

การกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ  
ร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน



นาย ฐัฐพันธ์ กลิ่นเกษร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1770-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COD NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL USING BNR AND  
MICROFILTRATION PROCESSES



Mister Nuttapun Klinkaysorn

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1770-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ  
ร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน  
โดย นาย ธีรพันธ์ กลิ่นเกษร  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง ไส่ห้วงศ์วัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

ณัฐพันธ์ กลิ่นเกษร : การกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการทางชีวภาพร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน.(COD NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL USING BNR AND MICROFILTRATION PROCESSES) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 257 หน้า. ISBN 974-17-1770-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ และกลไกในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพ แบบแอนน็อกซิก-แอนแอโรบิก-แอโรบิก หรือ Anoxic-anaerobic-aerobic membrane bioreactor (A<sup>3</sup>-MBR) ซึ่งพัฒนาขึ้นมาใหม่ที่ภาควิชา โดยคำนึงถึงผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจน และอายุสลัดจ์ที่มีต่อระบบ

ในงานวิจัยแบ่งออกเป็นการทดลองย่อย 3 การทดลอง ซึ่งการทดลองที่ 1 ควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 25% ต่อ 75 % การทดลองที่ 2 ควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% ทั้งสองการทดลองควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน และการทดลองที่ 3 ควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% โดยควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 80 วัน

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีอัตราการป้อนน้ำเสียเฉลี่ย 96 ลิตรต่อวัน มีค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 325 มก./ล. ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 7.9 มก./ล. และค่าไนโตรเจน (ในรูปของที่เคเอ็น) ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 35.8 มก./ล. ผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของการทดลองพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดตั้งนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า 97% ประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นสูงกว่า 95% ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่า 93% และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า 80%

จากการทดลองพบว่าอัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เนื่องจากไนเตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนของระบบมีค่าต่ำ เพราะเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Simultaneous Nitrification Denitrification) ที่ส่วนเติมออกซิเจน และค่าอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสลดลง เนื่องจากปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 8.4% ที่อายุสลัดจ์ 40 วันเป็น 10.7% ที่อายุสลัดจ์ 80 วัน และอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคฟล็อกในระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีมากขึ้นด้วย

จากการวิเคราะห์ชุมชนแบคทีเรียด้วยเทคนิคพีชพบว่า เบต้าซับคลาสโพรทีโอแบคทีเรีย (beta subclass proteobacteria) เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบ ค่าฟลักซ์เฉลี่ยของแผ่นเยื่อตลอดการทดลองเท่ากับ 13.5 ลิตร/ตร.ม.-ชม. โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเท่ากับ 171 บาท/ลบ.ม.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม .....  
ปีการศึกษา ..... 2545 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

##4270322921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : A<sup>3</sup>-MBR/ BIOLOGICAL NUTRIENT REMOVAL/ MICROFILTRATION  
PROCESS/ SIMULTANEOUS NITRIFICATION DENITRIFICATION

NUTTAPUN KLINKAYSORN : COD NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL USING  
BNR AND MICROFILTRATION PROCESSES.

THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 257 pp.

ISBN 974-17-1770-9

This research was a study on the efficiencies and mechanisms of Anoxic-Anaerobic-Aerobic Membrane Bioreactor (A<sup>3</sup>-MBR) which has been newly developed for removal of COD, nitrogen and phosphorus in wastewater. The research examined the effects of the flowrate distribution ratio to anoxic per anaerobic compartments and sludge age on the system performance.

The research was divided into 3 experiments. The first experiment controlled the flowrate distribution ratio of wastewater to anoxic part at a rate of 25% per 75% of the anaerobic part. The second experiment controlled the flowrate distribution ratio of wastewater to the anoxic part at a rate of 75% per 25% of the anaerobic part. Both experiments kept sludge age at 40 days. The third experiment maintained the same flowrate distribution ratio as in the second experiment, but increasing sludge age to 80 days.

The wastewater used in the research was synthetic wastewater. On average, the feed flowrate was 96 litre per day. The synthetic wastewater had 325 mg.COD/l., 7.9 mg.P/l. and 35.8 mg.TKN/l. From the results obtained at steady state condition, it was found that the system performance in terms of COD, TKN, TN and phosphorus removal was higher than 97%, 95%, 93%, and 80%, respectively.

The experiments indicated that the flowrate distribution ratio yielded insignificant effects on COD, nitrogen and phosphorus removal. The increasing of sludge age did not decrease the phosphorus removal efficiency since the phosphorus content in cells rose from 8.4% at the sludge age of 40 days to 10.7% at the sludge age of 80 days. Furthermore, the older the sludge age, the larger the floc size in the system. This led to the increase in total nitrogen removal due to simultaneous nitrification denitrification (SND) reaction.

The analysis of bacterial community by FISH technique, beta subclass proteobacteria was found to be the dominant bacteria in the system. The average membrane flux throughout the experiments was 13.5 litre/m<sup>2</sup>.-hr., and the cost for wastewater treatment using A<sup>3</sup>-MBR was approximately 171 baht/m<sup>3</sup>.

Department of Environmental Engineering..... Student's signature .....

Field of study in Environmental Engineering..... Advisor's signature .....

Academic year 2002

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่มีประโยชน์แก่งานวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์ และรองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและชี้แจงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัย จนสามารถดำเนินการให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) กองทุนเพื่อการศึกษา มูลนิธิชิน โสภณพนิช และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเห็นคุณค่าและสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.สมเกียรติ เตชกาญจนารักษ์ คุณวิวัฒน์ จูประพัทธ์ศรี และคุณนิมารตี บุญอาพัทธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งให้ความรู้ความเข้าใจที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพีช ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้สึกตื่นตัวกับการเรียนรู้สิ่งใหม่ๆ อีกครั้งหนึ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ตลอดเวลาที่ผู้วิจัยได้เรียนอยู่ที่ภาคได้รับความรู้สึกดี ๆ เสมอมา อาจจะมีบ้างที่ไม่เข้าใจกัน แต่สุดท้ายพวกเรา ก็เป็นเพื่อนกันและพร้อมจะช่วยเหลือกันให้กำลังใจแก่กันเพื่อจะก้าวต่อไป

ขอขอบคุณมิ่งขวัญ กำลังใจของเธอในระหว่างที่ผู้วิจัยได้เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้ผู้วิจัยมีเรี่ยวแรงที่จะฝ่าฟันกับแต่ละวันอย่างเต็มเปี่ยม

ประโยชน์ซึ่งจะได้รับจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยขออุทิศให้แก่ ทาธรรม สมฤทธิ์ ตาของผู้วิจัย ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถจะทำอะไรเพื่อท่านได้อีกแล้ว ที่ท่านไม่เคยสิ้นหวังกับหลานคนนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ-แม่ ที่ให้การสนับสนุนการตัดสินใจของลูกในเรื่องต่างๆ อย่างเข้าใจและเอาใจใส่เสมอมา ซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งของผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

## คำอธิบายคำย่อ

- AOB เอโอบี : ย่อมาจาก ammonia oxidizing bacteria หมายถึงกลุ่มแบคทีเรีย ซึ่งสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียในโตรเจน ให้เปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจน
- BNR บีเอ็นอาร์ : ย่อมาจาก biological nutrient removal หมายถึงการกำจัดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งมีทั้งสภาวะแอนน็อกซิก สภาวะไร้ออกซิเจน และสภาวะเติมออกซิเจน
- EBPR อีบีพีอาร์ : ย่อมาจาก enhanced biological phosphorus removal หมายถึงการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพอย่างเพิ่มพูน การทำงานของระบบต้องมีสภาวะไร้ออกซิเจน สลับกับสภาวะเติมออกซิเจน
- FISH ฟิช : ย่อมาจาก fluorescent *in situ* hybridization หมายถึงเทคนิคระดับโมเลกุล ที่ใช้ในการบ่งชนิดของแบคทีเรีย หรือกลุ่มของแบคทีเรีย ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก ข
- GAO จีเอโอ : ย่อมาจาก glycogen accumulating organisms หมายถึงกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพอย่างเพิ่มพูน แต่ไม่สามารถสะสมและจับใช้ฟอสเฟตได้เช่นพีเอโอ จึงไม่ส่วนในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพอย่างเพิ่มพูน
- NOB เอ็นโอบี : ย่อมาจาก nitrite oxidizing bacteria หมายถึงกลุ่มแบคทีเรีย ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ไนโตรเจนให้เปลี่ยนไปเป็นไนเตรต
- PAO พีเอโอ : ย่อมาจาก phosphorus accumulating organisms หมายถึงกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน พีเอโอจะคายฟอสฟอรัสออกจากเซลล์ที่สภาวะไร้ออกซิเจน และจับใช้ฟอสฟอรัสเพื่อนำเข้าไปสะสมไว้ในเซลล์ ที่สภาวะเติมออกซิเจน พีเอโอจึงมีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์มากกว่าสิ่งมีชีวิตอื่นๆในระบบ
- PHA พีเอชเอ : ย่อมาจาก polyhydroxyalkanoate คือโพลีเมอร์ของคาร์บอนที่สิ่งมีชีวิตในระบบบำบัดน้ำเสียใช้สะสมเป็นแหล่งพลังงานรูปแบบหนึ่ง มีพีเอชบีและพีเอชวีเป็นองค์ประกอบ
- SDNR เอสดีเอ็นอาร์ : ย่อมาจาก specific denitrification rate หมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก ข
- SND เอสเอ็นดี : ย่อมาจาก simultaneous nitrification denitrification หมายถึงปฏิกิริยาซึ่งเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน พร้อมกันกับการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะได้แก่ ทางกายภาพและทางชีวภาพ รายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 2.6
- SNR เอสเอ็นอาร์ : ย่อมาจาก specific nitrification rate หมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก จ

SOUR เอสโอยูอาร์ : ย่อมาจาก specific oxygen uptake rate หมายถึงอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก ญ

SPRR เอสพีอาร์อาร์ : ย่อมาจาก specific phosphorus release rate หมายถึงอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก ซ

SPUR เอสพีอาร์อาร์ : ย่อมาจาก specific phosphorus uptake rate หมายถึงอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ที่ได้เรียบเรียงไว้ในภาคผนวก ฅ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
คำอธิบายคำย่อ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 ผลกระทบของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม.....	4
2.2 การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ.....	5
2.2.1 ปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน.....	5
2.2.2 ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน.....	6
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน.....	8
2.2.3.1 อุณหภูมิ.....	8
2.2.3.2 ออกซิเจนละลาย.....	9
2.2.3.3 พีเอช.....	10
2.2.3.4 สารยับยั้งปฏิกริยา.....	10
2.2.4 ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน.....	11
2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน.....	13
2.2.5.1 ชนิดของแหล่งคาร์บอน หรือตัวให้อิเล็กตรอน.....	13
2.2.5.2 อุณหภูมิ.....	14
2.2.5.3 ออกซิเจนละลาย.....	14
2.2.5.4 พีเอช.....	15
2.2.5.5 ธาตุอื่นๆ.....	15
2.2.6 ปฏิกริยาเอสเอ็นดี.....	16
2.3 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	18
2.3.1 กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	18
2.3.2 กลุ่มจุลชีพที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัส.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 จุลชีพที่รบกวนระบบอิมูโนวิทยา.....	23
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส.....	24
2.3.4.1 ชนิดของแหล่งคาร์บอน .....	24
2.3.4.2 อุณหภูมิ.....	25
2.3.4.3 พีเอช .....	27
2.3.4.4 ไนเตรต .....	28
2.3.4.5 เวลาเก็บกักของสภาวะไร้ออกซิเจน .....	30
2.3.4.6 ประจุบวก .....	31
2.4 การกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสทางชีวภาพ .....	31
2.4.1 รูปแบบกระบวนการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทางชีวภาพ .....	32
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน .....	36
2.4.2.1 อายุสัณฐาน .....	36
2.4.2.2 อัตราส่วนสารอินทรีย์ต่อไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัส.....	37
2.4.2.3 ปัจจัยอื่นๆ .....	39
2.5 แผ่นเยื่อสำหรับการบำบัดน้ำเสีย .....	40
2.5.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน .....	41
2.5.1.1 ลักษณะการกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน.....	41
2.5.1.2 ฟลักซ์ .....	41
2.5.1.3 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเจลโพลาไรเซชัน .....	42
2.5.2 ระบบเอ็มบีอาร์ .....	42
2.5.2.1 ชนิดของแผ่นเยื่อที่ใช้ในการบำบัด .....	42
2.5.2.2 จุดเด่นของกระบวนการ .....	43
2.5.2.3 จุดด้อยของกระบวนการ .....	45
2.5.3 การอุดตันของแผ่นเยื่อ .....	45
2.5.3.1 ทฤษฎีการอุดตันของแผ่นเยื่อ .....	45
2.5.3.2 เทคนิคในการลดการอุดตันของแผ่นเยื่อ .....	47
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	48
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย .....	52
3.1 แผนการทดลอง .....	52
3.2 แนวคิดของระบบ .....	53
3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง .....	54
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ .....	63
3.6 การดูแลรักษาระบบ .....	65
3.7 การควบคุมระบบ .....	66
3.7.1 การควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบ .....	66
3.7.2 การควบคุมการแบ่งน้ำเสีย .....	67
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>69</b>
4.1 ผลการดำเนินงานวิจัย .....	69
4.2 ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ .....	71
4.2.1 พีเอช และสภาพต่าง .....	71
4.2.2 อุณหภูมิ .....	75
4.2.3 ออกซิเจนละลาย .....	77
4.2.4 ของแข็งแขวนลอย .....	79
4.2.5 เอสวีไอ .....	79
4.3 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบ .....	81
4.4 การกำจัดซีโอดีของระบบ .....	89
4.5 การกำจัดไนโตรเจนของระบบ .....	91
4.6 การกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ .....	97
4.7 ผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัด .....	100
4.7.1 ผลของการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดซีโอดี .....	102
4.7.2 ผลของการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดไนโตรเจน .....	104
4.7.3 ผลของการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดฟอสฟอรัส .....	108
4.8 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัด .....	110
4.7.1 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดซีโอดี .....	110
4.7.2 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดไนโตรเจน .....	111
4.7.3 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดฟอสฟอรัส .....	118
4.9 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในฟล็อก .....	120
4.10 ชุมชนของแบคทีเรียในระบบ .....	125
4.10.1 ชุมชนแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจน .....	126
4.10.1 ชุมชนแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัส .....	132
4.10.1 ชุมชนแบคทีเรียแบบเส้นใย .....	132
4.10.1 การปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะด้วยวิธีพีช .....	132
4.11 การดำเนินการและควบคุมระบบ .....	135
4.12 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบกับระบบบำบัดที่มีอยู่ .....	139

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	143
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	143
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	145
รายการอ้างอิง .....	146
ภาคผนวก .....	153
ภาคผนวก ก ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย .....	154
ภาคผนวก ข การบ่งบอกชนิดของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการพีช .....	210
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่ายิลด์และอัตราการสลายตัวของระบบ .....	215
ภาคผนวก ง สมดุลมวลของพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ .....	218
ภาคผนวก จ การคำนวณหาอัตราส่วนแอนนอนอกซิกต่อแอโรบิกของเอสเอ็นดี .....	223
ภาคผนวก ฉ การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ .....	226
ภาคผนวก ช การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ .....	230
ภาคผนวก ซ การหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ .....	234
ภาคผนวก ฌ การหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ .....	238
ภาคผนวก ญ การหาอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ .....	242
ภาคผนวก ฎ แผนภูมิการกระจายของขนาดอนุภาคในระบบ .....	248
ภาคผนวก ฏ การล้างแผ่นเยื่อด้วยสารเคมี .....	255
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	257

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ค่าภาระไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสำหรับทะเลสาบ .....	5
ตารางที่ 2-2 Ammonia Oxidizing Bacteria .....	7
ตารางที่ 2-3 Nitrite Oxidizing Bacteria .....	8
ตารางที่ 2-4 ความเข้มข้นและผลของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อปฏิกิริยาไนตริไฟเออร์ .....	11
ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน .....	12
ตารางที่ 2-6 ชนิดของแหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน .....	13
ตารางที่ 2-7 รูปแบบของฟอสฟอรัส .....	18
ตารางที่ 2-8 การตรวจวัดปริมาณของ <i>Acinetobacter</i> ในระบบอีบีพีอาร์ด้วยวิธีการต่าง ๆ .....	22
ตารางที่ 2-9 สาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้จีเอโอเกิดขึ้นในกระบวนการอีบีพีอาร์ .....	23
ตารางที่ 2-10 เปรียบเทียบเมตาบอลิซึมของพีเอโอ และจีเอโอ .....	24
ตารางที่ 2-11 ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่มีผลต่ออัตราการกำจัดฟอสฟอรัส .....	25
ตารางที่ 2-12 ผลของการลดอุณหภูมิที่ต่อระบบอีบีพีอาร์ .....	27
ตารางที่ 2-13 พฤติกรรมของ <i>non-DPB</i> และ <i>DPB</i> .....	29
ตารางที่ 2-14 รวบรวมอัตราส่วนประจุบวกต่อฟอสฟอรัส .....	31
ตารางที่ 2-15 สภาวะต่าง ๆ ที่ผลต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส .....	32
ตารางที่ 2-16 อัตราส่วนสารอินทรีย์ต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม .....	38
ตารางที่ 2-17 อัตราส่วนสารอินทรีย์ต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด .....	39
ตารางที่ 2-18 ผลของการกำจัดคอปรีฟอร์มทั้งหมดด้วยระบบเอ็มบีอาร์ .....	44
ตารางที่ 2-19 สภาวะการเดินระบบสำหรับการทดลองของ Seo และคณะ .....	49
ตารางที่ 2-20 สภาวะการเดินระบบสำหรับการทดลองของ Yoon และคณะ .....	51
ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการทดลอง .....	52
ตารางที่ 3-2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำเสีย .....	55
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของโพรบที่ใช้ในการทดลอง .....	63
ตารางที่ 3-4 จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง .....	64
ตารางที่ 3-5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ .....	65
ตารางที่ 3-6 การควบคุมมวลสำหรับแบ่งน้ำเสียเข้าระบบ .....	66
ตารางที่ 3-7 อายุสัปดาห์กับอัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน .....	68
ตารางที่ 4-1 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง .....	71
ตารางที่ 4-2 ค่าพีเอชในส่วนต่าง ๆ ของทุกการทดลอง .....	72
ตารางที่ 4-3 ค่าสภาพต่างในส่วนต่าง ๆ ของทุกการทดลอง .....	72
ตารางที่ 4-4 ค่าอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของทุกการทดลอง .....	75
ตารางที่ 4-5 ค่าออกซิเจนละลายในส่วนต่าง ๆ ของทุกการทดลอง .....	77
ตารางที่ 4-6 ค่าของแข็งแขวนลอยของทุกการทดลอง .....	79
ตารางที่ 4-7 ค่าเอสวี 30 และ เอสวีไอของส่วนเติมออกซิเจน .....	72

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4-8 ค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอสที่สภาวะคงตัว .....	84
ตารางที่ 4-9 ค่าซีไอดีจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	89
ตารางที่ 4-10 ค่าทีเคเอ็นจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	91
ตารางที่ 4-11 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	93
ตารางที่ 4-12 ค่าไนไตรต์จากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	94
ตารางที่ 4-13 ค่าไนเตรตจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	95
ตารางที่ 4-14 ค่าฟอสฟอรัสจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	97
ตารางที่ 4-15 อัตราส่วนซีไอดีที่ถูกใช้ต่อฟอสฟอรัสที่กำจัด .....	99
ตารางที่ 4-16 การทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบส่วนแอนนอกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน .....	101
ตารางที่ 4-17 การทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับ 2 .....	102
ตารางที่ 4-18 การทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับ 3 .....	110
ตารางที่ 4-19 การคำนวณตามสมการสตอยชิโอเมตริก .....	113
ตารางที่ 4-20 เปรียบเทียบความลึกของออกซิเจนที่ซึมเข้าฟล็อก .....	122
ตารางที่ 4-21 อัตราส่วนส่วนแอนนอกซิกและส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อกของ .....	123
ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ .....	123
ตารางที่ 4-23 เปรียบเทียบความลึกของไนเตรตที่ซึมเข้าฟล็อก .....	124
ตารางที่ 4-24 โพรบที่ใช้ในการทดลอง และความจำเพาะต่อแบคทีเรีย .....	125
ตารางที่ 4-25 การปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะต่าง ๆ ด้วยวิธีพีช .....	135
ตารางที่ 4-26 การดำเนินการเพื่อควบคุมพลักซ์ของระบบในแต่ละการทดลอง .....	136
ตารางที่ 4-27 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดของระบบ .....	139
ตารางที่ 4-28 ขั้นตอนการคำนวณ และผลการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่าย .....	141

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน .....	9
รูปที่ 2-2 ผลของพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน .....	10
รูปที่ 2-3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จากแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ .....	14
รูปที่ 2-4 ผลของพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน .....	16
รูปที่ 2-5 ลักษณะฟล็อกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี .....	17
รูปที่ 2-6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Orbal .....	17
รูปที่ 2-7 อีบีพีอาร์ตามแบบจำลองของ Comeau-Wentzel .....	20
รูปที่ 2-8 อีบีพีอาร์ตามแบบจำลองของ Mino .....	21
รูปที่ 2-9 ผลกระทบของอุณหภูมิและอายุสลัดจ์ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสในเซลล์ .....	26
รูปที่ 2-10 ผลของพีเอชที่มีต่ออีบีพีอาร์ .....	28
รูปที่ 2-11 ผลของสัดส่วนเวลาสัมผัสไร้ออกซิเจน ที่มีต่อค่าฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง .....	30
รูปที่ 2-12 กระบวนการ BARDENPHO .....	33
รูปที่ 2-13 กระบวนการ MODIFIED BARDENPHO .....	34
รูปที่ 2-14 กระบวนการ 3 STAGE PHOREDOX .....	34
รูปที่ 2-15 กระบวนการ PHOREDOX .....	34
รูปที่ 2-16 กระบวนการ JOHANNESBERG .....	35
รูปที่ 2-17 กระบวนการ UCT .....	35
รูปที่ 2-18 กระบวนการ MUCT .....	35
รูปที่ 2-19 กระบวนการ VIP .....	36
รูปที่ 2-20 กระบวนการ SBR .....	36
รูปที่ 2-21 ชนิดของแผ่นเยื่อแยกตามขนาด .....	40
รูปที่ 2-22 การกรองแบบไหลผ่านเยื่อ และแบบไหลขนานเยื่อ .....	41
รูปที่ 2-23 ชนิดแผ่นเยื่อแยกตามลักษณะ .....	43
รูปที่ 2-24 ลักษณะการอุดตันในแผ่นเยื่อ .....	46
รูปที่ 2-25 การล้างย้อนแผ่นเยื่อ .....	47
รูปที่ 2-26 การทดลองของ Ueda และ Hata .....	49
รูปที่ 2-27 การทดลองของ Seo และคณะ .....	50
รูปที่ 2-28 การทดลองของ Yoon และคณะ .....	51
รูปที่ 3-1 ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	56
รูปที่ 3-2 ทิศทางการไหลและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ .....	57
รูปที่ 3-3 กล้องแบ่งน้ำเสีย .....	59
รูปที่ 3-4 แผ่นเยื่อที่ใช้ในการทดลอง .....	59
รูปที่ 3-5 ถังเก็บน้ำเสียและถังรองรับน้ำทิ้ง .....	61
รูปที่ 3-6 แผงควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า .....	62

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-7 อุปกรณ์แบ่งน้ำเสียและวาล์วที่ใช้ในการควบคุม .....	67
รูปที่ 4-1 ค่าพีเอชตลอดทั้งการทดลอง .....	73
รูปที่ 4-2 ค่าสภาพต่างตลอดทั้งการทดลอง .....	74
รูปที่ 4-3 อุณหภูมิตลอดทั้งการทดลอง .....	76
รูปที่ 4-4 ออกซิเจนละลายตลอดทั้งการทดลอง .....	78
รูปที่ 4-5 ค่าของแข็งแขวนลอยตลอดทั้งการทดลอง .....	80
รูปที่ 4-6 เอสวี 30 และเอสวีไอตลอดทั้งการทดลอง .....	82
รูปที่ 4-7 การวิเคราะห์ชนิดของแบคทีเรียแบบเส้นใยด้วยวิธีพีช .....	83
รูปที่ 4-8 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 1 .....	85
รูปที่ 4-9 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 2 .....	86
รูปที่ 4-10 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 3 .....	87
รูปที่ 4-11 ค่า MLSS และ MLVSS ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	88
รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละการทดลอง .....	88
รูปที่ 4-13 ค่าซีไอดีจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	90
รูปที่ 4-14 ค่าทีเคเอ็นจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	92
รูปที่ 4-15 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	93
รูปที่ 4-16 ค่าไนไตรต์จากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	94
รูปที่ 4-17 ค่าไนเตรตจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	96
รูปที่ 4-18 ค่าฟอสฟอรัสจากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง .....	98
รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อซีไอดี .....	103
รูปที่ 4-20 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อทีเคเอ็น .....	105
รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อไนไตรต์ .....	106
รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อไนเตรต .....	107
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อฟอสฟอรัส .....	109
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ของอัตราการจับใช้สารอาหารจำเพาะกับอายุสลัดจ์ .....	111
รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อซีไอดี .....	112
รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อทีเคเอ็น .....	114
รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อไนไตรต์ .....	115
รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อไนเตรต .....	116
รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของอายุสลัดจ์ที่ค่าต่าง ๆ .....	118
รูปที่ 4-30 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อฟอสฟอรัส .....	119
รูปที่ 4-31 สัดส่วนสภาวะแอนน็อกซิกต่อแอโรบิกในฟล็อก .....	122
รูปที่ 4-32 สัดส่วนสภาวะแอนน็อกซิกต่อแอนแอโรบิกในฟล็อก .....	125
รูปที่ 4-33 อัตราส่วนของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆในระบบ .....	126



## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-34 การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าซัคโลสด้วยวิธีพีช .....	127
รูปที่ 4-35 การวิเคราะห์ปริมาณแอลฟาซัคโลสด้วยวิธีพีช .....	128
รูปที่ 4-36 การวิเคราะห์ปริมาณแกมมาซัคโลสด้วยวิธีพีช .....	129
รูปที่ 4-37 การวิเคราะห์ปริมาณ AOB ด้วยวิธีพีช .....	130
รูปที่ 4-38 การวิเคราะห์ปริมาณ <i>Nitrobacter ssp.</i> ด้วยวิธีพีช .....	131
รูปที่ 4-39 การวิเคราะห์ปริมาณ <i>Pseudomonas ssp.</i> ด้วยวิธีพีช .....	133
รูปที่ 4-40 การวิเคราะห์ปริมาณพีเอโอด้วยวิธีพีช .....	134
รูปที่ 4-41 ค่าความดันลดผ่านแผ่นเยื่อ และค่าฟลักซ์ตลอดทั้งการทดลอง .....	137
รูปที่ 4-42 ค่าพลังงานที่ใช้ และค่าความต้านทานรวมตลอดทั้งการทดลอง .....	138



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ความสำคัญของธาตุอาหารโดยเฉพาะไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้นเป็นที่ทราบกันว่า ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการเติบโตของพืชน้ำที่มากเกินไป (Eutrofication) การใช้ออกซิเจนของจุลชีพในน้ำ ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง และความเป็นพิษของสารประกอบไนโตรเจนที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นระบบกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biological Nutrient Removal, BNR) ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

