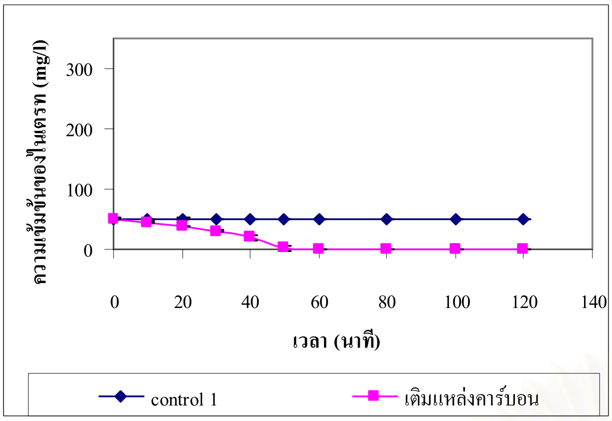
4.3.3 ผลการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายองแบคทีเรียนั้น พบว่าน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องสามารถเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีเช่นเดียวกับโซเดียมอะซิเตท โดยน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีค่า C/N ratio เท่ากับ 49.48 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และปริมาณจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ใช้ประมาณ 2000 mg/l เท่ากันทุกการทดลอง และควบคุมค่าซีโอดีให้อยู่ที่ประมาณ 150 mg/l ที่ความเข้มข้นไนเตรทต่าง ๆ เช่นเดียวกัน

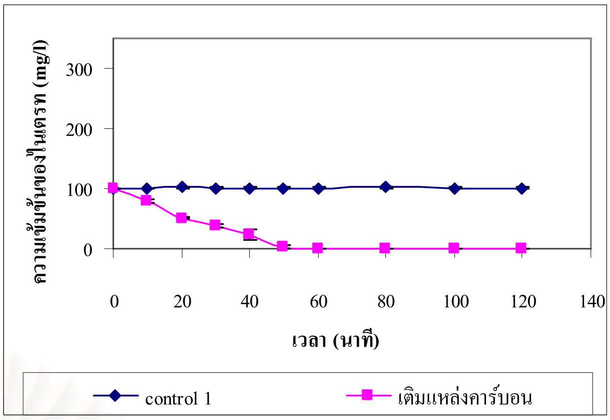
จากรูป 4.6-a. พบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l เชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่มีน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน สามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l ภายในเวลา 50-60 นาที และมีการทดลองชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอนคือน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง พบว่า ไนเตรทไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ มีค่าประมาณเท่าเดิมตลอดการทดลอง ดังนั้นเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก โดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 0.97 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.6-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน สามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l เช่นเดียวกัน แต่ภายในเวลาประมาณ 50-60 นาที และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทเช่นกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาทีในช่วง 50 นาทีแรกโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 1.93 mg/l ต่อนาที

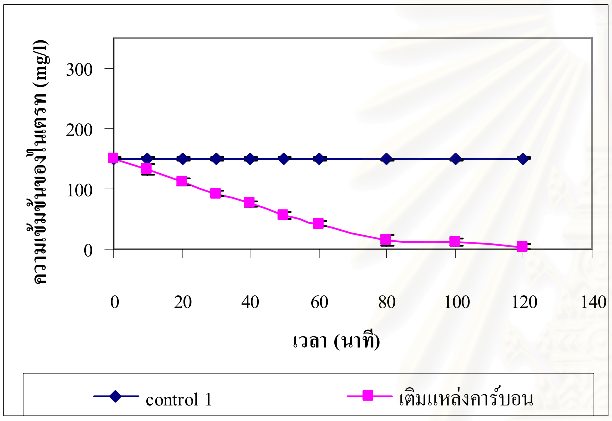
จากรูป 4.6-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 4.21 mg/l ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่น้อยมาก และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 97.21% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 1.88 mg/l ต่อนาที



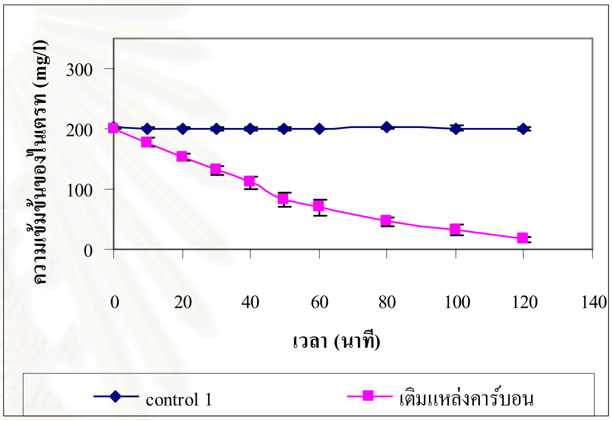
a.



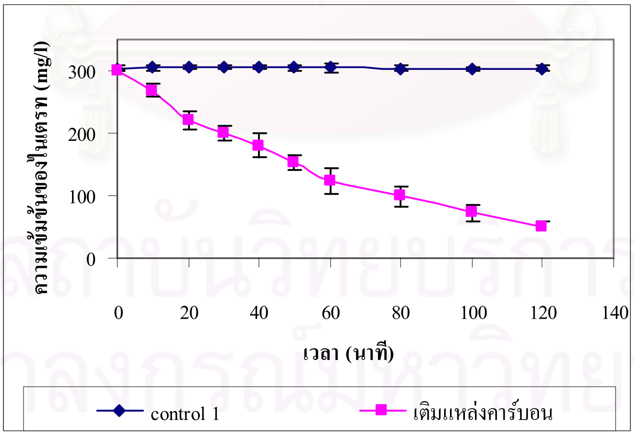
b.



c.



d.



e.

รูปที่ 4.6 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

จากรูป 4.6-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 16.5 mg/l และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 91.8% และอัตราการลดไนเตรท/นาทีในช่วง 50 นาทีแรกโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 2.36 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.6-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 50.79 mg/l และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 83.14% และอัตราการลดไนเตรท/นาทีในช่วง 50 นาทีแรกโดยเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง คิดเป็น 2.97 mg/l ต่อนาที

จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่า ที่ปริมาณไนเตรทเริ่มต้นสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการกำจัดไนเตรทให้หมดไปภายในมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทสูงมากขึ้นแต่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องหรือแหล่งคาร์บอนที่เติมลงไปนั้นยังมีค่าเท่าเดิม แต่ถ้าดูอัตราการลดไนเตรทต่อนาทีในช่วง 50 นาทีแรกที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่ายิ่งความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้น อัตราการลดไนเตรท/นาที จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไนเตรทเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยไนเตรทเป็นสารอาหารหลักสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย ไนเตรทจึงมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดและอัตราเร็วของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงและการกำจัดไนเตรท โดยจะเกิดขึ้นได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดถ้าไนเตรทมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูงเกินพอ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับโซเดียมอะซิเตท แต่น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าโซเดียมอะซิเตททั้งประสิทธิภาพการกำจัด และอัตราการลดไนเตรท/นาที

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง สรุปได้ดังตาราง โดยทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l จะปรับ pH จุลินทรีย์ก่อนทำการทดลองที่ 7.5 และ pH media ที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปรับ pH ให้อยู่ที่ 8.4 และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ประมาณ 2000 mg/l ให้เท่ากันทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยที่ไนเตรทเริ่มต้น 51.24 mg/l ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถลดไนเตรทได้จนหมดคิดเป็น 100% ส่วนซีโอดีสามารถกำจัดได้ 24.74 % เมื่อคิดค่า nitrate uptake rate (NUR) คิดเป็น 53.27 mg NO_3^-N/hr. และ spedific nirate uptake rate (SNUR) คิดเป็น 25.85 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.83 หลังการทดลองที่

เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.15 แสดงว่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปตามทฤษฎีของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ที่เมื่อเปลี่ยนจากไนเตรทเป็นไนโตรเจนก๊าซจะมีการผลิตด่างขึ้นและค่า ORP มีค่าประมาณ -300 mV

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย

พารามิเตอร์		**ไนเตรทเริ่มต้น (mg/l)**				
		50	**100**	**150**	**200**	**300**
ไนเตรท (mg/l)	**เริ่ม**	51.24	100.62	150.84	201.17	301.34
	หลัง	0	0	4.21	16.5	50.79
	ลดได้	51.24	100.62	146.63	184.67	250.55
	%ลดไนเตรท	100 %	100 %	97.21%	91.8 %	83.14 %
ซีโอดี (mg/l)	**เริ่ม**	151.33	140	142.67	147.22	151.11
	หลัง	113.89	109.67	132.56	118	138.33
	ลดได้	37.44	30.33	10.11	29.22	12.78
	%ลดซีโอดี	24.74 %	21.66 %	7.09 %	19.85 %	8.46 %
pH	**เริ่ม**	7.83	7.79	7.65	7.74	7.72
	หลัง	9.15	9.09	9.41	9.45	9.54
NUR (mg NO_3^-N/hr.)		53.27	105.20	74.97	92.34	125.28
SNUR (mg NO_3^-N/g MLVSS-hr.)		25.85	51.52	36.61	44.11	60.64
MLSS (mg/l)		2421	2439	2445	2443	2454
MLVSS (mg/l)		2072	2056	2073	2098	2074
อุณหภูมิ (^oC)		30.5	30.1	30.3	30.2	30.3
pH Bacteria		7.56	7.52	7.52	7.52	7.57
pH Media		8.4	8.4	8.41	8.4	8.4
ORP (mV)		-300	-290	-309	-308	-310

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 100.62 mg/l สามารถลดไนเตรทได้หมดเช่นเดียวกัน คิดเป็น 100% ซีโอดีสามารถกำจัดได้ 21.66 % ค่า NUR เท่ากับ 105.20 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 51.52 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.79 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.09 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 150.84 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 146.63 mg/l คิดเป็น 97.21% ซีโอดีกำจัดได้ 7.09 % ค่า NUR เท่ากับ 74.97 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 36.61 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.65 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.41

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 201.17 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 184.67 mg/l คิดเป็น 91.8% ซีโอดีกำจัดได้ 19.85 % ค่า NUR เท่ากับ 92.34 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 44.11 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.74 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.45

และที่ไนเตรทเริ่มต้น 301.34 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 250.55 mg/l คิดเป็น 83.14% ซีโอดีกำจัดได้ 8.46 % ค่า NUR เท่ากับ 125.28 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 60.64 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลอง 7.72 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.54

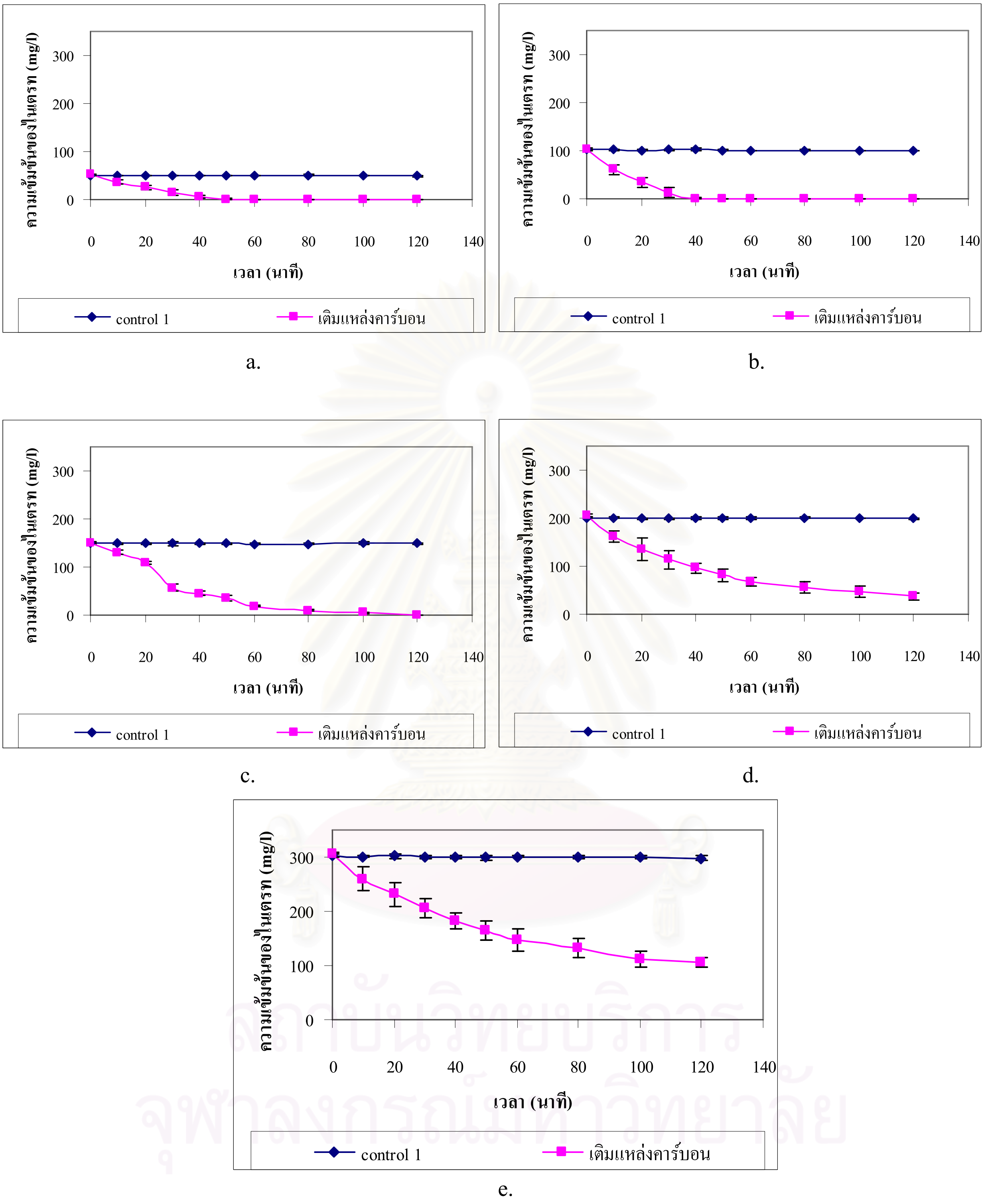
เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนจากน้ำเสียดิบในรูปที่ 2.3 ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันคือประมาณ 30 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่า SNUR เป็น 10 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. พบว่าจากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากคาร์บอนจากน้ำเสียดิบ

4.3.4 ผลการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

จากการทดลองใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียนั้น พบว่าน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลสามารถเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีเช่นเดียวกับโซเดียมอะซิเตท โดยน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีค่า C/N ratio เท่ากับ 28.07 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และปริมาณจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ใช้ประมาณ 2000 mg/l เท่ากันทุกการทดลอง และควบคุมค่าซีโอดีให้อยู่ที่ประมาณ 150 mg/l ที่ความเข้มข้นไนเตรทต่าง ๆ เช่นเดียวกัน

จากรูป 4.7-a. พบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l เชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่มีน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l ภายในเวลา 50 นาที และมีการทดลองชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอนคือน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล พบว่า ไนเตรทไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ มีค่าประมาณเท่าเดิมตลอดการทดลอง ดังนั้นเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 0.99 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.7-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l เช่นเดียวกัน แต่ภายในเวลาประมาณ 50 นาที และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทเช่นกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 2 mg/l ต่อนาที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.7 แสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

จากรูป 4.7-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทเหลือ 0 mg/l เช่นเดียวกัน แต่ภายในเวลาประมาณ 120 นาที และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท คิดเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 2.33 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.7-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 37.28 mg/l และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท คิดเป็น 81.78% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 2.38 mg/l ต่อนาที

จากรูป 4.7-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถกำจัดไนเตรทได้ แต่ไนเตรทที่เวลา 120 นาที ยังคงมีความเข้มข้นประมาณ 105.05 mg/l และการทดลองชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรท เช่นเดิม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท คิดเป็น 65.52% และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรก คิดเป็น 2.8 mg/l ต่อนาที

จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่า ที่ปริมาณไนเตรทเริ่มต้นสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการกำจัดไนเตรทให้หมดไปภายในมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทสูงมากขึ้นแต่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลหรือแหล่งคาร์บอนที่เติมลงไปนั้นยังมีค่าเท่าเดิม แต่ถ้าดูอัตราการลดไนเตรทต่อนาทีในช่วง 50 นาทีแรกที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่ายิ่งความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้น อัตราการลดไนเตรท/นาที จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไนเตรทเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยไนเตรทเป็นสารอาหารหลักสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้าย ไนเตรทจึงมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดและอัตราเร็วของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงและการกำจัดไนเตรท โดยจะเกิดขึ้นได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดถ้าไนเตรทมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูงเกินพอ ซึ่งการเพิ่มอัตราบรรทุกไนเตรทได้มาก ก็จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น เพราะหมายถึง สามารถกำจัดได้เร็วขึ้น หรือใช้ปริมาตรถังปฏิกรณ์น้อยลง แต่ในขณะเดียวกัน ก็อาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงได้ ซึ่งผลการทดลองของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดเป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรท/นาทีค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลอาจจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่ทั้ง 2 ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรท/นาทีน้อยกว่าโซเดียมอะซิเตท และปริมาณคาร์บอนนั้นมีผลต่อ

อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเช่นกันโดยเมื่อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ในสภาวะที่เหมาะสมและมีปริมาณคาร์บอนไม่จำกัด อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะมีค่าคงที่สูงสุด แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนมีจำกัดหรือไม่เพียงพอ แบคทีเรียจะย่อยสลายตัวเองเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันลดลง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ย

พารามิเตอร์		ไนเตรทเริ่มต้น (mg/l)				
		50	100	150	200	300
ไนเตรท (mg/l)	เริ่ม	51.69	102.65	151.07	204.67	304.69
	หลัง	0	0	0	37.28	105.05
	ลดได้	51.69	102.65	151.07	167.39	199.64
	%ลดไนเตรท	100 %	100 %	100 %	81.78 %	65.52 %
ซีโอดี (mg/l)	เริ่ม	165.22	162.22	160.44	159	158
	หลัง	147.44	149.78	150.67	152.78	146.89
	ลดได้	17.78	12.44	9.77	6.22	11.11
	%ลดซีโอดี	10.76 %	7.67 %	6.09 %	3.91 %	7.03 %
pH	เริ่ม	7.81	7.33	7.94	7.82	7.9
	หลัง	9.32	9.00	9.44	9.4	9.39
NUR (mg NO_3^-N/hr.)		61.68	145.78	75.57	83.46	105.19
SNUR (mg NO_3^-N/g MLVSS-hr.)		30.59	71.21	37.25	41.56	54.89
MLSS (mg/l)		2359	2401	2416	2416	2433
MLVSS (mg/l)		2025	2040	2024	2015	2029
อุณหภูมิ (^{o}C)		30.2	30.2	30.0	30.3	30.0
pH Bacteria		7.49	7.49	7.5	7.47	7.5
pH Media		8.38	8.39	8.41	8.42	8.4
ORP (mV)		-303	-283	-299	-299	-301

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนโดยเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง สรุปได้ดังตาราง โดยทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l จะปรับ pH จุลินทรีย์ก่อนทำการทดลองที่ 7.5 และ pH media ที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปรับ pH ให้อยู่ที่ 8.4 และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่ประมาณ 2000 mg/l ให้

เท่ากันทุกความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยที่ไนเตรทเริ่มต้น 51.69 mg/l ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถลดไนเตรทได้จนหมดคิดเป็น 100% ส่วนซีโอดีสามารถกำจัดได้ 10.76 % เมื่อคิดค่า nitrate uptake rate (NUR) คิดเป็น 61.68 mg NO_3^-N/hr. และ spedific nirate uptake rate (SNUR) คิดเป็น 30.59 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.81 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.32 แสดงว่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปตามทฤษฎีของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เมื่อเปลี่ยนจากไนเตรทเป็นไนโตรเจนก๊าซจะมีการผลิตด่างขึ้นและค่า ORP มีค่าประมาณ -300 mV

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 102.65 mg/l สามารถลดไนเตรทได้หมดเช่นเดียวกัน คิดเป็น 100% ซีโอดีสามาระกำจัดได้ 7.67 % ค่า NUR เท่ากับ 145.78 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 71.21 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.33 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.00

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 151.07 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้หมดเช่นเดียวกัน คิดเป็น 100% ซีโอดีกำจัดได้ 6.09 % ค่า NUR เท่ากับ 75.57 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 37.25 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.94 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.44

ที่ไนเตรทเริ่มต้น 204.67 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 167.39 mg/l คิดเป็น 81.78% ซีโอดีกำจัดได้ 3.91 % ค่า NUR เท่ากับ 83.46 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 41.56 mgNO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลองมีค่า 7.82 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.4

และที่ไนเตรทเริ่มต้น 304.69 mg/l ที่เวลา 120 นาที สามารถลดไนเตรทได้ 199.64 mg/l คิดเป็น 65.52% ซีโอดีกำจัดได้ 7.03 % ค่า NUR เท่ากับ 105.19 mg NO_3^-N/hr. และ SNUR มีค่า 54.89 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. pH เริ่มการทดลอง 7.9 หลังการทดลองที่เวลา 120 นาที pH มีค่า 9.39 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนจากน้ำเสียดิบในรูปที่ 2.3 ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันคือประมาณ 30 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่า SNUR เป็น 10 mg NO_3^-N/g MLVSS-hr. พบว่าจากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากคาร์บอนจากน้ำเสียดิบ

โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดจากการทดลองมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียมีความไวต่ออุณหภูมิ และแม้ว่าจะโตได้ดีในช่วง 5-25 องศาเซลเซียส แต่ก็ทำงานได้ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิเท่ากับหรือมากกว่า 20 องศาเซลเซียส ซึ่งปัญหานี้จะมีน้อยสำหรับภูมิอากาศแบบประเทศไทย เพราะอุณหภูมิน้ำลดต่ำลงถึงเพียง 21 องศาเซลเซียส และอัตราสูงสุดของดีไนตริฟิเคชันขึ้นกับอุณหภูมิ (ธงชัย, 2544)