เนื่องจากในน้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบทั้งไนโตรเจน และฟอสฟอรัสอยู่ด้วยกัน ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงควรที่จะต้องมีศักยภาพในการลดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสพร้อมกัน ซึ่งโดยข้อเท็จจริงแล้ว เป็นเรื่องที่ยากในการควบคุมดูแลระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในสภาวะเต็มออกซิเจนของระบบ ทำให้เกิดไนเตรตขึ้น เมื่อเวียนสลัดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนมาส่วนแอนน็อกซิกหรือส่วนไร้ออกซิเจน ก็จะเป็นการเวียนไนเตรตมาด้วย ซึ่งไนเตรตที่เวียนมานี้ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบลดลง (Henze และคณะ , 1996)

ดังนั้นการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสที่ผ่านมา จึงมุ่งเน้นที่จะลดผลกระทบของไนเตรตที่มีต่อกลไกการกำจัดฟอสฟอรัส

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบเอ็มบีอาร์ (Membrane Bioreactor, MBR) ร่วมกับระบบบีเอ็นอาร์ ซึ่งส่งเสริมให้ระบบเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Simultaneous Nitrification Denitrification, SND) ที่สามารถกำจัดไนโตรเจนทุกรูปแบบได้ในสภาวะเต็มออกซิเจน ช่วยลดผลกระทบของไนเตรตที่มีต่ออัตราการคายฟอสฟอรัสในสภาวะไร้ออกซิเจน จึงทำให้การกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ด้วยแผ่นเยื่อที่มีขนาดรูพรุนเล็กมาก จึงสามารถรักษาค่าอายุสลัดจ์ของระบบไว้ได้สูง ทำให้จุลชีพที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด เช่น แบคทีเรียในกลุ่มไนตริไฟเออร์ พีเอโอ และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีถูกตัดพันธุ์อยู่ในระบบ ซึ่งความหลากหลายของจุลชีพในระบบนี้จะช่วยส่งเสริมการกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ร่วมกับแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันแบบจมตัวซึ่งเป็นระบบที่พัฒนาขึ้น โดยเรียกว่าระบบ  $A^3$ -MBR
2. ศึกษาผลของอัตราการแบ่งน้ำเสีย และอายุสลัดจ์ที่มีผลต่อกลไกการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบ
3. ศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ  $A^3$ -MBR เปรียบเทียบกับระบบเอส และระบบบำบัดน้ำเสียที่พัฒนาให้สามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลอง และติดตั้งแบบจำลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีค่าซีโอดีประมาณ 325 มก./ล. มีค่าที่เคเอ็นไนโตรเจนประมาณ 36 มก./ล. และมีค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดประมาณ 7.9 มก./ล. คิดเป็นค่า COD: N : P เท่ากับ 100 : 11 : 2.4

แบบจำลอง (Model) ที่สร้างขึ้นเป็น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 90 ลิตร แบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแอนน็อกซิก (Anoxic) ส่วนไร้ออกซิเจน (Anaerobic) และส่วนเติมออกซิเจน (Aerobic) โดยที่ส่วนเติมออกซิเจนมีการติดตั้งชุดแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) ขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร พื้นที่ผิว 0.3 ตารางเมตร ระบบมีการหมุนเวียนสลัดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนไปยังส่วนแอนน็อกซิก ด้วยอัตราคงที่ 5.0 ลิตรต่อชั่วโมง น้ำที่บำบัดแล้วในส่วนเติมออกซิเจนจะถูกดูดออกจากถังปฏิกรณ์โดยผ่านแผ่นเยื่อ ด้วยการกรองแบบไหลตามขวาง (Cross-Flow Filtration) ซึ่งเรียกระบบบำบัดที่พัฒนาขึ้นนี้ว่า “ Anoxic-anaerobic-aerobic Membrane Bioreactor ( $A^3$ -MBR)”

งานวิจัยแบ่งเป็น 3 ชุดการทดลองย่อย แต่ละชุดการทดลองแตกต่างกันที่ค่าอายุสลัดจ์ และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจน ในการทดลองที่ 1 กับ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่มีอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนที่ต่างกันเป็น 25 % : 75 % กับ 75 % : 25 % ตามลำดับ การควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสียนี้ควบคุมด้วยวาล์วและชุดแบ่งน้ำเสีย ในการทดลองที่ 2 กับ 3 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่มีค่าอายุสลัดจ์แตกต่างกันเป็น 40 กับ 80 วัน ตามลำดับ การควบคุมอายุสลัดจ์ควบคุมด้วยอัตราการทิ้งสลัดจ์

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาใช้อธิบายกลไกการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบ และชุมชนแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง ประกอบกับการประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ เพื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดอื่นๆ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

#### 2.1 ผลกระทบของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม

อัตราการเจริญเติบโตของพืชน้ำขึ้นอยู่กับ แสงแดด และธาตุอาหารต่างๆอีก 15 ชนิด ที่สำคัญได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน ฟอสฟอรัส และเหล็ก

ซึ่งคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนนั้นพืชน้ำสามารถจับใช้ได้จากในน้ำ ส่วนไนโตรเจน กำมะถัน ฟอสฟอรัส และเหล็กนั้นได้มาจากการสลายของหินหรือดินในน้ำ

นอกจากแหล่งธาตุอาหารจากธรรมชาติแล้ว แหล่งธาตุอาหารยังเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ที่สำคัญได้แก่ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ทิ้งลงแหล่งน้ำ ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีปริมาณมากเกินไปเกินความสามารถในการรองรับของแหล่งน้ำนี้ เป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำนานับประการ

เช่นปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่มีผลกระทบต่อแหล่งน้ำ เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ทิ้งลงไปแหล่งน้ำทำให้สาหร่าย และพืชน้ำอื่นๆเติบโตอย่างรวดเร็ว และเมื่อจำนวนสาหร่ายนี้มากขึ้นเรื่อยๆจนหนาแน่นจะเกิดการแย่งชิงอาหารกันขึ้น สาหร่ายบางส่วนที่ไม่สามารถแย่งชิงอาหารได้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตก็จะตายลง เกิดการย่อยสลายตัวเองซึ่งต้องใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำในการย่อยสลาย ทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เกิดผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต

นอกจากนี้ยังมีผลกระทบอื่นๆของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่มีต่อแหล่งน้ำ ได้แก่

- เกิดการแทนที่สาหร่ายชนิดอื่นๆ ด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ทำให้แพลงก์ตอนสัตว์ที่ใช้สาหร่ายชนิดอื่นๆ เป็นอาหารลดปริมาณลง นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มักผลิตสารไม่พึงปรารถนาในแหล่งน้ำ ได้แก่ สารที่ทำให้เกิดสี กลิ่น รส และสารพิษ
- สาหร่ายที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณผิวน้ำ ทำให้แสงแดดไม่สามารถส่องลงไปได้ถึงใต้น้ำ พืชใต้น้ำจึงสังเคราะห์แสงไม่ได้และตายลง

Sawyer (1974 อ้างโดย Porcella และ Bishop, 1975) รายงานว่าขีดจำกัดของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเท่ากับ 0.3 มก./ล. และ 0.01 มก./ล. ตามลำดับ

Vollenweider (1970 อ้างโดย Schnoor, 1996) ได้ใช้ค่าของ Sawyer ในการประมาณอัตราการรองรับปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของทะเลสาบดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่าภาระไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสำหรับทะเลสาบ (Schnoor, 1996)

Mean Depth (m)	Permissible Loading		Dangerous Loading	
	(g/m <sup>2</sup> of surface area/yr)		(g/m <sup>2</sup> of surface area/yr)	
	N	P	N	P
5	1.0	0.07	2.0	0.13
10	1.5	0.10	3.0	0.20
50	4.0	0.25	8.0	0.50
100	6.0	0.40	12.0	0.80
150	7.5	0.50	15.0	1.00
200	9.0	0.60	18.0	1.20

สรุปผล สายพานิช (2539) รายงานผลกระทบของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่มีต่อแหล่งน้ำได้แก่ แอมโมเนียในน้ำทิ้ง 30 มก./ล. จะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำเพื่อการย่อยสลาย 138 มก.ออกซิเจน/ล. และแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 1 มก./ล. นั้นยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำอีกด้วย ส่วนไนโตรเจนที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 3 มก./ล. จะเป็นพิษต่อปลา รวมทั้งไนเตรตที่ทำปฏิกิริยากับเอมีนจะทำให้เกิดสาร Nitrosamines ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง 1 กรัมจะทำให้พืชน้ำเติบโต 78.3 กรัม ซึ่งเมื่อพืชน้ำนี้ตายลงจะต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายเช่นกัน

## 2.2 การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจน จากที่เป็นสารละลายในน้ำเสีย ให้ไปอยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพนี้ได้แก่ ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน ปฏิกิริยานิไตรฟิเคชัน ปฏิกิริยาดีไนไตรฟิเคชัน และปฏิกิริยาเอสเอ็นดี

### 2.2.1 ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

เป็นปฏิกิริยาซึ่งเปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic Nitrogen) ให้เป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันนี้ จะถูกใช้โดยไนไตรฟิเคชันในปฏิกิริยานิไตรฟิเคชันต่อไป

ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณไนโตรเจนในสารอาหารและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารอาหาร ซึ่งอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส สำหรับการเจริญเติบโตของจุลชีพโดยทั่วไปคือ 100 : 5 : 1 ดังนั้นหากปริมาณไนโตรเจนในสารอาหารมี

ไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์เซลล์ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน แต่หากปริมาณไนโตรเจนมีสูงกว่าที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ ก็จะเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณแอมโมนีในระบบบมีสูงขึ้น (Grady และคณะ, 1999)

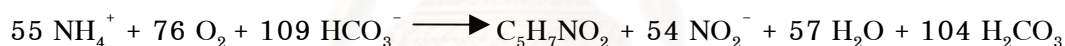
### 2.2.2 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นปฏิกิริยาซึ่งเปลี่ยนแอมโมนี ให้เป็นไนเตรตไนโตรเจน โดยมีไนไตรต์เป็นสารระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) แบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นแบคทีเรีย 2 กลุ่ม แต่เรียกรวมๆว่า “Nitrifiers” หรือ “Nitrifying Bacteria” ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียประเภทออโตโทรฟ ( Autotroph ) กล่าวคือจะใช้สารคาร์บอนอนินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไบคาร์บอเนต เป็นแหล่งคาร์บอน และได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยได้แก่

ก.) ปฏิกิริยาไนไตรเตชัน (Nitritation) เป็นการเปลี่ยนแอมโมนีไปเป็นไนไตรต์ แบคทีเรียที่รับผิดชอบปฏิกิริยาเรียกว่า “*Ammonia oxidizing bacteria, AOB*” มีคำนำหน้าชื่อว่า “Nitroso” ดังตารางที่ 2-2

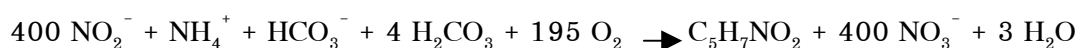
สมการปริมาณสมมูล (Stoichiometric Equation) โดย Halling-Sorensen และ Jorgensen (1993 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) มีดังนี้



จากสมการในการออกซิไดซ์แอมโมนี 1 โมลไนโตรเจน ต้องใช้ออกซิเจน 1.38 โมล ไบคาร์บอเนต 1.98 โมล และเกิดไนไตรต์ 0.98 โมลไนโตรเจน โดยมีค่าyield เท่ากับ 0.15 กรัมเซลล์ต่อกรัมแอมโมนีไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์

ข.) ปฏิกิริยาไนเตรเตชัน (Nitrataion) เป็นการเปลี่ยนไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต แบคทีเรียที่รับผิดชอบปฏิกิริยาเรียกว่า “*Nitrite oxidizing bacteria, NOB*” มีคำนำหน้าชื่อว่า “Nitro” ดังตารางที่ 2-3

สมการปริมาณสมมูลโดย Halling-Sorensen และ Jorgensen (1993 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) มีดังนี้



จากสมการ ในการออกซิไดซ์ไนไตรต์ 1 โมลไนโตรเจน ต้องใช้ออกซิเจน 0.49 โมล ไบคาร์บอเนต 0.0025 โมล และเกิดไนเตรต 1 โมลไนโตรเจน โดยมีค่าyield เท่ากับ 0.02 กรัมเซลล์ต่อกรัมไนเตรตไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์

ตารางที่ 2-2 Ammonia Oxidizing Bacteria (Seviour และ Blackall, 1999)

Genus	Species	Morphology	Intracellular membrane organization	DNA G + C Content	Habitat
Nitrosomonas	N.europaea	rods	random	51	fresh waster, activated slugde , soil
	N.cryotolerans	rods	random	45.8	marine
Nitrosococcus	N.nitrosus	cocci	?	?	soil
	N.oceanus	cocci	central	50.8	marine
	N.mobilus	cocci	random	49.3	blackisk water
Nitrospira	N.briensis	helical	invaginations of cytoplasmic membrane	54.1	soil
Nitrosolobus	N.multiformis	lobed	dividing up cell	54.6	soil
Nitrosovibrio	N.tenuis	curved rods	invaginations of cytoplasmic membrane	53.9	soil

สมการปริมาณสมมูลรวมของทั้ง 2 ปฏิกิริยาย่อยโดย Halling-Sorensen และ Jorgensen (1993 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) มีดังนี้



จากสมการ ในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 โมลไนโตรเจน ต้องใช้ออกซิเจน 1.85 โมล ไบคาร์บอเนต 1.98 โมล และเกิดไนเตรต 1 โมลไนโตรเจน โดยมีค่าyieldเท่ากับ 0.17 กรัมเซลล์ต่อกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์



ตารางที่ 2-3 Nitrite Oxidizing Bacteria (Seviour และ Blackall, 1999)

Genus	Species	Morphology	Intracellular organization	DNA Content	Habitat
Nitrobacter	N.winogradskyi	pleomorphic rods	polar cap	61.7	soil fresh water
		N.hamburgensis	pleomorphic rods	polar cap	61.4
	N.vulgaris		pleomorphic rods	polar cap	59.4
					49.3
Nitrococcus	N.mobilis	coccus	tubular	61.2	marine
Nitrospina	N.gracilis	rods	invaginations of cytoplasmic membrane	57.7	marine
Nitrospira	N.marina	curved	none	50.0	marine
	N.moscoviensis	curved	none	57.0	fresh water

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

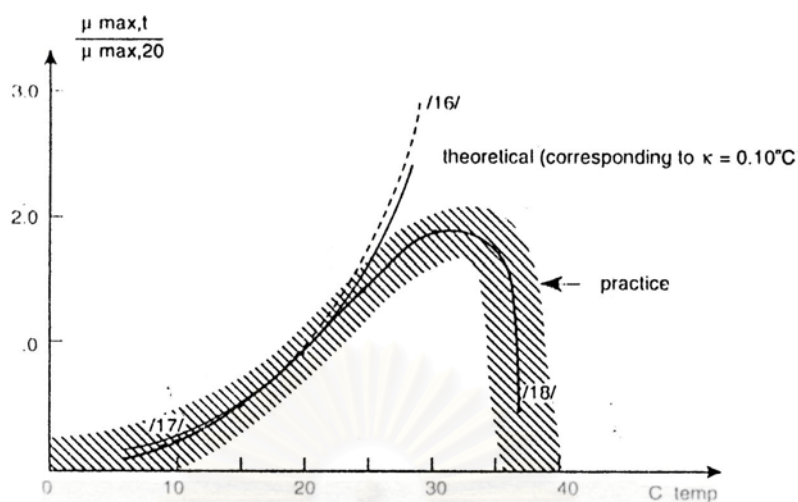
#### 2.2.3.1 อุณหภูมิ

อัตราการเจริญเติบโตของไนตริไฟเออร์นั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลงตามไปด้วยเมื่ออุณหภูมิลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันไม่ว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงยังทำให้อัตราการเจริญเติบโตของไนตริไฟเออร์ต่ำกว่าปกติ

Bock และคณะ (1986 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 28-30 °C

Henze และคณะ (1996) พบว่าไนตริไฟเออร์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-30 °C ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และอัตราการเจริญเติบโตจะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนอยู่ในช่วง 10-22 °C หรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนอยู่ในช่วง 35-40 °C นอกจากนี้หากเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันไม่ว่าจะลดลงหรือสูงขึ้น จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างช้า ๆ

Water Environment Federation [WEF] (1998) กล่าวว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือ 30-36 °C



รูปที่ 2-1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Henze และคณะ, 1996)

### 2.2.3.2 ออกซิเจนละลาย

ออกซิเจนละลาย (DO) บ่งบอกถึงปริมาณออกซิเจนที่มีในระบบ ซึ่งในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนั้น ไนตริไฟเออร์ต้องการพลังงานจากปฏิกิริยาโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ซึ่งในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 กรัมจะต้องใช้ออกซิเจน 4.57 กรัม

Painter (1977 อ้างโดย Pochana และ Keller, 1999) แนะนำว่าปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาควรสูงกว่า 2 มก./ล.

Randall และคณะ (1992) พบว่าค่าออกซิเจนละลายสำหรับแบคทีเรีย 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยามีค่าไม่เท่ากัน โดย *Nitrosomonas* ซึ่งอยู่ในกลุ่มเอโอบีต้องการค่าออกซิเจนละลายมากกว่า 1.0 มก./ล. และสำหรับ *Nitrobacter* ซึ่งอยู่ในกลุ่มเอ็นโอบีต้องการค่าออกซิเจนละลายมากกว่า 2.0 มก./ล. ซึ่งค่าออกซิเจนละลายในช่วง 0.5 – 2.5 มก./ล. จะทำให้เกิดการจำกัดปฏิกิริยาในระบบเอเอสได้ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และลักษณะฟลอคในระบบด้วย

Droste (1997) พบว่าค่าออกซิเจนในระบบจะต้องสูงกว่า 0.5 มก./ล. จึงจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้น

และการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแม้ออกซิเจนละลายในระบบมีค่าสูงถึง 60 มก./ล. ก็ไม่เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้น (Randall และคณะ, 1992 ; Henze และคณะ, 1996)

### 2.2.3.3 พีเอช

แบคทีเรียที่รับผิดชอบปฏิกิริยานิตริฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นประเภทออโตโทรฟ ซึ่งต้องใช้แหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์เซลล์จากคาร์บอนอนินทรีย์ (Inorganic carbon) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไบคาร์บอเนต

ซึ่งไบคาร์บอเนตนี้เกี่ยวข้องกับระบบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ในระบบ ในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 กรัม ต้องใช้ไบคาร์บอเนตถึง 7.2 กรัม หากในน้ำเสียมีไบคาร์บอเนตไม่เพียงพอต่อการออกซิไดซ์แอมโมเนียจนเกิดขาดขึ้นมา จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบโดยตรงต่อแบคทีเรียในระบบและการเกิดปฏิกิริยา

Painter และ Loveless (1983) พบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานิตริฟิเคชันคือ 7.5-8.5

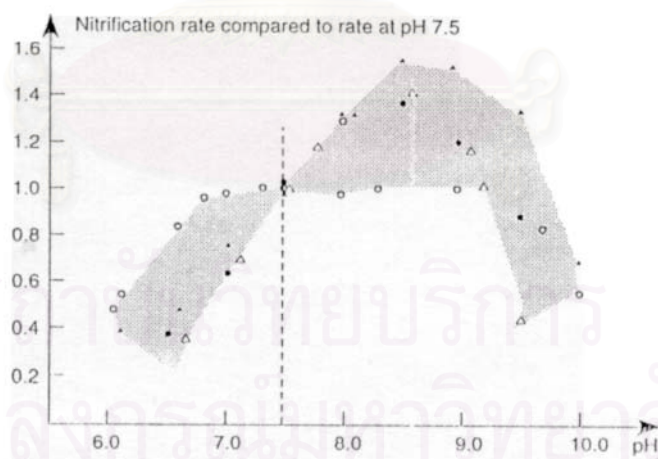
Antoniou และคณะ (1990 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) พบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานิตริฟิเคชันคือ 7.0-8.2

Henze และคณะ (1996) พบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานิตริฟิเคชันคือ 8.0-9.0 ดังแสดงในรูปที่ 2-2

Droste (1997) แนะนำให้รักษาค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วง 6.5-8.0

WEF (1998) กล่าวว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานิตริฟิเคชันมีค่าประมาณ 8.0 และปฏิกิริยาจะถูกยับยั้งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.0 หรือสูงกว่า 10.0

สรุปโดยรวมแล้ว ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานิตริฟิเคชันควรอยู่ในช่วง 6.5 - 9.0 โดยไม่ควรให้ค่าพีเอชต่ำกว่า 6.0 หรือสูงกว่า 10.0



รูปที่ 2-2 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยานิตริฟิเคชัน (Henze และคณะ, 1996)

### 2.2.3.4 สารยับยั้งปฏิกิริยา

ไนตริไฟเออร์ค่อนข้างอ่อนไหวต่อสารต่างๆ ซึ่งขนาดของผลกระทบจากสารต่างๆ ที่ยับยั้งการทำงานของไนตริไฟเออร์นี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ความเข้มข้น ระยะเวลาการสัมผัส และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ (WEF, 1998)

Henze และคณะ (1996) ได้รวบรวมชนิด ความเข้มข้นและผลของโลหะหนักที่มีต่อปฏิกิริยา ตามตารางที่ 2-4 นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อีกหลายชนิดที่มีผลต่อไนตริไฟเออร์

ตารางที่ 2-4 ความเข้มข้นและผลของโลหะหนักชนิดต่างๆที่มีต่อไนตริไฟเออร์  
(Henze และคณะ, 1996)

Metal	Conc. (g/m <sup>3</sup> )	Effect
Cu	0.05-0.56	Nitrosomonas activity inhibited (pure culture)
Cu	4	No essential inhibition in activated sludge
Cu	150	75% inhibition of activated sludge
Ni	> 0.25	Nitrosomonas growth inhibited (pure culture)
Cr(III)	> 0.25	Nitrosomonas growth inhibited (pure culture)
Cr(III)	118	75% inhibition of activated sludge
Zn	0.08-0.5	Inhibition of Nitrosomonas (pure culture)
Co	0.08-0.5	Inhibition of Nitrosomonas (pure culture)

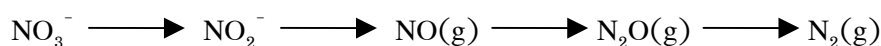
#### 2.2.4 ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

ถึงแม้แอมโมเนียไนโตรเจนจะถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน อันเป็นการลดผลกระทบของแอมโมเนียในน้ำทิ้งที่มีกับแหล่งน้ำแล้วก็ตาม แต่ไนเตรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนั้น ก็ยังคงส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้ ทั้งทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง Nitrosamines หรือทำให้เกิดโรคกับเด็กทารกที่บริโภคน้ำที่ปนเปื้อนที่เรียกว่า “Blue baby”

ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนที่สมบูรณ์จำเป็นต้องกำจัดไนเตรตซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันด้วย โดยการกำจัดไนเตรตทางชีวภาพนี้มี 2 ทางด้วยกัน ได้แก่

- 1) Assimilatory Nitrate Reduction เกิดโดยจุลชีพในระบบบำบัดใช้ในเตรตแทนแอมโมเนียในการสังเคราะห์เซลล์
- 2) Dissimilatory Nitrate Reduction หรือที่เรียกอีกชื่อว่า “Denitrification”

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันนี้เป็นปฏิกิริยารีดักชัน โดยไนเตรตซึ่งมีเลขออกซิเดชันบวก 5 จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็น 0 โดยมีไนไตรต์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นสารที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา



ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งทำให้แบคทีเรียใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนออกซิเจน โดยแบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรียกว่า “Denitrifiers” หรือ “Denitrifying Bacteria” ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน สภาวะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรียกว่า “สภาวะแอนน็อกซิก (Anoxic Condition)” แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าวในไตรฟิเคชันมีหลายชนิดซึ่งได้แสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าวในไตรฟิเคชัน

(Seviour และ Blackall, 1999)

Taxon	Habitat	Comments
<b>Archaea</b>		
Several extreme halophiles including <i>Halobacterium mediteranei</i>	solar saltern	Produces $N_2$ from $NO_3^-$ or $NO_2^-$
<b>Proteobacteria</b>		
<b>Subclass-<math>\alpha</math></b>		
Phototrophic bacteria like <i>Rhodobacter spheroides</i>	sewage	Not all strains denitrifying
Budding bacteria like <i>Hyphomicrobium</i> spp.	water	Uses C-1 compounds as energy sources
Helical bacteria like some <i>Azospirillum</i> spp.	soil	Not all strains denitrifying
Gram-negative aerobic rods like <i>Agrobacterium tumefaciens</i> , <i>Rhizobium</i> spp.	soil	Some produce $N_2O$ which is then used as an $e^-$ acceptor by others
Gram-negative cocci and coccobacilli like <i>Gluconobacter</i> spp. and <i>Paracoccus denitrificans</i>	sewage and soil	$N_2$ and $N_2O$ produced
<b>Subclass-<math>\beta</math></b>		
Gram-negative aerobic and facultatively anaerobic bacteria including <i>Pseudomonas</i> spp.	soil and water	
Gram-negative cocci like <i>Neisseria</i> spp.	animals	Some reduce $NO_2$ to gas
<b>Subclass-<math>\gamma</math></b>		
Gram-negative aerobic bacteria like <i>Moraxella</i> spp.	commonly animals	$NO_3^-$ and $NO_2^-$ reduced but not always to gas
<i>Pseudomonas</i> spp.	range of habitats	Metabolically diverse
<i>Zoogloea ramigera</i>	sewage	$NO_3^-$ reduced to $N_2$
Gram-negative chemoautotrophs like <i>Beggiatoa alba</i>	fresh water	Sulphide-dependent reduction of $NO_3^-$ to $N_2$
<i>Flavobacterium</i> group like <i>Empedobacter</i> sp.	sewage	Not understood
<b>Gram-positive bacteria</b>		
Endospore-forming rods like many <i>Bacillus</i> spp., including some halophiles	range of habitats including sewage	Metabolically diverse
Non-spore-forming bacteria like <i>Tsukamurella paurometabola</i>	humans	$NO_2^-$ utilized by some isolates

## 2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

### 2.2.5.1 ชนิดของแหล่งคาร์บอน หรือตัวให้อิเล็กตรอน

แหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันมีหลายชนิด ตัวอย่างอยู่ในตารางที่ 2-6 ซึ่งแต่ละชนิดก็ให้พลังงานแก่แบคทีเรียที่แตกต่างกัน ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นไม่เท่ากันด้วย

ตารางที่ 2-6 แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ สำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

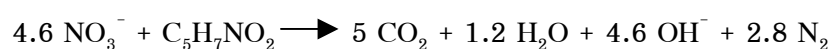
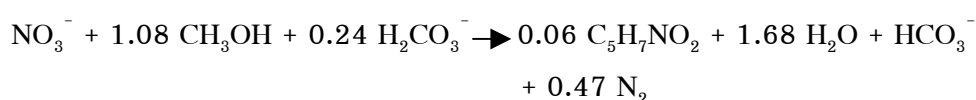
(Henze และคณะ, 1996)

Acetone	Glucose	Olive oil
Newprint	Cherry juice	Organic matter in wastewater
Hydrogen (potable water)	Marmalade	Raw syrup
Wastewater from breweries	Molasses	Sawdust
Acetic acid	Methane	Sulphur
Ethanol (potable water)	Methanol	

McCarty และคณะ (1969) ได้เปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน 5 ชนิดได้แก่ เมทานอล กรดอะซิติก เอทานอล อะซิโตน และน้ำตาล ซึ่งสรุปว่า เมทานอลมีความเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกที่สุด รวมทั้งยังขนส่งและเติมให้แก่ระบบได้ง่าย

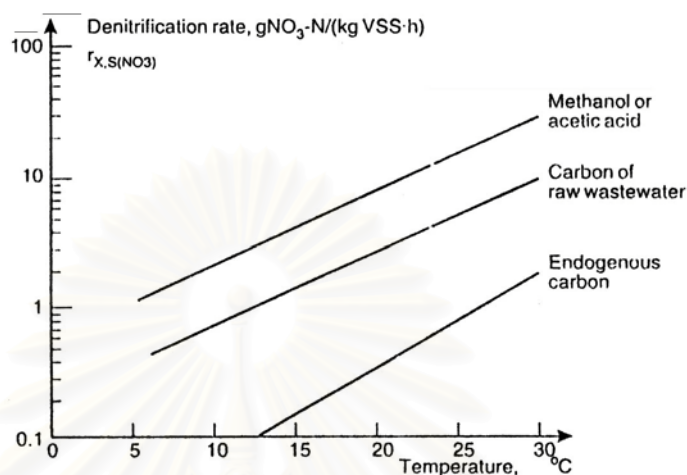
Tam และคณะ (1994) ได้เปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน 3 ชนิดได้แก่ อะซิเตต โพรพิโอเนต และเมทานอล พบว่า อะซิเตต และโพรพิโอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีราคาเหมาะสม ในขณะที่เมทานอลมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุด

Sedlak (1991) ได้แสดงสมการปริมาณสมมูลสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนต่างชนิดกัน ได้แก่ เมทานอล และแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ (Endogenous carbon) ซึ่งให้พลังงานและอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน



Henze และคณะ (1996) แสดงว่าชนิดของแหล่งคาร์บอนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยเมทานอล และกรดอะซิติก ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่ายมีอัตราการเกิด

ปฏิกิริยาสูงที่สุด ในขณะที่แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุด เนื่องจากจะต้องผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสก่อนจึงจะสามารถนำแหล่งคาร์บอนนี้มาใช้ได้ ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจากแหล่งคาร์บอนชนิดต่าง ๆ (Henze และคณะ, 1996)

#### 2.2.5.2 อุณหภูมิ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และยังสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง

Li (1988) กล่าวว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันคือ 40 °C และยังสามารถเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 50 °C

Bitton (1994) พบว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิช่วง 35 - 50 °C และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลงเมื่ออุณหภูมิลดลงในช่วง 5 - 10 °C

Henze และคณะ (1996) กล่าวว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้แม้ อุณหภูมิจะสูงถึง 50 - 60 °C โดยอัตราการกำจัดไนเตรตจะสูงกว่าที่ 35 °C ถึง 50%

WEF (1998) กล่าวว่าช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ดีไนตริไฟเออร์สามารถเจริญเติบโตได้ดีคือ 5 - 25 °C

#### 2.2.5.3 ออกซิเจนละลาย

ในระบบซึ่งมีทั้งออกซิเจนและไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย จุลชีพจะเลือกใช้ออกซิเจนในระบบเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายก่อน เพราะให้พลังงานในการดำรงชีวิตแก่จุลชีพที่สูงกว่าการใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ดังนั้นในระบบที่ต้องการกำจัดไนเตรตจึงไม่ควรใช้ออกซิเจนละลายอยู่ในระบบเลย เพราะออกซิเจนจะใช้

แหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาทำให้สิ้นเปลืองแหล่งคาร์บอนมากขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง (McCarty, 1969)

Bryan (1993 อ้างโดย Seviuor และ Blackall 1999) พบว่าปฏิกิริยาจะถูกยับยั้งเมื่อออกซิเจนละลายในระบบมากกว่า 0.5 มก./ล.

Lie และ Welander (1994) ออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

อย่างไรก็ตามยังมีการศึกษาที่พบว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันยังเกิดขึ้นได้ แม้จะมีออกซิเจนละลายในระบบ แม้จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Randall และคณะ 1992 ; Bitton 1994 ; Droste 1997 ) ซึ่งเรียกว่า “Aerobic Denitrification” และแบคทีเรียบางชนิดซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ แม้จะอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ ได้แก่ *Thiosphaera Pantotropha*, *Alcaligenes faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *Zoogloea ramigera* (Robertson และ Kuenen, 1992 อ้างโดย Seviuor และ Blackall, 1999)

#### 2.2.5.4 พีเอช

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 6.0-9.0 แม้จะยังมีความขัดแย้งกันในรายละเอียดก็ตาม

Parker และคณะ (1975 อ้างโดย Grady 1980) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงที่สุดในช่วงพีเอช 7.0 – 7.5 และที่พีเอชต่ำกว่า 6.0 หรือสูงกว่า 8.0 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง

Randall และคณะ (1992) และ WEF (1998) กล่าวเช่นกันว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 7.0 – 8.0

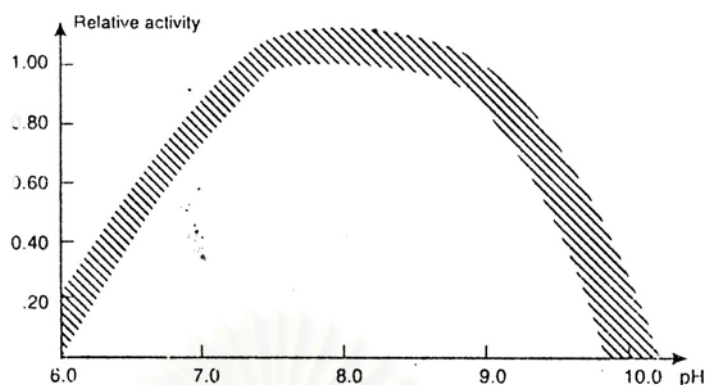
United State Environment Protection Agency [U.S.EPA.] (1993 อ้างโดย Droste 1997) กล่าวว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 6.0 – 8.0

Henze และคณะ (1996) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 7.0 – 9.0 ดังแสดงในรูปที่ 2-4 นอกจากนี้เมื่อพีเอชในระบบต่ำกว่า 7.0 จะทำให้เกิดก๊าซ NO และ  $N_2O$  ขึ้น ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาถูกจำกัด เพราะก๊าซทั้งสองนั้นเป็นสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา

#### 2.2.5.5 ธาตุอื่นๆ

Chakrabarti และ Jones (1983 อ้างโดย Bitton, 1994 ) พบว่า โมลิบดีนัม (Mo) และ เซเลเนียม (Se) มีผลกระทบต่อเอนไซม์ที่รับผิดชอบต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน





รูปที่ 2-4 ผลของพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Henze และคณะ, 1996)

### 2.2.6 ปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Simultaneous Denitrification Nitrification, SND)

ปฏิกิริยาเอสเอ็นดี เป็นปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดไนโตรเจนในทุกรูปแบบได้ในสภาวะเติมออกซิเจน ปฏิกิริยานี้แบ่งได้ตามลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเป็น ปฏิกิริยาที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางชีวภาพ และปฏิกิริยาที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฟล็อก

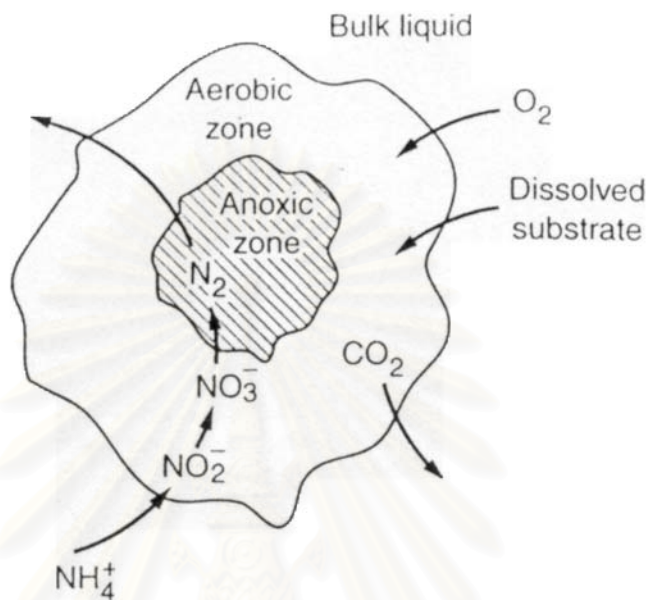
ปฏิกิริยาที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันได้พร้อมกัน เช่น *Thiosphaera Pantotropa* (Robertson และ Kuenen, 1992 อ้างโดย Seviuor และ Blackall, 1999)

ปฏิกิริยาที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฟล็อก โดยฟล็อกในระบบบำบัดซึ่งมีขนาดใหญ่จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนตามแต่อัตราการซึมถึงของออกซิเจน บริเวณที่ออกซิเจนเข้าถึงจะเกิดสภาวะเติมออกซิเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้น และส่วนที่ลึกเข้าไปในฟล็อกซึ่งออกซิเจนไม่สามารถซึมเข้าไปถึงจะเกิดสภาวะแอนน็อกซิก ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยได้รับไนเตรตจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจากบริเวณที่ออกซิเจนซึมถึง (ดังรูปที่ 2-5 )

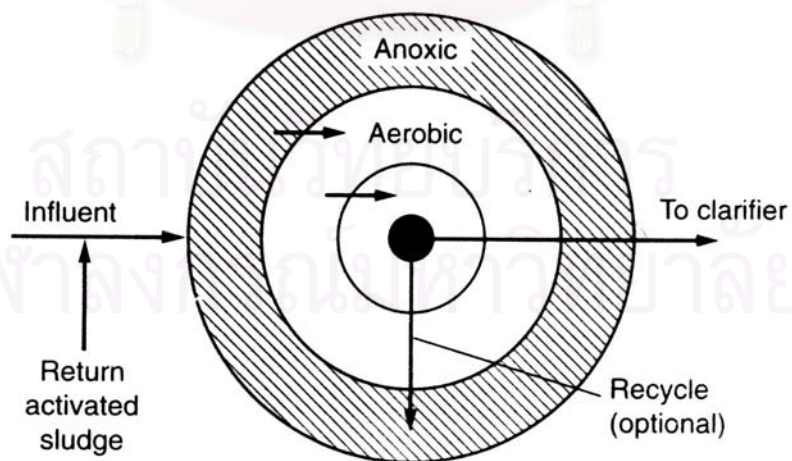
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีนั้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณแหล่งคาร์บอนที่เติมให้ระบบออกซิเจนละลายในระบบ ซึ่งหากมีออกซิเจนละลายในระบบสูงก็จะทำให้ออกซิเจนซึมเข้าไปในฟล็อกได้มาก ลดการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่จะเกิดขึ้น และขนาดฟล็อก โดยขนาดฟล็อกที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดส่วนแอนน็อกซิกในฟล็อกมากขึ้น (Pochana และ Keller, 1999)

Daigger และ Littleton (2000) เพื่อศึกษาการทำงานของระบบเอสบีเอ็นอาร์ (Simutanous Biological Nutrient Removal, SBNR) ที่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้พร้อม ๆ กัน โดยมุ่งความสนใจไปยังการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย 7 แห่งทางตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นระบบ Orbal process (แสดงไว้ในรูปที่ 2-6) ที่ดำเนินการในลักษณะ Step feed พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสีย Elmwood & Hammonton ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ 33 วันมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด 85 - 90% ทั้งนี้ผู้วิจัยเชื่อว่าการกำจัดไนโตรเจนของระบบเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะของระบบบำบัดที่มีทั้งส่วนแอนน็อกซิกและ

ส่วนเติมออกซิเจน (Bioreactor macroenvironment) และการเกิดส่วนแอนนอกซิกภายในฟล็อกของแบคทีเรีย (Floc microenvironment)



รูปที่ 2-5 ลักษณะฟล็อกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Metcalf และ Eddy, 2002)



รูปที่ 2-6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Orbal (Metcalf และ Eddy, 2002)

## 2.3 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสามารถกำจัดได้ทั้งจากวิธีทางเคมี โดยใช้สารเคมี และวิธีทางชีวภาพด้วยกลไกของแบคทีเรีย ตามตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 รูปแบบของฟอสฟอรัส (WEF, 1998)

Species	Comment
Organic-P	Organic phosphorus can be convert to orthophosphate and polyphosphate
Orthophosphate	Most abundant phosphorus species Reactive species in chemical reaction and consumed in biological growth
Polyphosphate	Condensed orthophosphates Possibly reacts with metal salts Can be used for biological growth
Chemical Phosphorus	Precipitated phosphates formed by reacting orthophosphate with metal salts, or precipitates as phosphate hydroxides
Biological Phosphorus	Phosphorus incorporated into the biomass for growth Excess phosphorus may accumulate under certain

### 2.3.1 กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

#### (Enhance Biological Phosphorus Removal, EBPR)

ในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจุลชีพจะใช้ฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์เซลล์ ร่วมกับคาร์บอน และไนโตรเจน ซึ่งอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 100 : 5 : 1 ดังนั้นน้ำเสียที่มีอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัส มากกว่า 100 : 1 ก็จะทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเนื่องจากจุลชีพในระบบใช้ฟอสฟอรัสไปในการสังเคราะห์เซลล์

แต่ในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่อัตราส่วนนี้มักจะน้อยกว่า 100 : 1 ทำให้ฟอสฟอรัสที่เหลือจากการนำไปสร้างเซลล์ของจุลชีพ ออกจากระบบบำบัดทางน้ำทิ้งไปด้วย

การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพอย่างเพิ่มพูน (Enhance Biological Phosphorus Removal, EBPR) เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นจากที่จุลชีพนำไปใช้สังเคราะห์เซลล์ การกำจัดนี้ได้พัฒนาทั้งรูปแบบระบบบำบัด และแบบจำลอง (Model) ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดตลอดมา

ปัจจุบันพบว่าสภาวะที่ส่งเสริมให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูนนั้น ต้องให้จุลชีพที่สามารถสะสมฟอสฟอรัส หรือพีเอโอ(Phosphorus Accumulating Organisms, PAOs) หมุนเวียนอยู่ในสองสภาวะได้แก่ สภาวะไร้ออกซิเจน กับสภาวะเติมออกซิเจน สภาวะที่เกิดสลับกันนี้ สร้างความได้เปรียบให้แก่พีเอโอเหนือจุลชีพอื่น ๆ เนื่องจากพีเอโอมีความสามารถในการสะสมโพลีฟอสเฟตซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญอีกรูปหนึ่ง ในขณะที่จุลชีพอื่น ๆ ไม่สามารถสะสมโพลีฟอสเฟตได้แบบพีเอโอ และยิ่งพีเอโอสามารถสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ได้มากเท่าไรก็ยิ่งทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูนมีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่านั้น โดยพีเอโอสามารถสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ได้ตั้งแต่ 5 - 20% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (Henze และคณะ, 1996 ; Seviuor และ Blackall, 1999) การกำจัดฟอสฟอรัสจึงเกิดจากการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินที่สะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ปริมาณที่สูงนี้ออกจากระบบ (Mino และคณะ, 1998)

#### กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition)

พีเอโอจะสลายโพลีฟอสเฟตในเซลล์ซึ่งสะสมมาจากสภาวะเติมออกซิเจน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดึงแหล่งคาร์บอนภายนอกเซลล์มาเก็บสะสมไว้ในเซลล์ โดยแหล่งคาร์บอนภายนอกที่พีเอโอสามารถดึงมาใช้ได้คือ กรดไขมันระเหยง่ายที่มีพันธะสั้น (Short Chain Volatile Fatty Acid, SCVFA) ประกอบด้วยอะซิเตตและโพรพิโอเนต

อะซิเตตหรือโพรพิโอเนตที่ถูกดึงเข้ามาในเซลล์ จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพีเอชบี (Polyhydroxybuterate) หรือ พีเอชวี (Polyhydroxyvalerate) ซึ่งเรียกรวม ๆ ว่า พีเอชเอ (Polyhydroxyalkanoate) พีเอชเอนี้เป็นสารโพลีเมอร์อินทรีย์ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอะซิเตตและโพรพิโอเนต

และการสลายโพลีฟอสเฟตเพื่อสะสมพลังงานในรูปพีเอชเอนี้ ทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาภายนอกเซลล์ของพีเอโอ (Phosphorus Release)

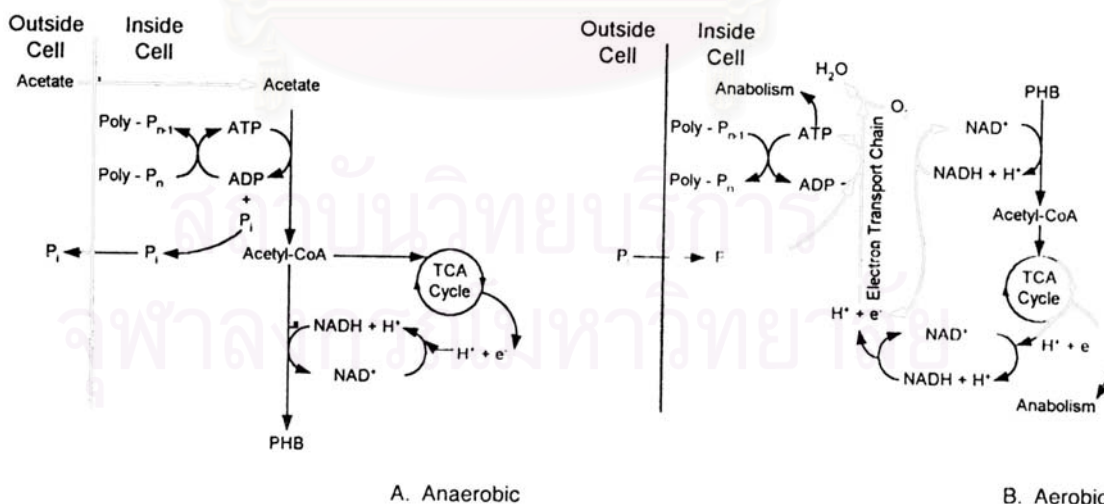
#### กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในสภาวะเติมออกซิเจน (Aerobic Condition)

ในสภาวะเติมออกซิเจนซึ่งแหล่งคาร์บอนภายนอกเซลล์ลดต่ำลง จุลชีพอื่น ๆ ที่ไม่สามารถสะสมพีเอชเอในสภาวะไร้ออกซิเจนดังเช่นพีเอโอ มีแหล่งพลังงานและคาร์บอนเพื่อใช้ในการรักษาเซลล์และเจริญเติบโตน้อยกว่าพีเอโอ โดยพีเอชเอที่พีเอโอสะสมในสภาวะไร้ออกซิเจนนั้นถูกใช้เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์เซลล์ และถูกออกซิไดซ์โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน พลังงานที่ได้นี้บางส่วนจะถูกใช้เพื่อจับฟอสฟอรัสรอบ ๆ เซลล์ที่ถูกคายออกมาในสภาวะไร้ออกซิเจน เข้ามาสะสมไว้ในเซลล์อีกครั้งในรูปโพลีฟอสเฟต (Phosphorus Uptake) ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกจับใช้ในสภาวะเติมออกซิเจนนี้มีปริมาณมากกว่าที่ได้ปลดปล่อยออกมาในสภาวะไร้ออกซิเจน ดังนั้นจึงเกิดการกำจัดฟอสฟอรัสที่เพิ่มพูนขึ้น (Luxury uptake)

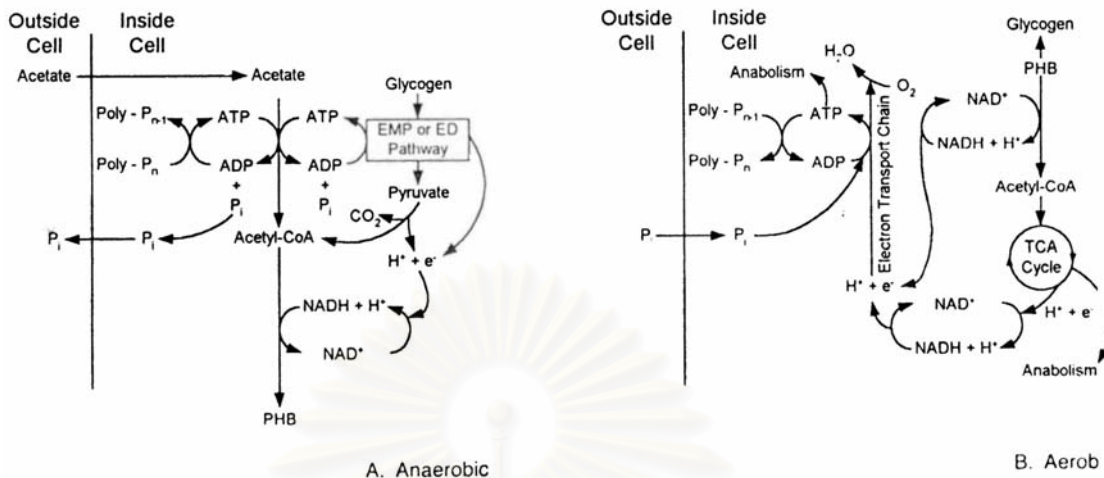
แบบจำลองที่อธิบายการทำงานของพีเอโอได้แก่ของ Comeau-Wentzel ในปี 1987 และของ Mino ในปี 1990 ซึ่งความแตกต่างของแบบจำลองทั้งสองนี้อยู่ที่การอธิบายเกี่ยวกับแหล่งของพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์พีเอเอที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากพีเอเอเป็นโพลิเมอร์ที่มีพลังงานสูง ดังนั้นการที่จะสังเคราะห์ขึ้นจากอะซิเตต หรือโพรพิโอเนต ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีพลังงานต่ำกว่า จำต้องได้รับพลังงานอีกส่วนจาก Reducing power ซึ่งสามารถสร้างขึ้นภายในเซลล์ร่วมในการสังเคราะห์พีเอเอด้วย

Reducing power ที่สร้างขึ้นภายในเซลล์นี้เกิดได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็ให้ปริมาณ Reducing power ที่แตกต่างกัน ในแบบจำลองของ Comeau-Wentzel กล่าวว่า Reducing power นั้นเกิดจากอะซิเตตที่ดึงเข้ามาในเซลล์บางส่วนถูกออกซิไดซ์ผ่านวัฏจักร TCA (Tricarboxylic acid) โดยพีเอเอนั้นถูกสังเคราะห์ขึ้นจากอะซิเตตส่วนที่เหลือกับ Reducing power ที่ผลิตขึ้น ตามรูปที่ 2-7 ส่วนในแบบจำลองของ Mino กล่าวว่า Reducing power ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูนเกิดจากการสลายตัวของกลัยโคเจนที่สะสมไว้ภายในเซลล์ผ่านทาง ED (Entner-Doudoroff) หรือ EMP (Embden-Meyerhof pathway) ซึ่งจะใช้กระบวนการใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพีเอโอ โดยกลัยโคเจนจะถูกสะสมคืนกลับในสภาวะเต็มออกซิเจนจากการย่อยสลายพีเอเอ ตามรูปที่ 2-8

ที่มาของ Reducing power ที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดความแตกต่างเกี่ยวกับปริมาณที่เกิดขึ้นเช่น ปริมาณการสร้างพีเอเอ ปริมาณการคายฟอสฟอรัส ปริมาณการดึงอะซิเตต เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างๆที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Mino และวิเคราะห์พบการสะสมและย่อยสลายกลัยโคเจนในการทดลอง ดังนั้นภายหลังกลัยโคเจนจึงถูกค่านึงถึงในการกำจัดฟอสฟอรัสไปด้วย (Seviuor และ Blackall, 1999)



รูปที่ 2-7 อีพีอาร์ตามแบบจำลองของ Comeau-Wentzel (Grady และคณะ, 1999)



รูปที่ 2-8 อีบีพีอาร์ตามแบบจำลองของ Mino (Grady และคณะ, 1999)

### 2.3.2 กลุ่มจุลชีพที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัส

Fuhs และ Chen (1975 อ้างโดย Randall และคณะ, 1992) พบว่า *Acinetobacter* เป็นแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์ที่มากกว่าปกติ เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายที่มีพันธะสั้นเป็นสารอาหาร

Seviour และ Blackall (1999) ได้รวบรวมการทดลองที่หาปริมาณของ *Acinetobacter* ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูนด้วยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแบบต่างๆ ทั้งในระบบขนาดทดลอง และระบบจริง ดังตารางที่ 2-8 ซึ่งสรุปว่าวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแบบเพาะเชื้อแล้วนับ (Cultivation) จะพบ *Acinetobacter* เป็นจุลชีพเด่นในระบบ แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ทันสมัยมากขึ้น เช่น Fluorescent Antibody Staining Technique (FA), Respiratory Quinone profiles, Fluorescent *in situ* Hybridization (FISH) กลับพบว่า *Acinetobacter* ในระบบนั้นมีจำนวนไม่มากนัก

ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ชุมชนของจุลชีพที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่นวิธีการฟิช (Fluorescent *in situ* Hybridization, FISH) ทำให้บ่งบอกชนิดของจุลชีพในระบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

Wagner และคณะ (1994 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) ทดลองใช้วิธีฟิชทดสอบสไลด์จากระบบอีบีพีอาร์ พบว่า 36% ของแบคทีเรียเป็นแกรมบวกที่มี G+C สูง อีก 36% อยู่ในกลุ่ม Beta proteobacteria และอีก 10% อยู่ในกลุ่ม gamma proteobacteria โดยพบ *Acinetobacter* เพียง 3-6% เท่านั้น

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) กล่าวว่าหากอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับจุลชีพที่ได้ศึกษามานั้น  
พีเอไอไม่ได้ประกอบด้วยแบคทีเรียชนิดเดียวแต่ประกอบด้วยกลุ่มแบคทีเรียต่างๆกันหลากหลาย  
กลุ่ม

ตารางที่ 2-8 การตรวจวัดปริมาณของ *Acinetobacter* ในระบบอิมปีฟิอาร์ด้วยวิธีการต่างๆ  
(Seviuor และ Blackall, 1999)

Description	Percentage of		References
	bacteria as <i>Acinetobacter</i>	Method of enumeration	
FS, P removing Bardenpho	54% of Gram-negative	Cultured then API 20E	Buchan (1983)
LS, Poor P removal	67% of Gram-negative	Cultured then API 20E	Brodisch (1985)
LS, Removing P	15% of Gram-negative	Cultured then API 20E	Brodisch (1985)
P removing	61% of heterotrophs	Cultured and fluorescent antibody	Lotter (1985)
Not removing P	56% of heterotrophs	Cultured and fluorescent antibody	Lotter (1985)
	56% of heterotrophs	Cultured and fluorescent antibody	Cloete and Steyn (1987) <sup>a</sup>
	<10% of bacterial cells	Microscopy and fluorescent antibody	Cloete and Steyn (1987) <sup>a</sup>
LS, Phoredox P removal	79% of bacteria	Cultured then API 20E	Kerdachi and Healey (1987)
LS, P removal,	90% of heterotrophs	Cultured then API 20E	Wentzel <i>et al.</i> (1988)
LS, P removal, operation	3-6% of quinone containing bacteria	Q-9 portion of population	Hiraishi <i>et al.</i> (1989)
FS, P removal, operation	6% of bacterial cells	Microscopy and <i>in situ</i> hybridization	Wagner <i>et al.</i> (1994d) <sup>b</sup>
FS, P removal, operation	32% of heterotrophs	Cultivated and probe hybridization	Wagner <i>et al.</i> (1994d) <sup>b</sup>

Acinetobacter numbers determined in the same sample by two methods.