ค่าซีโอดี จากการทดลองโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่า โซเดียมอะซิเตทสามารถลดซีโอดีได้มากกว่าน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องลดได้มากกว่าน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล อาจเนื่องจากโซเดียมอะซิเตทนั้นสามารถถูกนำไปใช้ได้ง่ายกว่า ซึ่งซีโอดีจากการทดลองโดยแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดยังมีเหลืออยู่ในปริมาณที่สูงจึงต้องนำไปบำบัดต่อ การนำไปใช้จริงจึงควรคำนวณให้ใส่ค่าซีโอดีให้มีความพอเหมาะต่อการบำบัด

และค่า ORP เฉลี่ยของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดจากการทดลองมีค่าประมาณ -300 มิลลิโวลท์ การวัดค่า ORP เนื่องจากเรารู้ว่าออกซิเจนอิสระมีผลต่อดีไนตริฟิเคชัน กล่าวคือ ค่าดีโอที่เริ่มยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเท่ากับประมาณ 0.2 mg/l เราจึงควรทำให้กระบวนการมีค่าดีโอมีค่าต่ำที่สุด แต่มาตรดีโอที่มีจำหน่ายและใช้งานในเชิงปฏิบัติในปัจจุบันมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถวัดดีโอที่ความเข้มข้นต่ำมาก ๆ ได้ จึงมีงานวิจัยที่หาความสัมพันธ์ระหว่างดีโอและ ORP พบว่าเป็นเส้นตรงที่ดี ดังนั้นการใช้ ORP เป็นตัวกำหนดหรือควบคุมดีไนตริฟิเคชันแทนค่าดีโอจึงน่าจะเป็นทางเลือกที่วิศวกรควรให้ความสนใจ ซึ่งวิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ใช้เทคนิค ORP นี้ไปควบคุมระบบกำจัดไนโตรเจนแบบเวลาจริง (real-time) ในโรงบำบัดน้ำเสีย พบว่าเมื่อปรับหรือแก้ไขข้อมูลการควบคุมรวมทั้งปรับแต่งจนได้ที่แล้ว เทคนิคนี้ใช้งานได้ดีและเป็นประโยชน์มาก (ธงชัย, 2544)

4.3.5 การเปลี่ยนแปลงไนเตรทและอิออนต่าง ๆ โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

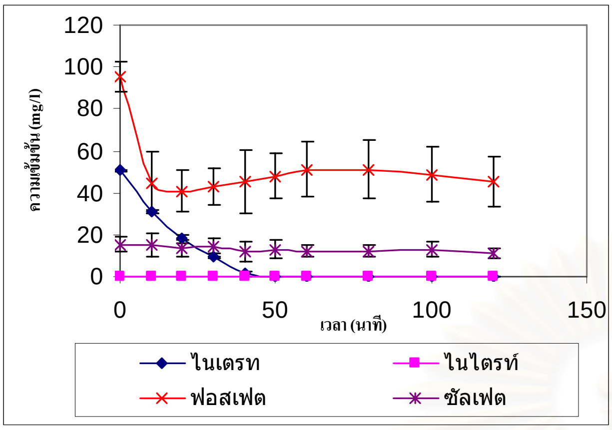
จากรูป 4.8-a. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ ฟอสเฟต ซัลเฟต โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 100 mg/l และมีค่าลดลงตั้งแต่นาทีที่ 10 เป็นต้นไปจนเหลือประมาณ 50 mg/l เนื่องจากอาจถูกใช้ไปในระหว่างกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่ได้ใช้ซัลเฟอร์มากนักในเมทาบอลิซึม การเปลี่ยนแปลงจึงไม่ลดลง

จากรูป 4.8-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาทีเช่นเดียวกัน ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 100 mg/l และมีค่าลดลงตั้งแต่นาทีที่ 10 เป็นต้นไปจนเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l

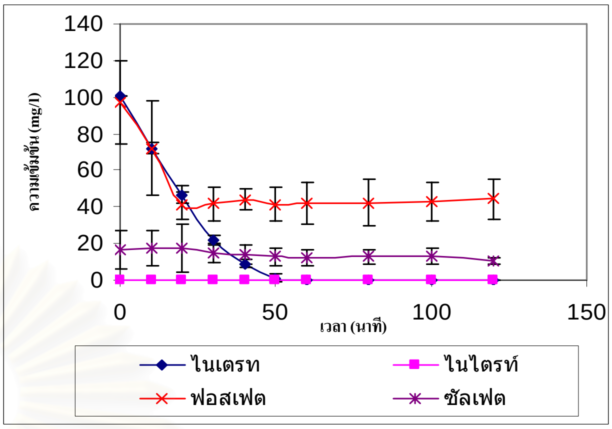
จากรูป 4.8-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 100 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 90 mg/l และมีค่าลดลงเหลือประมาณ 50 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เช่นเดียวกัน

จากรูป 4.8-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 120 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 100 mg/l และมีค่าลดลงเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 10 mg/l และรูปที่ 4.8-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงแต่ภายในเวลา 120 นาทียังคงมีไนเตรทเหลืออยู่ ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ

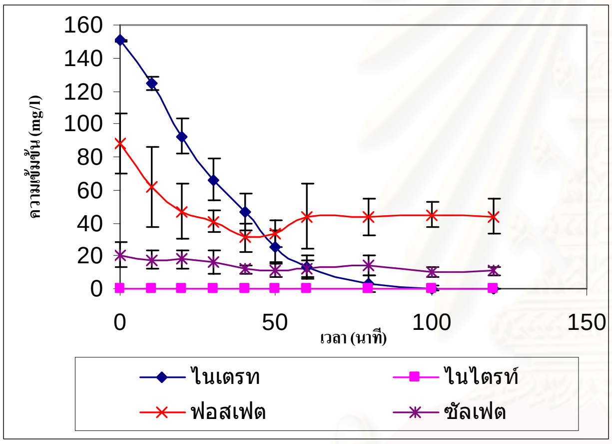
เกือบ 90 mg/l และมีค่าลดลงเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l



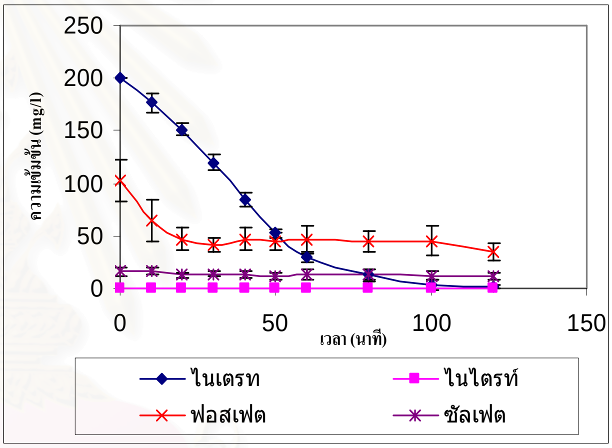
a.



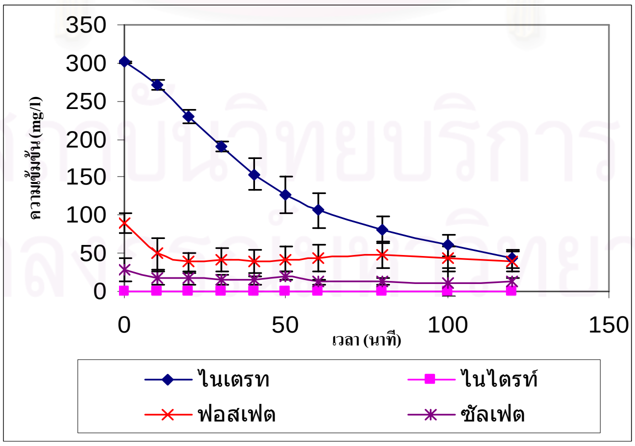
b.



c.



d.



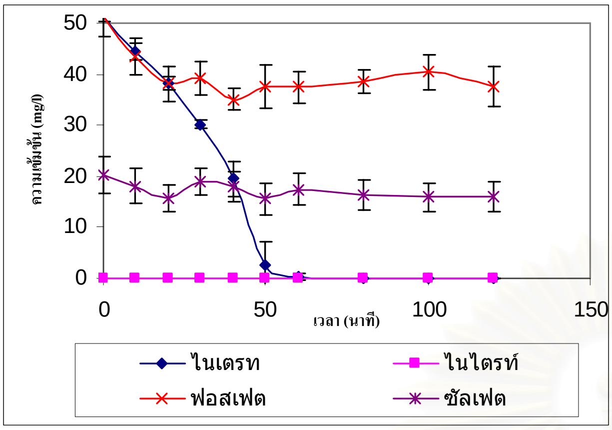
e.

รูปที่ 4.8 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน

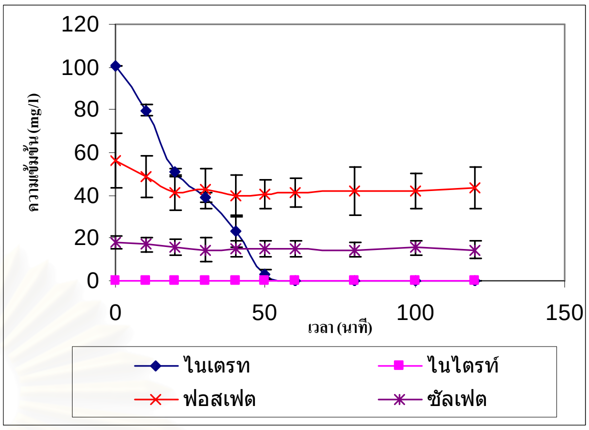
a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

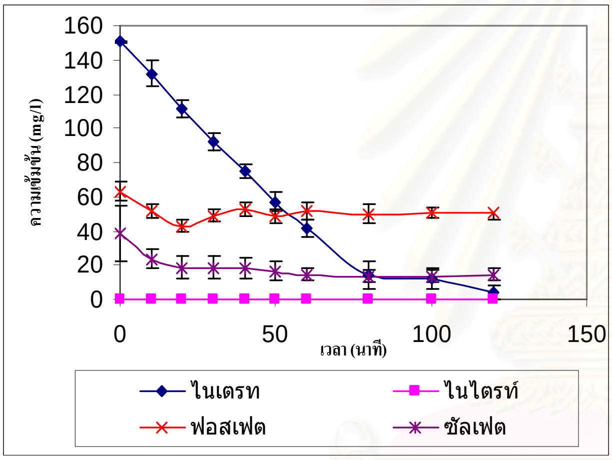
4.3.6 การเปลี่ยนแปลงไนเตรทและอิออนต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ



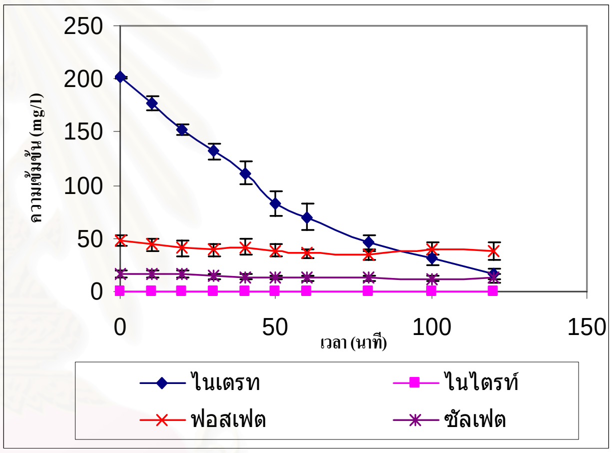
a.



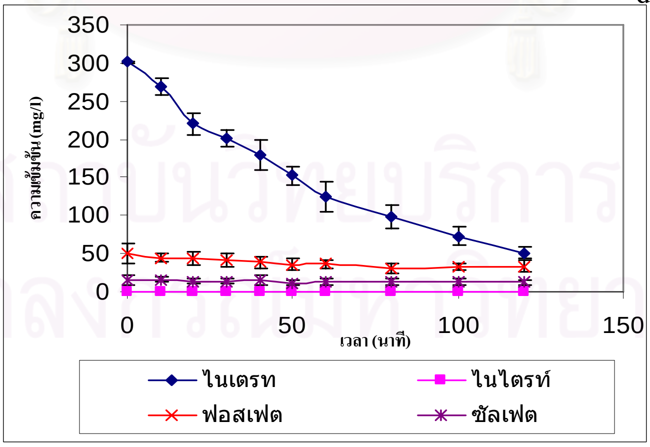
b.



c.



d.



e.

รูปที่ 4.9 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

จากรูป 4.9-a. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ คลอไรด์ ฟอสเฟต ซัลเฟต โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 70 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 50 mg/l และมีค่าลดลงจนเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่ได้ใช้ซัลเฟอร์มากนักในเมทาบอลิซึม การเปลี่ยนแปลงจึงไม่ลดลงเช่นเดียวกัน

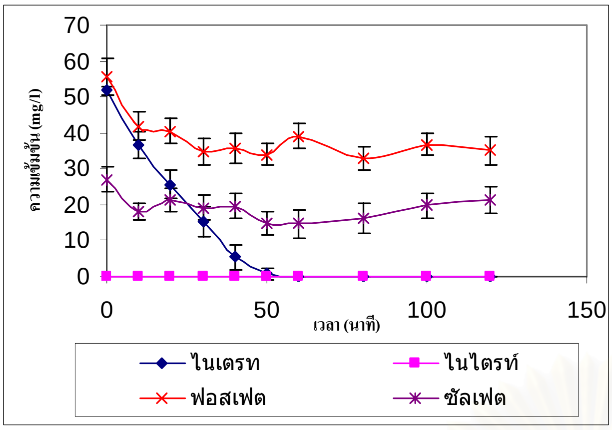
จากรูป 4.9-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาทีเช่นเดียวกัน ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 60 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 60 mg/l และมีค่าลดลงจนเหลือประมาณ 50 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l

จากรูป 4.9-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนเกือบหมดภายในเวลา 120 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์อยู่ที่ประมาณ 60 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณเกือบ 80 mg/l และมีค่าลดลงเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เช่นเดียวกัน

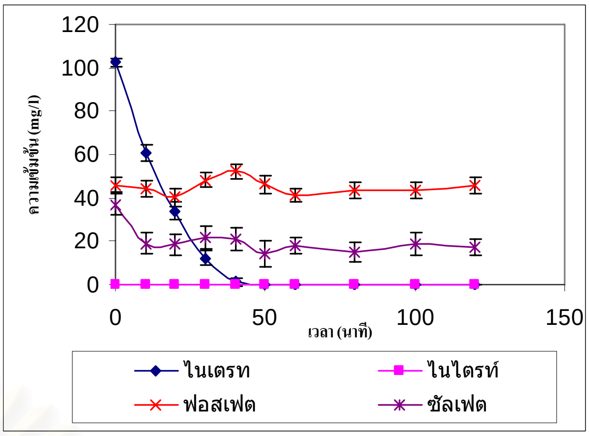
จากรูป 4.9-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงแต่ที่เวลา 120 นาที ยังคงมีไนเตรทเหลืออยู่ ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์อยู่ที่ประมาณ 15 mg/l ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 10 mg/l และรูปที่ 4.9-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงแต่ภายในเวลา 120 นาทียังคงมีไนเตรทเหลืออยู่ ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 70 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 50 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 15 mg/l

4.3.7 การเปลี่ยนแปลงไนเตรทและอิออนต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

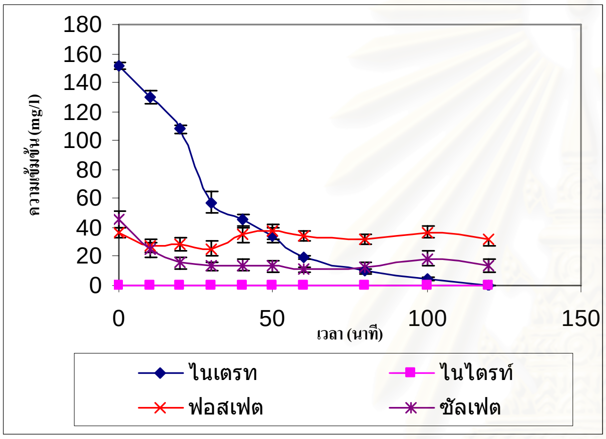
จากรูป 4.10-a. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ได้แก่ ไนเตรท ไนไตรท์ คลอไรด์ ฟอสเฟต ซัลเฟต โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ฟอสเฟตเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 60 mg/l และมีค่าลดลงจนเหลือประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่ได้ใช้ซัลเฟอร์



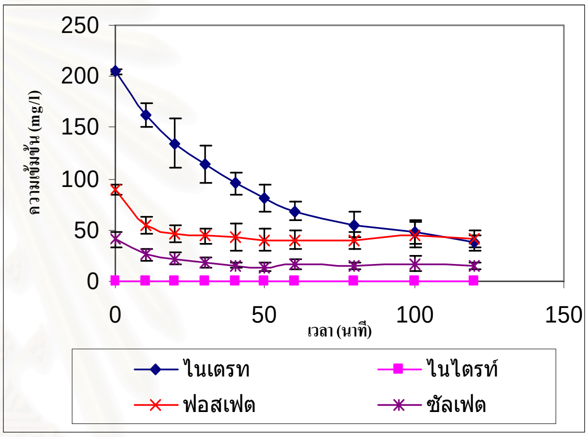
a.



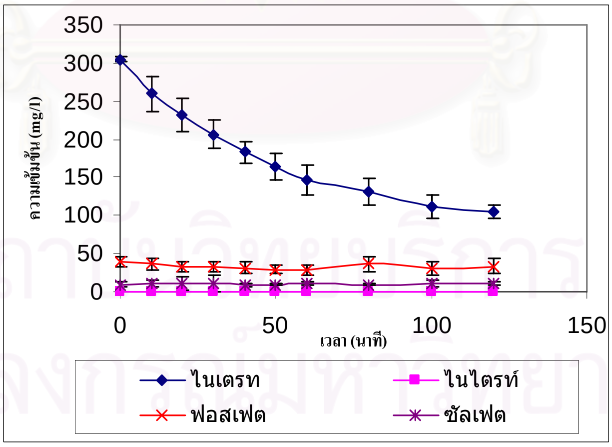
b.



c.



d.



e.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 แสดงการลดอิออนโดยเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

a – ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l　　b - ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l　　c - ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

d – ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l　　e - ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

มากนักในเมทาบอลิซึม การเปลี่ยนแปลงจึงไม่ลดลงเช่นเดียวกับการใช้โซเดียมอะซิเตทและน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

จากรูป 4.10-b. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนหมดภายในเวลา 50 นาทีเช่นเดียวกัน ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l ตลอดการทดลอง คลอไรด์อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ตลอดการทดลอง ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l

จากรูป 4.10-c. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงจนเกือบหมดภายในเวลา 120 นาที ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 80 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l เช่นเดียวกัน

จากรูป 4.10-d. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงแต่ที่เวลา 120 นาที ยังคงมีไนเตรทเหลืออยู่ ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 80 mg/l ซึ่งเริ่มลดลงจนคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 40 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 20 mg/l และรูปที่ 4.10-e. ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l จากรูปไนเตรทลดลงแต่ภายในเวลา 120 นาทียังคงมีไนเตรทเหลืออยู่ ไนไตรท์มีค่าเป็น 0 mg/l คลอไรด์อยู่ที่ประมาณ 20 mg/l ฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณ 30 mg/l ส่วนซัลเฟตนั้นตลอดช่วงการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 10 mg/l

จากการทดลองแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดนั้น พบว่าไนไตรท์ไม่เกิดขึ้นเลยเนื่องจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันนั้นถ้ามีการเติมแหล่งคาร์บอนจากภายนอกไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการสะสมไนไตรท์ขึ้น แต่จากการทดลองไม่มีไนไตรท์เกิดขึ้นแสดงว่าแหล่งคาร์บอนที่เติมให้กับดีไนตริฟายอิงนั้นมีค่าเพียงพอ ส่วนค่าฟอสเฟตที่สูงนั้นพบว่าจะลดลงจนคงที่จึงไม่ไปรบกวนปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันถึงแม้ว่าอาจมีเชื้อจุลินทรีย์อยู่หลายสปีชีส์ ส่วนซัลเฟตที่ไม่มีการลดลงหรือเปลี่ยนแปลงนั้นเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์มีความสามารถในการกำจัดไนเตรทมากกว่าที่กำจัดซัลเฟต แต่ถ้าเมื่อใดที่การกำจัดไนเตรทหมดลงจุลินทรีย์ก็จะเลือกที่จะกำจัดซัลเฟตเป็นชนิดต่อไป ระบบบำบัดน้ำเสียที่กำจัดซัลเฟตนั้นจึงมีการเติมแบคทีเรียที่กำจัดไนโตรเจนลงไปเพราะสามารถลดซัลเฟตได้นั่นเอง

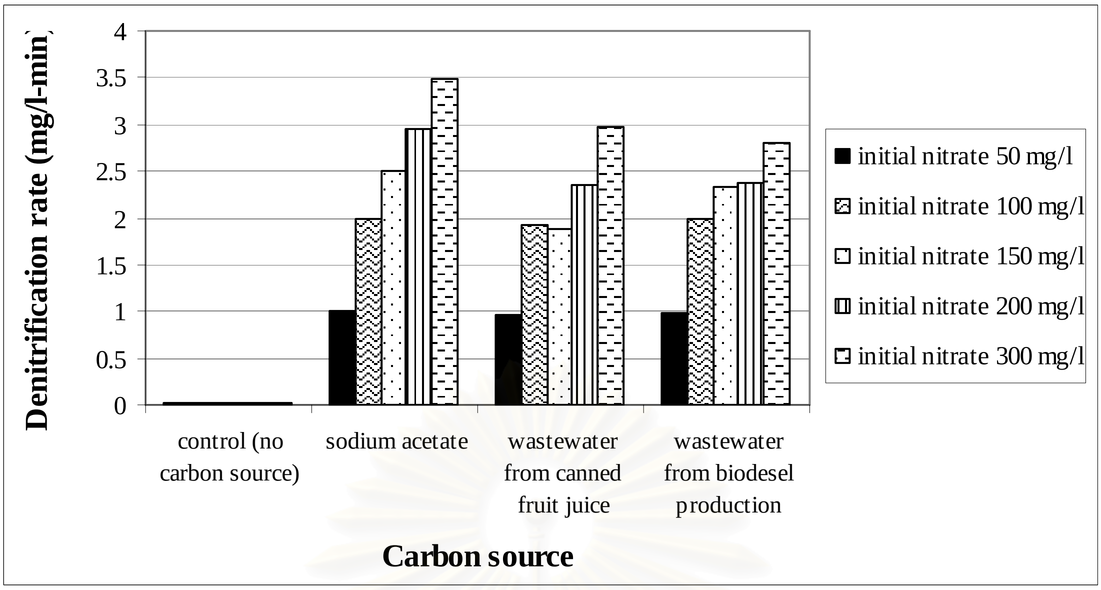
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรทจากโซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล

ไนเตรทเริ่มต้น (mg/l)	**ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท (%)**			**อัตราการลดไนเตรท/นาที (mg/l ต่อ นาที)**		
	โซเดียมอะซิเตท	**น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง**	**น้ำเสียโรงงานไบโอดีเซล**	**โซเดียมอะซิเตท**	**น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง**	**น้ำเสียโรงงานไบโอดีเซล**
50	100 %	100 %	100 %	1	0.97	0.99
100	100 %	100 %	100 %	2	1.93	2
150	100 %	97.21 %	100 %	2.5	1.88	2.33
200	99.3 %	91.8 %	81.78 %	2.96	2.36	2.38
300	85.65 %	83.14 %	65.52 %	3.49	2.97	2.8

จากตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรท/นาที จากแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทในช่วง 120 นาที เป็น 100% 100% 100% 99.3% และ 86.65% ตามลำดับ และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรกเป็น 1 2 2.5 2.96 และ3.49 ตามลำดับ น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง เป็นแหล่งคาร์บอน ที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเป็น 100% 100% 97.21% 91.8% และ 83.14% ตามลำดับ และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรกเป็น 0.97 1.93 1.88 2.36 และ 2.97 ตามลำดับ และการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเป็น 100% 100% 100% 81.78% และ 65.62% ตามลำดับ และอัตราการลดไนเตรท/นาที ในช่วง 50 นาทีแรกเป็น 0.99 2 2.33 2.38 และ 2.8 ตามลำดับ โดยการนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานที่ต้องการบำบัดไนเตรทนั้น ถ้าโรงงานมีไนเตรทในน้ำเสียมีค่าสูงมาก ก็ควรใช้ช่วงการบำบัดที่เวลา 50 นาที เพราะเป็นช่วงที่สามารถลดไนเตรทได้มากที่สุด แต่ถ้าโรงงานมีไนเตรทในน้ำเสียไม่สูงมากนักก็สามารถใช้ช่วงการบำบัดที่เวลา 120 นาที ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราการลดไนเตรทโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

โดยอัตราการลดไนเตรทนั้นเมื่อเปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดแล้ว โซเดียมอะซิเตทมีอัตราการลดไนเตรท และประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทได้มากที่สุด น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพรองลงมา และน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องมีสิทธิภาพน้อยที่สุด โดยน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องมีแหล่งน้ำตาลที่สามารถนำมาเป็นแหล่งคาร์บอนได้ ส่วนน้ำเสียไบโอดีเซลจาก วว. นั้น มีเมธานอลสูงจึงใช้เมธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน แต่ถ้าสังเกตช่วงไนเตรทเริ่มต้นที่เหมะสมแล้ว ที่ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l มีอัตราการลดไนเตรทสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณไนเตรทเริ่มต้นมีค่าสูงตามที่ได้กล่าวไปแล้ว จะทำให้อัตราการลดสูงตามไปด้วย แต่ถ้าสังเกตอัตราการลดไนเตรทของไนเตรทเริ่มต้น 50 และ 100 mg/l แล้ว แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดที่ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l มีอัตราการลดไนเตรทสูงกว่าที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ประมาณ 2 เท่า คือเพิ่มขึ้น 1mg/l ต่อนาที แต่จากไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l เป็น 150 200 และ 300 mg/l นั้น มีอัตราการลดไนเตรทเพิ่มขึ้นประมาณ 0.3-0.5 mg/l ต่อนาที เท่านั้นนั่นอาจแสดงว่า ยิ่งไนเตรทเริ่มต้นเพิ่มขึ้น อัตราการลดไนเตรทเพิ่มขึ้น จริงอยู่แล้วตามทฤษฎี แต่ก็เป็นไปในสัดส่วนที่ไม่ได้สูงมากนัก และยิ่งไนเตรทเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท ก็จะน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l จึงน่าจะเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเป็น 100% และอัตราการลดไนเตรท/นาที เพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สูง

นอกจากนี้การเลือกใช้ตัวให้อิเลคตรอนหรือแหล่งคาร์บอน มีข้อพิจารณาที่สำคัญ 3 ข้อ คือ หาได้ง่าย ให้อัตราการกำจัดสูง และราคาไม่สูง การเลือกใช้ตัวให้อิเลคตรอนที่มีราคาถูกจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดได้ ตัวให้อิเลคตรอนที่นิยมใช้ในการกำจัดไนเตรท คือ เมธานอล เนื่องจาก อัตราการกำจัดสูง ราคาปานกลาง และให้ยิลด์ต่ำซึ่งจะช่วยลดปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้

ก็ยังมีเอธานอล และกรดอะซิติก การใช้แหล่งคาร์บอนที่มีราคาถูกเป็นทางหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทางเลือกหนึ่งสำหรับตัวให้อิเลคตรอนคือ การใช้แหล่งคาร์บอนจำพวกน้ำตาลชนิดต่าง ๆ และสารอื่น ๆ ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และเกิดกระบวนการหมักได้ ซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก เช่น น้ำเสียจากชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น งานวิจัยเล่มนี้จึงทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นการนำของเสียมาใช้ประโยชน์และไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งมีความคุ้มค่าอย่างมาก

4.4 ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากการทดลอง

จากการทดลองการลดไนเตรทโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นแบบ mixed culture นั้น การศึกษาถึงอัตราการลดไนเตรทสูงสุดนั้นมีความสำคัญเนื่องจากสามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียว่าสามารถกำจัดไนเตรทได้อัตราสูงสุดที่ความเข้มข้นเท่าใด ดังนั้นการศึกษาถึงไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจึงมีความสำคัญ โดยการหาค่า V_{max} ซึ่งเป็นอัตราการลดไนเตรทสูงสุดโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นแบบ mixed culture และค่า k แสดงถึงความสามารถของเชื้อในการจับอาหาร จากการเขียนกราฟระหว่าง 1/S และ 1/U โดย S คือความเข้มข้นของไนเตรทที่เวลาต่าง ๆ และ U คือ อัตราการลดไนเตรทที่เวลาต่าง ๆ จากกราฟเราสามารถคำนวณค่า V_{max} ค่า k และค่า Yield ได้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า V_{max} และ k ที่ได้จากการทดลองโดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

ไนเตรทเริ่มต้น	โซเดียมอะซิเตท			น้ำเสียจากผลไม้กระป๋อง			น้ำเสียจากไบโอดีเซล		
	V_{max}	K	Y	V_{max}	K	Y	V_{max}	K	Y
50 mg/l	1.64	7.34	39.56	1.88	9.10	39.03	1.31	3.99	38.69
100 mg/l	2.70	13.76	19.87	2.17	12.87	19.88	4.77	19.84	19.48
150 mg/l	11.95	452.81	13.30	13.70	659.48	13.64	14.43	441.54	13.24
200 mg/l	8.53	149.16	10.04	9.47	831.10	10.83	1.63	212.90	11.95
300 mg/l	7.81	603.49	7.75	8.37	810.76	7.98	1.01	302.61	10.02

จากรูปที่ 4.78-4.80 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง 1/S และ 1/U สามารถหาค่า V_{max} ค่า k และค่า Yield ได้พบว่า แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดมีค่า V_{max} ค่า k และค่า Yield ที่แต่ละความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดยค่า V_{max} โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีค่า V_{max} เท่ากับ 1.64 2.70 11.95 8.53 และ 7.81 ตามลำดับ แสดงว่าอัตราการลดไนเตรทสูงสุด (V_{max}) นั้นมีค่าสูงขึ้นที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จนถึง

150 mg/l และเริ่มลดลงที่ไนเตรทเริ่มต้น 200 และ 300 mg/l ส่วนค่า k นั้นมีค่า 7.34 13.76 452.81 149.16 และ 630.49 ตามลำดับ มีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่า Yield มีค่า 39.56 19.87 13.30 10.04 7.75 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจนที่ถูกกำจัด

การใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีค่า V_{max} เท่ากับ 1.88 2.17 13.70 9.47 และ 8.37 mg/l ตามลำดับ แสดงว่าอัตราการลดไนเตรทสูงสุด (V_{max}) นั้นมีค่าสูงขึ้นที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จนถึง 300 mg/l สูงขึ้น ส่วนค่า k มีค่า 9.10 12.87 659.48 831.10 และ 810.76 ตามลำดับ พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามไนเตรทเริ่มต้นที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน และค่า Yield มีค่า 39.03 19.88 13.64 10.83 7.98 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจนที่ถูกกำจัด

และการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีค่า V_{max} เท่ากับ 1.31 4.77 14.43 1.63 และ 1.01 แสดงว่าอัตราการลดไนเตรทสูงสุด (V_{max}) นั้นมีค่าสูงขึ้นที่ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l จนถึง 150 mg/l และเริ่มลดลงที่ไนเตรทเริ่มต้น 200 และ 300 mg/l เช่นเดียวกับโซเดียมอะซิเตท ส่วนค่า k มีค่า 3.99 19.84 441.54 212.90 และ 302.61 ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน และค่า Yield มีค่า 38.69 19.48 13.24 11.95 10.02 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมไนเตรทไนโตรเจนที่ถูกกำจัด

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรทนั้นจากการศึกษาไคเนติกส์โดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่า ไคเนติกส์ที่เหมาะสมของโซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลอยู่ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l เนื่องจากมีค่า V_{max} สูงที่สุด โดยโซดียมอะซิเตทมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 1.95 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 6.08 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 16.25 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และที่ MLVSS 2,000 mg/l pH 7.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่า ORP 30 mV. มีความเหมาะสมในการลดค่าไนเตรทของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

การคำนวณค่าไคเนติกส์ของดีไนตริฟิเคชันนั้นมีความสำคัญเนื่องจาก ในการออกแบบระบบกำจัดไนโตรเจน วิศวกรบางคนอาจใช้วิธีที่มีผลในทางปฏิบัติตรง ๆ เช่น ใช้เวลากักน้ำของถังแอโรบิกและแอนอกซิกเป็นเกณฑ์การออกแบบ แต่วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะกับน้ำเสียชุมชนที่รู้จักลักษณะของน้ำเสีย (characteristics) มาอย่างดีแล้วเท่านั้น และเอาไปใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมไม่ได้ หากต้องการออกแบบระบบกำจัดไนโตรเจนให้ได้แม่นยำ ก็ควรใช้วิธีคำนวณจากข้อมูลไคเนติกส์ของกระบวนการ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

การศึกษาถึงผลของประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยใช้แหล่งคาร์บอนจากโซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ได้ข้อสรุปดังนี้

1. จากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าจุลินทรีย์สามารถลดไนเตรทจาก 100 mg/l จนเหลือ 0 mg/l และ pH ในถังปฏิกิริยานั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังการเติมอาหาร แสดงว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถลดไนเตรทในน้ำเสียได้ดี

2. จากการหาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ที่เหมาะสม พบว่าที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่สูงขึ้น อัตราการลดไนเตรทเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 2000 mg/l มีความสามารถในการลดไนเตรทได้สูงสุดโดยมีอัตราการลดไนเตรท ประมาณ 2 mg/l ต่อนาที

3. จากการทดลองโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนในการลดไนเตรทในน้ำเสีย พบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีประสิทธิภาพในการกำจัด 100% 100% 100% 99.3% และ 85.65% ตามลำดับ การใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการกำจัด 100% 100% 97.21% 91.8% และ 83.14% ตามลำดับ และการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการกำจัด 100% 100% 100% 81.78% และ 65.52% ตามลำดับ

4. จากการทดลองโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนในการลดไนเตรทในน้ำเสีย พบว่าที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 100 150 200 และ 300 mg/l มีอัตราการลดไนเตรท 1 2 2.5 2.96 และ 3.49 mg/l ต่อนาที ตามลำดับ การใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนมีอัตราการลดไนเตรท 0.97 1.93 1.88 2.36 และ 2.97 mg/l ต่อนาที ตามลำดับ และการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนมีอัตราการลดไนเตรท 0.99 2 2.33 2.38 และ 2.8 mg/l ต่อนาที ตามลำดับ

5. จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ปริมาณไนเตรทเริ่มต้นสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการกำจัดไนเตรทให้หมดไปภายในมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นไนเตรทสูงมากขึ้น แต่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และแหล่งคาร์บอนที่เติมลงไปนั้นยังมีค่าเท่าเดิม แต่ถ้าดูอัตราการลดไนเตรทต่อนาทีในช่วง 50 นาทีแรกที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ นั้น พบว่ายิ่งความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้น อัตราการลดไนเตรท/นาที จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

6. จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่าไนเตรทนั้นจากการศึกษาไคเนติกส์โดยใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่า ไคเนติกส์ที่เหมาะสมของโซเดียมอะซิเตท น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลอยู่ที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l เนื่องจากมีค่า V_{max} สูงที่สุด โดยโซดียมอะซิเตทมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 1.95 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 6.08 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 16.25 กรัมคาร์บอนต่อกรัมไนโตรเจน และที่ MLVSS 2,000 mg/l pH 7.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่า ORP 30 mV. มีความเหมาะสมในการลดค่าไนเตรทของแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด

7. การใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง และน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรท/นาทีค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลอาจจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่ทั้ง 2 ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและอัตราการลดไนเตรท/นาทีน้อยกว่าโซเดียมอะซิเตท แต่ก็น้อยกว่าไม่มากนัก สามารถนำมาใช้แทนโซเดียมอะซิเตทได้เป็นอย่างดี และค่าใช้จ่ายไม่สูงเท่าโซเดียมอะซิเตทเพราะเป็นการนำน้ำเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้เกิดความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแต่อาจจะมีค่าใช้จ่ายบ้างเกี่ยวกับการขนส่งน้ำเสีย

8. จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง (Two-way ANOVA) พบว่า แหล่งคาร์บอนและความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นมีผลต่อกัน ส่งผลให้อัตราการลดไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกัน แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 แหล่ง ทำให้ความสามารถในอัตราการลดไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกัน และความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อัตราการลดไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กำพล นันทพงษ์. 2545. การศึกษาปริมาณและวิธีการลดปริมาณไนเตรทในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด แล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียชนิดติดที่แบบเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์สุขภาพ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

เฉลิมราช วันทวิน. 2536. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปผักและผลไม้ขนาดย่อมโดยกระบวนการไร้อากาศตรึงเซลแบบไหลย้อนขึ้น. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีแห่งประเทศไทย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ณัฐกฤตา จินต์สุภาวงศ์. 2543. การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูง และมีความเค็มในระบบถังกรองใช้อากาศแบบไหลขึ้น ที่มีปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นในสภาวะเดียวกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวะกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2539. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 7. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล และ ลลิตา อัตนโถ. 2549. รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

ฝ่ายบริการข้อมูล. 2542. สถิติส่งออกสินค้าอาหารของไทย. สถิติการค้า. กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ กิตติ เกษตรธรรม. 2536. การใช้ถังกรองเอดีในการกำจัดไนเตรทออกจากน้ำดิบ. เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิฐู นันทิธัญญธาดา. 2546. การกำจัดไนเตรทในตู้เลี้ยงปลาโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์. 2544. การกำจัดสารประกอบไนเตรทในตู้เลี้ยงปลาน้ำจืดระบบปิดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์สารสนเทศ. 2539. ความสกปรกในรูปบีโอดีที่เกิดจากอุตสาหกรรม. สถิติโรงงานอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ และ สมลักษณ์ บุญญรักษ์. 2545. การจัดการการใช้น้ำและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี . 9(2) : 109-118.

ภาษาอังกฤษ

APHA, WEF, and APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th ed. American public health association. Washington DC.

Boongorsrang, A., Suga, M., and Meada, Y. 1982a. Nitrification of wastewater containing organic carbon and inorganic nitrogen by rotating disc contactor. J. Ferment. Tech. 60(4): 359-364.

Chang, C.C., Tseng, S. K., and Huang, H.K. 1999. Hydrogenotrophic denitrification with immobilized acaligenes eutrophus for drinking water treatment. Bioresource Tech. 69 : 53-58.

Christensen, M.H., and Harremoes, P. 1977. Biological Denitrification of Sewage: a literature review. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Chudoba, P., Pannier, M., Truc, A., and Pujol, R. 1998. A new fixed-film mobile bed bioreactor for denitrification of wastewaters. Wat. Sci. Tech. 38(8-9) : 233-240.

Drysdale, G.D., Kassen, H.C., and Bux, F. 1999. Denitrification by heterotrophic bacteria during activated sludge treatment. Water Science and Technological. Vol. 25.No.3. pp. 357-362.

Elhannouni, F., Belhadj, M., Taky, M., Echihabi, L., Hafsi, M., Abbassi, H.EI., Cherif, A.T., and Midaoui, A. EI. 2000. Denitrification of groundwater by electrodialysis using a new anion exchange membrane.J. Wat. Supply : Tech.-AQUA. 49(4) : 211-218.

Gomez, M.A., Lopez, J.G., and Garcia, E.H. 2000. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter. Journal of Harzardous Materials B80. pp. 69-80.

Her, J.J., and Huang, J.S. 1995. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough. Bioresource Tech. 54: 45-51.

Hwang, Y., Yoneyama, Y., and Noguchi, H. 2000. Denitrification characteristics of reject water in upflow biofiltration. Process Biochem. 35 : 1241-1245

Kioussi, D. R., Wheaton, F. W., and Kofinas, P. 2000. Reactive nitrogen and phosphorous removal from squaculture wastewater effluents using polymer hydrogels. Aquacultural Eng. 23 : 315-332.

Liang, O. B. 1995. Food Industry Waste Management in Asean. Food Agenda 21st Century, 5th Asean Food Conference Plenary Papers. pp. 63-65.

Lee, P.G., Lea, R.N., Dohmann, E., Prebilaky, W., Turk, P.E., Ying, H., and Whitson, J.L. 2000. Denitrification in aquaculture systerns: an example of a fuzzy logic control problem. Aquacultural Eng. 23: 37-59.

Metcalf & Eddy. 1991. Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse. Third Edition. McGraw-Hill Publishing Company, New York.

McCarty, P.L., Back, L.A., and Amant St, P.P. 1969. Biological Denitrification of Wastewater by Addition of Organic Materials. 24th ed. Waste Conf., Purdue University, Indiana, USA

Menasvata, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuniapae, B., and Lee, P. 2001. Design and function of a closed recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. Aquacultural Eng. 11 : 85-88.

Mohseni-Bandpi, A. and Elliott, D.J. 1998. Groundwater denitrification with alternative carbon source. Wat. Sci. Tech. 38(6) : 237-243

Patureau, D., Bernet, N., and Moletta, R. 1996. Effect of oxygen on denitrification in continuous chemostat culture with *Comamonas* sp. SGLY2. Journal of Industrial Microbiology. Vol.16. pp. 124-128.

Paul, E. Klisiewicz. 1995. Approach and Methology for Waste Reduction Assessments in The Food Industry. Food Agenda 21st Century, 5th Asean Food Conference Plenary Papers. pp. 59-62.

Stickney, R.R. 1994. Principle of aquaculture. John Wiley & U.S.A. Inc.: Sons.

Takashi, A., and Audrey, D. L. 1996. Wastewater Reclamation Recycling and Reuse: Past, Present and Future. Wat. Sci. Tech. Vol. 33, No. 10-11, pp. 1-1.

Tate, R.L. (III). 1995. Denitrification. Soil Microbiology. John Wiley and U.S.A. Inc.: Sons. pp. 340-342.

Tchobanoglous,G., and Burton , F.L. 1991. Wastewater Engineering: Tretment , Disposal and Reuse, New York: Metcalf and Eddy, Inc.

Wasik, E., Boldziewicz, J., and Blaszczyk, M. 2001. Removal of nitrates from ground water by a hybrid process of biological denitrification and microfiltration membrane. Process Biochemistry. Vol.37. pp. 57-64.