LS, laboratory-scale reactor; FS, full-scale reactor.

### 2.3.3 จุลชีพที่รบกวนระบบอีบีพีอาร์

นอกจากจุลชีพในกลุ่มพีเอโอที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบอีบีพีอาร์แล้ว ยังพบจุลชีพบางกลุ่มในระบบอีบีพีอาร์ที่ปลดประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของพีเอโอ

Cech และ Hartman (1990 อ้างโดย Mino และคณะ, 1998) พบจุลชีพกลุ่มใหม่ในระบบอีบีพีอาร์ที่เติมกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และให้ชื่อว่า G-Bacterium และการศึกษาต่อ ๆ มากก็ได้อธิบายพฤติกรรมของจุลชีพกลุ่มนี้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และเรียกว่าจีเอโอ (Glycogen Accumulating Organisms, GAOs)

สถานะที่ทำให้จีเอโอสามารถเจริญเติบโตได้ในระบบอีบีพีอาร์มีหลายสถานะด้วยกันซึ่ง Mino และคณะ (1998) ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2-9 นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกระบวนการเมตาบอลิซึมระหว่างพีเอโอ และจีเอโอ ไว้ตามตารางที่ 2-10

จากตารางที่ 2-10 จะพบว่าเมตาบอลิซึมของจีเอโอกับพีเอโอคล้ายคลึงกันมาก ยกเว้นการใช้พลังงานในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งพีเอโอได้มาจากการย่อยสลายโพลีฟอสเฟตที่สะสมในเซลล์ แต่จีเอโอใช้การย่อยสลายไกลโคเจน เป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งรีดิวซ์ เนื่องจากจีเอโอไม่มีการสะสมโพลีฟอสเฟตในสภาวะเติมออกซิเจน ดังนั้นจีเอโอจึงไม่มีการคายฟอสฟอรัสในสภาวะไร้ออกซิเจน และจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะเติมออกซิเจน (Mino และคณะ, 1998)

ตารางที่ 2-9 สาเหตุต่างๆที่ทำให้จีเอโอเกิดขึ้นในกระบวนการอีบีพีอาร์  
(Mino และคณะ, 1998)

Reference	Carbon Source	Causative	Note
Matsuo <i>et.al.</i> (1982)	dilute night soil	seed sludge from night soil treatment plant	when seeded by EBPR sludge. good P removal achieved.
Fukase <i>et.al.</i> (1985)	Ac, Pep, YEx	long SRT and HRT (54d)	PHB accumulated anaerobically.
Cech and Hartman (1990, 1993)	Ac, Glu	addition of glucose	PHB accumulated and glycogen consumed anaerobically.
Matsuo (1994)	Pep, Ac, Prop	unclear	P removal recovered by extending anaerobic retention time.
Liu <i>et.al.</i> (1994)	Ac, Pep	limited phosphorus feeding	PHB accumulated and glycogen consumed anaerobically.
Satoh <i>et.al.</i> (1994)	Ac, Prop, Pep, YEx	unclear	PHB accumulated and glycogen consumed anaerobically.



ตารางที่ 2-10 เปรียบเทียบเมตาบอลิซึมของพีเอโอกับจีเอโอ (Mino และคณะ, 1998)

Metabolism	PAOs	GAOs
In the anaerobic phase		
Uptake of external organic substrate	+	+
Consumption of intracellular glycogen	+	+
Accumulation of intracellular PHA	+	+
Consumption of intracellular polyphosphate and consequent release of orthophosphate	+	-
In the aerobic phase		
Recovery of intracellular glycogen	+	+
Consumption of stored PHA	+	+
Growth	+	+
Recovery of intracellular polyphosphate	+	-

Cech และ Hartman (1990, 1993 อ้างโดย ธงชัย พรณสวัสดิ์, 2544) ได้ทดลองใช้กลูโคสป้อนเข้าถึงปฏิกรณ์ แล้วศึกษาจีเอโอในระบบ พบว่าจีเอโอเป็นชนิดแกรมลบมีรูปร่างเหมือนกับ *Methanosarcina* มาก และอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน จีเอโอแตกต่างจากพีเอโออย่างชัดเจน เนื่องจากจีเอโอมีเยื่อหุ้มเซลล์ที่ผนังเซลล์ แต่พีเอโอมีแกรนูลที่ย้อมไนส์เสอร์ติดมากอยู่ภายในเซลล์

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

#### 2.3.4.1 ชนิดของแหล่งคาร์บอน

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับ ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่มีในสภาวะไร้ออกซิเจน จากตารางที่ 2-11 พบว่าอะซิเตต เป็นแหล่งคาร์บอนที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด เนื่องจากอะซิเตตนั้นย่อยสลายได้ง่ายเพราะมีคาร์บอนเพียง 3 อะตอมในโมเลกุล เมื่อใช้ไปในปริมาณที่เท่ากับสารอื่นๆ จึงทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า แต่กรดฟอร์มิกซึ่งมีคาร์บอนเพียงอะตอมเดียวกลับไม่ทำให้เกิดการกำจัดเลย

Satoh และคณะ (1996) ได้ทดลองเติมแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ ได้แก่ อะซิเตต โพรพีโอเนต มอลเตต แล็กเตต ไพรูเวต ซักซิเนต และน้ำเสียจริงที่ผ่านการหมักแก่ระบบ ปรากฏว่าอัตราการคายฟอสฟอรัส และการสร้างพีเอชเอมีค่าสูงที่สุด เมื่อให้อะซิ

เตต และโพรฟิไอเนตแก่ระบบ ซึ่งค่าการเกิดอัตราต่างๆที่พบสอดคล้องกับค่าจากแบบจำลองของ Mino

Randall และ Chapin (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของอะซิเตตต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ด้วยการผสมอะซิเตตความเข้มข้นตั้งแต่ 25 ถึง 800 มก./ล.กับน้ำเสีย แล้วเติมแก่ระบบกำจัดฟอสฟอรัส พบว่าอะซิเตตที่มีความเข้มข้น 400 มก./ล. เมื่อผสมกับน้ำเสียชุมชน และความเข้มข้น 100 - 150 มก./ล. เมื่อผสมกับน้ำเสียอุตสาหกรรม จะให้ผลในการกำจัดฟอสฟอรัสดีที่สุด

ตารางที่ 2-11 ชนิดแหล่งคาร์บอนที่มีผลต่ออัตราการกำจัดฟอสฟอรัส  
(Randall และคณะ, 1992)

Substrate	mg/L. Phosphorus Uptake*	mg/L. COD Utilized**
	mg/L. COD Utilized	mg P Removal
Formic acid	0	Infinity
Acetic acid	0.37	16.8
Propionic acid	0.10	24.4
Butyric acid	0.12	27.5
Isobutyric acid	0.14	29.1
Valeric acid	0.15	66.1
Isovaleric acid	0.24	18.8
Municipal sewage	0.05	102 <sup>+</sup>

\*Total P uptake in aerobic zone.

\*\*COD utilized and P removed in total system.

+Value obtain with highly aerobic sewage.

BSRT = 13 days for all experiments.

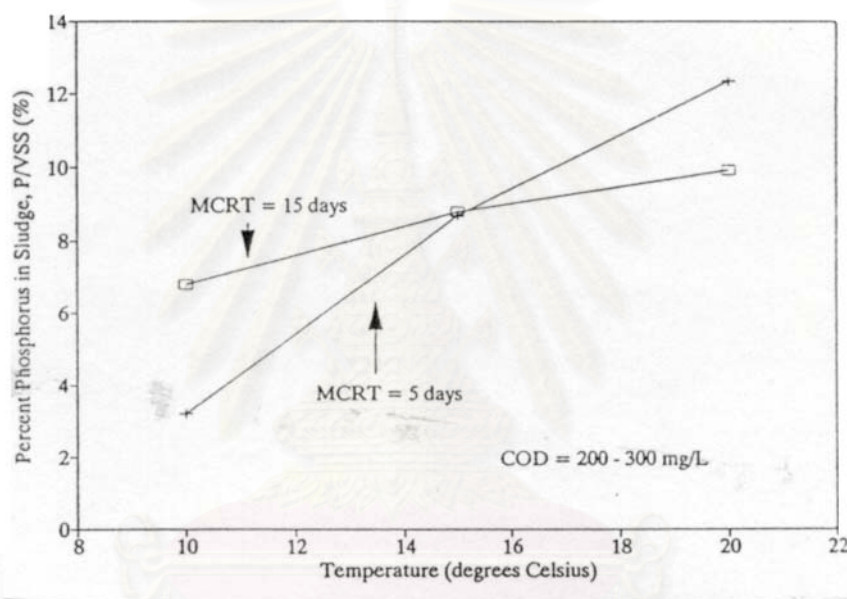
#### 2.3.4.2 อุณหภูมิ

ยังคงมีความขัดแย้งกันในหมู่นักวิจัยอยู่เกี่ยวกับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสนั้น โดยบางกลุ่มก็เชื่อว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นด้วย ขณะที่อีกกลุ่มกับเชื่อในทางตรงข้ามกัน

Ekama และคณะ (1994 อ้างโดย Randall และคณะ, 1992) รายงานว่าที่อุณหภูมิ 14 °C ระบบอีพีอาร์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 22 °C

McClintock และคณะ (1991 และ 1993 อ้างโดย WEF, 1998) แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีปริมาณฟอสฟอรัสในสลัดจ์สูงขึ้นด้วย และวันที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  เมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 5 วันจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูนขึ้น ดังรูปที่ 2-9

Mamais และ Jenkin (1992) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง  $10 - 37^{\circ}\text{C}$  ที่มีต่อระบบแบบแบคทีเรียที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัส สรุปว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสคือช่วง  $28 - 33^{\circ}\text{C}$  และการจับใช้จะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  ซึ่งผู้วิจัยกล่าวว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Du Preeze และ Toerien (1978) และ Juni (1978) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับ *Acinetobacter* อยู่ในช่วง  $29 - 35^{\circ}\text{C}$  โดยจะไม่เจริญเติบโตเลยที่อุณหภูมิ  $41^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2-9 ผลกระทบของอุณหภูมิและอายุสลัดจ์ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสในเซลล์ (WEF, 1998)

Helmer และ Kunst (1998) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง  $5 - 20^{\circ}\text{C}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส พบว่าเมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงจะมีผลให้อัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะในสภาวะไร้ออกซิเจนลดลงด้วย และอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะจะลดลงจนต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ต่ำลงก็ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัด

Baetens และคณะ (1999) ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง  $5 - 20^{\circ}\text{C}$  ที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส แล้วได้สรุปผลของอุณหภูมิต่อการกำจัดฟอสฟอรัสไว้ในตารางที่ 2-12 (เครื่องหมายบวก แทนผลดีที่เกิดต่อระบบ และเครื่องหมายลบ แทนผลเสียที่เกิดต่อระบบ)

ปรีดา เหล่าจุจินดา (2541) ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 5 – 40 °C ที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส พบว่าที่อุณหภูมิต่ำลงระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น

อภิรดี ดวงใจ (2543) ศึกษาผลของการเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วง 20 – 35 °C ที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอย่างฉับพลันประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 35 °C ระบบไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อีก

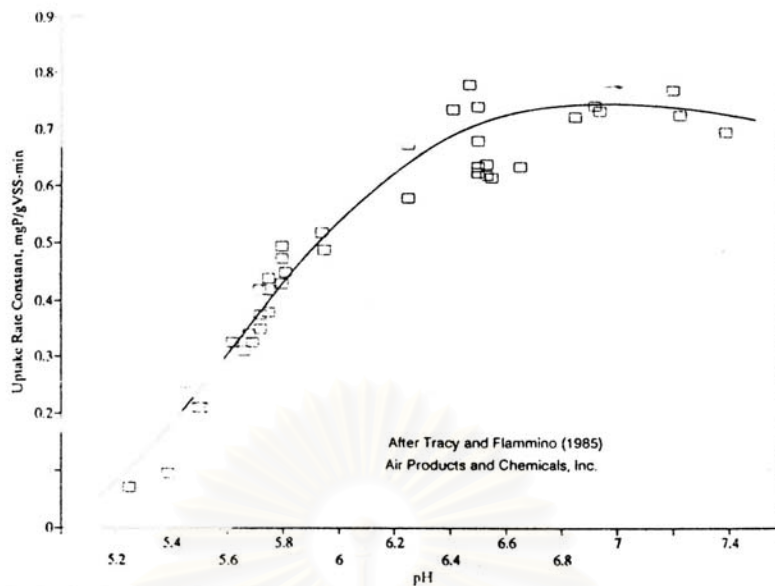
ตารางที่ 2-12 ผลของการลดอุณหภูมิที่มีต่อระบบอีปีฟีอาร์ (Baetens และคณะ, 1999)

Level	Action	Resulting effect	Effect
Organism	- Lower rates	- Kinetic limitation	
	- Lower decay resulting in higher observed yield	- Less limitation due to increased storage capacity	+
Population	- Acclimation leading to population shift within PAOs	- Changed Arrhenius coefficient, changed kinetics	+/-
	- Less nitrification, less nitrate	- More substrate for PAOs, more storage capacity	
	- Less fermentation	- Less substrate for PAOs, less storage capacity	
Physical-chemical	- Precipitation	- Probability of precipitation decreases - If solubility product is exceeded, precipitate formation quicker	

#### 2.3.4.3 พีเอช

Tracy และ Flammino (1985 อ้างโดย Randall และคณะ, 1992) แสดงว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 6.0 – 7.4 ดังรูปที่ 2-10 และเมื่อพีเอชลดต่ำลง อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจะลดลงด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-10 ผลของพีเอชที่มีต่ออึบีฟิอาร์ (Randall และคณะ, 1992)

Liu และคณะ (1996) พบว่าปริมาณการจับใช้อะซิเตตมีค่าสูงสุดที่พีเอชช่วง 6.5 - 7.8 และปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงสุดเกิดขึ้นที่พีเอชช่วง 7.1 - 8.6 โดยสรุปว่าพีเอช  $6.8 \pm 0.7$  เป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ

#### 2.3.4.4 ไนเตรต

ปริมาณของแหล่งคาร์บอนที่พีเอโอนามาสะสมในสภาวะไร้ออกซิเจนนั้น มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างมาก เมื่อมีแหล่งคาร์บอนมากก็จะทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาภายนอกเซลล์มาก และเกิดการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากขึ้นด้วย แต่หากในสภาวะไร้ออกซิเจนมีไนเตรตเข้ามาด้วย ไนเตรตจะถูกใช้ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยมีแหล่งคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งทำให้แหล่งคาร์บอนที่พีเอโอจะนำไปสะสมไว้ก็จะลดลง และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสลดลงด้วย

Henze และคณะ (1996) กล่าวถึงผลกระทบด้านลบของไนเตรตที่มีในสภาวะไร้ออกซิเจนว่า ไนเตรตทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบลดลง โดยไนเตรต 1 โมลจะใช้อะซิเตต 1.26 โมล และไนเตรตยังมีผลกระทบต่อเมตาบอลิซึมของพีเอโอ ทำให้ไม่เกิดการสะสมโพลีฟอสเฟต

แต่ในบางการศึกษาก็พบว่าไนเตรตไม่ได้ยับยั้งการกำจัดฟอสฟอรัสเสียทีเดียว เนื่องจากมีพีเอโอบางส่วนที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน พร้อมกับเกิดการคายฟอสฟอรัสได้

Kuba และคณะ (1994) ได้ศึกษาผลกระทบของไนเตรตต่อการคายฟอสฟอรัส โดยมีอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าอัตราการใช้อะซิเตตที่สูงขึ้นนั้นเนื่องจากอะซิเตตถูกใช้ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยมีพีเอโอบางส่วนซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไน

ตริฟิเคชันได้ด้วย ซึ่งเรียกว่า “Denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB” อย่างไรก็ตามอัตราการคายฟอสฟอรัสต่อปริมาณอะซิเตตที่ถูกใช้ก็มีค่าที่ต่ำกว่าในระบบที่ไม่ได้เติมไนเตรตเข้าไป ทั้งนี้เพราะอะซิเตตที่ใช้ไปในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันนั้นมีค่าประมาณ 20% ไม่ถูกนำไปสังเคราะห์เป็นพีเอชเอ และเนื่องจากอัตราการสังเคราะห์พีเอชเอต่ออะซิเตตที่ถูกใช้มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Comeau-Wentzel ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่า Reducing power ที่ใช้ในการสังเคราะห์พีเอชเอเกิดจากวัฏจักร TCA ตามแบบจำลอง

Kuba และคณะ (1996) ศึกษาผลของการเติมไนเตรตภายหลังสภาวะไร้ออกซิเจนที่มีต่อการจับใช้ฟอสฟอรัส สรุปว่าดีพีบีสามารถใช้ไนเตรตที่เติมให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และใช้ไนเตรตนี้แทนออกซิเจนเพื่อออกซิไดซ์พีเอชเอ ให้เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้นในระบบ และเมื่อมีการเติมออกซิเจนก่อนเติมไนเตรต 0.25 – 0.75 ซม. ก็ยังพบการจับใช้ฟอสฟอรัสเมื่อเติมไนเตรตลงไปเช่นกัน ซึ่งอัตราการจับใช้ในขณะที่มีออกซิเจนก็ไม่ต่างกับเมื่อมีไนเตรตมากนัก

Chuang และคณะ (1996) อธิบายผลของไนเตรต และแหล่งคาร์บอนที่มีต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสไว้ว่า ในระบบที่มีทั้งไนเตรตและแหล่งคาร์บอน (ในรูปอะซิเตต) อยู่ จุลชีพที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดฟอสฟอรัส จะดึงอะซิเตต เข้ามาเก็บกักไว้ในเซลล์ในรูป พีเอชเอ และกลัยโคเจน ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการดึงอะซิเตตนั้นได้มาจากการออกซิไดซ์  $\text{NADH}_2$  ด้วยไนเตรตเกิดการคายฟอสฟอรัส และเมื่อระบบมีเพียงไนเตรตโดยไม่มีอะซิเตตในระบบ จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้นโดยจุลชีพจะใช้พีเอชเอในเซลล์ เป็นแหล่งคาร์บอน และมีการจับใช้ฟอสฟอรัสในระบบเข้ามาเก็บไว้ในเซลล์

Meinhold และคณะ (1998) ศึกษาผลของการเติมไนเตรตหลังจากการคายฟอสฟอรัสของพีเอโอต่อการกำจัด ผู้วิจัยได้สนับสนุนแนวคิดที่แบ่งพีเอโอออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (non-DPB) และกลุ่มที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ด้วย (DPB) และสรุปว่าดีพีบีนั้นมีปริมาณน้อยกว่า โดยพีเอโอทั้ง 2 กลุ่มแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันตามแต่สภาวะดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 พฤติกรรมของ non-DPB และ DPB (Meinhold และคณะ, 1998)

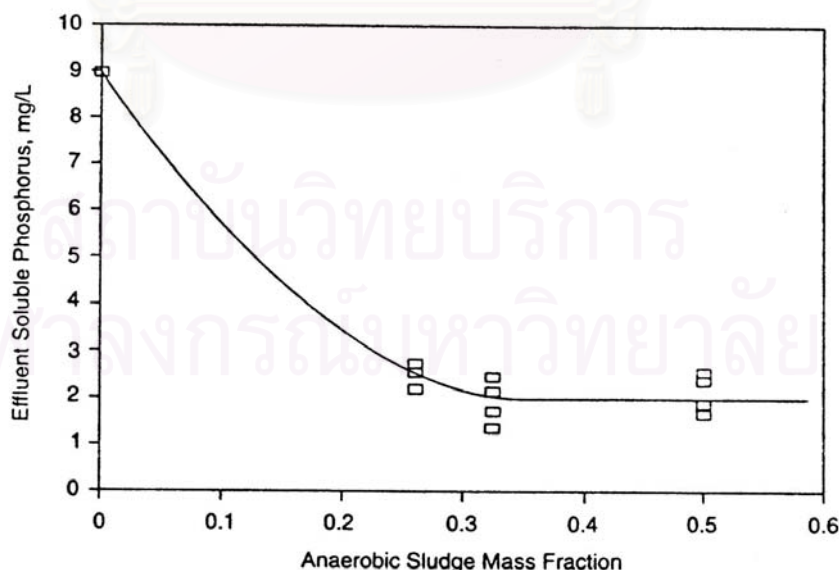
	Anaerobic	Anoxic	Aerobic
non-DPB	storage PHB	storage PHB	utilize PHB
	P release	P release	P uptake
DPB	storage PHB	utilize PHB	utilize PHB
	P release	P uptake	P uptake

จากตารางเฉพาะในสภาวะแอนน็อกซิกเท่านั้นที่ non-DPB และ DPB จะทำงานแตกต่างกัน ถ้าหาก non-DPB ทำงานมากกว่าในสภาวะแอนน็อกซิก ค่าฟอสฟอรัสสุทธิที่ปรากฏในระบบก็จะเพิ่มขึ้นแต่หาก DPB ทำงานมากกว่าก็จะเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น อัตราการทำงานของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มขึ้นอยู่กับ ปริมาณพีเอชเอในเซลล์ ปริมาณแหล่งคาร์บอนตลอดสภาวะแอนน็อกซิก เช่นเมื่อมีการเติมอะซิเตตปริมาณมาก ๆ ค่าฟอสฟอรัสสุทธิของระบบจะเพิ่มขึ้น

Stevens และคณะ (1999) ได้นำจุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส มาทดลองเติมและไม่เติมน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นแรก (Primary Effluent) ในสภาวะแอนน็อกซิก พบว่าทั้งสองการทดลองเกิดการคายฟอสฟอรัสและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้นพร้อมกัน

#### 2.3.4.5 เวลาเก็บกักของสภาวะไร้ออกซิเจน

Randall และคณะ (1992) ได้เสนอข้อมูลของระบบบำบัดแบบอิมปีฟิวอาร์ที่ York River ซึ่งรองรับน้ำเสีย 24,600 ลบ.ม.ต่อวัน มีเวลาเก็บกักทั้งหมด 6 ชม. ซึ่งเป็นเวลาเก็บกักสำหรับสภาวะไร้ออกซิเจน 2 ชม. (คิดเป็น 0.33 ของทั้งหมด) พบว่าขนาดของสภาวะไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมนั้น ขึ้นกับส่วนประกอบในน้ำเสียเข้า หากมีกรดไขมันระเหยง่ายปนระส่นมาก ขนาดของถังก็สามารถลดลงได้ เพราะจะเกิดการจับใช้คาร์บอนได้อย่างรวดเร็ว และยังชี้ว่าเวลาเก็บกักเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากกว่าอัตราส่วนของขนาดสภาวะไร้ออกซิเจนต่อขนาดทั้งหมด ตามรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 ผลของสัดส่วนเวลาพักไร้ออกซิเจนที่มีต่อค่าฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง (Randall และคณะ, 1992)

WEF (1998) ได้สำรวจระบบอิมปีฟิอาร์ทั้งขนาดจริงและขนาดต้นแบบ ที่มีเวลาเก็บกักของสภาวะไร้ออกซิเจนต่างๆกัน โดยมีค่าระหว่าง 0.5 – 2.7 ชม. พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักสูงขึ้น การกำจัดฟอสฟอรัสก็จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

#### 2.3.4.6 ประจุบวก

Comeau และคณะ (1987) พบว่า โปแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมเป็นส่วนประกอบในโซโมเลกุลของโพลีฟอสเฟต โดยที่ประจุบวกนี้จะถูกใช้เพื่อสร้างเสถียรภาพให้แก่กลุ่มฟอสเฟต ซึ่งสูตรโมเลกุลของโพลีฟอสเฟตได้แก่  $Me_{n+2}P_nO_{3n+1}$  (Jardin และ Popel, 1996b) เมื่อ Me คือประจุบวก

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าปริมาณโปแทสเซียม และแมกนีเซียมในน้ำเสียทั่วไปมีปริมาณเพียงพอสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส ยกเว้นน้ำเสียบางชนิดที่ต้องพิจารณาก่อน เช่น น้ำเสียจากโรงงาน

ตารางที่ 2-14 รวบรวมอัตราส่วนประจุบวกต่อฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัส

$K^+ / P$	$Mg^{2+} / P$	$Ca^{2+} / P$	Direction of transport	แหล่งอ้างอิง
0.2	0.28	0.09	P release	Comeau และคณะ (1987)
0.24	0.27	0.12	P uptake	Comeau และคณะ (1987)
0.34	0.24	0.06	Avg. release&uptake	Comeau และคณะ (1987)
0.23	0.29	-	P release	Carlsson และคณะ (1996)
0.33	0.23	-	content in PAOs sludge	Jardin และ Popel (1996a)
0.325	0.259	-	content in PAOs sludge	Jardin และ Popel (1996b)
0.356	0.25	-	Avg. release&uptake	Pattarkine (1991 อ้างโดย WEF 1998)

## 2.4 การกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ระบบบำบัดแบบเอเอส (Activated Sludge, A/S) ได้พัฒนาให้สามารถกำจัดได้ทั้งสารประกอบคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจึงทำให้กระบวนการมีความสลับซับซ้อนมากขึ้น เพราะต้องเกี่ยวข้องกับสภาวะต่างๆในการบำบัด และจุลชีพกลุ่มต่างๆก็เกี่ยวข้องกับการบำบัดด้วยดังตารางที่ 2-15



ตารางที่ 2-15 สภาวะต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส  
(Grady และคณะ, 1999)

Zone	Biochemical transformations	Functions	Zone required for
Anaerobic	- Uptake and storage of VFAs by PAOs - Fermentation of Readily biodegradable organic matter by heterotroph - Phosphorus release	- Selection of PAOs	- Phosphorus removal
Anoxic	- Denitrification - Alkalinity production	- Conversion of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{N}_2$ - Selection of Denitrifier	- Nitrogen Removal
Aerobic	- Nitrification - Metabolism of stored and exogenous substrate by PAOs - Metabolism of exogenous substrate by heterotroph - Phosphorus uptake - Alkalinity consumption	- Conversion of $\text{NH}_4\text{-N}$ to $\text{NO}_3\text{-N}$ - Nitrogen removal through gas stripping - Formation of polyphosphate	- Nitrogen Removal - Phosphorus removal

#### 2.4.1 รูปแบบกระบวนการกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

(Randall และคณะ, 1992; WEF, 1992; Seviour และ Blackall, 1999)

รูปแบบกระบวนการกำจัดได้พัฒนาเรื่อยมา ซึ่งได้รับการปรับเปลี่ยนรูปแบบตามความรู้ใหม่ๆที่เกิดขึ้นจากงานวิจัย

ทีมงานของ Barnard ที่แอฟริกาใต้ได้ปรับปรุงระบบ Bardenpho ตามรูปที่ 2-12 ซึ่งสามารถกำจัดสารประกอบคาร์บอน และไนโตรเจน ให้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ด้วย ด้วยการเพิ่มถังไร้ออกซิเจนหน้ากระบวนการ และใช้ชื่อว่า Modified Bardenpho หรือ Five-stage bardenpho ตามรูปที่ 2-13

นอกจากนี้ทีมงานยังได้ปรับปรุงระบบ Modified Bardenpho ตามรูปที่ 2-13 ด้วยการเพิ่มขนาดถังแอนน็อกซิก เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเพื่อลด