Yeoh, B. G., and Chong, C. N. 1995. Appropriate Environment Technology for The Food Industry. Food Agenda 21st Century, 5th Asean Food Conference Plenary Papers. pp. 66-75.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ค่า pH MLSS MLVSS และ COD
ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน พฤษภาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)	หมายเหตุ
1	-	-	-	-	-	
2	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	
18	7.54	8.41	11000	5200	470	เริ่มเลี้ยง
19	8.90	8.40	-	-	-	
20	9.02	8.41	-	-	-	
21	8.74	8.40	-	-	-	
22	7.82	8.40	-	-	-	
23	8.74	8.40	-	-	-	
24	8.60	8.38	-	-	-	
25	8.39	8.39	9870	4965	487	
26	8.11	8.40	-	-	-	
27	8.35	8.40	-	-	-	
28	8.41	8.40	-	-	-	
29	8.56	8.41	-	-	-	
30	9.41	8.40	-	-	-	
31	9.38	8.40	-	-	-	

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน มิถุนายน 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	7.95	8.41	5870	2987	385
2	8.35	8.40	-	-	-
3	8.45	8.41	-	-	-
4	8.57	8.40	-	-	-
5	8.77	8.41	-	-	-
6	9.00	8.40	-	-	-
7	8.55	8.40	-	-	-
8	8.59	8.40	4780	2870	450
9	8.65	8.40	-	-	-
10	8.71	8.41	-	-	-
11	8.66	8.40	-	-	-
12	8.81	8.40	-	-	-
13	8.73	8.41	-	-	-
14	8.40	8.39	-	-	-
15	8.20	8.41	5520	3150	370

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน มิถุนายน 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
16	8.51	8.38	-	-	-
17	6.80	8.42	-	-	-
18	7.84	8.41	-	-	-
19	7.08	8.40	-	-	-
20	6.80	8.41	-	-	-
21	8.11	8.41	-	-	-
22	7.08	8.40	5140	3060	478
23	7.04	8.40	-	-	-
24	8.46	8.40	-	-	-
25	8.13	8.41	-	-	-
26	8.17	8.41	-	-	-
27	8.36	8.40	-	-	-
28	8.41	8.40	-	-	-
29	8.46	8.41	4710	2680	367
30	8.36	8.40	-		-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน กรกฎาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.11	8.41	-	-	-
2	8.13	8.40	-	-	-
3	8.15	8.40	-	-	-
4	8.17	8.39	5510	2897	510
5	7.43	8.39	-	-	-
6	8.23	8.40	-	-	-
7	8.41	8.41	-	-	-
8	8.22	8.41	-	-	-
9	7.50	8.39	-	-	-
10	7.89	8.40	-	-	-
11	8.50	8.40	6120	3150	480
12	8.57	8.39	-	-	-
13	8.13	8.39	-	-	-
14	8.35	8.40	-	-	-
15	8.32	8.41	-	-	-
16	-	-	-	-	-
17	9.13	8.40	-	-	-
18	7.99	8.39	5580	3100	387
19	-	-	-	-	-
20	9.09	8.39	-	-	-
21	8.90	8.40	-	-	-
22	8.63	8.40	-	-	-
23	8.71	8.41	-	-	-
24	8.81	8.40	-	-	-
25	8.63	8.39	6140	2987	359
26	8.71	8.40	-	-	-
27	8.56	8.41	-	-	-
28	8.78	8.40	-	-	-
29	-	-	-	-	-
30	8.83	8.40	-	-	-
31	-	-	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน สิงหาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.11	8.41	-	-	-
2	8.13	8.40	-	-	-
3	8.15	8.40	-	-	-
4	8.17	8.39	5510	2897	510
5	7.43	8.39	-	-	-
6	8.23	8.40	-	-	-
7	8.41	8.41	-	-	-
8	8.22	8.41	-	-	-
9	7.50	8.39	-	-	-
10	7.89	8.40	-	-	-
11	8.50	8.40	6120	3150	480
12	8.57	8.39	-	-	-
13	8.13	8.39	-	-	-
14	8.35	8.40	-	-	-
15	8.32	8.41	-	-	-
16	-	-	-	-	-
17	9.13	8.40	-	-	-
18	7.99	8.39	5580	3100	387
19	-	-	-	-	-
20	9.09	8.39	-	-	-
21	8.90	8.40	-	-	-
22	8.63	8.40	-	-	-
23	8.71	8.41	-	-	-
24	8.81	8.40	-	-	-
25	8.63	8.39	6140	2987	359
26	8.71	8.40	-	-	-
27	8.56	8.41	-	-	-
28	8.78	8.40	-	-	-
29	-	-	-	-	-
30	8.67	8.40	-	-	-
31	-	-	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน กันยายน 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.45	8.41	5510	2680	450
2	8.39	8.40	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	7.94	8.39	-	-	-
5	7.94	8.40	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	7.36	8.41	-	-	-
8	8.90	8.40	6140	3120	380
9	9.28	8.40	-	-	-
10	9.09	8.39	-	-	-
11	9.00	8.40	-	-	-
12	9.05	8.40	-	-	-
13	9.05	8.40	-	-	-
14	8.43	8.43	-	-	-
15	8.85	8.40	5540	2980	410
16	7.73	8.43	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน กันยายน 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
17	8.66	8.40	-	-	-
18	8.61	8.41	-	-	-
19	8.53	8.40	-	-	-
20	8.41	8.40	-	-	-
21	-	-	-	-	-
22	-	-	4870	2670	350
23	8.66	8.43	-	-	-
24	-	8.41	-	-	-
25	8.40	8.40	-	-	-
26	-	-	-	-	-
27	8.13	8.40	-	-	-
28	8.26	8.41	-	-	-
29	-	-	5010	2580	410
30	8.51	8.40	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน ตุลาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.43	8.41	-	-	-
2	8.42	8.40	-	-	-
3	8.51	8.40	-	-	-
4	7.96	8.41	-	-	-
5	7.87	8.40	5210	3520	550
6	8.13	8.41	-	-	-
7	8.25	8.39	-	-	-
8	8.51	8.38	-	-	-
9	8.38	8.40	-	-	-
10	8.35	8.41	-	-	-
11	-	-	-	-	-
12	-	-	4870	3050	447
13	8.61	8.41	-	-	-
14	8.74	8.40	-	-	-
15	8.51	8.39	-	-	-
16	8.31	8.38	-	-	-
17	7.99	8.41	-	-	-
18	7.67	8.40	-	-	-
19	7.85	8.40	4470	3150	360
20	8.01	8.40	-	-	-
21	8.13	8.39	-	-	-
22	8.36	8.41	-	-	-
23	8.41	8.40	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	8.35	8.40	-	-	-
26	-	-	4560	3080	470
27	8.41	8.40	-	-	-
28	8.39	8.40	-	-	-
29	8.44	8.40	-	-	-
30	-	-	-	-	-
31	8.51	8.41	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน พฤศจิกายน 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.43	8.40	-	-	-
2	8.41	8.40	-	-	-
3	8.07	8.41	4170	3050	468
4	8.11	8.37	-	-	-
5	8.34	8.40	-	-	-
6	8.26	8.41	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	8.31	8.40	-	-	-
9	8.41	8.40	-	-	-
10	8.42	8.40	4450	3520	448
11	8.32	8.38	-	-	-
12	8.67	8.40	-	-	-
13	8.51	8.41	-	-	-
14	-	-	-	-	-
15	7.82	8.40	-	-	-
16	8.47	8.40	5520	3020	320
17	8.45	8.40	-	-	-
18	8.51	8.38	-	-	-
19	8.52	8.39	-	-	-
20	8.51	8.40	-	-	-
21	8.44	8.41	-	-	-
22	8.48	8.40	-	-	-
23	8.49	8.40	5210	3150	320
24	8.50	8.40	-	-	-
25	8.21	8.39	-	-	-
26	8.51	8.40	-	-	-
27	8.41	8.40	-	-	-
28	8.43	8.40	-	-	-
29	8.31	8.40	-	-	-
30	8.29	8.41	5620	3510	355

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน ธันวาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.36	8.40	-	-	-
2	8.64	8.40	-	-	-
3	8.51	8.38	-	-	-
4	8.32	8.40	-	-	-
5	8.42	8.40	-	-	-
6	8.41	8.39	4780	2780	352
7	8.40	8.40	-	-	-
8	8.28	8.35	-	-	-
9	8.41	8.40	-	-	-
10	8.42	8.39	-	-	-
11	8.31	8.38	-	-	-
12	8.32	8.35	-	-	-
13	8.35	8.40	5160	3520	410
14	8.36	8.39	-	-	-
15	8.41	8.41	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน ธันวาคม 2549

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
16	8.38	8.40	-	-	-
17	8.63	8.40	-	-	-
18	8.51	8.41	-	-	-
19	8.46	8.39	-	-	-
20	8.57	8.38	5230	3080	450
21	8.44	8.40	-	-	-
22	8.38	8.40	-	-	-
23	8.42	8.40	-	-	-
24	8.41	8.39	-	-	-
25	8.43	8.41	-	-	-
26	8.44	8.41	-	-	-
27	8.61	8.39	4980	3100	350
28	8.63	8.40	-	-	-
29	8.61	8.40	-	-	-
30	8.62	8.41	-	-	-
31	8.63	8.39	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน มกราคม 2550

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	7.97	8.41	-	-	-
2	7.87	8.40	-	-	-
3	7.83	8.39	5420	3190	360
4	7.87	8.39	-	-	-
5	7.99	8.40	-	-	-
6	8.00	8.40	-	-	-
7	7.85	8.41	-	-	-
8	7.83	8.39	-	-	-
9	7.89	8.40	-	-	-
10	8.21	8.40	4870	2880	320
11	8.00	8.38	-	-	-
12	8.12	8.39	-	-	-
13	8.01	8.40	-	-	-
14	7.85	8.41	-	-	-
15	8.10	8.40	-	-	-
16	8.41	8.41	-	-	-
17	8.50	8.40	4470	2550	260
18	8.70	8.40	-	-	-
19	8.10	8.40	-	-	-
20	8.30	8.41	-	-	-
21	7.70	8.41	-	-	-
22	7.87	8.41	-	-	-
23	8.00	8.40	-	-	-
24	7.88	8.39	4890	3080	320
25	7.97	7.00	-	-	-
26	8.53	7.11	-	-	-
27	8.31	7.13	-	-	-
28	8.27	7.14	-	-	-
29	8.27	7.12	-	-	-
30	8.31	7.10	-	-	-
31	8.74	7.02	4780	3210	370

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน กุมภาพันธ์ 2550

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	8.63	7.10	-	-	-
2	8.80	7.03	-	-	-
3	8.41	7.06	-	-	-
4	8.51	7.11	-	-	-
5	8.25	7.10	-	-	-
6	8.58	6.65	-	-	-
7	8.52	7.11	5710	2680	310
8	8.41	7.12	-	-	-
9	8.57	7.07	-	-	-
10	8.61	7.08	-	-	-
11	8.53	7.11	-	-	-
12	8.56	7.17	-	-	-
13	8.55	7.21	-	-	-
14	8.66	7.20	5140	2450	250
15	8.57	7.12	-	-	-
16	8.51	7.11	-	-	-
17	8.53	7.13	-	-	-
18	8.52	7.09	-	-	-
19	8.51	7.17	-	-	-
20	8.53	7.21	-	-	-
21	8.51	7.20	4870	2870	310
22	8.39	8.40	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-
26	7.38	8.41	-	-	-
27	8.40	8.40	-	-	-
28	8.65	8.38	4610	2810	386
29	-	-	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน มีนาคม 2550

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
1	7.71	7.12	-	-	-
2	8.56	7.10	-	-	-
3	8.24	8.40	-	-	-
4	8.35	8.40	5510	2870	440
5	8.22	8.40	-	-	-
6	7.89	8.41	-	-	-
7	8.21	8.41	-	-	-
8	7.98	8.41	-	-	-
9	7.65	8.41	-	-	-
10	7.99	8.39	-	-	-
11	8.36	8.40	4870	2750	360
12	7.82	8.40	-	-	-
13	8.66	8.40	-	-	-
14	8.81	8.40	-	-	-
15	8.72	7.13	-	-	-
16	8.68	7.13	-	-	-
17	-	-	-	-	-

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS และ COD ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria เดือน มีนาคม 2550

วันที่	pH น้ำออก	pH อาหาร	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)
18	-	-	4470	2687	410
19	7.90	8.39	-	-	-
20	8.61	7.15	-	-	-
21	8.53	-	-	-	-
22	7.39	-	-	-	-
23	8.67	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	-	-	3870	2410	330
26	8.24	7.05	-	-	-
27	8.50	8.40	-	-	-
28	8.61	8.39	-	-	-
29	8.50	8.41	-	-	-
30	8.67	8.40	-	-	-
31	8.50	8.40	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่า pH MLSS MLVSS COD และไนเตรท ในถังเลี้ยงเชื้อ denitrifying bacteria ทุกสัปดาห์

สัปดาห์ที่	MLSS (mg/l)	MLVSS (mg/l)	COD (mg/l)	NO3 น้ำเข้า (mg/l)	NO3 น้ำออก (mg/l)
1	11000	5200	470	110.20	5.50
2	9870	4965	487	118.75	4.30
3	5870	2987	385	99.87	6.00
4	4780	2870	450	99.85	4.50
5	5520	3150	370	100.21	2.10
6	5140	3060	478	104.56	0.00
7	4710	2680	367	105.23	0.50
8	5541	2560	360	106.22	0.60
9	5840	3140	485	107.78	1.80
10	5870	3050	358	114.32	2.90
11	4580	3187	410	108.87	3.00
12	5510	2897	510	98.21	0.20
13	6120	3150	480	99.86	0.10
14	5580	3100	387	97.85	0.00
15	6140	2987	359	104.56	1.90
16	5510	2680	450	98.56	1.40
17	6140	3120	380	97.00	1.60
18	5540	2980	410	100.25	5.20
19	4870	2670	350	104.23	5.40
20	5010	2580	410	101.58	5.70
21	5210	3520	550	103.96	0.00
22	4870	3050	447	102.58	2.30
23	4470	3150	360	99.68	3.60
24	4560	3080	470	99.98	2.80
25	4170	3050	468	97.56	4.70
26	4450	3520	448	101.58	5.00
27	5520	3020	320	103.35	1.90
28	5210	3150	320	110.87	3.60
29	5620	3510	355	115.56	5.40
30	4780	2780	352	104.98	2.40
31	5160	3520	410	96.87	1.00
32	5230	3080	450	100.05	0.00
33	4980	3100	350	100.89	1.90
34	5420	3190	360	104.00	1.80
35	4870	2880	320	100.21	5.50
36	4470	2550	260	99.85	5.10
37	4890	3080	320	94.25	0.00
38	4780	3210	370	100.25	2.30
39	5710	2680	310	108.77	3.30
40	5140	2450	250	104.32	4.00
41	4870	2870	310	105.65	1.10
42	4610	2810	386	103.32	2.30
43	5510	2870	440	106.67	2.20
44	4870	2750	360	110.01	4.00
45	4470	2687	410	109.21	1.30
46	3870	2410	330	100.67	2.00

ภาคผนวก ข

การลดไนเตรทที่ MLVSS ต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่าการลดไนเตรทที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ต่าง ๆ ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	NO3 (mg/l) ที่ MLVSS ต่าง ๆ				
	MLVSS 800 mg/l	MLVSS 1000 mg/l	MLVSS 1300 mg/l	MLVSS 1500 mg/l	MLVSS 2000 mg/l
0	102.03	101.08	100.55	100.28	100.16
10	93.87	90.53	91.78	87.77	70.35
20	86.45	81.11	76.32	70.36	50.81
30	78.51	73.53	63.84	55.43	25.44
40	67.34	59.83	50.77	38.81	9.81
50	56.42	46.82	38.41	23.55	0
60	45.98	30.64	22.57	8.34	0
80	38.46	19.77	3.39	0	0
100	19.32	2.07	0	0	0
120	3.47	0	0	0	0

ตารางแสดงค่าการลดไนเตรทที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ต่าง ๆ ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	NO3 (mg/l) ที่ MLVSS ต่าง ๆ				
	MLVSS 800 mg/l	MLVSS 1000 mg/l	MLVSS 1300 mg/l	MLVSS 1500 mg/l	MLVSS 2000 mg/l
0	105.36	100.59	99.87	100.25	105.21
10	95.87	93.22	87.65	85.54	71.25
20	83.21	79.81	75.23	73.21	49.88
30	75.22	72.56	64.85	56.33	23.57
40	68.11	60.79	49.87	37.02	8.54
50	50.12	45.6	35.87	24.05	0
60	42.11	33.23	21.58	7.58	0
80	35.11	20.15	4.1	0	0
100	19.32	2.1	0	0	0
120	4.1	0	0	0	0

ตารางแสดงค่าการลดไนเตรทที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ต่าง ๆ ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	NO3 (mg/l) ที่ MLVSS ต่าง ๆ				
	MLVSS 800 mg/l	MLVSS 1000 mg/l	MLVSS 1300 mg/l	MLVSS 1500 mg/l	MLVSS 2000 mg/l
0	105.33	101.22	102.56	98.59	104.01
10	94.58	93.56	89.33	80.21	70.25
20	87.66	80.25	74.89	69.25	52.39
30	75.32	74.87	65.21	55.33	25.47
40	62.51	60.52	51.65	34.01	8.51
50	52.13	45.23	38.22	22.54	0
60	41.02	32.56	18.57	6.68	0
80	32.23	20.59	2.59	0	0
100	20.55	3.21	0	0	0
120	3.66	0	0	0	0

ตารางแสดงอัตราการลดไนเตรทที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS) ต่าง ๆ

MLVSS (mg/l)	อัตราการลดไนเตรท (mg/l ต่อ นาที)			
800	0.8253	0.8377	0.8441	0.8357
1000	0.9129	0.9127	0.9159	0.913833
1300	1.1001	1.0798	1.1107	1.096867
1500	1.3557	1.3577	1.3142	1.342533
2000	2.0223	2.1157	2.092	2.076667