ผลกระทบของไนเตรตที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส รวมทั้งยกเลิกถังแอนน็อกซิกใบที่สอง และถังเติมออกซิเจนใบที่สอง และให้ชื่อว่า Three-stage phoredox ตามรูปที่ 2-14

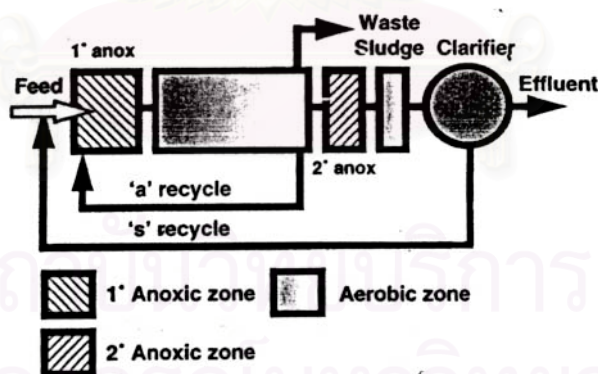
ระบบ Johannesburg ตามรูปที่ 2-16 ได้พัฒนามาจาก Phoredox ตามรูปที่ 2-15 เพื่อลดผลกระทบของไนเตรตจากถังตกตะกอน ด้วยการเติมถังแอนน็อกซิกระหว่างถังตกตะกอนกับถังไร้ออกซิเจน ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันในถังจึงเป็นแบบใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์

Mamais และทีมงานที่ University of Cape Town แอฟริกาใต้ พัฒนาระบบเพื่อลดผลกระทบจากไนเตรตที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสอีกหลายรูปแบบ ได้แก่ UCT Process ตามรูปที่ 2-17 และ Modified UCT ตามรูปที่ 2-18

ระบบส่วนใหญ่ที่พัฒนาขึ้นที่แอฟริกาใต้นั้น มีการควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้สูง (> 20 วัน) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์อัดเนื่องจากแบคทีเรียชนิดเส้นใยที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นระบบที่ควบคุมอายุสลัดจ์ต่ำลงจึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ที่เรียกว่า Virginia Initiative Project, VIP ตามรูปที่ 2-19 ซึ่งยังคงมีรูปแบบการลดผลกระทบของไนเตรตเช่นเดียวกับระบบ UCT

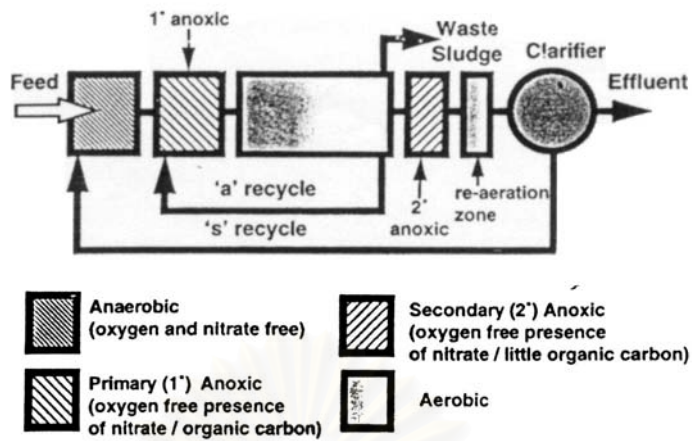
Irvine และทีมงานได้พัฒนาระบบ Sequencing Batch Reactor (SBR) ตามรูปที่ 2-20 ให้สามารถกำจัดสารประกอบคาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ แต่ต้องจัดรูปแบบให้เกิดทั้งสภาวะไร้ออกซิเจนและสภาวะแอนน็อกซิกในกระบวนการด้วย

**Bardenpho Process**



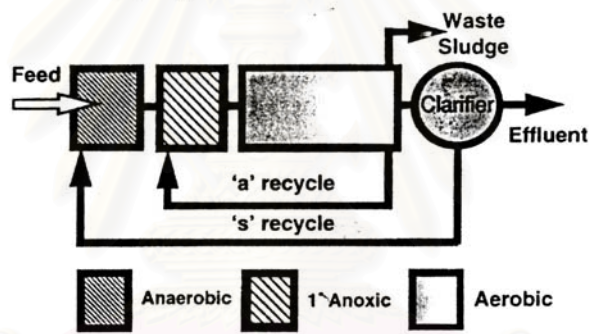
รูปที่ 2-12 กระบวนการ Bardenpho (Seviour และ Blackall, 1999)

**Modified Bardenpho (Phoredox) Process**



รูปที่ 2-13 กระบวนการ Modified Bardenpho (Seviour และ Blackall, 1999)

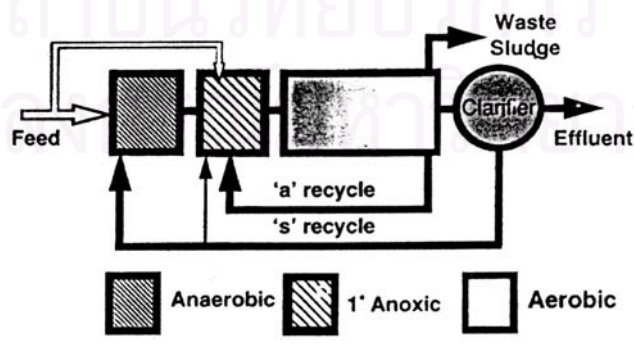
**3 Stage Phoredox Process**



รูปที่ 2-14 กระบวนการ 3 stage Phoredox (Seviour และ Blackall, 1999)

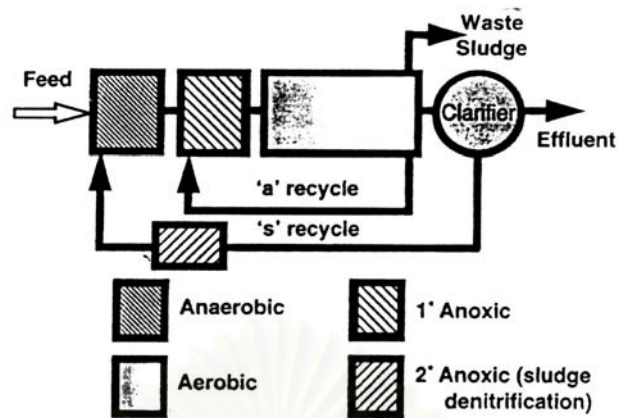
**Phoredox Process**

with modifications to minimise the effect of nitrate



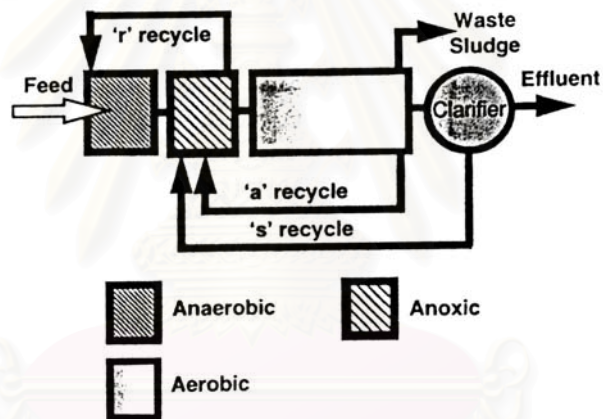
รูปที่ 2-15 กระบวนการ Phoredox (Seviour และ Blackall, 1999)

**Johannesberg Process**  
based upon the 3 Stage Modified Bardenpho Process



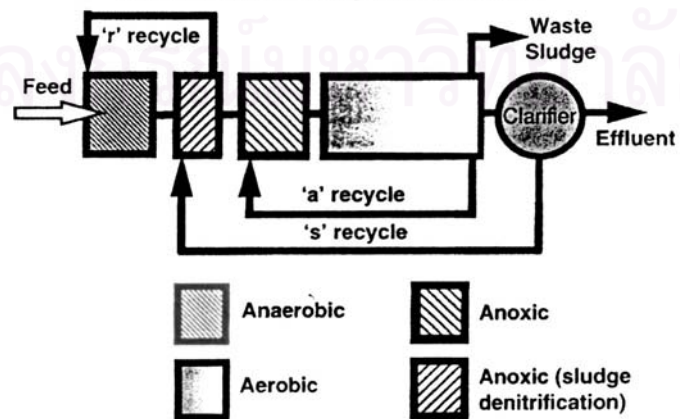
รูปที่ 2-16 กระบวนการ Johannesburg (Seviour และ Blackall, 1999)

**University of Cape Town Process**  
A modification of the 3 Stage Phoredox Process

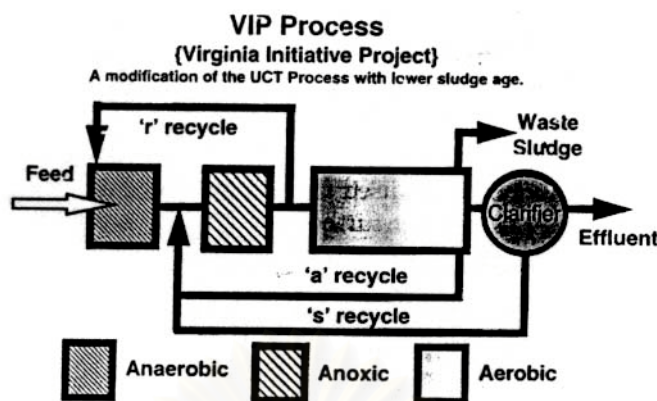


รูปที่ 2-17 กระบวนการ UCT (Seviour และ Blackall, 1999)

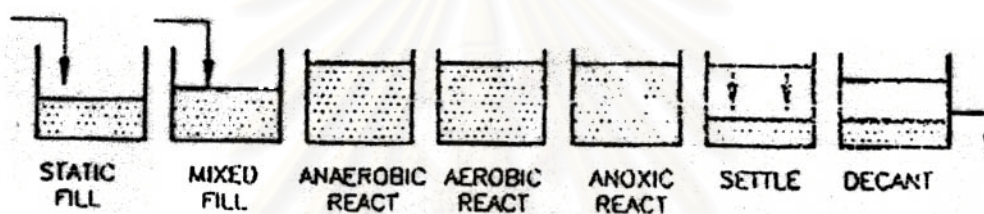
**Modified University of Cape Town Process**  
A modification of the 3 Stage Phoredox Process



รูปที่ 2-18 กระบวนการ MUCT (Seviour และ Blackall, 1999)



รูปที่ 2-19 กระบวนการ VIP (Seviour และ Blackall, 1999)



รูปที่ 2-20 กระบวนการ SBR (WEF, 1992)

## 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน

### 2.4.2.1 อายุสลัดจ์ (Grady และคณะ, 1999)

อายุสลัดจ์ในแต่ละสภาวะที่คำนวณได้จากสมการที่ 2-1 สามารถบอกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะได้ดีกว่าอายุสลัดจ์รวม

$$\frac{\sum (X_{M,T} V)_{\text{phase}}}{(X_{M,T} V)_{\text{SYSTEM}}} = \theta_c, \text{ phase} \quad (2-1)$$

โดยที่ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย ( $X_{M,T}$ ) ในแต่ละถังขึ้นอยู่กับรูปแบบในการกำจัด เช่นกระบวนการ Bardenpho Phoredox และ 3-stage phoredox นั้น ถือว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเท่ากันในทุกถัง เนื่องจากการเวียนสลัดจ์เพียงจุดเดียว แต่สำหรับกระบวนการ UCT MUCT และ VIP ซึ่งมีการเวียนสลัดจ์หลายจุดนั้น จะทำให้ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในถังไร้ออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าในถังอื่น ๆ

Grady และคณะ (1999) แนะนำค่าอายุสลัดจ์รวมของส่วนแอนน็อกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน ที่เหมาะสมกับลักษณะของสารอาหาร (Substrate) ที่เติมเข้าระบบดังนี้

ค่าอายุสลายตัวของระบบเมื่อระบบใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอาหารที่ย่อยสลายได้รวดเร็ว (Readily biodegradable) เป็นองค์ประกอบ ให้ใช้ค่า 1 วันสำหรับอุณหภูมิมากกว่า 20 °C และใช้ค่า 1.5 วันสำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 °C ส่วนน้ำเสียที่มีสารอาหารที่ย่อยสลายได้ช้า (Slowly biodegradable) เป็นองค์ประกอบควรให้ค่าสูงขึ้นเป็น 2-3 วัน และอาจใช้ค่าอายุสลายเพียง 0.5 วันในกรณีที่น้ำเสียประกอบด้วยกรดไขมันระเหยง่าย หรือสารอาหารที่ย่อยสลายได้รวดเร็วในปริมาณที่เพียงพอ

การเพิ่มอายุสลายตัวของส่วนไร้ออกซิเจนทำให้เกิดการหมักที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส และการเพิ่มอายุสลายตัวของส่วนแอนนออกซิกทำให้เกิดการสลายย่อยสารอาหารที่ย่อยสลายได้ช้า เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

การเพิ่มค่าอายุสลายตัวของส่วนแอนนออกซิก และส่วนเติมออกซิเจนจะส่งผลกระทบต่อการกำจัดฟอสฟอรัสดังนี้

ก.) การเพิ่มอายุสลายเป็นการลดการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบลดลง

ข.) อายุสลายของส่วนเติมออกซิเจนที่มากเกินไป ทำให้สารอินทรีย์ที่เก็บสะสมไว้ในเซลล์ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ จนลดอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสลง

ค.) ทำให้เกิดการคายฟอสฟอรัสครั้งที่สอง (Secondary release)

อย่างไรก็ตาม Wentzel (1988 อ้างโดย WEF, 1998) พบว่าอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์มากขึ้น เมื่ออายุสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการสลายตัวของพีเอโอมีค่าต่ำ (0.05 ต่อวัน) เมื่อเทียบกับแบคทีเรียแบบเฮเทอโรทรอปซึ่งมีมากในระบบ (0.24 ต่อวัน) ดังนั้นเมื่ออายุสลายสูงขึ้น ทำให้สัดส่วนพีเอโอในระบบมีมากขึ้น Wentzel สรุปว่ากระบวนการอีปีฟิวราสามารถเกิดขึ้นได้ที่อายุสลายตั้งแต่ 3 ถึง 68 วัน

#### 2.4.2.2 อัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัส

(Grady และคณะ, 1999)

ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัส โดยสำหรับการกำจัดไนโตรเจน สารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ส่วนในการกำจัดฟอสฟอรัส สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกดึงเข้าไปในเซลล์เพื่อสังเคราะห์พีเอเอในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการกำจัด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นถูกแย่งชิงโดยแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดต่าง ๆ กัน หากปริมาณของสารอินทรีย์มีอยู่อย่างจำกัดแล้ว ก็จะเป็นการจำกัดประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปด้วย

อัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจน ดูได้จากอัตราส่วนซีโอดีต่อที่เคเอ็น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วควรมีค่าเท่ากับ 2.86 แต่ค่าดังกล่าวก็อาจจะไม่เพียงพอต่อการกำจัด

อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และไนโตรเจนในน้ำเสียบางส่วนจะถูกใช้เพื่อสังเคราะห์เซลล์ และสารอินทรีย์คาร์บอนบางส่วนนั้นย่อยสลายได้ช้า ซึ่งต้องลดขนาดโมเลกุลด้วยกระบวนการไฮดรอลิซิสก่อนจึงจะถูกนำมาใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2-16 อัตราส่วนสารอินทรีย์ต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม (Grady และคณะ, 1999)

Nitrogen removal			
efficiency	COD/TKN	BOD <sub>5</sub> /NH <sub>3</sub> -N	BOD <sub>5</sub> /TKN
Poor	< 5	< 4	< 2.5
Moderate	5 - 7	4 - 6	2.5 - 3.5
Good	7 - 9	6 - 8	3.5 - 5.0
Excellent	> 9	> 8	> 5

อัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อฟอสฟอรัส วัดได้ด้วยหลายรูปแบบได้แก่ อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้งหมด (COD/TP) อัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้งหมด (BOD<sub>5</sub>/TP) อัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสละลาย (BOD<sub>5</sub>/SP) และ อัตราส่วนบีโอดีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (BOD<sub>5</sub>/ΔP) ซึ่งความเกี่ยวข้องของปริมาณสารอินทรีย์กับปริมาณฟอสฟอรัสในการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นทำให้เกิดสภาวะในการกำจัด 2 แบบคือ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนหรือแหล่งคาร์บอนจำกัด (Carbon Limited) และปริมาณฟอสฟอรัสจำกัด (Phosphorus Limited)

ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนจำกัด คือสภาวะที่มีสารอินทรีย์ไม่เพียงพอต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ทำให้พีเอไอสะสมพีเอชเอในเซลล์ได้น้อยกว่าที่ควรเป็น จึงเกิดการตายและจับใช้ฟอสฟอรัสน้อยลงด้วย ฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบจึงมีค่าสูงขึ้น

ปริมาณฟอสฟอรัสจำกัด คือสภาวะที่ฟอสฟอรัสไม่เพียงพอให้กำจัด โดยมีสารอินทรีย์คาร์บอนมากเกินไปในการสังเคราะห์พีเอชเอ แต่กลับไม่มีฟอสฟอรัสเพียงพอสำหรับการสังเคราะห์โพลีฟอสเฟตในเซลล์ ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งมีค่าต่ำ ดังนั้นสภาวะที่ปริมาณฟอสฟอรัสจำกัด จึงเป็นสภาวะพึงปรารถนาในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน

นอกจากอัตราส่วนปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสแล้ว ชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำเสียก็มีความสำคัญต่อการบำบัดเช่นกัน (ดูได้ในหัวข้อที่ 2.2.5.1 และ 2.3.2.1)

ตารางที่ 2-17 อัตราส่วนบีโอดีต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (Grady และคณะ, 1999)

Type of BPR process	BOD <sub>5</sub> /ΔP ratio (mgBOD <sub>5</sub> /mgP)	COD/ΔP ratio (mgCOD/mgP)
High efficiency (e.g. A/O <sup>TM</sup> without nitrification, VIP, UCT)	15-20	26-34
Moderate efficiency (e.g., A/O <sup>TM</sup> and A <sup>2</sup> /O <sup>TM</sup> with nitrification)	20-25	34-43
Low efficiency (e.g., Bardenpho)	> 25	> 43

#### 2.4.2.3 ปัจจัยอื่น ๆ

##### ก) อุณหภูมิ

- มีผลต่อไนตริไฟเออร์ มากกว่าจุลชีพกลุ่มอื่น ๆ
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนลดลง
- อัตราการหมักสารอินทรีย์ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้รวดเร็วในระบบลดลง ส่งผลประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดลง

##### ข) ออกซิเจนละลาย

- ค่าออกซิเจนละลายในสถานะเต็มออกซิเจนควรมากกว่า 2 มก./ล. เพื่อไม่ให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และการจับใช้ฟอสฟอรัส
- ออกซิเจนละลายที่มีมากในสถานะแอนน็อกซิก และไร้ออกซิเจน จะไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอน เป็นการลดสารอินทรีย์สำหรับดีไนตริไฟเออร์และพีเอไอ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง

##### ค) พีเอช

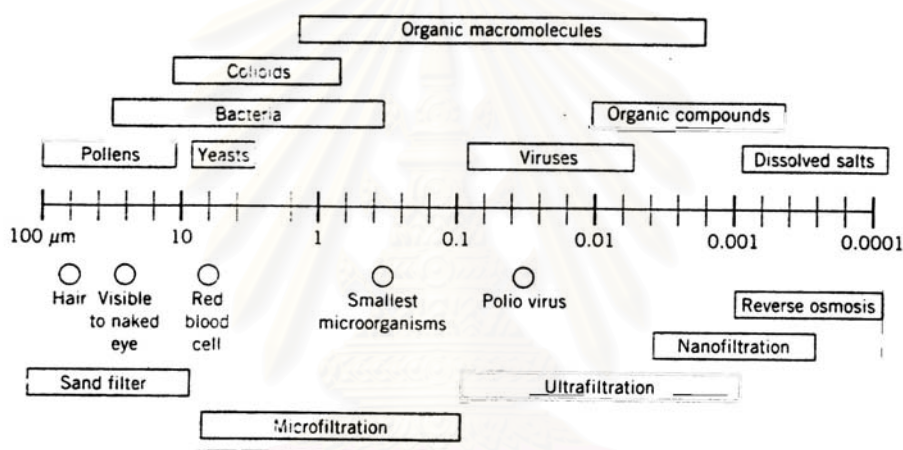
- การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่อไนตริไฟเออร์มากกว่าจุลชีพกลุ่มอื่น ๆ



## 2.5 แผ่นเยื่อสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการแผ่นเยื่อสังเคราะห์ (Synthetic membrane process) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเยื่อในจุดประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อใช้แยกสาร เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร หรือทำให้สารมีความบริสุทธิ์ โดยหลักการที่สำคัญของกระบวนการ คือการใช้แรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเยื่อกรอง จึงเกิดการแยกระหว่างสารที่ผ่านรูพรุนของแผ่นเยื่อได้กับสารที่ไม่สามารถผ่านได้ ชนิดของแผ่นเยื่อสามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ดังรูปที่ 2-21

ด้วยคุณสมบัติในการแยกสารของแผ่นเยื่อนี้ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ รวมทั้งกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากแผ่นเยื่อที่มีรูพรุนขนาดเล็กสามารถดักแบคทีเรียในระบบบำบัดไม่ให้ออกไปกับน้ำทิ้งได้ จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด



รูปที่ 2-21 ชนิดของแผ่นเยื่อแยกตามขนาด (Droste, 1997)

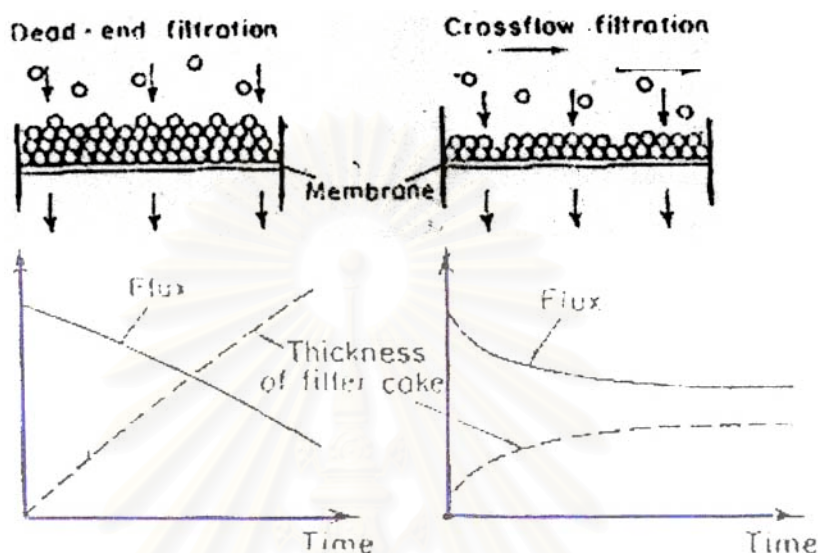
Brindle และ Stephenson (1995) สรุปการประยุกต์ใช้แผ่นเยื่อที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดไว้ซึ่งได้แก่ ใช้แยกจุลชีพออกจากน้ำทิ้ง ใช้ในอุปกรณ์เติมออกซิเจน และใช้แยกสารอินทรีย์ในน้ำเสียออกจากน้ำเสียโดยตรง

### 2.5.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Processes)

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกโดยการซึมผ่านแผ่นเยื่อวิธีหนึ่ง ใช้เพื่อแยกอนุภาคแขวนลอย โดยอาศัยหลักการแยกสารแบบคัดเลือกขนาด (Sieving mechanism) ซึ่งมีความสามารถในการแยกสารที่มีอนุภาค 0.1 – 10 ไมโครเมตร หลังจากผ่านแผ่นเยื่อแล้วตัวทำละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนจะสามารถผ่านแผ่นเยื่อไปได้ ซึ่งเรียกสารเหล่านี้ว่า เพอเมต (Permeate) ส่วนสารแขวนลอยที่ไม่สามารถผ่านแผ่นเยื่อไปได้ เพราะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุน จะถูกกักไว้ซึ่งเรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) หรือ คอนเซนเตรต (Concentrate)

### 2.5.1.1 ลักษณะการกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

ลักษณะการกรองสารละลายในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ การกรองแบบไหลผ่านแผ่นเยื่อ (Dead-end Filtration) และการกรองแบบไหลขนานกับแผ่นเยื่อ (Cross-flow Filtration) ดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 การกรองแบบไหลผ่านแผ่นเยื่อ และแบบไหลขนานแผ่นเยื่อ

(Plankarom, 1996)

การกรองแบบไหลผ่านแผ่นเยื่อ เป็นการกรองที่ทิศทางการไหลของสารที่ต้องการกรองตั้งฉากกับแผ่นเยื่อ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจึงสะสมตัวที่ผิวหน้าแผ่นเยื่ออย่างต่อเนื่อง ทำให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อลดลงอย่างรวดเร็ว

การกรองแบบไหลขนานแผ่นเยื่อ เป็นการกรองที่ทิศทางการไหลของสารที่ต้องการกรองขนานไปกับแผ่นเยื่อ ซึ่งทิศทางการไหลขนานกับแผ่นเยื่อนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อ กวาดเอาอนุภาคที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อออกไปด้วย ดังนั้นอัตราการกรองแบบไหลขนานแผ่นเยื่อจึงสูงกว่าการกรองแบบไหลผ่านแผ่นเยื่อ

### 2.5.1.2 ฟลักซ์ (Flux)

ค่าฟลักซ์ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการกรอง และปริมาตรของเพอมีเอตที่ผ่านรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ผิวแผ่นเยื่อต่อระยะเวลาที่ใช้ในการกรอง

$$J = \frac{\Delta P}{\eta R t} \quad (2-2)$$

เมื่อ  $J$  คืออัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อ  
 $\Delta P_{TM}$  คือผลต่างของความดันผิวแผ่นเยื่อด้านป้อนสารกับด้านเพอมิเอต  
 $\mu$  คือความหนืดของสารละลาย  
 $R_t$  คือความต้านทานรวม

### 2.5.1.3 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเจลโพลาไรเซชัน

ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เกิดขึ้นเมื่อตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนถูกกรองออกจากระบบ ส่วนตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนถูกกักไว้ที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อ ความเข้มข้นที่ใกล้ผิวหน้าแผ่นเยื่อ ( $C_w$ ) จึงสูงกว่าบริเวณที่ห่างแผ่นเยื่อออกไป ( $C_b$ ) ความแตกต่างของความเข้มข้นทำให้เกิดการแพร่กลับของตัวถูกละลายไปยังระบบ แต่เมื่อทำการกรองต่อไปเรื่อยๆ จนความเข้มข้นของตัวถูกละลายใกล้ผิวแผ่นเยื่อมีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลายของสารนั้น จะทำให้เกิดเค้กชั้นใกล้แผ่นเยื่อ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เจลโพลาไรเซชัน ชั้นเจลหรือเค้กที่เกิดขึ้นนี้คล้ายเป็นแผ่นเยื่ออีกแผ่นหนึ่งที่ต่ออนุกรมกับแผ่นเยื่อที่มีอยู่ ทำให้ความต้านทานของแผ่นเยื่อสูงขึ้น และอัตราการกรองผ่านแผ่นเยื่อลดลง

### 2.5.2 ระบบเอ็มบีอาร์ (Membrane bioreactor, MBR)

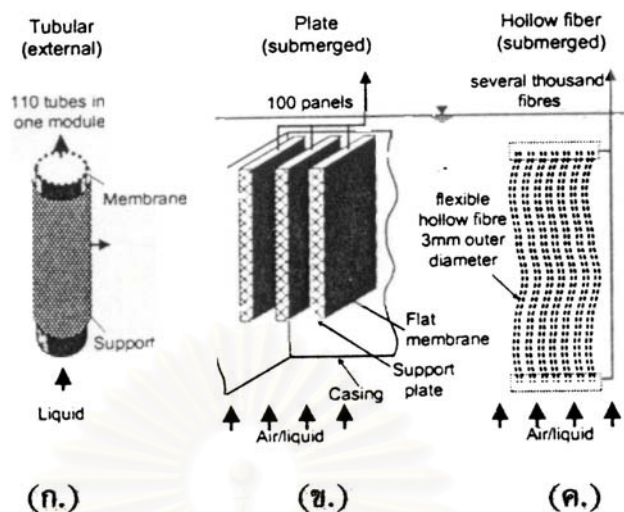
ระบบเอ็มบีอาร์ เป็นระบบเอเอสอีกรูปแบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้แผ่นเยื่อแทนถังตกตะกอน รูพรุนที่มีขนาดเล็กของแผ่นเยื่อนั้นสามารถกักจุลชีพในระบบไม่ให้ออกไปกับน้ำทิ้งได้ จุลชีพในระบบจึงมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยสูงกว่าระบบทั่วไป มีการรายงานค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของระบบเอ็มบีอาร์ที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนว่ามีค่าสูงถึง 25,000 มก./ล. (Gunder และ Krauth, 1999)

Smith และคณะ (1969) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกๆ ที่ทดลองใช้แผ่นเยื่อร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งแผ่นเยื่อที่ใช้เป็นแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) พบว่าระบบมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยประมาณ 10,000 มก./ล. โดยระบบเอ็มบีอาร์ที่ใช้ยังเป็นแบบที่แยกส่วนระหว่างถังเติมออกซิเจนกับชุดกรองด้วยแผ่นเยื่ออยู่

#### 2.5.2.1 ชนิดของแผ่นเยื่อที่ใช้ในระบบ

แผ่นเยื่อที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบ่งตามลักษณะของแผ่นเยื่อได้ 3 ชนิดคือ

- 1) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber)
- 2) แบบแผ่น (Plate and frame)
- 3) แบบท่อ (Tubular)



รูปที่ 2-23 ชนิดของแผ่นเยื่อแยกตามลักษณะ (Gunder และ Kruath, 1999)

ก.) แบบท่อ ข.) แบบแผ่น ค.) แบบเส้นใยกลวง

#### 2.5.2.2 จุดเด่นของกระบวนการ

ก) สามารถใช้แทนถังตกตะกอน

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542) กล่าวว่าความสำเร็จในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอเอส ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกตะกอนของสลัดจ์ จากการสำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของระบบเอเอสที่ไม่สามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งนั้น ก็เพราะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอน

ดังนั้นการใช้แผ่นเยื่อแทนถังตกตะกอนของระบบเอเอส เป็นการลดค่าก่อสร้างถังตกตะกอนในระบบเอเอส และทำให้ระบบสามารถผลิตน้ำทิ้งที่ได้ตามมาตรฐานจนอาจนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ทั้งนี้เพราะแผ่นเยื่อที่มีรูพรุนขนาดเล็กสามารถกักจุลชีพในระบบไม่ให้หลุดออกมากับน้ำทิ้งได้

ข) สามารถใช้แทนระบบฆ่าเชื้อโรค

เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กของแผ่นเยื่อ จึงสามารถกักเชื้อแบคทีเรียหรือไวรัสที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนไม่ให้ปะปนออกมาในน้ำทิ้งได้

Kolega และคณะ (1991) ทดลองติดตั้งแผ่นเยื่อแบบเส้นใยกลวงขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตรในระบบบำบัดน้ำเสียที่หลังถังตกตะกอนชั้นที่หนึ่ง และหลังถังตกตะกอนชั้นที่สอง พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านแผ่นเยื่อหลังถังตกตะกอนที่สองไม่พบแบคทีเรียและไวรัส และน้ำทิ้งที่ผ่านแผ่นเยื่อหลังถังตกตะกอนที่หนึ่งไม่พบแบคทีเรียเลย

ตารางที่ 2-18 ผลการกำจัดคอลลีฟอร์มทั้งหมดด้วยระบบเอ็มบีอาร์

ชนิดของแผ่นเยื่อ	ขนาดรูพรุน (ไมครอน)	ประสิทธิภาพการกำจัด Total Coliform	แหล่งอ้างอิง
Tubular	0.1	No detected	Gunder และ Krauth (1999)
Plate and Frame	0.4	No detected	Gunder และ Krauth (1999)
Hollow Fiber	0.1	No detected	Gunder และ Krauth (1999)
Hollow Fiber	0.5	6-log removal	Messalem และคณะ (2000)
Plate and Frame	0.4	9-log removal	Gander (2000)
Plate and Frame	5.0	5-log removal	Gander (2000)
Plate and Frame	0.4	> 7-log removal	Jefferson และคณะ (2000)

ค) สามารถรักษาค่าอายุสัต์จี้ให้มีค่าสูง

ระบบเอ็มบีอาร์สามารถรักษาค่าอายุสัต์จี้ให้มีค่าสูง ทำให้มีการทิ้งสัต์จี้ส่วนเกินออกจากระบบน้อยกว่าระบบทั่วไป หรืออาจจะไม่ต้องทิ้งสัต์จี้ออกจากระบบเลย

Wagner และ Rosenwinkel (2000) ทดลองเดินระบบเอ็มบีอาร์โดยไม่ทิ้งสัต์จี้ ออกจากระบบเป็นเวลา 1 ปี ทำให้ค่าเอ็มแอลเอสเอสเพิ่มขึ้นจาก 2,000 มก./ล. เมื่อเริ่มต้นทดลอง เป็น 18,000 มก./ล. หลังเดินระบบได้ 1 ปี พบว่าอัตราการเกิดสัต์จี้มีค่าเพียง 0.002 – 0.032 กิโลกรัม/วัน โดยจุลชีพดำรงอยู่อย่างอนุรักษ์ (Preservative Metabolism) และจากการสมดุลมวลคาร์บอนพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำเสียเข้าออกจากระบบในรูปคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

เนื่องจากสามารถรักษาค่าอายุสัต์จี้ได้สูง ทำให้จุลชีพที่อัตราการเติบโตช้าไม่ถูกล้างออกจากระบบ จึงเอื้อให้เกิดจุลชีพที่หลากหลายในการบำบัด

Luxmy และคณะ (2000) วิเคราะห์ชุมชนแบคทีเรีย (Bacterial Community) ด้วยวิธี FISH และ DGGE ในระบบเอ็มบีอาร์ที่ป้อนด้วยน้ำเสียชุมชน พบว่ามีแบคทีเรียกลุ่มที่มีอัตราการเติบโตช้าในระบบ เช่น *Nitrosomonas Nitrococcus* และ *Nitrobacter* โดยแบคทีเรียที่พบนี้มีรูปร่างที่หลากหลาย

ง) ลดขนาดถังเติมอากาศ

ปริมาณจุลชีพในระบบมีผลต่อการบำบัดน้ำเสียโดยตรง เมื่อระบบมีความเข้มข้นของจุลชีพสูง ทำให้ขนาดของถังเติมอากาศลดลงได้

Smith และคณะ (1969) แสดงว่าระบบเอ็มบีอาร์มีเวลากักของถังเติมอากาศน้อยกว่าระบบอีเอเอส 2 – 5 เท่า เมื่อเดินระบบที่ค่าอัตราส่วนเอฟต่อเอ็มใกล้เคียงกัน

จ) ใช้กำจัดสารอาหารที่ย่อยสลายยาก และโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสีย

ฉ) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Reuse)

### 2.5.2.3 จุดด้อยของกระบวนการ

ระบบเอ็มบีอาร์ เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่าระบบทั่วไป โดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เกิดจาก

1. พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำเพมิเอตออกจากระบบ
2. พลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

Chiemchaisri และคณะ (1993 อ้างโดย Brindle และ Stephenson, 1995) รายงานการใช้พลังงานของระบบเอ็มบีอาร์ที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากสำนักงานขนาดใหญ่ เพื่อนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ว่าต้องใช้พลังงาน 3.0 – 5.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.เพมิเอต

Gunder และ Kruath (1999) เปรียบเทียบการใช้พลังงานของระบบเอ็มบีอาร์ โดยใช้แผ่นเยื่อชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของระบบเพิ่มมากขึ้น จะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดก็สูงขึ้นด้วย โดยเมื่อความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยน้อยกว่า 15,000 มก./ล. พลังงานที่ต้องใช้สำหรับแผ่นเยื่อแบบท่อเท่ากับ 2.5 – 3.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.เพมิเอต และเท่ากับ 1.0 – 2.0 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.เพมิเอตสำหรับแผ่นเยื่อแบบเส้นใยกลวงและแบบแผ่น และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 25,000 มก./ล. จะต้องใช้พลังงานถึง 3.0 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.เพมิเอต สำหรับแผ่นเยื่อแบบเส้นใยกลวงและแบบแผ่น (พลังงานที่ใช้คิดเฉพาะที่ใช้ในการกรองและการเติมอากาศ)

### 2.5.3 การอุดตันของแผ่นเยื่อ

การอุดตันที่เกิดขึ้นบนแผ่นเยื่อทำให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อลดลง ซึ่งต้องใช้พลังงานในการบำบัดมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการในการลดการอุดตันของแผ่นเยื่อในระบบเอ็มบีอาร์

#### 2.5.3.1 ทฤษฎีการอุดตันบนแผ่นเยื่อ (รัตน จิระรัตนานนท์, 2541)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอุดตันบนแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน

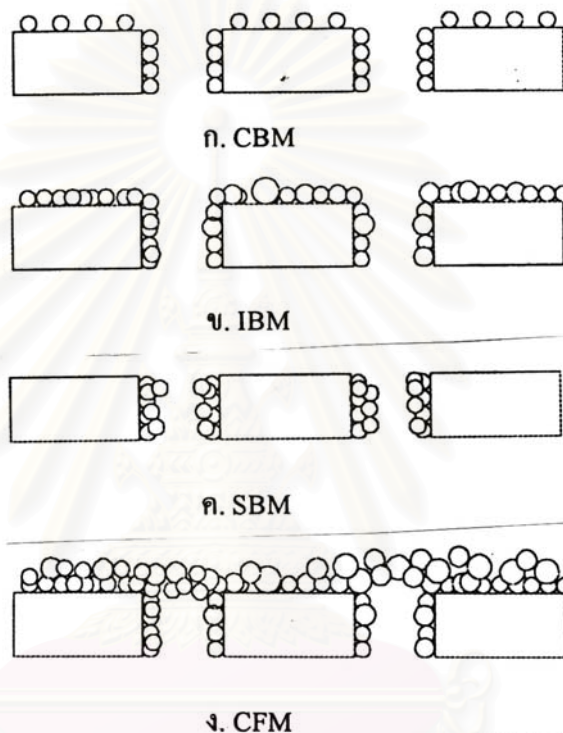
1. Complete Blocking Filtration Model (CBM) มีสมมุติฐานว่าโมเลกุล หรืออนุภาคที่มาถึงแผ่นเยื่อจะเข้าไปอุดตันรูพรุน โดยทุก ๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนในการอุดตันรูพรุนโดยไม่ทับซ้อนกัน ดังนั้นอัตราการกรองจะขึ้นอยู่กับเวลา ตามรูปที่ 2-24 ก.

2. Intermediate Blocking Filtration Model (IBM) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ CBM โดยโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งจะสามารถซ้อนทับอยู่บนอีกโมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้ ตามรูปที่ 2-24 ข.

3. Standard Blocking Filtration Model (SBM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายในการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพรุนของแผ่นเยื่อมาก โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุน

ไปได้ และมีอนุภาคบางส่วนถูกดูดซับอยู่ภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของแผ่นเยื่อนั้น ตามรูปที่ 2-24 ค.

4. Cake Filtration Model (CFM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่างๆกันคือ 1) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน ซึ่งจะถูกระบายและเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้า 2) อนุภาคที่มีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมอยู่ในรูพรุน และต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อ ตามรูปที่ 2-24 ง.



รูปที่ 2-24 ลักษณะการอุดตันในแผ่นเยื่อ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541)

นักวิจัยพยายามแยกส่วนประกอบของอนุภาคในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอ็มบีอาร์ที่ทำให้เกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อ

Fane และคณะ (1980 อ้างโดย Defrance, 2000) แบ่งอนุภาคที่ทำให้เกิดการอุดตันในระบบเอ็มบีอาร์ไว้ 2 ชนิด ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) และอนุภาคละลาย (Dissolve matter) โดย 60% ของความต้านทานที่เกิดขึ้นเกิดจากอนุภาคละลาย

Wisniewski (1996 อ้างโดย Defrance, 2000) แบ่งอนุภาคที่ทำให้เกิดการอุดตันเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) คอลลอยด์ (Colloidal Fraction) และโมเลกุลละลาย (Dissolve Molecules) โดยมีอัตราส่วนความต้านทานที่เกิดขึ้นแก่ระบบเท่ากับ 23% 25% และ 52% ตามลำดับ

จากสมการที่ 2-2 อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อจะแปรผกผันกับความต้านทานรวม เมื่อความต้านทานรวมสูงขึ้น จะทำให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อลดลง โดยความต้านทานของแผ่นเยื่อนี้ก็มีทั้งที่สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการล้างแผ่นเยื่อ และแบบที่เป็นความต้านทานถาวรที่ไม่สามารถกำจัดออกได้

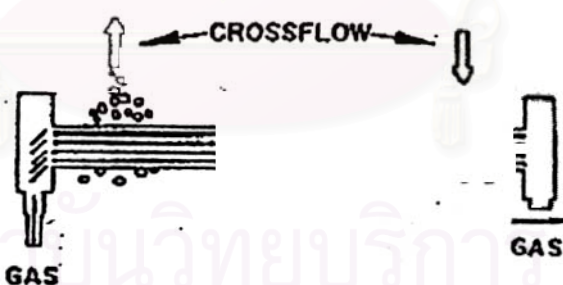
Choo และ Lee (1996) พบว่าความต้านทานรวมเท่ากับ ความต้านทานเนื่องจากแผ่นเยื่อ (membrane resistance,  $R_m$ ) เป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นจากแผ่นเยื่อเอง หากค่าได้จากการทดลองใช้แผ่นเยื่อกรองน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีของแข็งแขวนลอย ดังนั้นจึงมีค่าคงที่เสมอ รวมกับความต้านทานที่เกิดจากโพลาไรเซชัน (Polarization resistance,  $R_p$ ) ซึ่งกำจัดออกได้ด้วยการใช้น้ำล้างในระบบ รวมกับความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันภายนอก (External fouling resistance,  $R_{ef}$ ) ซึ่งกำจัดออกได้ด้วยการนำแผ่นเยื่อออกมาล้างด้วยน้ำประปา และความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันภายใน (Internal fouling resistance,  $R_{if}$ ) ซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้

### 2.5.3.2 เทคนิคในการลดการอุดตันของแผ่นเยื่อ

การลดการอุดตันของแผ่นเยื่อ เพื่อเพิ่มอัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อมีด้วยกันหลายวิธีดังนี้

#### ก) การล้างย้อน (Back washing)

การล้างย้อน คือการพ่นของไหลย้อนในทิศทางที่สวนกับการสูบเข้า เพื่อไล่ออนุภาคที่เกาะบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อออก ดังรูปที่ 2-25



รูปที่ 2-25 การล้างย้อนแผ่นเยื่อ (Plankarom, 1996)

#### ข) การกรองแบบไหลขนาน (Cross flow filtration)

การกรองแบบไหลขนาน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อ เป็นการไล่ออนุภาคที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อออก การกรองแบบไหลขนานที่นิยมกันในรูปแบบหนึ่งคือการพ่นฟองอากาศใต้แผ่นเยื่อ โดยความสามารถในการลดการอุดตันด้วยวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลที่พ่น หากเพิ่มความเร็วในการไหลจะทำให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อมีมากขึ้น (Magara และ Itoh, 1991)



ค) การสูบน้ำเพอมีเอตออกเป็นระยะ ๆ (Intermittent suction)  
 การสูบออกเป็นระยะ ๆ ทำเพื่อลดการสะสมของอนุภาคอย่างต่อเนื่องที่แผ่นเยื่อ  
 Talat (1988) พบว่าการสูบลับกับหยุดสูบทุก 10 นาที ทำให้เสถียรภาพของ  
 อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อดีที่สุด

Yamamoto และคณะ (1989) การสูบออกเป็นระยะ โดยควบคุมความดันผ่าน  
 แผ่นเยื่อให้ต่ำ (13 kPa) ให้ผลดีต่อเสถียรภาพของอัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อ

ง) การลดความดันผ่านแผ่นเยื่อ (Reduction of pressure)  
 ตามสมการการกรอง เมื่อความดันผ่านแผ่นเยื่อ (transmembrane pressure)  
 มากขึ้นจะทำให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อเพิ่มขึ้นด้วย และหากลดความดันผ่านแผ่นเยื่อ  
 ลงก็จะทำให้การอุดตันลดลงด้วย

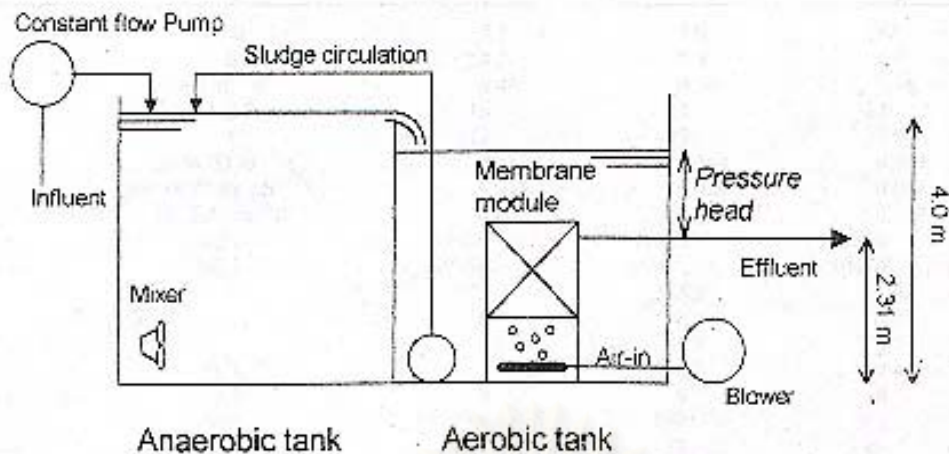
Ueda และ Hata (1999) ใช้ความสูงของน้ำเหนือท่อน้ำออก 1.69 เมตรเป็น  
 ความดันให้น้ำที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อ พบว่าตลอดการใช้งาน 371 วันไม่ต้องมีการล้างแผ่น  
 เยื่อเลย และให้อัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อที่มีคงที่

จ) การล้างด้วยสารเคมี (Chemical washing)  
 สารเคมีที่ใช้ในการล้างแผ่นเยื่อได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต  
 กรดเกลือ กรดซัลฟูริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ueda และ Hata (1999) ทดลองใช้ระบบเอ็มบีอาร์บำบัดน้ำเสียชุมชน โดยระบบที่ใช้มี  
 ถังบำบัด 2 ถังต่ออนุกรมกัน มีถังไร้ออกซิเจนนำหน้าถังเติมออกซิเจน ทั้งสองถังมีขนาดเท่ากัน  
 เท่ากับ 1.56 ลบ.ม. คิดเป็นเวลาพัก 13.4 ชั่วโมงโดยมีการหมุนเวียนสลัดจ์จากถังเติมออกซิเจน  
 ไปยังถังไร้ออกซิเจนด้วยอัตราการไหล 4 เท่าของน้ำเสียเข้าระบบ มีอัตราการไหลของน้ำเข้า 6.0  
 ลบ.ม./วัน ดังรูปที่ 2-26

แผ่นเยื่อที่ใช้มีขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร ความดันผ่านแผ่นเยื่อใช้ความสูงของน้ำ  
 เหนือท่อน้ำออก 1.69 เมตร มีการควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 72 วัน เมื่อดำเนินการประมาณ 1 ปี มี  
 ความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสในถังเติมออกซิเจน 12,930 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโ  
 ดี 99% ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอดี 93% ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย  
 100% ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด 79% ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้ง  
 หมด 74% และกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ 6 ล็อก



รูปที่ 2-26 การทดลองของ Ueda และ Hata (Ueda และ Hata, 1999)

Seo และคณะ (2000) ทดลองใช้ระบบเอ็มบีอาร์บำบัดน้ำเสียชุมชน โดยถังบำบัดที่ใช้มี 2 ส่วนต่ออนุกรมกัน ส่วนแรกมีขนาด 0.09 ลบ.ม. ส่วนที่สองมีขนาด 0.18 ลบ.ม. คิดเป็นเวลา กัก 16 - 19 ชั่วโมง มีการหมุนเวียนสลัดจ์จากส่วนที่สองไปยังส่วนแรกด้วยอัตราการไหล 1 เท่า ของน้ำเสียเข้าระบบ ตามรูปที่ 2-27 การทำงานของระบบนั้นในแต่ละส่วนจะมีระยะเวลาในการ เต็มอากาศและหยุดเติมอากาศ (แต่ยังมีการหมุนเวียนสลัดจ์ระหว่างส่วนด้วยปั๊มหมุนเวียน) ที่ แตกต่างกัน ทั้งสองส่วนจึงสลับกันเป็นถังเติมออกซิเจน (เมื่อมีการเติมอากาศ) และถังไร้ออกซิเจน (เมื่อหยุดเติมออกซิเจน) สภาวะการเดินระบบสำหรับการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2-19

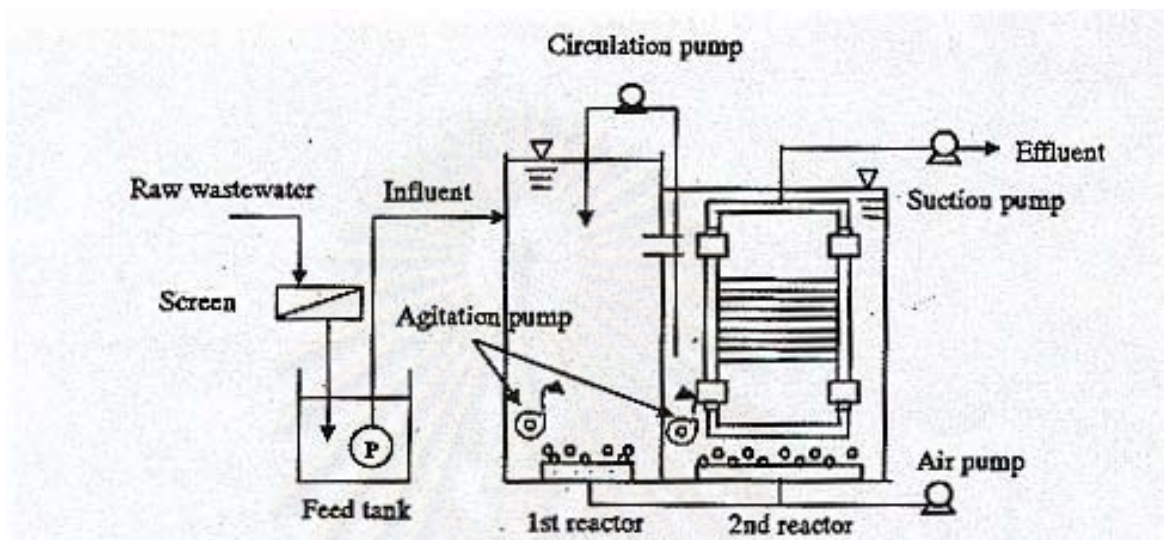
ตารางที่ 2-19 สภาวะการเดินระบบในการทดลองของ Seo และคณะ  
(Seo และคณะ, 2000)

Classification	Aeration-nonaeration (min)	Suction-idle (min)	Aeration intensity (l/min)	Internal recycle	F/M ratio (day)
Phase 1	1st 30 - 90	5 - 5	20	1Q	0.07
	2nd 60 - 60				
Phase 2	1st 60 - 60	60 - 60	20	1Q	0.06
	2nd 60 - 60		15		

แผ่นเยื่อที่ใช้มีขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร ควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 25 วัน มีความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอส 2,700 - 3,400 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงกว่า 98% ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด 73.6% และ 91.6% ในการทดลองที่ 1 และ

2 ตามลำดับ จึงสรุปว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อระยะเวลาเต็มออกซิเจน 60 นาที

ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดพบว่า ในการทดลองที่ 1 น้ำเสียเข้ามีฟอสฟอรัสทั้งหมด 3.8 – 5.0 มก./ล. มีฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งเฉลี่ย 2.4 มก./ล. และในการทดลองที่ 2 มีค่าฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งน้อยกว่า 2 มก./ล. แม้ฟอสฟอรัสในน้ำเข้าจะสูงขึ้นก็ตาม

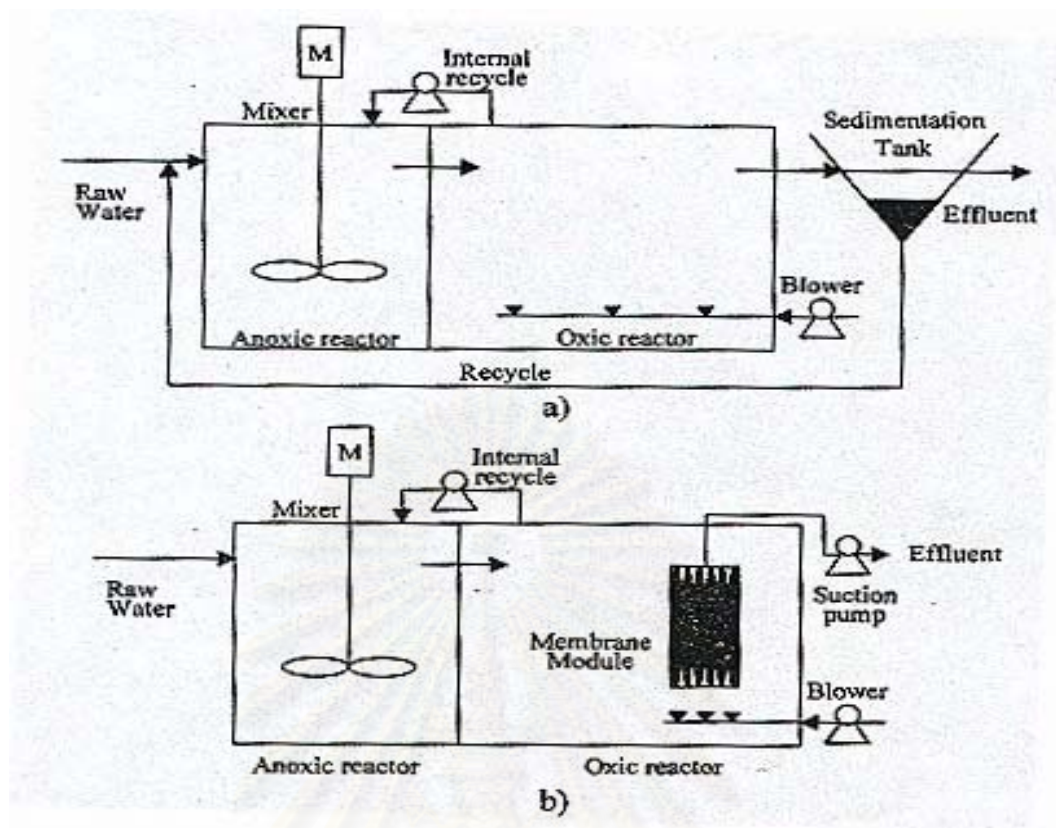


รูปที่ 2-27 การทดลองของ Seo และคณะ (Seo และคณะ, 2000)

Yoon และคณะ (2000) เปรียบเทียบระบบแอนน็อกซิก-ออกซิกที่ใช้ถังตกตะกอนปกติกับที่ใช้แผ่นเยื่อแทนถังตกตะกอน ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ตามรูปที่ 2-28 สภาวะการเดินระบบในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2-20 แผ่นเยื่อที่ใช้มีขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร ระยะเวลาสูบและหยุดสูบสลับกันทุก 2 นาที

ค่าเอ็มแอลเอสเอสของสองระบบแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยค่าเอ็มแอลเอสเอสของระบบที่ใช้ถังตกตะกอนมีค่า 2,500 – 5,000 มก./ล. ส่วนระบบที่ใช้แผ่นเยื่อแทนถังตกตะกอนมีค่า 10,000 – 15,000 มก./ล.

พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงกว่า 98% และ 80 – 90% สำหรับระบบที่ใช้แผ่นเยื่อ และระบบปกติตามลำดับ การกำจัดไนโตรเจนของระบบที่ใช้แผ่นเยื่อสูงกว่าระบบปกติเล็กน้อย และการกำจัดฟอสฟอรัสของทั้งสองระบบไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากมีการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2-28 การทดลองของ Yoon และคณะ (Yoon และคณะ, 2000)

ตารางที่ 2-20 สภาวะการเดินระบบในการทดลองของ Yoon และคณะ (Yoon และคณะ, 2000)

Group	Device number	Hydraulic retention time (HRT, hr)		Internal recycle ratio	Etc.
		Anoxic	Oxic		
I		6	10	200%	Conventional A/O system
	2	6	6		
	3	6	10	300%	A/O type MBR
	4	6	10		
		6	10		
II			6	200%	Conventional A/O system
	7		6	200%	A/O type MBR
	3	4	4		
			5		
	5	3	5	100%	

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของค่าอายุสัลดจ์ และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนนอซิก ต่อส่วนไร้ออกซิเจน ที่มีต่อประสิทธิภาพและกลไกในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ของระบบบำบัดที่ได้พัฒนาขึ้น การทดลองในงานวิจัยนี้ทั้งหมด ได้กระทำที่ห้องปฏิบัติการวิจัย และบัณฑิตของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลองย่อยโดยมีรายละเอียดการทดลองดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองที่	อายุสัลดจ์ (วัน)	อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ส่วนแอนนอซิก : ส่วนไร้ออกซิเจน	อัตราการเวียนสัลดจ์ (ลิตรต่อชั่วโมง)
1	40	25% : 75%	5
2	40	75% : 25%	5
3	80	75% : 25%	5

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ตัวแปรคงที่

- ขนาดของถังปฏิกรณ์ มีความกว้าง 40 ซม. ความยาว 45 ซม. และความสูง 60 ซม. ระดับน้ำในถังสูง 50 ซม. ความจุน้ำ 90 ลิตร ถังแบ่งเป็น 3 ส่วน
  - ส่วนแอนนอซิก มีความกว้าง และความยาว 20 ซม.
  - ส่วนไร้ออกซิเจน มีความกว้าง และความยาว 20 ซม.
  - ส่วนเติมออกซิเจน มีความกว้าง 25 ซม. และความยาว 40 ซม.
- ระยะเวลาสูบและพัก 10 นาทีต่อ 10 นาที เพื่อลดการอุดตันของแผ่นเยื่อ
- อัตราการเวียนสัลดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนไปยังส่วนแอนนอซิก 5 ลิตรต่อชั่วโมง
- อัตราไหลของอากาศที่ผ่านผิวหน้าแผ่นเยื่อ 60 ลิตร/นาที เพื่อให้เกิดการกรองแบบไหลขนาน (Crossflow Filtration )

5. ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolve Oxygen) ของส่วนเติมออกซิเจน ควบคุมไว้ให้ได้มากกว่า 2 มก./ล. เพื่อไม่ให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Painter 1977 อ้างโดย Pochana และ Keller, 1999)

#### ตัวแปรอิสระ

1. ค่าอายุสลัดจ์ 40 วัน และ 80 วัน
2. อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจน 25% : 75% และ 75% : 25%

#### ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ เอ็มแอลเอสเอส เอ็มแอลวีเอสเอส เอสเอส เอสวี30 เอสวีไอ ซีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส อัตราจำเพาะที่เกี่ยวข้องกับการบำบัด ลักษณะชุมชนของจุลชีพในระบบ (Community of Microbial) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบ

### 3.2 แนวคิดของระบบ

ระบบที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยเป็นระบบที่พัฒนาขึ้นมาซึ่งเรียกว่า “Anoxic-anaerobic-aerobic membrane bioreactor, A<sup>3</sup>-MBR” โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 90 ลิตร แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแอนน็อกซิก (Anoxic) ส่วนไร้ออกซิเจน (Anaerobic) และส่วนเติมออกซิเจน (Aerobic) โดยที่ส่วนเติมออกซิเจนมีการติดตั้งชุดแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) ขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวแผ่นเยื่อ 0.3 ตารางเมตร น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในส่วนเติมออกซิเจนจะถูกสูบออกจากถังปฏิกรณ์ผ่านแผ่นเยื่อด้วยการกรองแบบไหลขนาน (Cross-Flow Filtration) ระบบมีการหมุนเวียนสลัดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนไปยังส่วนแอนน็อกซิก ด้วยอัตราคงที่ 5.0 ลิตรต่อชั่วโมง

น้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยป้อนเข้าส่วนแอนน็อกซิกและส่วนไร้ออกซิเจน ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วทั้งสองส่วนจะไหลรวมกันเข้าสู่ส่วนเติมออกซิเจน เพื่อให้แหล่งคาร์บอนในน้ำเสียถูกจัดสรรได้อย่างเหมาะสมแก่กลไกการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของจุลชีพ

แหล่งคาร์บอนในน้ำเสียที่แบ่งเข้าส่วนแอนน็อกซิก ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอกเซลล์ (Exogenous Denitrification) ซึ่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่สูงกว่าแบบใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ (Endogenous Denitrification) ทำให้สามารถลดไนเตรตได้อย่างรวดเร็ว จึงลดผลกระทบของไนเตรตที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในส่วนไร้ออกซิเจนลงได้

แหล่งคาร์บอนในน้ำเสียที่แบ่งเข้าส่วนไร้ออกซิเจน พีเอโอจะนำไปสะสมไว้ในเซลล์ในรูปของพีเอชเอ จึงเกิดการคายฟอสฟอรัสเป็นผลสืบเนื่องมา ซึ่งอัตราการคายฟอสฟอรัสที่สูงในส่วนไร้ออกซิเจนนี้ จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสมีมากขึ้นด้วย

### 3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะการดำเนินการระบบต่างๆ ได้ง่ายขึ้น จึงใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง เพราะจะช่วยลดความแปรปรวนด้านคุณลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

น้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยเตรียมให้มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากอาคารทั่วไป และเติมธาตุอาหารต่างๆ สำหรับจุลินทรีย์ให้เพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดการจำกัดกลไกการกำจัดเพราะขาดธาตุอาหารที่จำเป็น น้ำเสียถูกเตรียมไว้อย่างน้อยวันละ 90 ลิตร

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย [สวสท.] (2541) รวบรวมลักษณะน้ำเสียจากอาคารต่างๆ ในประเทศไทย พบว่าน้ำเสียจากโรงพยาบาล น้ำเสียจากส้วมจากอาคารสำนักงาน น้ำเสียจากห้างสรรพสินค้า และน้ำเสียจากโรงแรม มีค่าซีโอดีตั้งแต่ 253 ถึง 392 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 320 มก./ล. ในงานวิจัยนี้จึงเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าซีโอดีประมาณ 320 มก./ล. ซึ่งคิดเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เฉลี่ย 0.35 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แหล่งซีโอดีเตรียมมาจาก อะซิเตต (Acetate) และน้ำตาลทราย (Sugar)

สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ซีโอดีในการทดลองช่วงแรกใช้สาร 2 ชนิด ได้แก่ นิเวเตรียนบรอต (ยี่ห้อ HI-MEDIA ของประเทศอินเดีย) และกรดอะซิติก ส่วนการทดลองที่ 1 ถึง 3 ได้เปลี่ยนมาใช้น้ำตาลทราย และกรดอะซิติก เนื่องจากการสังเคราะห์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสให้ได้ปริมาณที่ต้องการด้วยนิเวเตรียนบรอตกระทำได้ยากกว่า เพราะในนิเวเตรียนบรอตนอกจากจะมีแหล่งคาร์บอนแล้วยังมีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบด้วยจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในนิเวเตรียนบรอตพบว่า

นิเวเตรียนบรอต 1 กรัมต่อลิตร ให้ค่าซีโอดี 540 มก./ล.

นิเวเตรียนบรอต 1 กรัมต่อลิตร ให้ค่าทีเคเอ็น 86 มก./ล.

นิเวเตรียนบรอต 1 กรัมต่อลิตร ให้ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด 26 มก./ล.

ดังนั้นเมื่อต้องการสังเคราะห์ซีโอดีจากนิเวเตรียนบรอตให้ได้ค่า 220 มก./ล. ต้องใช้นิเวเตรียนบรอต 0.41 กรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณนี้จะให้ค่าทีเคเอ็น 35 มก./ล. และฟอสฟอรัสทั้งหมด 10.6 มก./ล. ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้น้ำตาลทรายซึ่งสามารถควบคุมปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ตามปริมาณที่กำหนดไว้ได้ง่ายกว่า เนื่องจากในน้ำตาลไม่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ปริมาณไนโตรเจนที่ต้องใช้คำนวณมาจากค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน โดยสังเคราะห์ให้ได้ค่าประมาณ 8- 9 เพื่อให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่ดี (Grady และคณะ, 1999) แหล่งไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมมาจากแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )

ปริมาณฟอสฟอรัสที่ต้องใช้คำนวณมาจากค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส โดยสังเคราะห์ให้ได้ค่าประมาณ 40 เพื่อให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยพีเอโอ (Randall และคณะ, 1992) แหล่งฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมมาจาก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

ปริมาณไบคาร์บอเนตที่เติมแก่ระบบ คำนวณได้จากการใช้ไปในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ซึ่งใช้ไบคาร์บอเนตไป 7.2 กรัมต่อการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 กรัมไนโตรเจน หักลบกับการได้รับกลับคืนมาจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งให้ไบคาร์บอเนตคืนแก่ระบบ 3.8 กรัมต่อการรีดิวซ์ไนเตรต 1 กรัมไนโตรเจน (กรณีนี้ใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอกเซลล์) ดังนั้นในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 กรัมไนโตรเจน จะต้องใช้ไบคาร์บอเนตสุทธิ 3.4 กรัม เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบมีแอมโมเนียไนโตรเจนประมาณ 37 มก./ล. จึงต้องใช้ไบคาร์บอเนตเท่ากับ 125.8 มก./ล. แต่เนื่องจากไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองเป็นระดับการค้า (Commercial Grade) ปริมาณที่ใช้จึงต้องมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องใช้มากขึ้นประมาณ 2 เท่าเพื่อควบคุมพีเอชของระบบให้มีค่าใกล้เคียง 7.0

ธาตุอาหารอื่นๆที่เติมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่ โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เนื่องจากมีธาตุเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของโพลีฟอสเฟตซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดฟอสฟอรัส (Comeau, 1987) อัตราส่วนที่ใช้มีดังนี้

- อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อโปแตสเซียม เท่ากับ 1 ต่อ 0.24
- อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อแมกนีเซียม เท่ากับ 1 ต่อ 0.25
- อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อแคลเซียม เท่ากับ 1 ต่อ 0.25

น้ำเสียสังเคราะห์นี้จึงใช้สารเคมีต่างๆในการสังเคราะห์ ซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลังจากการสังเคราะห์แล้ว ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำเสีย

สารเคมีที่ใช้	ปริมาณที่ใช้ (mg/L.)	ความเข้มข้นที่ได้
Sugar	355	220 mgCOD/L.
$\text{CH}_3\text{COOH}$ acid	0.01 ml/L.	100 mgCOD/L.
$\text{NH}_4\text{Cl}$	150	37 mgN/L.
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	36.6	8.0 mgP/L.
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	6.6	2.5 mgCa/L.
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	15.4	1.52 mgMg/L.
$\text{NaHCO}_3$	305	150 mg $\text{HCO}_3^-$ /L.



### 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

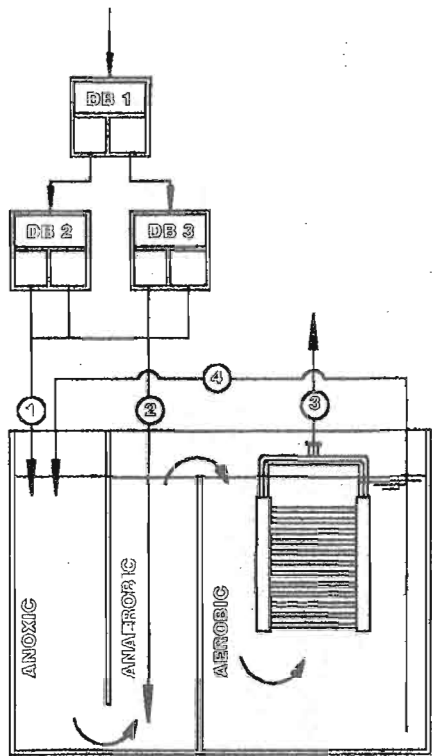
#### 3.4.1 ถังปฏิกรณ์ (Reactor)

ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใส ความจุ 108 ลิตร ขนาด 0.40 x 0.45 x 0.60 เมตร แบ่งเป็น 3 ส่วน

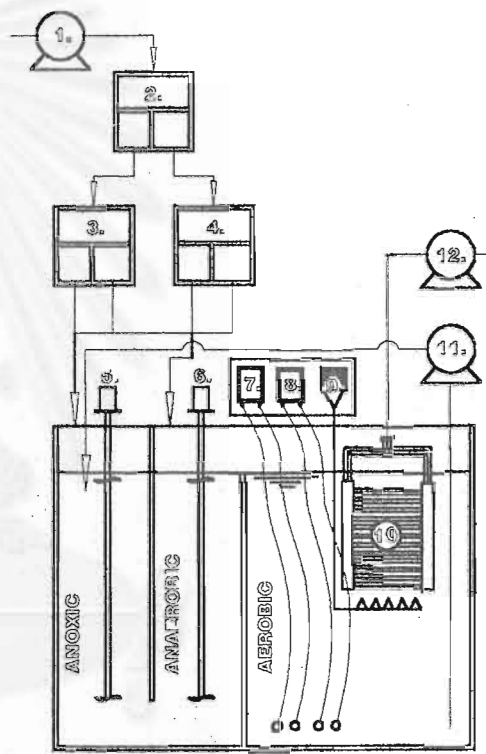
- ก.) ส่วนแอนนออกซิก ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. ลึก 60 ซม. ความจุน้ำ 24 ลิตร
- ข.) ส่วนไร้ออกซิเจน ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. ลึก 60 ซม. ความจุน้ำ 24 ลิตร
- ค.) ส่วนเติมออกซิเจน ขนาดกว้าง 25 ซม. ยาว 40 ซม. ลึก 60 ซม. ความจุน้ำ 60 ลิตร



รูปที่ 3-1 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



- Direction of Flow
- ① Influent to ANOXIC
  - ② Influent to ANAEROBIC
  - ③ Effluent from AEROBIC
  - ④ Return Sludge from AEROBIC to ANOXIC



- 1. Influent Pump ( P 1 )
- 2. Distribution Box 1 ( DB 1 )
- 3. Distribution Box 2 ( DB 2 )
- 4. Distribution Box 3 ( DB 3 )
- 5. ANOXIC Mixer ( M 1 )
- 6. ANAEROBIC Mixer ( M 2 )
- 7. Aerator 1 ( AT 1 )
- 8. Aerator 2 ( AT 2 )
- 9. Air Compressor ( AC )
- 10. Microfiltration Membrane
- 11. Return Sludge Pump ( P 2 )
- 12. Effluent Pump ( P 3 )

ทิศทางการไหลในระบบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ

รูปที่ 3-2 ทิศทางการไหลและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ

### 3.4.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ ( Influent Pump, P1 )

เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดไดอะแฟรม ยี่ห้อ Prominent รุ่น GAMMA/4-W ใช้สูบน้ำเสียที่เตรียมไว้ในถังเก็บน้ำเสียไปยังปฏิกรณ์ เครื่องสูบจะสูบอย่างต่อเนื่อง 10 นาที และหยุดสูบ 10 นาที เพื่อลดการอุดตันอย่างต่อเนื่องที่ผิวหน้าของแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน โดยปรับอัตราการสูบให้ได้ค่าใกล้เคียงกับเครื่องสูบน้ำออก ( P3 )

### 3.4.3 เครื่องสูบน้ำเวียนสลัดจ์ ( Return Sludge Pump, P2 )

เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย ยี่ห้อ Watson-Marlow รุ่น 502 S ใช้สูบลสลัดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนไปยังส่วนแอนน็อกซิก เพื่อทำให้เกิดกลไกการกำจัดทางชีวภาพต่างๆขึ้น โดยปรับอัตราการสูบไว้ประมาณ 5 ลิตร/ชม.

### 3.4.4 เครื่องสูบน้ำออก ( Effluent Pump, P3 )

เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดไดอะแฟรม ยี่ห้อ Iwaki รุ่น LK-31VS-03 ใช้สูบน้ำออกจากระบบ เครื่องสูบจะสูบต่อเนื่อง 10 นาที และหยุดสูบ 10 นาที เพื่อลดการอุดตันอย่างต่อเนื่องที่ผิวหน้าของแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน คาบเวลาที่สูบและหยุดนั้นตรงกันกับเครื่องสูบน้ำเข้าระบบ โดยปรับอัตราการสูบสูงสุดให้ได้เท่ากับ 167 มล./นาที โดยที่ควบคุมความดันลดผ่านแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันไม่ให้เกิน 25 kPa แต่อัตราการสูบออกนี้จะไม่คงที่ เนื่องจากการอุดตันที่ผิวหน้าและในเส้นใยแผ่นเยื่อที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้อัตราการลดลงเรื่อยๆตลอดการดำเนินระบบ จึงต้องทำการปรับอัตราการสูบออกทุกวัน

### 3.4.5 กล่องแบ่งน้ำเสีย (Distribution Box : DB1, DB2, DB3 )

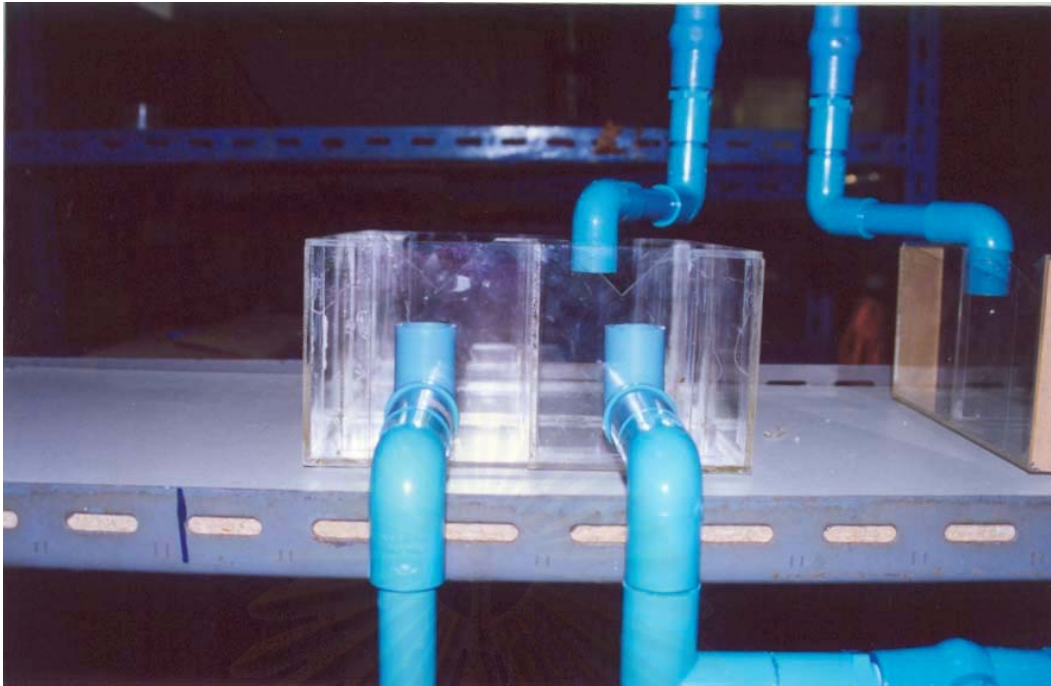
จำนวน 3 ชุด ทำจากอะคริลิกใส ขนาดกว้าง 10 ซม. ยาว 20 ซม. และสูง 10 ซม. กล่องแบ่งน้ำเสียนี้สร้างขึ้น เพื่อลดจำนวนเครื่องสูบที่ต้องใช้ในงานวิจัย และควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิก และส่วนไร้ออกซิเจนให้คงที่ ซึ่งสามารถแบ่งน้ำเสียเข้าทั้ง 2 ส่วนโดยใช้เครื่องสูบเพียงเครื่องเดียว (แสดงไว้ในรูปที่ 3-3)

### 3.4.6 ชุดแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน ( Microfiltration Membrane, MB )

แผ่นเยื่อเป็นแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) ของบริษัท Mitsubishi Rayon จำกัด ประเทศญี่ปุ่น มีขนาดรูพรุน (Pore Size) 0.4 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวแผ่นเยื่อ 0.3 ตารางเมตร (แสดงไว้ในรูปที่ 3-4)

### 3.4.7 ถังเก็บน้ำเสียก่อนเข้าระบบ ( Influent Tank )

เป็นถังโพลีเอททิลีนขนาด 90 ลิตร จำนวน 1 ใบ และขนาด 60 ลิตรจำนวน 1 ใบ เตรียมน้ำเสียในถัง 2 ถัง ถัง 90 ลิตรใช้เตรียมน้ำเสีย 90 ลิตร และถัง 60 ลิตรใช้เตรียมน้ำเสีย 30 ลิตร การติดตั้ง ถัง 90 ลิตรถูกยกสูงเหนือขอบถัง 60 ลิตร น้ำเสียจากถัง 90 ลิตรไหลด้วยแรงโน้มถ่วงลงถัง 60 ลิตร โดยใช้ลูกกลิ้งควบคุม ไม่ให้น้ำเสียจากถัง 90 ลิตรล้นออกจากถัง 60 ลิตร โดยมีเครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ (P1) สูบน้ำเสียจากถัง 60 ลิตรขึ้นกล่องแบ่งน้ำเสียที่ 1 (DB 1) (แสดงไว้ในรูปที่ 3-5)



รูปที่ 3-3 กล่องแบ่งน้ำเสีย (DB1-3)



รูปที่ 3-4 แผ่นเยื่อที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4.8 ถังรองรับน้ำทิ้ง ( Effluent Tank )

เป็นถังโพลีเอททิลีนขนาด 10 ลิตร จำนวน 1 ใบ รองรับน้ำเพอร์เมต ( Permeate ) ที่ดูดผ่านแผ่นเยื่อ ก่อนไหลลงสู่รางระบายน้ำในห้องปฏิบัติการต่อไป (แสดงไว้ในรูปที่ 3-5)

### 3.4.9 เครื่องกวนในส่วนแอนน็อกซิก ( Anoxic Mixer, M1 )

เป็นมอเตอร์ยี่ห้อ ORIENTAL MOTOR รุ่น 21K6GK-A2 ขนาด 6W 100V 50/60Hz 0.25A 2.5 $\mu$ F ที่มีความเร็วรอบระหว่าง 1200-1450 รอบ/นาที เมื่อทดสอบแล้วมีความเร็วรอบ 100- 120 รอบ/นาที ติดตั้งกับใบกวนที่ทำจากพลาสติก 2 ใบและแกนใบกวน ใช้กวนเพื่อทำให้น้ำเสียสัมผัสกับเชื้อในส่วนแอนน็อกซิกอย่างทั่วถึง

### 3.4.10 เครื่องกวนในส่วนไร้ออกซิเจน ( Anaerobic Mixer, M2 )

เป็นมอเตอร์ยี่ห้อ ORIENTAL MOTOR รุ่น 21K6GK-A2 ขนาด 6W 100V 50/60Hz 0.25A 2.5 $\mu$ F ที่มีความเร็วรอบระหว่าง 1200-1450 รอบ/นาที เมื่อทดสอบแล้วมีความเร็วรอบ 100- 120 รอบ/นาที ติดตั้งกับใบกวนที่ทำจากพลาสติก 2 ใบและแกนใบกวน ใช้กวนเพื่อทำให้น้ำเสียสัมผัสกับเชื้อในส่วนไร้ออกซิเจนอย่างทั่วถึง

### 3.4.11 เครื่องเติมอากาศ ( Aerator : A1 , A2 )

เป็นเครื่องเติมอากาศยี่ห้อ PRESIDENT รุ่น EK-8000 และเครื่องเติมอากาศยี่ห้อ HAILEA รุ่น ACO-9905 อย่างละ 1 ตัว มีหัวกระจายอากาศอยู่ในถังปฏิกรณ์จำนวน 10 หัว ใช้เพื่อเติมอากาศให้จุลินทรีย์ในส่วนเติมออกซิเจน รวมทั้งทำให้จุลินทรีย์แขวนลอยในระบบด้วย

### 3.4.12 เครื่องอัดอากาศ ( Air Compressor, AC )

เป็นเครื่องอัดอากาศยี่ห้อ RESUN รุ่น AP-30 อัตราการไหลของอากาศ 60 ลิตร/นาที ติดตั้งกับอุปกรณ์กระจายอากาศที่อยู่ใต้แผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน เพื่อให้เกิดการกรองแบบไหลขนานกับแผ่นเยื่อ (Cross flow filtration) และเป่าเชื้อที่สะสมบนผิวหน้าแผ่นเยื่อให้หลุดออกมาเพื่อลดการอุดตัน

### 3.4.13 ชุดควบคุมการทำงาน

เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ และเครื่องสูบน้ำออกจากระบบ ถูกควบคุมให้สลับกับหยุดสูบน้ำทุก ๆ 10 นาที โดยเดินเครื่องพร้อมกันทั้ง 2 เครื่อง เพื่อลดการสะสมของเชื้อที่ผิวหน้าแผ่นเยื่ออย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมเครื่องสูบน้ำในช่วงแรก (ตั้งแต่ ส.ค. 2544 ถึง ก.พ. 2545) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยไอซี (Integrate Circuit) หลายตัวในการควบคุม แต่เนื่องจากมีความซับซ้อนบริเวณที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ ทำให้เกิดปัญหาการควบคุมอยู่เป็นระยะ ๆ ดังนั้นในช่วงหลัง (ตั้งแต่ ก.พ. 2545 ถึง พ.ย. 2545 ) จึงใช้อุปกรณ์หน่วงเวลา (Timer Relay) ยี่ห้อ OMRON รุ่น H3BA จำนวน 2 ตัวประกอบเข้าชุดกันควบคุมแทน แม้ว่าการหน่วงเวลาจะไม่แม่นยำเท่าอุปกรณ์ชุดเดิม แต่ก็คงทนและไม่เกิดปัญหาในการควบคุมระบบ ชุดควบคุมการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3-6