ภาคผนวก ค

การลดไนเตรทโดยใช้
โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	50.71	51.11	51.13	50.87	50.35	50.77	7.67
10	50.82	50.89	50.82	30.29	31.35	30.83	7.89
20	51.73	50.23	50.21	18.23	15.89	18.59	8.13
30	50.91	50.91	51.83	9.87	10.97	9.97	8.31
40	50.83	51.78	50.51	0	2.35	1.08	8.49
50	49.77	50.25	49.87	0	0	0	8.47
60	49.82	50.93	49.85	0	0	0	8.45
80	50.11	51.31	49.51	0	0	0	8.44
100	51.21	50.82	48.88	0	0	0	8.41
120	50.83	49.77	50.23	0	0	0	8.4
pH Bac	7.5	7.5	7.49	7.51	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.9	30.6	31.2	30.3	30.4	30.6	
COD (mg/l)	145	150	138	98	82	71	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	50.87	50.35	50.77	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	75.92	60.66	61.16	
SNUR	-	-	-	38.35	29.8	31.43	
MLSS (mg/l)	2464	2408	2468	2436	2492	2424	
MLVSS (mg/l)	1998	1978	1976	1980	2036	1946	
ORP	-320	-313	-296	-311	-315	-318	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	50.06	50.88	51.63	50.78	50.83	50.21	7.77
10	51.18	51.87	50.83	31.25	29.73	30.59	7.91
20	50.09	50.85	50.11	20.29	15.29	19.82	8.13
30	50.12	49.85	49.87	11.13	8.21	11.14	8.36
40	50.83	48.51	48.31	2.57	1.18	3.31	8.49
50	50.94	50.18	51.32	0	0	0	8.47
60	50.15	51.63	50.82	0	0	0	8.46
80	50.83	50.82	50.31	0	0	0	8.46
100	51.92	51.17	50.99	0	0	0	8.44
120	49.87	50.89	51.11	0	0	0	8.4
pH Bac	7.51	7.5	7.52	7.5	7.51	7.53	
pH น้ำเสีย	8.4	8.41	8.39	8.4	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	30.6	30.4	29.9	29.6	30.4	31	
COD (mg/l)	138	141	158	87	63	72	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	50.78	50.83	50.21	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	61.18	61.24	60.49	
SNUR	-	-	-	30.65	29.27	30.68	
MLSS (mg/l)	2420	2424	2400	2478	2480	2416	
MLVSS (mg/l)	2020	2020	2006	1996	2092	1972	
ORP	-278	-321	-332	-301	-300	-296	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	50.99	50.31	51.13	50	51.03	50.09	7.81
10	50.83	50.72	50.13	31.12	32.01	29.88	7.99
20	51.11	51.23	49.87	18.21	19.87	15.32	8.17
30	50.87	50.51	48.35	9.98	7.73	8.88	8.36
40	51.23	50.17	51.23	2.01	1.05	0	8.43
50	52.93	49.87	50.13	0	0	0	8.4
60	50.51	50.32	49.13	0	0	0	8.4
80	49.87	50.11	51.23	0	0	0	8.39
100	50.87	50.23	49.55	0	0	0	8.36
120	51.32	50.15	50.5	0	0	0	8.34
pH Bac	7.51	7.6	7.58	7.55	7.53	7.51	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.7	29.6	30.8	31	30.6	30.4	
COD (mg/l)	147	145	153	76	87	80	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	50	51.03	50.09	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	60.24	61.48	74.76	
SNUR	-	-	-	28.6	30.2	37.38	
MLSS (mg/l)	2396	2422	2404	2574	2416	2408	
MLVSS (mg/l)	2020	2008	2006	2106	2036	2000	
ORP	-316	-299	-311	-318	-309	-315	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	101.93	100.51	101.21	100.13	100.57	100.87	7.71
10	100.87	101.32	101.31	70.21	73.28	72.41	8.13
20	100.73	100.32	102.55	49.83	43.33	40.88	8.39
30	100.61	100.51	99.23	25.31	20.14	19.43	8.54
40	101.87	102.57	98.71	10.87	9.01	7.01	8.77
50	101.25	100.29	101.82	0	0	0	9.01
60	100.52	101.21	102.97	0	0	0	9
80	101.99	100.51	100.25	0	0	0	9
100	98.21	101.52	100.33	0	0	0	9.89
120	99.28	102.31	100.25	0	0	0	9.88
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.9	30.7	30.6	30.2	30.8	30.6	
COD (mg/l)	152	140	141	97	80	72	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.13	100.57	100.87	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	120.64	121.17	121.53	
SNUR	-	-	-	59.08	59.81	59.46	
MLSS (mg/l)	2412	2404	2352	2482	2424	2446	
MLVSS (mg/l)	2040	2072	2214	2042	2026	2044	
ORP	-316	-312	-306	-307	-302	-297	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	101.23	101.32	100.51	100.87	100.59	100.85	7.83
10	100.32	100.98	100.51	71.05	73.31	75.09	8.05
20	101.77	101.23	99.52	50.88	49.93	39.09	8.33
30	98.99	99.87	102.51	23.41	21.17	20.01	8.55
40	102.51	98.72	99.87	8.81	7.83	6.63	8.77
50	99.21	101.23	98.32	0	0	0	9.03
60	101.32	100.51	98.51	0	0	0	9.01
80	102.13	101.72	99.21	0	0	0	9
100	101.35	99.21	100.21	0	0	0	9
120	99.87	100.52	101.23	0	0	0	8.87
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	30.1	30.6	29.8	29.7	30.6	31	
COD (mg/l)	156	159	148	76	72	80	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.87	100.59	100.85	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	121.53	121.19	121.51	
SNUR	-	-	-	59.93	59.35	58.7	
MLSS (mg/l)	2422	2470	2404	2220	2436	2422	
MLVSS (mg/l)	2074	2068	2012	2028	2042	2070	
ORP	-320	-311	-309	-308	-307	-297	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	100.23	100.56	100.83	100.63	100.59	100.83	7.66
10	101.32	101.23	100.31	73.31	43.21	74.11	7.89
20	103.32	100.26	99.77	50.83	19.87	51.43	8.11
30	101.23	99.77	98.32	24.85	8.81	22.41	8.36
40	101.23	98.25	99.35	7.78	2.05	13.77	8.54
50	100.32	99.35	101.32	0	0	0	8.67
60	101.22	98.23	101.35	0	0	0	8.82
80	99.23	99.27	99.36	0	0	0	8.82
100	98.77	98.71	100.31	0	0	0	8.81
120	99.31	100.33	99.77	0	0	0	8.8
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	30.2	30.2	31.3	32	29.9	29.7	
COD (mg/l)	131	140	139	91	80	76	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.63	100.59	100.83	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	100.63	100.59	100.83	
SNUR	-	-	-	49.92	48.59	48.71	
MLSS (mg/l)	2420	2444	2442	2432	2422	2446	
MLVSS (mg/l)	2036	2086	2014	2016	2070	2070	
ORP	-266	-279	-251	-300	-302	-328	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	150.11	151.22	150.81	150.72	150.66	150.13	7.77
10	151.23	150.23	150.97	120.41	123.42	121.99	8
20	150.77	149.32	151.22	98.43	83.51	81.77	8.31
30	149.33	148.77	150.83	63.66	60.83	62.36	8.58
40	150.31	147.72	150.55	49.35	45.43	47.78	8.76
50	149.11	150.83	151.72	27.68	20.31	22.31	8.99
60	150.77	149.32	149.87	11.23	9.31	10.58	9.18
80	151.72	150.32	148.82	3.05	0	1.09	9.36
100	149.77	151.11	149.32	0	0	0	9.44
120	150.77	150.82	150.32	0	0	0	9.4
pH Bac	7.5	7.51	7.5	7.51	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.7	29.8	30.1	30.6	29.7	29.6	
COD (mg/l)	152	150	153	86	72	80	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	150.72	150.66	150.13	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	90.25	113.28	89.9	
SNUR	-	-	-	44.46	55.64	42.85	
MLSS (mg/l)	2412	2410	2504	2244	2412	2432	
MLVSS (mg/l)	2042	2070	2086	2030	2036	2098	
ORP	-290	-301	-312	-305	-309	-310	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	150.83	150.72	151.22	150.83	150.09	150.91	7.95
10	151.22	149.77	149.87	121.47	130.82	130.01	8.13
20	151.22	150.78	148.36	97.63	99.91	97.77	8.46
30	150.77	151.78	146.87	58.41	60.52	57.63	8.59
40	151.72	149.78	149.32	39.88	40.83	35.51	8.71
50	149.87	150.82	150.31	22.21	21.03	20.83	8.96
60	148.75	149.88	151.11	10.98	10.88	10.81	9.21
80	150.75	151.77	150.82	1.08	2.09	1.11	9.4
100	151.75	149.63	150.55	0	0	0	9.53
120	149.83	148.81	151.77	0	0	0	9.51
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.52	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	30.6	30.9	31.3	31.6	32	31.3	
COD (mg/l)	159	161	163	72	80	80	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	150.83	150.09	150.91	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	90.32	89.87	90.36	
SNUR	-	-	-	43.5	43.33	43.65	
MLSS (mg/l)	226	2412	2424	2424	2426	2424	
MLVSS (mg/l)	2104	2042	2096	2076	2074	2070	
ORP	-309	-268	-279	-311	-312	-318	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	150.83	151.87	150.83	150.11	150.32	150.01	7.81
10	150.77	150.35	150.71	122.43	123.41	130.08	8.16
20	149.83	150.78	151.32	83.77	79.83	111.13	8.39
30	148.55	149.22	152.51	67.66	66.67	98.73	8.52
40	149.87	148.85	151.77	43.21	44.31	73.71	8.73
50	151.55	150.83	158.38	20.23	25.29	50.55	8.91
60	150.51	151.18	152.5	7.72	11.73	31.23	9.23
80	149.63	150.88	149.87	0	2.01	15.29	9.41
100	148.87	151.32	150.55	0	0	3.87	8.4
120	149.55	152.31	148.99	0	0	0	8.39
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	30.1	30.2	30.7	31.3	30.6	31.3	
COD (mg/l)	164	152	159	86	80	87	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	150.11	150.32	150.01	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	112.86	90.01	75	
SNUR	-	-	-	55.11	44.12	36.66	
MLSS (mg/l)	2432	2424	2428	2492	2500	2394	
MLVSS (mg/l)	2080	2116	2084	2048	2040	2046	
ORP	-306	-309	-311	-318	-315	-312	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	201.77	201.32	201.72	200.59	200.08	200.18	7.63
10	202.51	200.51	202.81	160.72	167.73	170.03	7.92
20	201.83	200.82	203.52	142.41	150.83	147.79	8.2
30	201.79	200.62	200.44	119.88	123.51	118.31	8.41
40	200.51	200.47	204.41	73.21	88.32	79.32	8.67
50	200.53	201.87	205.72	50.01	53.21	52.18	9
60	200.87	201.83	200.51	31.09	33.33	36.67	9.28
80	200.51	200.56	201.83	18.29	19.27	20.32	9.36
100	199.87	200.56	202.53	9.01	10.88	9.97	9.49
120	198.53	200.53	203.71	3.02	5.55	4.05	9.51
pH Bac	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	31.3	32.3	32.1	30.8	30.9	30.6	
COD (mg/l)	151	149	148	76	90	73	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	197.57	194.53	196.13	
% ลดไนเตรท	-	-	-	98.49%	97.23%	97.98%	
NUR	-	-	-	98.78	97.26	98.06	
SNUR	-	-	-	48.76	48.2	45.91	
MLSS (mg/l)	2422	2424	2464	2428	2450	2452	
MLVSS (mg/l)	2040	2040	2078	2026	2018	2136	
ORP	-310	-287	-269	-251	-266	-318	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	200.82	201.11	200	200.83	201.08	200.83	7.76
10	201.83	201.12	201	175.21	187.87	187.83	8.99
20	205.94	200.97	200.01	150.09	149.88	152.73	9.14
30	206.85	200.82	200.09	112.21	120.21	113.22	9.36
40	201.11	202.55	200.08	83.71	80.88	81.76	9.58
50	200.87	201.77	201.01	51.32	49.83	50.31	9.63
60	200.18	201.63	200.11	27.73	30.31	31.85	9.76
80	201.19	200.63	201.87	10.07	11.17	10.87	9.81
100	199.21	199.72	200.88	0	2.07	0	9.83
120	200	198.82	200.99	0	0	0	9.8
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.39	8.39	8.39	
อุณหภูมิ	30.5	30.4	30.3	30.2	29.5	29.6	
COD (mg/l)	153	150	147	80	85	76	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	200.83	201.08	200.83	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	120.26	100.54	120.26	
SNUR	-	-	-	56.87	47.6	61.36	
MLSS (mg/l)	2426	2494	1874	2444	2420	2356	
MLVSS (mg/l)	2088	2106	2096	2114	2112	1960	
ORP	-313	-340	-348	-359	-311	-313	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	201.18	201.46	198.22	200.11	200.13	200.87	7.67
10	200.05	200.56	201.23	183.52	173.82	183.47	7.84
20	200.51	200.87	199.87	150.77	151.71	163.44	7.99
30	200.82	200.12	200.55	112.52	123.42	135.77	8.19
40	199.72	200.83	201.82	83.72	89.31	98.83	8.34
50	198.84	200.56	202.44	49.56	50.44	63.44	8.46
60	199.56	200.87	204.55	21.17	23.55	26.43	8.59
80	198.72	200.77	201.33	5.55	7.78	8.83	8.73
100	200.82	199.87	200.12	0	0	0	9.12
120	201.44	198.82	200.52	0	0	0	9.11
pH Bac	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.39	8.39	8.39	
อุณหภูมิ	29.7	29.2	28.8	30.6	30.7	30.3	
COD (mg/l)	139	140	151	97	98	101	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	200.11	200.13	200.87	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	119.83	119.84	120.28	
SNUR	-	-	-	58.51	57.56	56.95	
MLSS (mg/l)	2422	2420	2418	2552	2424	2468	
MLVSS (mg/l)	2106	2082	2062	2048	2082	2112	
ORP	-315	-313	-319	-317	-300	-296	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	300.01	302.23	299.87	300.59	300.63	300.88	7.72
10	300.51	302.11	300.01	260.41	270.83	275.42	8.13
20	300.72	301.85	299	219.43	240.41	241.43	8.55
30	300.63	301.32	301.18	180.41	190.25	198.42	8.81
40	301.13	297.77	302.17	125.51	140.88	153.55	9.06
50	303.72	298.32	301.09	87.77	113.43	116.66	9.17
60	298.72	300.55	300.77	63.31	100.01	108.59	9.29
80	298.72	301.43	300.51	42.51	80.88	89.72	9.41
100	299.77	300.43	300.82	30.77	60.21	68.88	9.49
120	301.82	301.77	300.52	29.82	42.41	53.41	9.51
pH Bac	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.38	8.38	8.38	
อุณหภูมิ	30.3	31.6	30.9	29.9	29.9	29.8	
COD (mg/l)	155	146	148	70	69	81	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	270.77	258.22	247.47	
% ลดไนเตรท	-	-	-	90.08%	85.89%	82.25%	
NUR	-	-	-	135.38	129.11	123.74	
SNUR	-	-	-	64.1	61.25	59.61	
MLSS (mg/l)	2480	2412	2482	2548	2488	2860	
MLVSS (mg/l)	2104	2164	2108	2112	2108	2076	
ORP	-305	-306	-317	-306	-299	-300	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	300.72	300.53	306.53	300.55	303.31	304.41	7.69
10	301.73	301.43	305.72	273.77	270	266.67	8.1
20	319.72	305.42	302.71	219.83	225.52	235.42	8.51
30	305.77	300.41	303.78	183.51	185.21	199.98	8.76
40	301.49	293.71	300.51	126.78	143.42	180.88	9.01
50	300.55	297.77	300.52	110.88	125.78	163.42	9.17
60	299.72	305.72	299.73	89.43	109.83	139.98	9.24
80	300.41	303.03	298.77	63.42	80.77	98.72	9.4
100	300.52	302.01	299.71	55.51	66.67	71.71	9.47
120	300.83	300.7	300.01	43.88	49.52	59.87	9.53
pH Bac	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	31.2	308	31	29.8	29.7	31.1	
COD (mg/l)	153	156	141	97	87	86	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	256.67	253.79	244.54	
% ลดไนเตรท	-	-	-	85.40%	83.67%	80.33%	
NUR	-	-	-	128.34	126.9	122.27	
SNUR	-	-	-	63.6	63.13	63.22	
MLSS (mg/l)	2492	2624	2422	2488	2442	2422	
MLVSS (mg/l)	2096	2086	2096	2016	2010	1934	
ORP	-313	-293	-271	-313	-308	-300	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	301.87	300.87	300	301.11	300.82	300.43	7.77
10	300.55	300.11	299.87	283.42	270.43	271.71	8.09
20	301.83	299.73	301	223.42	223.84	231.13	8.26
30	300.53	301.82	300.03	193.45	185.29	190.87	8.46
40	303.84	300.51	302.53	177.76	167.72	166.68	8.71
50	304.59	299.99	303.77	158.51	133.51	130.81	9.06
60	300.51	300.19	307.73	132.21	110.11	105.73	9.23
80	300.01	300.21	305.78	99.98	91.03	83.51	9.38
100	300.09	298.72	306.42	78.71	60.42	53.77	9.42
120	299.87	299.76	302.59	53.32	30.33	26.67	9.56
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	30.6	29.7	31.2	29.3	29.6	30.7	
COD (mg/l)	130	132	144	70	82	80	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	247.79	270.49	273.76	
% ลดไนเตรท	-	-	-	82.29%	89.92%	91.12%	
NUR	-	-	-	123.9	135.24	136.88	
SNUR	-	-	-	60.32	66.75	66.38	
MLSS (mg/l)	2514	2484	2494	2482	2402	2542	
MLVSS (mg/l)	2092	2112	2110	2054	2026	2062	
ORP	-287	-297	-278	-301	-313	-306	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสีย
จากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	50.1	51.2	51.1	50.9	51	50.7	7.91
10	50.2	50	50.7	43.9	44.7	43.8	8.19
20	50.7	51.1	50.6	37.5	38.5	39.1	8.52
30	51.1	50	50.7	29.5	30.6	30.1	8.76
40	49.3	51.1	51.1	18.2	17.7	18.6	8.96
50	51.2	49.8	48.9	0	1.2	0.6	9.1
60	50.6	50.7	48.7	0	0	0	9.14
80	50.7	51.3	49.3	0	0	0	9.12
100	51	48.8	49.4	0	0	0	9.09
120	50.9	49.1	50.6	0	0	0	9.06
pH Bac	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.39	8.39	8.39	
อุณหภูมิ	31.2	31.3	29.1	29.9	31	32	
COD (mg/l)	159	166	167	101	120	110	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	50.9	51	507	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	61.32	51	50.7	
SNUR	-	-	-	29.4	24.36	24.95	
MLSS (mg/l)	2410	2410	2424	2422	2510	2484	
MLVSS (mg/l)	2076	2018	2096	2086	2094	2032	
ORP	-278	-260	-260	-297	-290	-301	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	50.7	51.1	50.1	51.9	50.6	52	7.88
10	51.3	50.6	50	45	43.8	44.1	8.1
20	52.7	50.6	50.6	38.9	37.6	36.7	8.58
30	51.8	50.7	50.1	30.6	29.8	30.2	8.83
40	50.9	50.5	50.8	19.7	17.3	17.6	9.13
50	50.6	50.8	51.1	2.1	0	0	9.31
60	50.5	51.6	50.9	0	0	0	9.3
80	50.7	50.7	50.8	0	0	0	9.29
100	50.8	52	49.7	0	0	0	9.28
120	51	51.9	49.8	0	0	0	9.27
pH Bac	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55	7.55	
pH น้ำเสีย	8.39	8.39	8.39	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.8	30.2	30.5	31.3	31.2	29.8	
COD (mg/l)	168	150	141	110	128	118	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	51.9	50.6	52	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	51.9	60.96	62.65	
SNUR	-	-	-	26.72	28.86	29.83	
MLSS (mg/l)	2432	2422	2490	2420	2466	2228	
MLVSS (mg/l)	2050	2118	2090	1942	2112	2100	
ORP	-305	-318	-307	-319	-300	-315	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	50.7	50.9	51.1	53.1	51	50	7.7
10	50.5	51.1	50.7	44.8	48.1	42.1	8.1
20	50.6	50.7	51	38.6	36	35.5	8.31
30	51.1	49.8	51.1	30.8	28.3	30.8	8.47
40	49.8	49.6	50.9	28.3	19.7	18.7	8.6
50	49.7	49.9	50.8	15	2.1	2.2	8.84
60	50.1	50	49.6	2.1	0	0	9.01
80	50.2	50.6	49.7	0	0	0	9.13
100	49.7	50.9	49.9	0	0	0	9.12
120	50.7	50.9	50	0	0	0	9.11
pH Bac	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.1	29.2	29.8	31.1	31.3	31.2	
COD (mg/l)	146	135	130	98	108	132	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	53.1	51	50	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	39.92	51	50	
SNUR	-	-	-	19.55	24.93	24.08	
MLSS (mg/l)	2482	2232	2436	2424	2474	2420	
MLVSS (mg/l)	2110	2100	2112	2042	2046	2076	
ORP	-316	-30	-318	-300	-315	-299	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	100.58	100.83	100.32	100.58	100.46	100.77	7.84
10	100.81	100.57	101.11	75.99	78.32	80.78	8.18
20	100.32	102.51	101.81	49.87	50.81	53.63	8.63
30	101.01	101.88	102.31	38.68	40.51	41.83	8.88
40	102.03	101.33	101.41	26.07	29.07	30.61	9.04
50	100.78	101.32	102.51	0	3.05	5.32	9.14
60	100.87	100.99	102.44	0	0	0	9.11
80	101.18	100.88	101.33	0	0	0	9.06
100	102.22	100.53	100.88	0	0	0	9
120	103.01	101.87	100.57	0	0	0	8.98
pH Bac	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.8	29.9	30.6	30.4	30.8	30.6	
COD (mg/l)	148	129	149	105	96	99	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.58	100.46	100.77	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	121.18	100.46	100.77	
SNUR	-	-	-	58.37	47.93	49.2	
MLSS (mg/l)	2424	2422	2444	2460	2426	2472	
MLVSS (mg/l)	2058	2078	2044	2076	2092	2048	
ORP	-268	-270	-260	-271	-280	-299	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	100.88	100.83	100.31	100.85	100.31	100.55	7.71
10	101.12	101.03	100.81	78.32	79.99	81.09	8.05
20	105.32	101.08	100.35	50.32	48.32	50.82	8.43
30	102.87	100.97	100.32	40.32	35.18	40.11	8.61
40	101.03	100.65	100.51	30.12	15.03	29.83	8.97
50	103.07	100.37	100.38	7.77	0	3.17	9.13
60	101.83	100.27	101.09	0	0	0	9.1
80	103.88	102.31	101.01	0	0	0	9.09
100	101.07	101.97	101.18	0	0	0	9.08
120	100.05	100.35	100.99	0	0	0	9.07
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.7	29.7	29.9	30.2	30.4	30.1	
COD (mg/l)	136	139	131	87	98	103	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.85	100.31	100.55	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	100.85	120.86	100.55	
SNUR	-	-	-	50.12	59.71	47.79	
MLSS (mg/l)	2340	2486	2468	2358	2430	2430	
MLVSS (mg/l)	2084	2086	2024	2012	2024	2104	
ORP	-310	-300	-311	-298	-290	-270	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	100.88	100.8	100.32	100.66	101.08	100.35	7.81
10	101	100.78	100.38	82.17	83.77	76.77	8.26
20	101.07	100.63	100.66	51.36	53.82	50.31	8.57
30	100.98	101.01	100.83	38.42	35.14	40.62	8.78
40	100.63	101.18	101.08	15.13	10.82	22.83	9.05
50	100.32	100.32	101.09	2.81	0.77	3.51	9.17
60	100.77	100.66	101	0	0	0	9.28
80	101.11	100.77	102.07	0	0	0	9.27
100	102.13	101.18	102.01	0	0	0	9.25
120	100.87	101.26	101.11	0	0	0	9.23
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.39	8.39	8.39	
อุณหภูมิ	30.1	30.6	30.7	29.2	29.4	29.6	
COD (mg/l)	158	140	130	141	132	126	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.66	101.08	100.35	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	100.66	101.08	100.35	
SNUR	-	-	-	48.44	52.1	50.07	
MLSS (mg/l)	2444	2454	2474	2420	2408	2534	
MLVSS (mg/l)	2042	2106	2106	2078	1940	2004	
ORP	-287	-288	-290	-310	-310	-311	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	150.17	151.13	152.21	150.31	150.32	150.83	7.63
10	148.52	149.31	153.72	120.21	123.49	132.85	7.86
20	146.52	146.61	150.88	105.71	106.82	115.87	8.18
30	151.11	145.55	150.98	83.52	89.32	89.88	8.35
40	149.82	148.71	150.67	68.72	70.61	75.21	8.61
50	150.23	149.32	152.67	50.81	55.31	62.51	8.81
60	152.17	150.03	150.87	35.21	39.83	40.63	9.12
80	150.99	150.07	150.63	10.87	20.82	22.88	9.24
100	149.21	151.17	150.71	0	10.19	11.87	9.38
120	150.82	152.32	151.11	0	0	0	9.37
pH Bac	7.49	7.49	7.49	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.3	29.5	31.3	30.2	30.8	30.4	
COD (mg/l)	138	149	156	132	134	162	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	150.31	150.32	150.83	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	90	75.16	75.42	
SNUR	-	-	-	44.29	37.17	37.33	
MLSS (mg/l)	2420	2502	2482	2466	2422	2480	
MLVSS (mg/l)	2026	2096	2082	2032	2022	2020	
ORP	-281	-300	-271	-290	-315	-320	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	151.02	150.87	151.03	150.61	151.82	151.11	7.72
10	152.19	151.86	150.71	138.19	139.82	140.87	8.11
20	153.32	149.06	151.83	115.82	105.82	115.32	8.38
30	150.81	149.83	151.87	92.85	88.71	98.77	8.46
40	151.11	148.13	149.83	78.56	69.55	78.32	8.67
50	150.31	151.03	150.11	59.23	50.82	60.77	8.99
60	149.19	150.07	151.35	46.72	38.71	41.77	9.14
80	150.11	149.87	149.32	30.11	20.25	30.78	9.28
100	151.11	148.97	150.85	19.87	10.52	15.03	9.31
120	150.13	151.03	151.87	7.82	3.32	7.77	9.46
pH Bac	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56	
pH น้ำเสีย	8.43	8.43	8.43	8.39	8.39	8.39	
อุณหภูมิ	30.3	30.3	30.6	29.8	29.9	30.1	
COD (mg/l)	147	136	129	119	120	117	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	142.79	148.5	143.34	
% ลดไนเตรท	-	-	-	94.81%	97.81%	94.86%	
NUR	-	-	-	71.4	74.25	71.67	
SNUR	-	-	-	33.9	36.32	35.41	
MLSS (mg/l)	2540	2532	2520	2354	2490	2342	
MLVSS (mg/l)	2100	2140	2130	2106	2044	2024	
ORP	-310	-309	-300	-311	-315	-308	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	151.06	150.11	151.18	150.82	151.11	150.68	7.61
10	150.85	149.32	150.87	129.87	125.23	138.51	7.83
20	150.71	151.11	149.77	115.21	105.72	115.32	8.1
30	151.23	152.09	148.32	95.78	99.82	89.87	8.39
40	149.83	153.81	147.08	78.32	78.88	77.78	8.51
50	147.11	150.18	150.08	52.79	53.51	67.72	8.77
60	146.32	149.36	151.77	39.87	40.29	50.83	8.93
80	145.82	150.87	150.68	21.18	20	39.51	9.13
100	147.71	146.32	151.09	10.88	10.11	20.21	9.29
120	149.81	149.97	151.63	5.59	3.52	9.91	9.41
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.8	31.2	29.9	30.6	30.5	31	
COD (mg/l)	148	135	146	117	128	130	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	145.23	147.59	140.77	
% ลดไนเตรท	-	-	-	96.29%	97.67%	93.42%	
NUR	-	-	-	72.62	73.8	70.38	
SNUR	-	-	-	35.52	35.72	33.81	
MLSS (mg/l)	2426	2468	2440	2456	2244	2420	
MLVSS (mg/l)	2076	2112	2104	2044	2066	2082	
ORP	-311	-318	-319	-350	-317	-315	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	200.01	200.81	201.07	200.71	201.08	200.32	7.11
10	200.19	200.66	201.08	171.32	183.05	172.01	7.83
20	198.12	200.55	202.05	150.77	151.72	162.05	7.99
30	197.35	201.66	198.77	130.33	135.17	141.01	8.15
40	201	202.87	199.66	113.73	112.35	120.08	8.36
50	203.77	201.32	198.32	85.57	86.77	91.03	8.57
60	200.86	201.31	199.77	76.46	79.83	82.76	8.81
80	202.11	205.32	201.01	49.29	50.01	51	9.13
100	201.55	206.77	200.01	37.11	35.07	34.77	9.27
120	200.32	208	201.83	20.83	18.05	15.06	9.36
pH Bac	7.53	7.53	7.53	7.53	7.53	7.53	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.1	29.3	30.2	31.3	32	30.8	
COD (mg/l)	159	145	141	110	109	126	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	179.88	183.03	185.26	
% ลดไนเตรท	-	-	-	89.62%	91.02%	92.48%	
NUR	-	-	-	89.94	91.52	92.63	
SNUR	-	-	-	43.49	44.12	44.66	
MLSS (mg/l)	2464	2444	2420	2446	2470	2426	
MLVSS (mg/l)	2114	2108	2104	2068	2074	2074	
ORP	-300	-298	-297	-267	-280	-291	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	200.66	201.66	205.32	200.77	201.67	201.67	7.78
10	201.32	202.77	200.87	182.71	181.66	182.33	8.13
20	199.33	198.32	200.77	151.32	149.36	151.06	8.37
30	198.76	197.71	201.82	128.47	120.82	131.08	8.51
40	197.66	195.32	202.38	108.71	108.16	113.07	8.78
50	200.56	198.38	198.32	86.33	85.76	86.63	8.96
60	200.67	201.02	199.38	67.77	73.83	78.32	9.16
80	201.32	205.07	200.77	48.32	50.61	43.01	9.26
100	198.21	206.32	200.87	35.71	38.77	30.88	9.34
120	199.32	201.01	200.63	18.78	15.32	19.99	9.48
pH Bac	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.8	29.9	30.6	30.2	30.5	30.1	
COD (mg/l)	149	150	137	120	136	117	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	181.99	186.32	181.68	
% ลดไนเตรท	-	-	-	90.65%	92.40%	90.09%	
NUR	-	-	-	91	93.16	90.84	
SNUR	-	-	-	42.88	44.7	43.34	
MLSS (mg/l)	2420	2448	2480	2460	2430	2430	
MLVSS (mg/l)	2088	2108	2102	2122	2084	2096	
ORP	-315	-382	-300	-319	-321	-301	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	202.13	201.67	201.32	201.32	202	201.03	7.73
10	200.87	201.63	201.37	183.77	171.32	166.66	8.11
20	201.63	201.72	200.57	160.66	150.83	143.39	8.32
30	201.83	200.32	200.46	140.73	135.77	121.67	8.64
40	200.36	201.36	198.48	121.16	120.83	87.68	8.81
50	200.61	200.78	199.37	83.75	87.11	53.98	9.09
60	201.67	200.32	199.32	63.87	69.32	39.66	9.21
80	200.77	200.71	199.36	40.61	52.78	28.32	9.36
100	198.31	201.18	198.72	21.32	38.59	18.32	9.48
120	199.32	201.87	198.83	15	21.66	3.77	9.5
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.8	29.9	30.1	30	31	29.9	
COD (mg/l)	158	146	140	98	117	129	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	186.32	180.34	197.26	
% ลดไนเตรท	-	-	-	92.55%	89.28%	98.12%	
NUR	-	-	-	93.16	90.17	98.63	
SNUR	-	-	-	44.15	43.06	46.74	
MLSS (mg/l)	2342	2430	2490	2432	2484	2462	
MLVSS (mg/l)	2086	2084	2136	2110	2094	2110	
ORP	-315	-320	-300	-317	-308	-315	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	301.83	310.77	305.71	300.82	301.12	300.12	7.72
10	312	308.32	300.32	279.77	260.83	271.87	8.11
20	305.78	307.66	308.64	218.35	235.77	240.35	8.56
30	306.87	309.64	305.47	213.77	211.35	208.71	8.84
40	310.87	310.82	306.78	205.77	198.72	197.35	9.04
50	300.01	310.32	300.21	171.32	162.87	153.72	9.16
60	298.77	318.77	300.59	156.13	147.31	136.81	9.26
80	298.32	305.73	309.52	105.13	112.55	121.23	9.49
100	301.85	306	302.78	81.55	85.99	87.88	9.48
120	310.11	306.83	308.61	56.31	63.77	49.52	9.52
pH Bac	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	30.2	30.3	30.1	29.8	29.6	29.9	
COD (mg/l)	150	146	141	131	141	150	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	244.51	237.35	250.6	
% ลดไนเตรท	-	-	-	81.28%	78.82%	83.50%	
NUR	-	-	-	122.26	118.68	125.3	
SNUR	-	-	-	59.17	58.34	61.3	
MLSS (mg/l)	2422	2446	2438	2482	2446	2462	
MLVSS (mg/l)	2024	2070	2106	2066	2034	2044	
ORP	-312	-297	-270	-288	-261	-305	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	301.39	300.32	305.77	300.53	301.38	302.87	7.78
10	311.32	302.59	307.32	279.81	263.71	250.83	8.13
20	309.38	309.87	306.83	219.63	212.35	201.82	8.54
30	307.32	305.46	305.32	202.5	198.77	183.56	8.78
40	305.32	306.56	306.77	170.77	163.32	161.73	8.91
50	306.73	300.51	301.86	156.81	140.41	136.84	9.13
60	310.08	305.42	300.62	105.39	109.87	105.93	9.3
80	311.74	300.52	301.63	83.45	90.01	98.77	9.41
100	309.03	301.08	301.87	56.42	63.82	63.52	9.53
120	300.87	302.18	300.53	39.87	50.01	48.77	9.56
pH Bac	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	30.6	30.8	31	32	29.9	29.9	
COD (mg/l)	156	157	150	118	123	150	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	260.66	251.37	254.1	
% ลดไนเตรท	-	-	-	86.73%	83.41%	83.90%	
NUR	-	-	-	130.33	125.68	127.05	
SNUR	-	-	-	62.48	61.37	61.38	
MLSS (mg/l)	2462	2468	2462	2502	2420	2432	
MLVSS (mg/l)	2098	2098	2070	2086	2048	2070	
ORP	-316	-383	-317	-350	-316	-307	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	305.83	300.81	306.01	301.82	302.87	300.51	7.67
10	306.72	300.62	300.03	282.51	263.55	261.72	7.91
20	307.82	305.77	300.21	235.72	221.08	202.55	8.23
30	302.51	301.23	300.26	208.66	197.77	183.55	8.44
40	306.55	302.85	302.67	185.23	183.51	150.86	8.67
50	307.82	305.87	306.77	163.55	151.72	138.29	8.84
60	302.53	300.31	302.81	132.71	105.37	115.23	9.13
80	302.11	300.86	302.67	113.52	88.64	75.61	9.31
100	300.32	306.72	302.63	83.61	69.51	59.82	9.49
120	300.81	302.81	300.63	57.88	50.87	40.11	9.53
pH Bac	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.9	30.1	30.6	30.2	30.6	30.5	
COD (mg/l)	157	160	143	146	149	137	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	243.94	252	260.4	
% ลดไนเตรท	-	-	-	80.82%	83.20%	86.65%	
NUR	-	-	-	121.97	126	130.2	
SNUR	-	-	-	59.61	60.46	61.65	
MLSS (mg/l)	2442	2468	2468	2470	2434	2442	
MLVSS (mg/l)	2116	2084	2072	2046	2084	2112	
ORP	-315	-309	-320	-311	-300	-298	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสีย
จากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	51.3	50.3	50.5	51.31	50.75	50.64	7.9
10	50.2	50.1	51.6	39.95	33.13	35.17	8.92
20	51.1	49.8	51.3	27.3	21.82	26.2	9.24
30	50.4	49.7	50.7	19.83	16.47	10.13	9.4
40	48.8	50.2	50.9	6.63	3.31	3.47	9.51
50	49.3	50.3	51.3	0	0	0	9.5
60	50.6	49.7	51.3	0	0	0	9.49
80	51.3	49.1	50.7	0	0	0	9.47
100	50.3	50.4	49.8	0	0	0	9.46
120	49.8	48.8	48.3	0	0	0	9.44
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.36	8.36	8.6	8.28	8.28	8.28	
อุณหภูมิ	29.6	30.1	30.6	29.9	29.8	30	
COD (mg/l)	151	166	166	141	145	155	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	51.31	50.75	50.64	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	61.82	61.14	61.01	
SNUR	-	-	-	29.81	30.21	31.26	
MLSS (mg/l)	2382	286	2454	2340	2376	2142	
MLVSS (mg/l)	2102	1936	2064	2074	2024	1952	
ORP	-288	-301	-315	-318	-320	-315	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	50.8	51.6	50.3	53.48	52.26	52.43	7.82
10	51.2	50.8	50.4	30.13	36.42	35.41	8.86
20	49.7	49.5	51.2	20.28	25.21	23.33	9.12
30	48	50.2	51.7	9.83	13.49	10.12	9.35
40	50.6	51.3	50.5	0	5.86	2.87	9.47
50	50.7	49.5	49.3	0	0	0	9.46
60	51.4	49.6	48.7	0	0	0	9.43
80	50.2	54	49.5	0	0	0	9.37
100	49.7	49.7	48.8	0	0	0	9.35
120	48.3	51.2	50.1	0	0	0	9.28
pH Bac	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	
pH น้ำเสีย	8.36	8.36	8.36	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	31.3	31.7	30.6	29.8	29.9	30.2	
COD (mg/l)	168	170	159	153	141	136	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	53.48	52.26	52.43	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	79.82	62.96	63.17	
SNUR	-	-	-	40.68	31.01	30.94	
MLSS (mg/l)	2126	2408	2448	2200	2332	2372	
MLVSS (mg/l)	2040	1960	2032	1962	2030	2042	
ORP	-298	-280	-276	-288	-315	-311	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	51.7	50.1	51.1	53.13	50.49	50.71	7.72
10	50.8	49.8	50.1	39.87	40.13	39.42	8.76
20	49.9	49.7	49.9	23.13	32.49	30.82	9.09
30	50.3	50.2	49.7	10.82	25.31	21.46	9.28
40	50.7	51.3	48.8	5.41	10.88	10.31	9.4
50	50.6	48.8	50.2	0	3.92	3.42	9.4
60	51.2	50.1	50.1	0	0	0	9.39
80	50.1	50.7	49.9	0	0	0	9.35
100	49.9	48.5	48.6	0	0	0	9.3
120	48.7	49.2	47.7	0	0	0	9.24
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.7	29.9	30.3	30	30.1	29.8	
COD (mg/l)	168	170	169	134	156	167	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	53.13	50.49	50.71	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	64.01	50.49	50.71	
SNUR	-	-	-	31.32	24.48	25.56	
MLSS (mg/l)	2412	2316	2430	2398	2430	2416	
MLVSS (mg/l)	2090	2006	2050	2044	2062	1984	
ORP	-315	-318	-320	-300	-288	-287	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	101.33	105.81	100.29	100.02	102.28	101.48	7.88
10	102.51	104.21	100.36	58.32	65.01	53.11	8.85
20	100.36	100.32	101.43	35.24	16.96	29.82	9.19
30	103.77	101.64	105.82	4.04	0	21.3	9.36
40	106.32	101.85	106.73	0	0	0	9.36
50	105.41	102.56	101.41	0	0	0	9.3
60	100.82	101.47	100.88	0	0	0	9.31
80	98.41	105.34	100.43	0	0	0	9.27
100	99.36	101.42	101.42	0	0	0	9.21
120	97.63	100.58	100.55	0	0	0	9.14
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.37	8.37	8.37	
อุณหภูมิ	29.8	29.9	30.1	30.8	31.2	30.6	
COD (mg/l)	169	160	170	163	152	169	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	100.02	102.28	101.48	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	149.28	204.56	151.46	
SNUR	-	-	-	72.47	95.5	74.98	
MLSS (mg/l)	2352	2416	2278	2428	2432	2498	
MLVSS (mg/l)	2028	1936	2020	2060	2142	2080	
ORP	-275	-260	-270	-288	-290	-211	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	101.43	102.48	102.44	103.81	102.13	101.11	8
10	100.52	102.56	101.48	78.1	66.67	69.82	8.74
20	101.48	99.43	100.59	48.53	35.41	22.49	8.94
30	100.59	100.51	100.63	34.76	9.23	10.87	9.11
40	102.82	101.43	99.47	5.14	0	2.01	9.05
50	103.51	100.42	99.36	0	0	0	9.01
60	98.72	97.78	98.41	0	0	0	8.99
80	99.66	99.82	100.32	0	0	0	8.95
100	100.43	101.43	99.41	0	0	0	8.85
120	100.58	100.51	99.66	0	0	0	8.74
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.42	8.42	8.42	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.7	30.2	30.3	29.4	29.6	29.1	
COD (mg/l)	141	158	160	130	120	155	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	103.81	102.13	101.11	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	125.07	152.43	121.82	
SNUR	-	-	-	59.78	75.99	61.46	
MLSS (mg/l)	2354	2338	2476	2390	2514	2350	
MLVSS (mg/l)	2016	2018	2052	2092	2006	1982	
ORP	-238	-287	-266	-273	-270	-300	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	101.43	101.66	105.41	106.84	102.77	103.42	7.91
10	101.62	102.63	103.88	52.44	51.46	50.77	8.53
20	101.28	101.48	102.59	38.13	39.82	39.41	9.02
30	100.56	100.59	101.43	12.05	10.11	7.82	9.24
40	99.47	99.87	100.56	3.17	1.23	0	9.31
50	100.83	98.73	99.87	0	0	0	9.29
60	101.63	99.82	100.32	0	0	0	9.27
80	102.41	100.63	100.46	0	0	0	9.22
100	100.24	100.52	100.55	0	0	0	9.18
120	100.59	100.44	100.81	0	0	0	9.13
pH Bac	7.48	7.48	7.48	7.48	7.48	7.48	
pH น้ำเสีย	8.37	8.37	8.37	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.9	30.3	31.2	31.1	30.4	30.6	
COD (mg/l)	167	168	167	146	155	158	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	106.84	102.77	103.42	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	128.72	123.82	154.86	
SNUR	-	-	-	63.66	61.18	75.89	
MLSS (mg/l)	2482	2508	2502	2194	2206	2496	
MLVSS (mg/l)	2058	2074	2072	2022	2024	2034	
ORP	-299	-301	-307	-318	-320	-317	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	150.81	151.11	149.36	150.23	152.87	153.77	8.13
10	146.32	150.39	150.11	130.14	135.42	130.29	8.78
20	151.41	149.82	146.39	103.56	111.19	106.66	9.12
30	150.46	148.88	140.13	47.91	50.26	60.23	9.24
40	150.33	145.31	150.82	45.13	44.63	45.37	9.34
50	149.82	150.13	150.31	38.46	35.42	38.97	9.38
60	146.66	151.11	146.66	16.72	18.71	20.23	9.39
80	146.47	150.36	148.97	5.53	9.45	11.19	9.37
100	152.23	149.84	149.98	4.16	5.56	5.53	9.33
120	150.31	149.9	150.13	0	0	0	9.27
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	
อุณหภูมิ	30.3	30.2	29.9	29.8	30.7	30.5	
COD (mg/l)	159	160	160	147	150	151	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	150.23	152.87	153.77	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	75.15	76.44	76.88	
SNUR	-	-	-	35.33	38.52	37.72	
MLSS (mg/l)	2546	2536	2414	2314	2476	2498	
MLVSS (mg/l)	2066	2036	2062	2126	1984	2038	
ORP	-306	-317	-372	-308	-315	-311	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	150.32	150.31	146.77	149.72	151.33	149.97	7.8
10	150.13	150.8	150.82	129.97	130.15	131.18	8.71
20	149.97	149.91	150.98	105.73	108.88	106.73	9.05
30	150.31	150.43	149.31	61.19	69.92	52.29	9.29
40	152.22	149.51	147.63	45.56	50.83	38.46	9.42
50	146.67	146.63	151.42	38.78	40.16	29.57	9.47
60	145.55	150.87	146.68	18.79	19.78	18.82	9.5
80	143.31	150.33	150.71	9.98	11.11	9.35	9.52
100	150.32	149.29	152.31	4.72	6.68	2.21	9.55
120	149.21	150.28	150.29	0	0	0	9.5
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.3	29.8	29.7	28.2	29.9	30.5	
COD (mg/l)	166	168	155	160	160	143	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	149.72	151.33	149.97	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	74.86	75.66	74.98	
SNUR	-	-	-	34.46	37.46	36.12	
MLSS (mg/l)	2402	2476	2416	2242	2428	2526	
MLVSS (mg/l)	2010	2014	1938	2171	2020	2076	
ORP	-352	-311	-287	-215	-288	-281	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	151.13	150.3	146.43	146.65	152.87	152.22	7.89
10	150.29	150.17	149.41	120.84	135.51	125.36	8.91
20	150.21	150.19	150.81	107.79	111.83	108.67	9.19
30	149.82	149.88	150.42	56.43	65.32	50.57	9.39
40	148.77	150.26	149.23	47.71	48.93	39.51	9.48
50	147.81	150.84	148.47	29.85	35.49	25.79	9.49
60	150.13	150.23	146.67	18.63	21.87	18.33	9.51
80	149.21	146.67	150.32	11.74	9.51	9.97	9.53
100	149.83	145.32	149.84	3.36	5.53	3.47	9.57
120	150.3	146.43	148.2	0	0	0	9.54
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	30.3	30.7	30.5	30.2	29.9	29.8	
COD (mg/l)	160	151	165	145	143	157	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	146.65	152.87	152.22	
% ลดไนเตรท	-	-	-	100%	100%	100%	
NUR	-	-	-	73.52	76.44	76.11	
SNUR	-	-	-	38.11	39.44	38.09	
MLSS (mg/l)	2372	2482	2514	2112	2474	2264	
MLVSS (mg/l)	1982	2034	2020	1924	1938	1998	
ORP	-311	-271	-266	-273	-288	-311	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	201.17	202.4	200.01	201.84	203.26	204.64	7.79
10	200.52	200.59	197.42	152.63	153.06	162.26	8.63
20	196.48	198.47	198.46	162.61	107.87	130.73	9.15
30	200.43	197.43	197.47	94.32	119.1	103.73	9.33
40	197.71	196.66	200.51	93.11	81.35	97.97	9.47
50	198.91	195.43	201.43	80.7	61.38	96.43	9.5
60	199.32	200.51	205.32	56.95	59.98	75.22	9.51
80	202.48	201.76	201.43	46.44	39.74	70.35	9.49
100	200.57	200.82	200.88	43.55	31.31	56.32	9.43
120	200.48	200.01	201.19	30.77	25.1	45.51	9.39
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.6	8.36	8.36	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.8	29.7	29.9	30.1	30.2	30.3	
COD (mg/l)	160	167	157	157	166	158	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	171.07	178.16	159.13	
% ลดไนเตรท	-	-	-	84.75%	87.65%	77.76%	
NUR	-	-	-	85.54	89.08	79.56	
SNUR	-	-	-	42.39	44.32	40.47	
MLSS (mg/l)	2526	2534	2460	2234	2186	2510	
MLVSS (mg/l)	2012	2078	2048	2018	2010	1966	
ORP	-277	-270	-275	-311	-308	-316	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	201.43	200.44	200.13	203.57	205.58	200.84	7.89
10	201.66	199.43	200.82	158.73	163.72	190.72	8.84
20	200.59	195.67	200.57	143.89	147.84	175.43	9.16
30	197.73	197.38	201.43	115.57	128.56	153.36	9.37
40	196.41	201.46	205.31	97.84	95.43	120.84	9.45
50	199.46	206.77	200.57	85.46	75.43	99.97	9.49
60	198.31	200.57	197.76	75.43	66.67	85.43	9.48
80	200.41	201.43	198.11	68.85	59.94	72.26	9.41
100	200.56	198.43	199.13	59.21	51.41	68.46	9.35
120	201.39	197.76	198.32	41.13	40.43	50.51	9.25
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.9	31	31.3	30.6	30.5	30.4	
COD (mg/l)	176	174	173	153	148	149	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	162.44	165.15	150.33	
% ลดไนเตรท	-	-	-	79.80%	80.33%	74.85%	
NUR	-	-	-	81.22	80.4	75.16	
SNUR	-	-	-	40.21	39.14	39.23	
MLSS (mg/l)	2488	2330	2354	2458	2464	2352	
MLVSS (mg/l)	1988	1976	1952	2020	2054	1916	
ORP	-315	-316	-308	-315	-382	-350	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	ครั้ง **1**	ครั้ง **2**	ครั้ง **3**	**pH** ครั้งที่ **1**
0	200.57	200.67	201.18	210.26	206.63	205.43	7.78
10	200.42	201.43	200.46	157.73	163.87	159.41	8.36
20	201.43	200.58	200.83	108.95	119.98	115.42	8.57
30	202.54	199.42	193.31	100.82	100.01	108.87	8.63
40	202.56	198.42	196.77	89.57	95.47	89.21	8.97
50	199.83	200.51	197.11	63.82	86.73	78.82	9.01
60	198.32	200.43	198.46	59.98	69.44	65.43	9.23
80	201.46	197.76	199.9	41.18	50	50.29	9.46
100	201.59	198.8	200.1	35.47	42.28	45.44	9.51
120	200.44	196.63	201.11	30.26	35.41	36.41	9.55
pH Bac	7.41	7.41	7.41	7.41	7.41	7.41	
pH น้ำเสีย	8.48	8.48	8.48	8.42	8.42	8.42	
อุณหภูมิ	30.1	30.2	30.3	30.1	30.4	29.9	
COD (mg/l)	166	151	148	160	144	140	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	180	171.22	169.02	
% ลดไนเตรท	-	-	-	85.61%	82.86%	82.28%	
NUR	-	-	-	90	85.61	84.51	
SNUR	-	-	-	46.49	41.32	40.44	
MLSS (mg/l)	2366	2446	2462	2478	2530	2308	
MLVSS (mg/l)	2030	2068	2112	1936	2076	2010	
ORP	-298	-276	-266	-273	-263	-273	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	301.13	301.46	305.46	310.51	306.77	301.15	7.47
10	303.33	305.43	300.42	237.55	250.42	240.49	8.4
20	300.48	306.43	298.43	232.5	221.33	221.17	8.8
30	298.77	300.13	299.71	211.65	208.57	200.19	8.86
40	297.63	298.77	300.01	184.34	195.46	183.47	8.89
50	299.31	299.31	301.64	182.34	178.39	167.48	9.09
60	301.46	300.42	306	166.77	165.46	150.43	9.06
80	301.32	299.71	300.01	104.5	141.32	141.47	9.07
100	300.42	300.46	297.78	95.28	109.97	128.82	9.09
120	291.11	301.46	296.34	100.45	99.98	109.97	9.08
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.41	8.41	8.41	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	30.1	29.9	30.2	30.1	29.9	29.2	
COD (mg/l)	167	155	141	148	150	133	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	210.06	206.79	191.22	
% ลดไนเตรท	-	-	-	67.65%	67.41%	63.50%	
NUR	-	-	-	105.03	103.4	95.61	
SNUR	-	-	-	53.48	50.44	48.34	
MLSS (mg/l)	2532	2418	2348	2140	2530	2402	
MLVSS (mg/l)	2124	1980	2012	1964	2050	1978	
ORP	-300	-308	-311	-315	-309	-318	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	**Control 2**	**Control 3**	**ครั้ง 1**	**ครั้ง 2**	**ครั้ง 3**	**pH ครั้งที่ 1**
0	301.13	300.01	301.42	309.17	301.18	306.73	8.1
10	298.77	300.66	302.56	256.63	238.41	263.46	8.91
20	299.36	306.42	298.72	238.95	211.67	217.78	8.99
30	306.42	303.46	297.61	201.17	188.87	199.98	9.17
40	305.48	301.54	299.32	183.39	164.13	176.83	9.36
50	306.48	298.78	301.17	176.63	128.43	155.56	9.49
60	300.01	297.36	300.76	159.84	109.77	146.68	9.52
80	297.64	296.63	297.73	150.67	108.83	139.42	9.57
100	299.82	296.77	298.33	120.27	95.17	101.13	9.61
120	298.33	298.31	297.61	119.97	100.16	98.87	9.33
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
อุณหภูมิ	29.7	29.9	29.8	30	30	30.1	
COD (mg/l)	150	158	168	143	152	157	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	189.2	201.02	207.86	
% ลดไนเตรท	-	-	-	61.20%	66.74%	67.77%	
NUR	-	-	-	94.6	100.51	103.93	
SNUR	-	-	-	46.06	50.66	49.26	
MLSS (mg/l)	2542	2454	2414	2292	2498	2552	
MLVSS (mg/l)	2010	2010	2086	2054	1984	2110	
ORP	-316	-311	-312	-319	-316	-319	

ตารางแสดงการลดไนเตรทโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่า ไนเตรท (mg/l)						
	Control 1	Control 2	Control 3	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	pH ครั้งที่ 1
0	301.17	306.69	302.26	305.49	301.17	300.07	8.13
10	300.06	300.01	301.17	297.73	291.13	257.73	8.25
20	298.72	301.13	306.63	243.31	280.71	211	8.46
30	299.31	300.69	305.43	201.53	251.13	195.82	8.57
40	297.73	298.76	299.47	187.73	209.97	164.26	8.74
50	290.01	297.43	303.48	164.49	178.11	150.07	9.1
60	301.13	300.42	302.67	128.57	164.3	130.82	9.19
80	307.71	301.16	301.63	116.63	150.19	129.44	9.27
100	306.71	300.46	300.84	109.84	138.82	109.42	9.36
120	300.06	301.87	301.42	96.67	120.56	98.82	9.44
pH Bac	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
pH น้ำเสีย	8.4	8.4	8.4	8.41	8.41	8.41	
อุณหภูมิ	29.9	29.8	30.1	30.4	30.6	30	
COD (mg/l)	156	158	169	143	142	154	
ลดไนเตรทได้	-	-	-	208.82	180.61	201.25	
% ลดไนเตรท	-	-	-	68.36%	59.97%	67.07%	
NUR	-	-	-	152.74	90.3	100.62	
SNUR	-	-	-	74.51	44.31	49.96	
MLSS (mg/l)	2486	2440	2398	2542	2406	2404	
MLVSS (mg/l)	1987	2084	1984	2050	2038	2014	
ORP	-300	-397	-260	-267	-266	-273	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

การเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	50.55	0	95.41	15.36
10	30.78	0	44.8	15.39
20	17.94	0	40.81	13.66
30	9.76	0	42.55	13.94
40	1.5	0	45.46	12.16
50	0	0	48.06	13.09
60	0	0	50.9	12.25
80	0	0	50.98	12.24
100	0	0	48.82	13
120	0	0	45.4	11.16

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	100.66	0	97.31	16.89
10	71.94	0	72.02	17.31
20	46.6	0	40.96	17.73
30	21.84	0	41.68	14.96
40	8.95	0	44.18	14.17
50	1.08	0	41.4	12.85
60	0	0	42.06	12.19
80	0	0	42.29	12.85
100	0	0	42.68	13.08
120	0	0	44.31	10.36

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	150.42	0	87.94	20.27
10	124.89	0	61.89	17.63
20	92.64	0	46.89	17.97
30	66.27	0	40.9	16.22
40	46.67	0	31.16	11.69
50	25.6	0	33.19	11.34
60	12.72	0	43.98	12.34
80	2.86	0	43.31	14.35
100	0.43	0	44.94	10.14
120	0	0	43.61	10.78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	200.52	0	102.56	16.26
10	176.69	0	65.3	16.81
20	151.07	0	46.9	12.89
30	119.89	0	42.05	13.54
40	84.34	0	47.14	12.8
50	52.26	0	44.1	12.01
60	29.12	0	46.85	12.78
80	12.46	0	44.36	12.95
100	3.55	0	45.46	12.36
120	1.4	0	34.37	11.15

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	301.41	0	89.9	27.75
10	271.41	0	49.97	17.43
20	228.94	0	38.33	17.21
30	189.71	0	41.11	15.51
40	153.69	0	39.7	14.43
50	126.75	0	42.49	20.19
60	106.58	0	43.91	12.48
80	81.17	0	48.03	14.04
100	60.74	0	42.76	11.49
120	43.25	0	38.42	12.61

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	51.24	0	51.28	20.38
10	44.48	0	43.44	18.08
20	38.12	0	38.16	15.66
30	30.08	0	39.23	18.94
40	19.53	0	35.13	17.93
50	2.51	0	37.51	15.62
60	0.23	0	37.46	17.44
80	0	0	38.49	16.34
100	0	0	40.39	15.86
120	0	0	37.49	16.11

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	100.62	0	56.26	18.16
10	79.69	0	48.76	16.88
20	51.03	0	41.09	15.51
30	38.98	0	43.04	14.41
40	23.28	0	39.51	15.14
50	2.93	0	40.47	14.87
60	0	0	41.36	15.26
80	0	0	41.93	14.53
100	0	0	41.91	15.42
120	0	0	43.35	14.55

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	150.84	0	62.99	38.5
10	132.12	0	51.91	23.58
20	111.29	0	42.76	18.57
30	92.06	0	49.07	18.57
40	75.1	0	52.64	18.12
50	57.05	0	49.03	16.66
60	41.54	0	51.6	14.4
80	24.04	0	49.96	13.67
100	12.08	0	50.97	13.65
120	4.21	0	50.78	14.53

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	201.17	0	47.66	16.84
10	177.2	0	44.18	17.01
20	152.35	0	40.58	16.48
30	131.67	0	39.07	14.36
40	111.75	0	42.16	13.97
50	82.99	0	38.52	13.19
60	70.2	0	35.84	12.62
80	45.99	0	35.53	12.59
100	32.28	0	39.82	12.16
120	16.5	0	38.61	12.94

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	301.34	0	49.93	15.05
10	268.29	0	44.62	15.64
20	220.85	0	44.09	13.77
30	200.96	0	42.46	13.74
40	179.7	0	38.92	14.66
50	152.84	0	35.9	11.35
60	123.86	0	36.38	13.24
80	98.77	0	31.25	12.85
100	72.46	0	33.17	13.1
120	50.79	0	33.35	12.37

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	51.69	0	55.48	27.03
10	36.62	0	41.86	18.29
20	25.62	0	40.53	21.2
30	15.27	0	34.75	19.21
40	5.42	0	35.59	19.64
50	0.82	0	34.06	14.93
60	0	0	39.02	14.76
80	0	0	32.97	16.18
100	0	0	36.71	19.75
120	0	0	35.02	21.41

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	102.65	0	46.08	37.06
10	60.63	0	44.39	19
20	33.98	0	40.27	18.56
30	12.24	0	48.33	21.9
40	1.28	0	52.13	21.08
50	0	0	46.37	14.24
60	0	0	41.13	17.98
80	0	0	43.46	15.2
100	0	0	43.43	18.88
120	0	0	45.55	17.04

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	151.07	0	36.32	45.59
10	129.87	0	27.3	25.03
20	107.89	0	28.43	15.76
30	57.12	0	25.34	13.33
40	45.12	0	35.14	14.21
50	34.72	0	37.21	13.41
60	19.1	0	33.86	11.06
80	9.76	0	32.3	12.68
100	4.58	0	36.84	18.37
120	0	0	31.37	13.57

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	204.67	0	89.14	40.96
10	162.46	0	54.58	25.7
20	134.75	0	46.53	22.32
30	113.82	0	44.14	17.8
40	95.64	0	43.24	15.08
50	80.97	0	40.44	14.02
60	68.28	0	40.56	16.29
80	55.45	0	39.31	15.38
100	48.16	0	45.27	16.69
120	37.28	0	41.28	14.56

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอิออนต่าง ๆ โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)
0	304.69	0	39.44	9.59
10	259.28	0	36.27	10.24
20	230.94	0	32.73	10.67
30	206.54	0	32.54	11.32
40	183.29	0	31.2	8.25
50	164.61	0	29.41	9.18
60	146.96	0	28.1	10.29
80	131.27	0	36.36	9.68
100	112.08	0	31.3	11.96
120	105.05	0	33.29	10.51

ภาคผนวก ช

อัตราการลดไนเตรทที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงอัตราการลดไนเตรทที่ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	ครั้งที่	อัตราการลดไนเตรท / นาที			เฉลี่ย
			ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	
โซเดียมอะซิเตท	50 mg/l	1	1	1	1	1
		2	1	1	1	
		3	1	1	1	
	100 mg/l	1	2	2	2	2
		2	2	2	2	
		3	2	2	2	
	150 mg/l	1	2.46	2.61	2.56	2.5
		2	2.57	2.58	2.6	
		3	2.6	2.5	1.99	
	200 mg/l	1	3.01	2.94	2.96	2.96
		2	2.99	3.02	3.01	
		3	3.01	2.99	2.75	
	300 mg/l	1	4.26	3.74	3.68	3.49
		2	3.79	3.55	2.82	
		3	2.85	3.35	3.39	
น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 mg/l	1	1	1	1	0.97
		2	1	1	1	
		3	0.76	0.98	0.96	
	100 mg/l	1	2.01	1.95	1.91	1.93
		2	1.86	2	1.95	
		3	1.96	2	1.94	
	150 mg/l	1	1.99	1.9	1.77	1.88
		2	1.83	2.02	1.81	
		3	1.96	1.95	1.66	
	200 mg/l	1	2.3	2.29	2.18	2.36
		2	2.29	2.32	2.3	
		3	2.35	2.3	2.94	
	300 mg/l	1	2.59	2.76	2.93	2.97
		2	2.87	3.22	3.32	
		3	2.76	3.02	3.24	
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 mg/l	1	1	1	1	0.99
		2	1	1	1	
		3	1	0.93	1	
	100 mg/l	1	2	2	2	2
		2	2	2	2	
		3	2	2	2	
	150 mg/l	1	2.24	2.35	2.3	2.33
		2	2.22	2.22	2.41	
		3	2.34	2.35	2.53	
	200 mg/l	1	2.42	2.84	2.16	2.38
		2	2.36	2.6	2.02	
		3	2.13	2.4	2.53	
	300 mg/l	1	2.56	2.57	2.67	2.8
		2	2.65	3.46	3.02	
		3	2.82	2.46	3	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฌ

ไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากการทดลอง
และการคำนวณค่า C/N ratio ที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่า 1/S และ 1/U โดยการใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	50.55	-	-	-
10	30.78	1.5	0.03	0.67
20	17.94	1	0.06	1.00
30	9.76	1	0.10	1.00
40	1.5	0.48	0.67	2.08
50	0	-	-	-
60	0	-	-	-
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	100.66	-	-	-
10	71.94	2.5	0.01	0.40
20	46.6	2	0.02	0.50
30	21.84	1.74	0.05	0.57
40	8.95	1.07	0.11	0.93
50	1.08	0.71	0.93	1.41
60	0	-	-	-
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	150.42	-	-	-
10	124.89	3	0.008	0.33
20	92.64	2.73	0.011	0.37
30	66.27	2.14	0.015	0.47
40	46.67	1.82	0.021	0.55
50	25.6	1.82	0.039	0.55
60	12.72	0.34	0.079	2.94
80	2.86	0.16	0.350	6.25
100	0.43	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	200.52	-	-	-
10	176.69	2.4	0.006	0.42
20	151.07	2.4	0.007	0.42
30	119.89	4.28	0.008	0.23
40	84.34	3.33	0.012	0.30
50	52.26	3.33	0.019	0.30
60	29.12	2.86	0.034	0.35
80	12.46	0.59	0.080	1.69
100	3.55	0.32	0.282	3.13
120	1.4	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	301.41	-	-	-
10	271.41	3.48	0.004	0.29
20	228.94	5	0.004	0.20
30	189.71	4	0.005	0.25
40	153.69	2.73	0.007	0.37
50	126.75	2.61	0.008	0.38
60	106.58	1.43	0.009	0.70
80	81.17	1.11	0.012	0.90
100	60.74	1.05	0.016	0.95
120	43.25	-	-	-

$NaNO_3$ 909 mg/l คิดเป็น NO_3^- 150 mg/l 1และใส่ CH_3COONa 1000 mg/l

$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 85 คิดเป็น N 14

$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 909 คิดเป็น N 149.72

CH_3COONa มวลโมเลกุล 85 คิดเป็น C 24

CH_3COONa มวลโมเลกุล 1000 คิดเป็น C 292.68 $\therefore$ C/N ratio = 292.68/149.72 = 1.95

ตารางแสดงค่า 1/S และ 1/U โดยการใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	51.24	-	-	-
10	44.48	0.67	0.02	1.49
20	38.12	0.56	0.03	1.79
30	30.08	0.91	0.03	1.10
40	19.53	1.43	0.05	0.70
50	2.51	1.25	0.40	0.80
60	0.23	0.046	4.35	21.67
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	100.62	-	-	-
10	79.69	2.27	0.01	0.44
20	51.03	2.14	0.02	0.47
30	38.98	1.07	0.03	0.93
40	23.28	1.67	0.04	0.60
50	2.93	1.25	0.34	0.80
60	0	-	-	-
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	150.84	-	-	-
10	132.12	2.27	0.008	0.44
20	111.29	2	0.009	0.50
30	92.06	1.67	0.011	0.60
40	75.1	1.47	0.013	0.68
50	57.05	1.5	0.018	0.67
60	41.54	1.33	0.024	0.75
80	24.04	0.86	0.042	1.16
100	12.08	-	-	-
120	4.21	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	201.17	-	-	-
10	177.2	2.5	0.006	0.40
20	152.35	2.22	0.007	0.45
30	131.67	1.76	0.008	0.57
40	111.75	2.31	0.009	0.43
50	82.99	2	0.012	0.50
60	70.2	1.05	0.014	0.95
80	45.99	0.87	0.022	1.15
100	32.28	0.7	0.031	1.43
120	16.5	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	301.34	-	-	-
10	268.29	4.35	0.004	0.23
20	220.85	4.28	0.005	0.23
30	200.96	1.78	0.005	0.56
40	179.7	2	0.006	0.50
50	152.84	2.98	0.007	0.34
60	123.86	1.82	0.008	0.55
80	98.77	1.11	0.010	0.90
100	72.46	1.11	0.014	0.90
120	50.79	-	-	-

$NaNO_3$ 909 mg/l คิดเป็น NO_3^- 150 mg/l และมี TKN จากน้ำผลไม้กระป๋อง 21 mg/l

$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 85 คิดเป็น N 14

$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 909 คิดเป็น N 149.72

∴ N = 149.72+21 = 170.72

TOC ของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง 1,039 mg/l ∴ C/N ratio = 1,039/170.72 = 6.08

ตารางแสดงค่า 1/S และ 1/U โดยการใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	51.69	-	-	-
10	36.62	1.43	0.03	0.70
20	25.62	1	0.04	1.00
30	15.27	1	0.07	1.00
40	5.42	0.77	0.18	1.30
50	0.82	0.3	1.22	3.33
60	0	-	-	-
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	102.65	-	-	-
10	60.63	3.57	0.02	0.28
20	33.98	3	0.03	0.33
30	12.24	1.82	0.08	0.55
40	1.28	0.71	0.78	1.41
50	0	-	-	-
60	0	-	-	-
80	0	-	-	-
100	0	-	-	-
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	151.07	-	-	-
10	129.87	1.82	0.008	0.55
20	107.89	3.53	0.009	0.28
30	57.12	3.33	0.018	0.30
40	45.12	0.87	0.022	1.15
50	34.72	1.25	0.029	0.80
60	19.1	0.7	0.052	1.43
80	9.76	0.3	0.102	3.33
100	4.58	0.23	0.218	4.35
120	0	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	204.67	-	-	-
10	162.46	3	0.006	0.33
20	134.75	2.5	0.007	0.40
30	113.82	2	0.009	0.50
40	95.64	1.54	0.010	0.65
50	80.97	1.15	0.012	0.87
60	68.28	0.82	0.015	1.22
80	55.45	0.53	0.018	1.89
100	48.16	0.62	0.021	1.61
120	37.28	-	-	-

ความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

เวลา	S	U	1/S	1/U
0	304.69	-	-	-
10	259.28	4	0.004	0.25
20	230.94	2.5	0.004	0.40
30	206.54	2	0.005	0.50
40	183.29	1.94	0.005	0.52
50	164.61	1.6	0.006	0.63
60	146.96	1.11	0.007	0.90
80	131.27	0.64	0.008	1.56
100	112.08	0.67	0.009	1.49
120	105.05	-	-	-

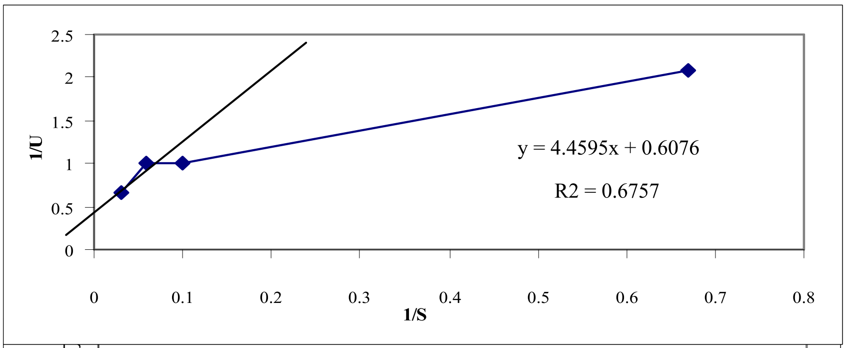
$NaNO_3$ 909 mg/l คิดเป็น NO_3^- 150 mg/l และมี TKN จากน้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล 206 mg/l

$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 85 คิดเป็น N 14

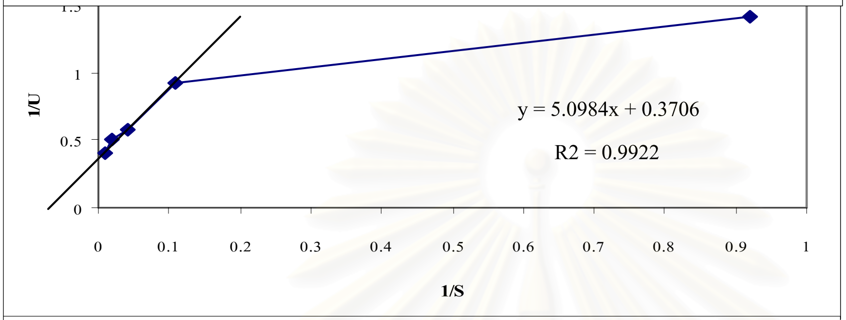
$NaNO_3$ มวลโมเลกุล 909 คิดเป็น N 149.72