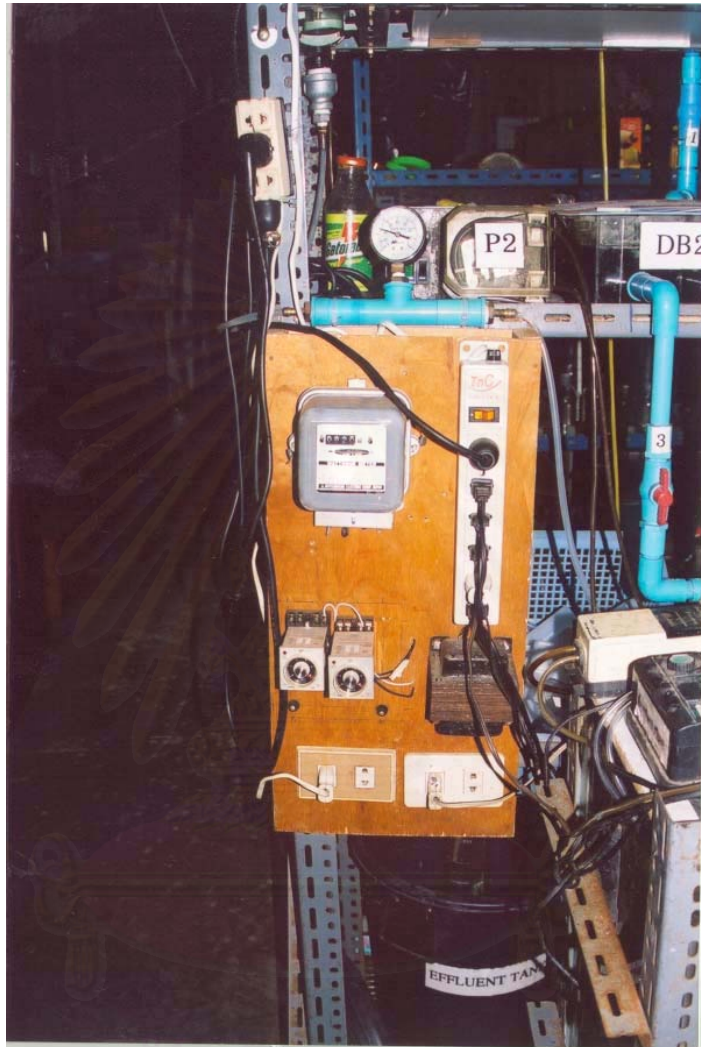
#### 3.4.14 มิเตอร์ไฟฟ้า

เป็นมิเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น MF-63E ใช้วัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปในแต่ละวัน มีหน่วยที่วัดได้เป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3-5 ถังเก็บน้ำเสียและถังรองรับน้ำทิ้ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3-6 แผงควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า

### 3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่างน้ำ และความถี่ของการวิเคราะห์ แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3-4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์เป็นไปตามหนังสือ “Standard Method for Examination of Water and Wastewater” และหนังสือคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย ( มั่นสิน ตันกุลเวศม์ 2538) แสดงไว้ในตารางที่ 3-5

พารามิเตอร์อื่นๆที่จัดบันทึกทุกวัน ได้แก่ หน่วยของมิเตอร์ไฟฟ้า ความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure) และ อัตราการไหลของน้ำเพอเมียด

พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ทำการวิเคราะห์ หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองที่ 2 และ 3 เพื่อเปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อกลไกการกำจัด ได้แก่ อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Release Rate) อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Uptake Rate) อัตราไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Nitrification Rate) อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Denitrification Rate) อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ (Specific Oxygen Uptake Rate) ขนาดอนุภาค (Particle Size) พีคอนเทน (วิเคราะห์หลังการทดลองที่ 1 ด้วย) และการบ่งชี้ชนิดของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการฟิช (Fluorescent *in situ* Hybridization, FISH) ซึ่งโพรบที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของโพรบที่ใช้ในการทดลอง

Probe	Sequence (5'-3')	rRNA target site	Specificity
PAO(mix)	CCGTCATCTACWCAGGGTATTAAC	16S,462-485	PAO-cluster
	CCCTCTGCCAAACTCCAG	16S,651-668	PAO-cluster
	GTTAGCTACGGCTAAAAGG	16S,846-866	PAO-cluster
GAM42	GCCTTCCCACATCGTTT	23S,1027-1043	gamma Proteobacteria
BET42	GCCTTCCCACATCGTTT	23S,1027-1044	beta Proteobacteria
ALF968	GGTAAGGTTCTGCGCGTT	16S,968-985	alpha Proteobacteria
PAE997	TCTGGAAAGTTCTCAGCA	16S,997-1014	Pseudomonas spp.
NIT3	CCTGTGCTCCATGCTCCG	16S,1035-1052	Nitrobacter spp.
Nso190	CGATCCCCTGCTTTCTCC	16S,189-207	betaproteobacterial
			ammonia-oxidizing bacteria



ตารางที่ 3-4 จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง				
	น้ำเสียเข้า	ส่วนแอนนอซิก	ส่วนแอนแอโรบิก	ส่วนแอโรบิก	น้ำทิ้ง
พีเอช	ก	ก	ก	ก	ก
ออกซิเจนละลาย	-	ก	ก	ก	-
อุณหภูมิ	ก	ก	ก	ก	ก
ซีโอดี	ข <sup>(t)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข
ทีเคเอ็น	ข <sup>(t)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข
ไนไตรต์	ข <sup>(t)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข
ไนเตรต	ข <sup>(t)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข
ฟอสฟอรัส	ข <sup>(t)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข <sup>(f)</sup>	ข
เอสวี30	-	-	-	ก	-
เอ็มแอลเอสเอส	-	ข	ข	ข	-
เอ็มแอลวีเอสเอส	-	ข	ข	ข	-
เอสเอส	ค	-	-	-	ค
กรดไขมันระเหย	-	ค	ค	-	-
พีเอชเอ	-	ง	ง	ง	-

หมายเหตุ	ก	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ทุกวัน
	ข	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ 3 ครั้งต่อสัปดาห์
	ค	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ 1 ครั้งต่อสัปดาห์
	ง	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ ช่วงหลังการทดลองที่ 2 และ 3
	(t)	วิเคราะห์โดยไม่กรองตัวอย่าง
	(f)	วิเคราะห์โดยกรองตัวอย่าง

ตารางที่ 3-5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
พีเอช	pH meter with glass electrode
ออกซิเจนละลาย	DO meter
อุณหภูมิ	Thermometer
ซีโอดี	Close reflux titration method
ทีเคเอ็น	Kjedahl method
แอมโมเนีย	Titration method
ไนไตรต์	NED Colorimetric method
ไนเตรต	UV-Spectrophotometer method
ฟอสฟอรัส	Vanadomolybdate acid method
เอสวี30	Gravimetric method
เอ็มแอลเอสเอส	filtration and drying at 103 <sup>o</sup> C
เอ็มแอลวีเอสเอส	filtration and drying at 103 <sup>o</sup> C and 550 <sup>o</sup> C
เอสเอส	filtration and drying at 103 <sup>o</sup> C
กรดไขมันระเหย	Dilution method

### 3.6 การดูแลรักษาระบบ

การดูแลรักษาระบบประกอบด้วย การทำความสะอาดอุปกรณ์ การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และการดูแลทำความสะอาดแผ่นเยื่อ

การทำความสะอาดอุปกรณ์

- ทำความสะอาดถังเก็บน้ำเสียทุกวัน ก่อนเตรียมน้ำเสีย
- ทำความสะอาดขวดเก็บตัวอย่างก่อน เก็บตัวอย่างในแต่ละวัน
- ใช้แปรงขัดสไลด์ที่ติดบริเวณขอบถังในส่วนเติมออกซิเจน เมื่อมีการสะสมตัวหนาขึ้น
- เปลี่ยนสายยางของเครื่องสูบน้ำเสียเข้า เมื่ออัตราการสูบน้ำเสียเข้าลดลง

การซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ

- เปลี่ยนสายยางซิลิโคน ของเครื่องสูบน้ำเสีย (P2)
- เติมน้ำมันหล่อลื่น และจารบีให้แก่ เครื่องกวน (M1,M2) และเครื่องอัดอากาศ (AC)

การดูแลทำความสะอาดแผ่นเยื่อ

กำหนดเวลาที่จะทำความสะอาดแผ่นเยื่อขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งที่อุดตันในแผ่นเยื่อ ซึ่งสังเกตได้จากค่าความดันผ่านแผ่นเยื่อที่เพิ่มขึ้นในแต่ละวัน

- การทำความสะอาดแผ่นเยื่อด้วยน้ำประปา โดยเอาแผ่นเยื่อออกจากถังปฏิกรณ์ แล้วฉีดพ่นด้วยน้ำประปาไปตามเส้นใยของแผ่นเยื่อ โดยเฉพาะบริเวณขอบของแผ่นเยื่อ ซึ่งมีสล็อตสะสมอยู่มากกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งในช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 จะต้องทำการล้างแผ่นเยื่อด้วยน้ำประปาอาทิตย์ละครั้ง แต่ในการทดลองที่ 3 เมื่อดำเนินระบบมาได้ 400 วันจะต้องล้างแผ่นเยื่อด้วยน้ำประปาทุกวัน เนื่องจากความต้านทานถาวร (Irreversible Resistance) ที่เกิดขึ้นในแผ่นเยื่อ
- การทำความสะอาดแผ่นเยื่อด้วยสารเคมี สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเป็นสารละลายผสมระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) 1.2% โดยปริมาตร ผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร และขั้นตอนการล้างอยู่ในภาคผนวก ก

### 3.7 การควบคุมระบบ

#### 3.7.1 การควบคุมอัตราการแบ่งน้ำเสีย

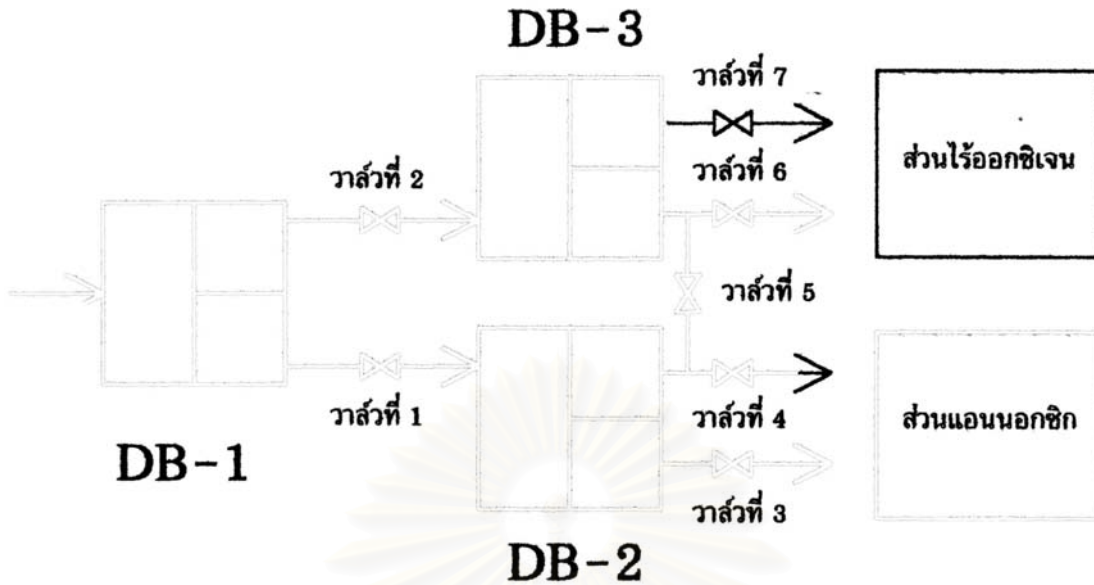
ในงานวิจัยน้ำเสียป้อนเข้าสู่ระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเติมเข้าส่วนแอนน็อกซิก ส่วนที่เหลือเติมเข้าส่วนไร้ออกซิเจน แล้วทั้งหมดไหลรวมกันเข้าส่วนเติมออกซิเจน แต่เนื่องจากเครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบมีเพียงเครื่องเดียว จึงได้จัดสร้างกล่องแบ่งน้ำเสียขึ้น (รายละเอียดอุปกรณ์ แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.4.5) เพื่อใช้แบ่งน้ำเสียเข้าระบบตามที่กำหนดไว้

การทดลองย่อยแต่ละการทดลองมีอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนที่แตกต่างกัน ซึ่งควบคุมได้ด้วยวาล์ว มีรายละเอียดการเปิด ปิดวาล์ว เพื่อควบคุมดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 การควบคุมวาล์วสำหรับแบ่งน้ำเสียเข้าระบบ

การทดลองที่	อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ส่วนแอนน็อกซิก : ส่วนไร้ออกซิเจน	วาล์วเลขที่						
		1	2	3	4	5	6	7
1	25% : 75%	O	O	O	C	O	O	O
2	75% : 25%	O	O	O	O	O	C	O
3	75% : 25%	O	O	O	O	O	C	O

O - เปิดวาล์ว , C - ปิดวาล์ว



รูปที่ 3-7 อุปกรณ์แบ่งน้ำเสีย และวาล์วที่ใช้ในการควบคุม

### 3.7.2 การควบคุมอายุสลัดจ์

จากสมการ

$$\theta_c = \frac{vX}{Q_w X_r + Q_e X_e} \quad (3-1)$$

เมื่อ	$\theta_c$	คือค่าอายุสลัดจ์ (วัน)
	$v$	คือปริมาตรของระบบ (ลิตร)
	$X$	คือค่าความเข้มข้นของสลัดจ์ในระบบ (มก./ล.)
	$Q_w$	คือค่าอัตราการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบ (ลิตร/วัน)
	$X_r$	คือค่าความเข้มข้นของสลัดจ์ที่ทิ้งออกจากระบบ (มก./ล.)
	$Q_e$	คืออัตราการไหลของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (ลิตร/วัน)
	$X_e$	คือค่าความเข้มข้นของสลัดจ์ในน้ำทิ้งออกจากระบบ (มก./ล.)

เนื่องจากแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันสามารถกักสลัดจ์ไม่ให้ออกไปกับน้ำทิ้ง ทำให้  $X_e \cong 0$  และสลัดจ์ส่วนเกินระบายออกจากถังปฏิกรณ์โดยตรงทำให้  $X = X_r$  ดังนั้น

$$\theta_c = \frac{v}{Q_w} \quad (3-2)$$

หรือ

$$Q_w = \frac{V}{\theta_c} \quad (3-3)$$

ปริมาตรของระบบ (V) มีค่าคงที่เท่ากับ 90 ลิตร ฉะนั้นจึงสามารถควบคุมค่าอายุสลัดจ์ ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบ แต่เนื่องจากเอ็มแอลเอสเอสใน แต่ละส่วนไม่เท่ากัน จึงทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินออกจากทุกส่วน โดยอัตราการทิ้งสลัดจ์ในแต่ละส่วนขึ้นอยู่กับปริมาตรของส่วนนั้น ๆ ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 อายุสลัดจ์กับอัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน

อายุสลัดจ์ (วัน)	อัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน (ลิตรต่อวัน)			
	ส่วนแอนนออกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	รวมทั้งหมด
40	0.50	0.50	1.250	2.250
80	0.25	0.25	0.625	1.125

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ลำดับการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นตั้งแต่วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2544 งานที่ทำในช่วงแรกคือ การจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับประกอบถังปฏิกรณ์ และระบบควบคุมทางไฟฟ้า การสอบเทียบ เครื่องสูบน้ำ และส่งข้อสารเคมีสำหรับวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

เมื่อดำเนินการประกอบถังปฏิกรณ์ และระบบควบคุมทางไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ในวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2544 จึงได้นำเชื้อจุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของกรุงเทพมหานคร ที่ยาน นาวา ปริมาตร 60 ลิตร มาเริ่มเดินระบบ (Start-Up) เริ่มแรกที่เลี้ยงเชื้อได้เลี้ยงแบบทีละเท (Batch) เป็นระยะ 10 วัน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ป้อนให้แก่ระบบ เพื่อให้เชื้อได้ปรับตัวกับน้ำ เสียก่อน โดยเชื้อที่ใช้เริ่มเดินระบบมีค่าเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 3,000 มก./ล. จากนั้นเลี้ยงเชื้อ ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน วิเคราะห์ค่าเอ็มแอลเอสเอสได้ประมาณ 4,500 มก./ล. จึงเริ่ม เดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous)

การทดลองเริ่มต้น (Initial Run) ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 80 วัน มีอัตราการแบ่งน้ำเสีย เข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 25% ต่อ 75% ดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2544 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2545 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 200 วัน ปรากฏ ว่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 93% แต่ประสิทธิภาพใน การกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวมีเพียง 28% ซึ่งน้อยกว่าที่คาดการณ์เอาไว้ (70%) ดังนั้นใน การทดลองที่ 1 จึงลดค่าอายุสลัดจ์เป็น 40 วัน เพื่อเพิ่มอัตราการระบายฟอสฟอรัสออกจากระบบ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส

การทดลองที่ 1 ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน และยังคงรักษาอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนไว้เท่ากับ 25% ต่อ 75% ดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 (เริ่มเก็บค่าพารามิเตอร์ วันที่ 18 กุมภาพันธ์) ถึงวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2545 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 67 วัน ปรากฏว่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดไนโตรเจนที่ สภาวะคงตัวสูงกว่า 95% และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 90 % ดังนั้นในการทดลองที่ 3 จึงควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน เท่ากับการทดลองที่ 2 และปรับอัตรา การแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนให้เท่ากับ 75% ต่อ 25% เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด

การทดลองที่ 2 ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน มีอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิก ต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% ดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 8 เมษายน พ.ศ. 2545 ถึงวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2545 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 50 วัน ปรากฏว่าประสิทธิภาพของ

ระบบในการกำจัดไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 98% และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 90 %

เมื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลองที่ 2 เพียงพอแล้ว ยังคงควบคุมระบบไว้ เพื่อวิเคราะห์อัตราการเกิดกลไกการกำจัดต่างๆ ของระบบที่อายุสลัดจ์ 40 วัน ได้แก่ อัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Release Rate) อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Uptake Rate) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Nitrification Rate) อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Denitrification Rate) และ อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ (Specific Oxygen Uptake Rate) รวมทั้งขนาดอนุภาค และการบ่งบอกประเภทของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการฟิช (Fluorescence *in situ* Hybridization, FISH) ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2545 จนถึงวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2545 ซึ่งการบ่งชี้ประเภทของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการฟิชนี้ได้ทำการทดลองที่ ห้องปฏิบัติการ Gene. Tech. คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ (Phosphorus Content) ของจุลชีพในการทดลองเริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ 5.7% กับการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งเท่ากับ 7.6 และ 8.4% พบว่าขัดแย้งกับการทดลองของ Wentzel และคณะ (1988 อ้างโดย WEF, 1998) ที่ว่าเมื่อค่าอายุสลัดจ์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์สูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าในการทดลองเริ่มต้นนั้น ระบบยังไม่สามารถเลี้ยงพีเอโอในระบบให้ได้จำนวนมากเพียงพอ แม้จะดำเนินการเลี้ยงเข้ามา 200 วันก็ตาม

ดังนั้นหลังจากเก็บค่าอัตราการเกิดกลไกการกำจัดต่างๆแล้ว จึงได้ทำการทดลองเริ่มต้นซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เป็นการทดลองที่ 3 โดยควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 80 วัน มีอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% ดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2545 ถึงวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2545 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน ปรากฏว่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 96% และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวสูงกว่า 80 %

ระหว่างการทดลองที่ 3 ได้มีการเติมเชื้อจุลชีพเพิ่มเติมให้แก่ระบบ เนื่องจากจุลชีพในระบบลดลงในช่วงที่ทำการทดลองฟิช เพราะไม่ได้เติมน้ำเสียเข้าระบบ

เชื้อจุลชีพที่เติมนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของห้างมาบุญครอง เมื่อวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2545 ปริมาตร 20 ลิตร เชื้อที่นำมา มีสีน้ำตาลแกมดำ มีค่าเอ็มแอลเอสเอส ประมาณ 2,400 มก./ล.

หลังการทดลองยังคงควบคุมระบบไว้ เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการเกิดกลไกการกำจัดต่างๆ ของระบบที่อายุสลัดจ์ 80 วัน เช่นเดียวกับที่อายุสลัดจ์ 40 วัน ตั้งแต่วันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2545 จนถึงวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2545 และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการฟิชแล้วเสร็จเมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2545

ตารางที่ 4-1 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียด	2544						2545													
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
เตรียมอุปกรณ์สำหรับทดลอง																				
การทดลองเริ่มต้น																				
การทดลองที่ 1																				
การทดลองที่ 2																				
หาค่าจำเพาะของการทดลองที่ 2																				
การทดลองที่ 3																				
หาค่าจำเพาะของการทดลองที่ 3																				

## 4.2 ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ

### 4.2.1 พีเอช และสภาพต่าง

ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มีค่าอยู่ในช่วง 5.03 ถึง 6.55 ซึ่งมีสภาพเป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมมาจากกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) แม้จะเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบโดยมีสภาพต่างในน้ำเข้าประมาณ 150 มก./ล. ก็ตาม

เมื่อเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบ ที่ส่วนแอนน็อกซ์ิกกับส่วนไร้ออกซิเจนทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ส่วน มีค่าอยู่ในช่วง 6.70 ถึง 7.30 ซึ่งไม่ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและการคายฟอสฟอรัสของระบบ โดยค่าสภาพต่างของทั้ง 2 ส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ที่ส่วนเติมออกซิเจนสภาพต่างลดลงประมาณ 80 มก./ล. เนื่องจากถูกใช้ไปในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน แต่พีเอชนั้นกลับมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจาก การเติมออกซิเจนในระบบเสมือนการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำให้ไปสู่บรรยากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้เป็นส่วนประกอบในระบบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ เมื่อมีการไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป จึงเป็นการลดกรดคาร์บอนิกในระบบด้วย (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543) พีเอชจึงกลับเพิ่มขึ้น

ค่าพีเอชในส่วนเติมออกซิเจนอยู่ระหว่าง 7.10 ถึง 7.60 ซึ่งไม่เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและการจับใช้ฟอสฟอรัสของระบบ โดย Liu และคณะ (1996) พบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับอีปีฟิอาร์เท่ากับ  $6.8 \pm 0.7$

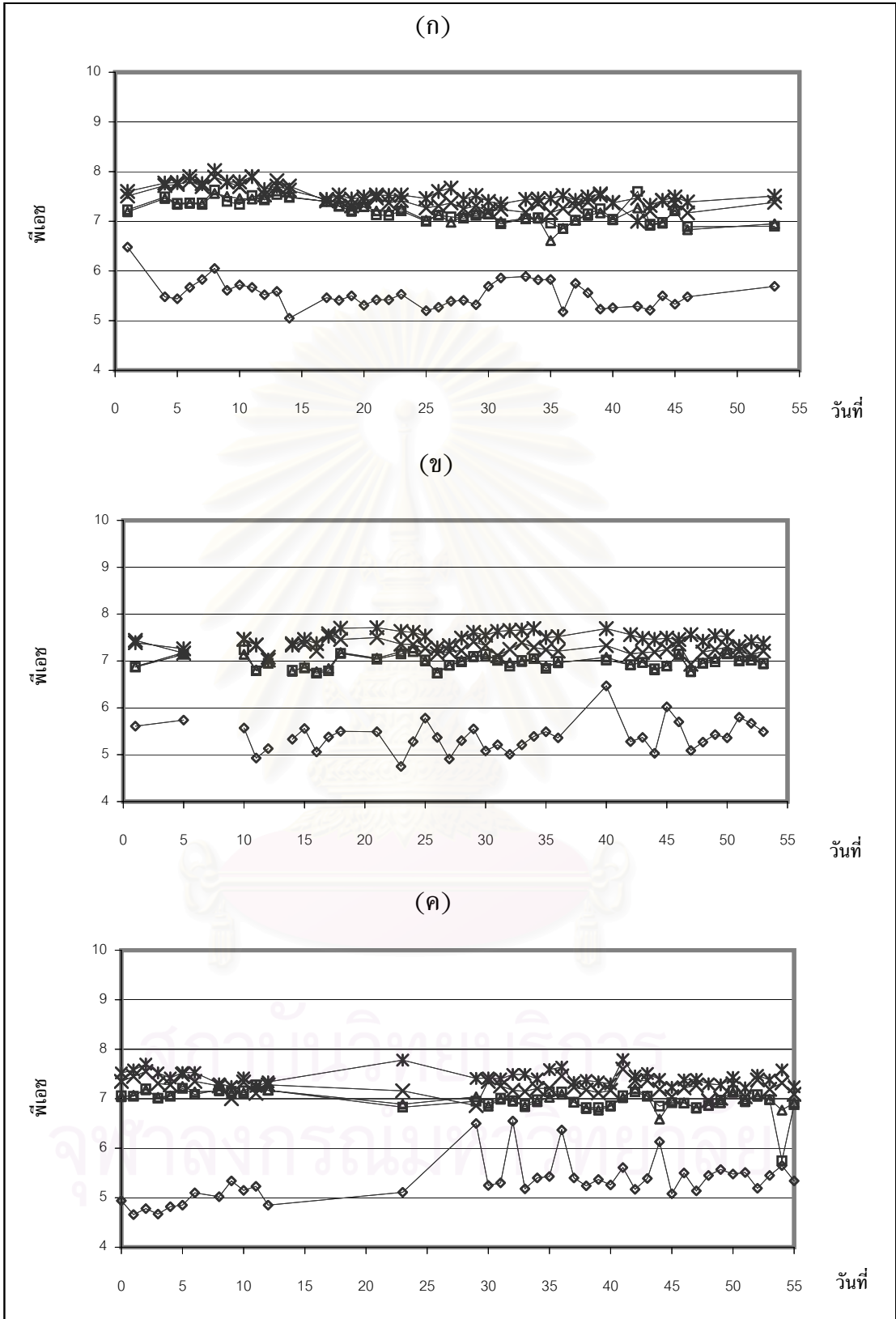


ตารางที่ 4-2 ค่าพีเอชในส่วนต่างๆ ของทุกการทดลอง

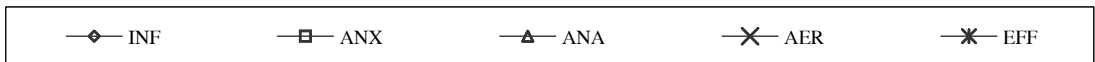
การทดลองที่		น้ำเข้า	ส่วนแอนนอกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก
1	avg.	<b>5.53</b>	<b>7.12</b>	<b>7.19</b>	<b>7.45</b>	<b>7.55</b>
	N	40	40	40	40	40
	S.D.	0.27	0.18	0.17	0.11	0.13
2	avg.	<b>5.39</b>	<b>6.98</b>	<b>6.99</b>	<b>7.27</b>	<b>7.49</b>
	N	37	37	37	37	37
	S.D.	0.33	0.10	0.11	0.10	0.10
3	avg.	<b>5.35</b>	<b>6.98</b>	<b>6.99</b>	<b>7.24</b>	<b>7.43</b>
	N	39	39	39	39	39
	S.D.	0.44	0.33	0.15	0.17	0.15