$\therefore$ N = 149.72+206 = 355.72

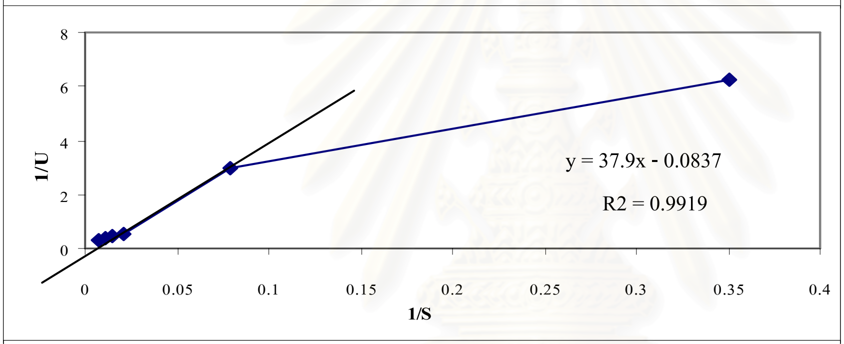
TOC ของน้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง 5,782 mg/l $\therefore$ C/N ratio = 5,782/355.72 = 16.25



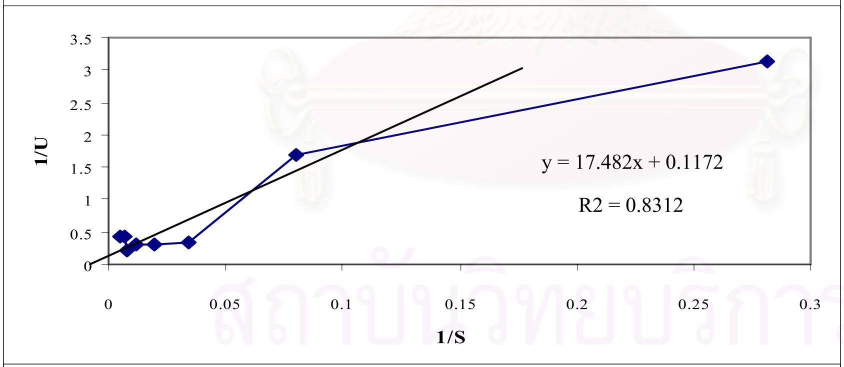
ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l



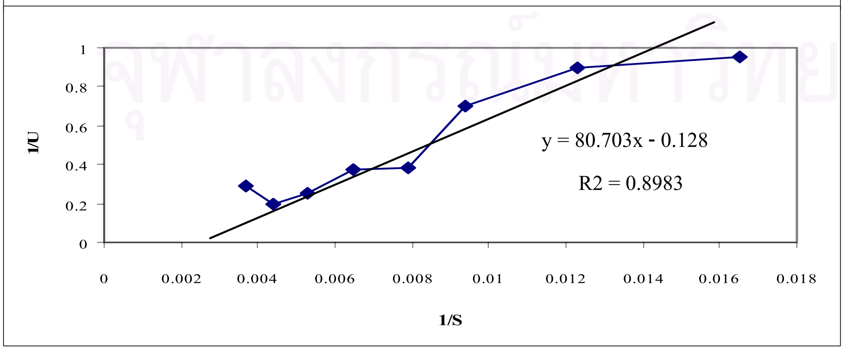
ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l



ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l

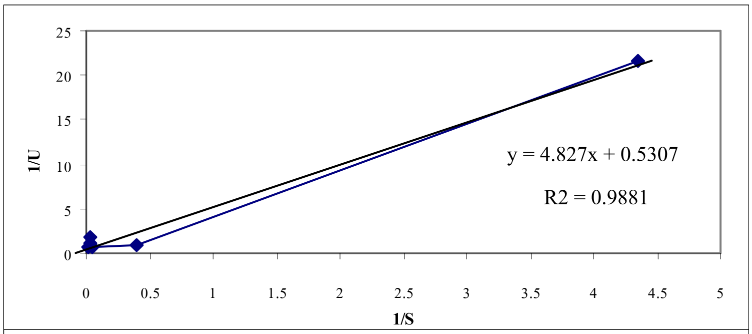


ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l

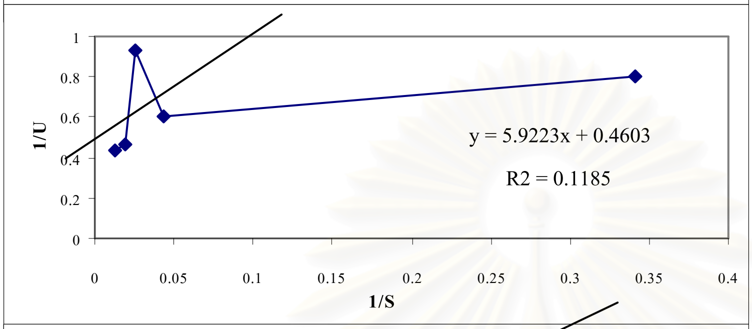


ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

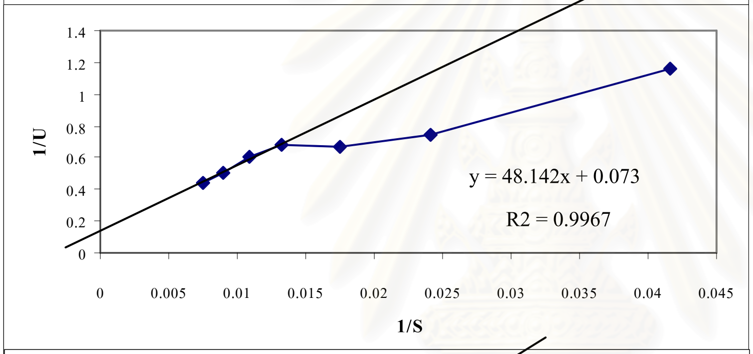
กราฟแสดงไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน



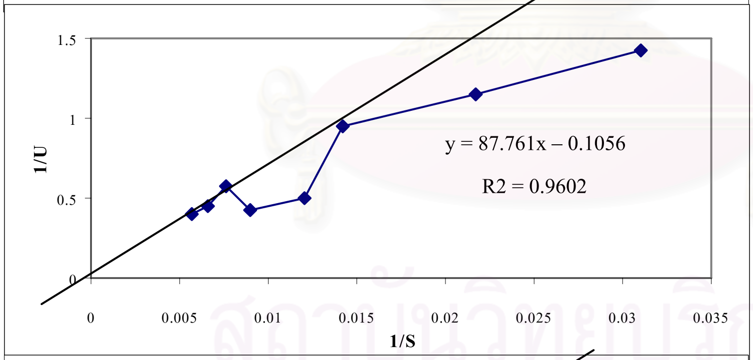
ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l



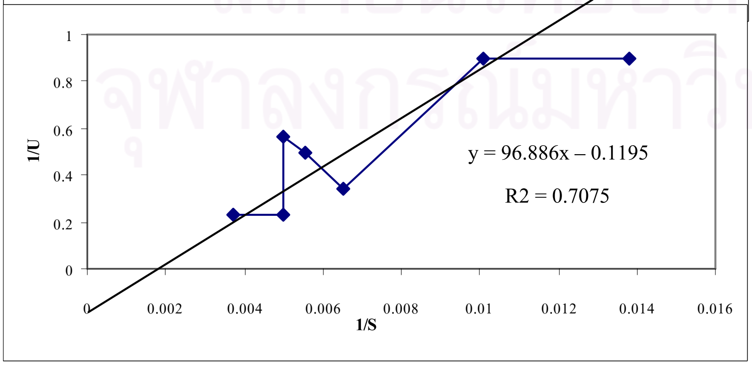
ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l



ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l



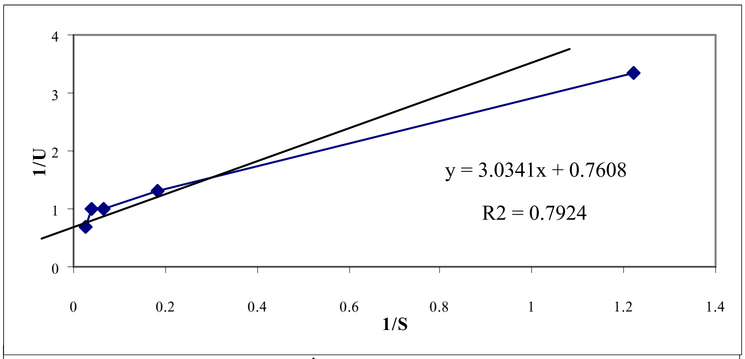
ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l



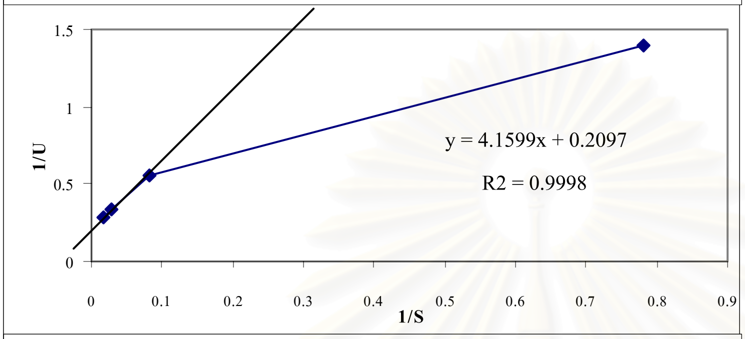
ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

กราฟแสดงไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำผลไม้กระป๋องเป็นแหล่งคาร์บอน

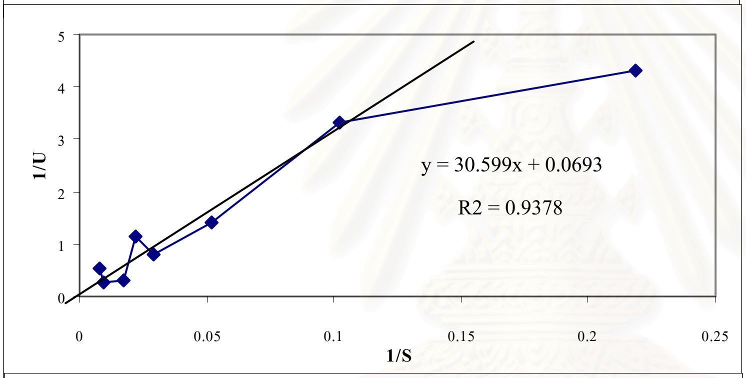
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



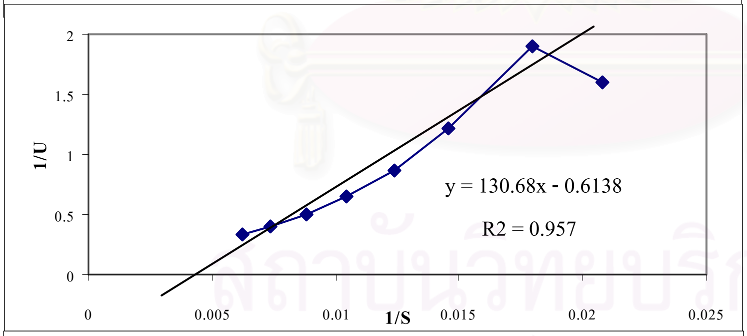
ไนเตรทเริ่มต้น 50 mg/l



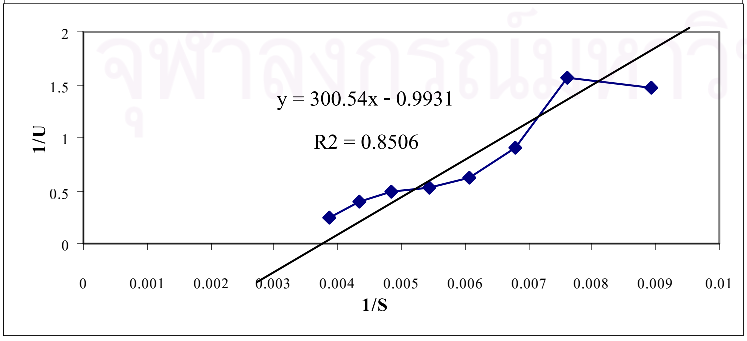
ไนเตรทเริ่มต้น 100 mg/l



ไนเตรทเริ่มต้น 150 mg/l



ไนเตรทเริ่มต้น 200 mg/l



ไนเตรทเริ่มต้น 300 mg/l

กราฟแสดงไคเนติกส์ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอน

ภาคผนวก ญ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลทางสถิติของการเปรียบเทียบปริมาณไนเตรทที่ลดได้โดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	N	Mean	Std. Deviation	Std.Error	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound	Minimun	Maximum
โซเดียมอะซิเตท	50 (mg/l)	9	50.5478	0.3844	0.1281	49.9965	51.5813	50.00	51.03
	100 (mg/l)	9	100.6589	0.2379	0.0793	100.3176	101.2112	100.13	100.87
	150 (mg/l)	9	150.4200	0.3576	0.1192	149.9071	151.4229	150.01	150.91
	200 (mg/l)	9	199.1200	2.4280	0.8093	195.6377	204.5623	194.53	201.08
	300 (mg/l)	9	258.1667	11.0857	3.6950	242.2684	589.6583	244.54	273.76
น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 (mg/l)	9	51.2444	0.9315	0.3105	49.9084	54.4360	50.00	53.10
	100 (mg/l)	9	100.6233	0.2474	0.0825	100.2685	101.4348	100.31	101.08
	150 (mg/l)	9	146.6311	3.7264	1.2421	141.2868	153.1744	140.77	150.83
	200 (mg/l)	9	184.6756	5.3010	1.7670	177.0728	204.8627	179.88	197.26
	300 (mg/l)	9	250.5478	7.6569	2.5523	239.5662	271.6416	237.35	260.66
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 (mg/l)	9	51.6889	1.1555	0.3852	50.0317	55.1372	50.49	53.48
	100 (mg/l)	9	102.6511	1.9549	0.6516	99.8474	109.6437	100.02	106.84
	150 (mg/l)	9	151.0700	2.1919	0.7306	147.9264	156.9136	146.65	153.77
	200 (mg/l)	9	167.3911	9.3184	3.1061	154.0266	193.3645	150.33	180.00
	300 (mg/l)	9	199.6478	10.3566	3.4522	184.7944	284.9134	180.61	210.06

ตารางแสดงข้อมูลทางสถิติของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดไนเตรทโดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	N	Mean	Std. Deviation	Std.Error	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound	Minimun	Maximum
โซเดียมอะซิเตท	50 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	100 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	150 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	200 (mg/l)	9	99.3000	1.0968	0.3656	97.7270	101.5730	97.23	100.00
	300 (mg/l)	9	85.6611	3.9206	1.3069	80.0382	96.7430	80.33	91.12
น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	100 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	150 (mg/l)	9	97.2067	2.5104	0.8368	93.6062	103.6004	93.42	100
	200 (mg/l)	9	91.8011	2.6759	0.8920	87.9633	101.9578	89.28	98.12
	300 (mg/l)	9	83.1456	2.5859	0.8620	79.4368	90.4387	78.82	86.73
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	100 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	150 (mg/l)	9	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	100.00	100.00
	200 (mg/l)	9	81.7656	4.0244	1.3415	75.9937	93.4219	74.85	87.65
	300 (mg/l)	9	65.5189	3.1359	1.0453	61.0213	72.8576	59.97	68.36

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลทางสถิติของการเปรียบเทียบค่า NUR โดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	N	Mean	Std. Deviation	Std.Error	95% Confidence Interval		Minimun	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
โซเดียมอะซิเตท	50 (mg/l)	9	64.1256	6.3769	2.1256	54.9798	85.0658	60.24	75.92
	100 (mg/l)	9	114.4022	10.2930	3.4310	99.6399	136.2923	100.59	121.53
	150 (mg/l)	9	93.4278	11.9298	3.9766	76.3181	129.9697	75.00	112.86
	200 (mg/l)	9	110.5678	11.3304	3.7768	94.3178	136.5300	97.26	120.28
	300 (mg/l)	9	129.0844	5.5396	1.8465	121.1395	144.8249	122.27	136.88
น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 (mg/l)	9	53.2722	7.2425	2.4142	42.8851	73.0371	39.92	62.65
	100 (mg/l)	9	105.1956	8.9746	2.9915	92.3242	134.0513	100.35	121.18
	150 (mg/l)	9	74.9667	5.8976	1.9657	66.5084	98.4583	70.38	90.00
	200 (mg/l)	9	92.3389	2.6500	0.8833	88.5383	102.4306	89.94	98.63
	300 (mg/l)	9	125.2744	3.8268	1.2756	119.7860	135.8184	118.68	130.33
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 (mg/l)	9	61.6767	8.5481	2.8494	49.4170	92.0797	50.49	79.82
	100 (mg/l)	9	145.7244	25.9656	8.6552	108.4846	241.7998	121.82	204.56
	150 (mg/l)	9	75.5339	1.0977	0.3659	73.9596	78.4543	73.32	76.88
	200 (mg/l)	9	83.4533	4.7813	1.5938	76.5960	96.8574	75.16	90.00
	300 (mg/l)	9	105.1933	18.4873	6.1624	78.6788	179.2545	90.13	152.74

ตารางแสดงข้อมูลทางสถิติของการเปรียบเทียบค่า SNUR โดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	N	Mean	Std. Deviation	Std.Error	95% Confidence Interval		Minimun	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
โซเดียมอะซิเตท	50 (mg/l)	9	31.8178	3.5347	1.1782	26.7484	43.4194	28.60	38.35
	100 (mg/l)	9	55.9500	5.1832	1.7277	48.5162	67.3638	48.59	59.93
	150 (mg/l)	9	45.4800	6.0771	2.0257	36.7642	64.3558	36.66	55.64
	200 (mg/l)	9	53.5244	5.8051	1.9350	45.1988	69.6857	45.91	61.36
	300 (mg/l)	9	63.1578	2.4676	0.8225	59.6188	70.2890	59.61	66.75
น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 (mg/l)	9	25.8533	3.2588	1.0863	21.7950	34.5038	19.55	29.83
	100 (mg/l)	9	51.5256	4.4731	1.4910	45.1103	66.1253	47.79	59.71
	150 (mg/l)	9	36.6078	3.1325	1.0448	32.1151	48.7827	33.81	44.29
	200 (mg/l)	9	44.1267	1.1811	0.3937	42.4329	48.4339	42.88	46.74
	300 (mg/l)	9	60.6400	1.3447	0.4482	58.7114	64.4086	58.34	62.48
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 (mg/l)	9	30.5856	4.5617	1.5206	24.0431	47.2224	24.48	40.68
	100 (mg/l)	9	71.2122	11.3681	3.7894	54.9081	111.8041	59.78	95.50
	150 (mg/l)	9	37.2500	1.6150	0.5383	34.9337	41.7563	34.46	39.44
	200 (mg/l)	9	41.5567	2.4551	0.8183	38.0356	50.0111	39.14	46.49
	300 (mg/l)	9	51.8911	8.8917	2.9639	39.1386	87.2625	44.31	74.51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลทางสถิติของการเปรียบเทียบอัตราการลดไนเตรทโดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด

แหล่งคาร์บอน	ไนเตรทเริ่มต้น	N	Mean	Std .Deviation	Std.Error	95% Confidence Interval		Minimun	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
โซเดียมอะซิเตท	50 (mg/l)	9	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.00	1.00
	100 (mg/l)	9	1.9822	0.0396	0.0132	1.9254	2.0568	1.88	2.00
	150 (mg/l)	9	2.4967	0.1964	0.0655	2.2150	2.8917	1.99	2.61
	200 (mg/l)	9	2.9644	0.0846	0.0282	2.8431	3.1413	2.75	3.02
	300 (mg/l)	9	3.4922	0.4573	0.1524	2.8363	4.9159	2.82	4.26
น้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้กระป๋อง	50 (mg/l)	9	0.9667	0.0787	0.0262	0.8537	1.1129	0.76	1.00
	100 (mg/l)	9	1.9533	0.0480	0.0160	1.8845	2.0788	1.86	2.01
	150 (mg/l)	9	1.8767	0.1179	0.0393	1.7076	2.1891	1.66	2.02
	200 (mg/l)	9	2.3633	0.2211	0.0737	2.0463	3.2571	2.18	2.94
	300 (mg/l)	9	2.9678	0.2511	0.0837	2.6076	3.6802	2.59	3.32
น้ำเสียจากกระบวนการไบโอดีเซล	50 (mg/l)	9	0.9922	0.0233	0.0078	0.9588	1.0335	0.93	1.00
	100 (mg/l)	9	2.0000	0.0000	0.0000	2.0000	2.0000	2.00	2.00
	150 (mg/l)	9	2.3289	0.1003	0.0334	2.1850	2.6738	2.22	2.53
	200 (mg/l)	9	2.3844	0.2562	0.0854	2.0170	3.2075	2.02	2.84
	300 (mg/l)	9	2.8011	0.3142	0.1047	2.3504	3.9106	2.46	3.46

ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ของปริมาณไนเตรทที่ลดได้โดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด และความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

แหล่งของความผันแปร	SS	df	MS	F	F_{CV} (P<0.05)
A (ไนเตรทเริ่มต้น)	9687.72	4	2421.93	579.41	2.45
B (แหล่งคาร์บอน)	1321.22	2	660.61	158.04	3.07
AB (ปฏิสัมพันธ์)	2287.01	8	285.88	68.39	2.02
W (ภายในเซล)	502.31	120	4.18		
รวม	13798.26	134			

ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ของปริมาณไนเตรทที่ลดได้โดยแหล่งคาร์บอน 3 ชนิด และความเข้มข้นไนเตรทเริ่มต้นต่าง ๆ

แหล่งของความผันแปร	SS	df	MS	F	F_{CV} (P<0.05)
A (ไนเตรทเริ่มต้น)	66.82	4	16.70	334	2.45
B (แหล่งคาร์บอน)	4.17	2	2.08	41.6	3.07
AB (ปฏิสัมพันธ์)	2.11	8	0.26	5.2	2.02
W (ภายในเซล)	5.68	120	0.05		
รวม	78.79	734			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – สกุล นางสาวสุนทรี อยู่สถาน

วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤษภาคม 2526

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนสตรีนนทบุรี พ.ศ. 2544

ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2548

ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย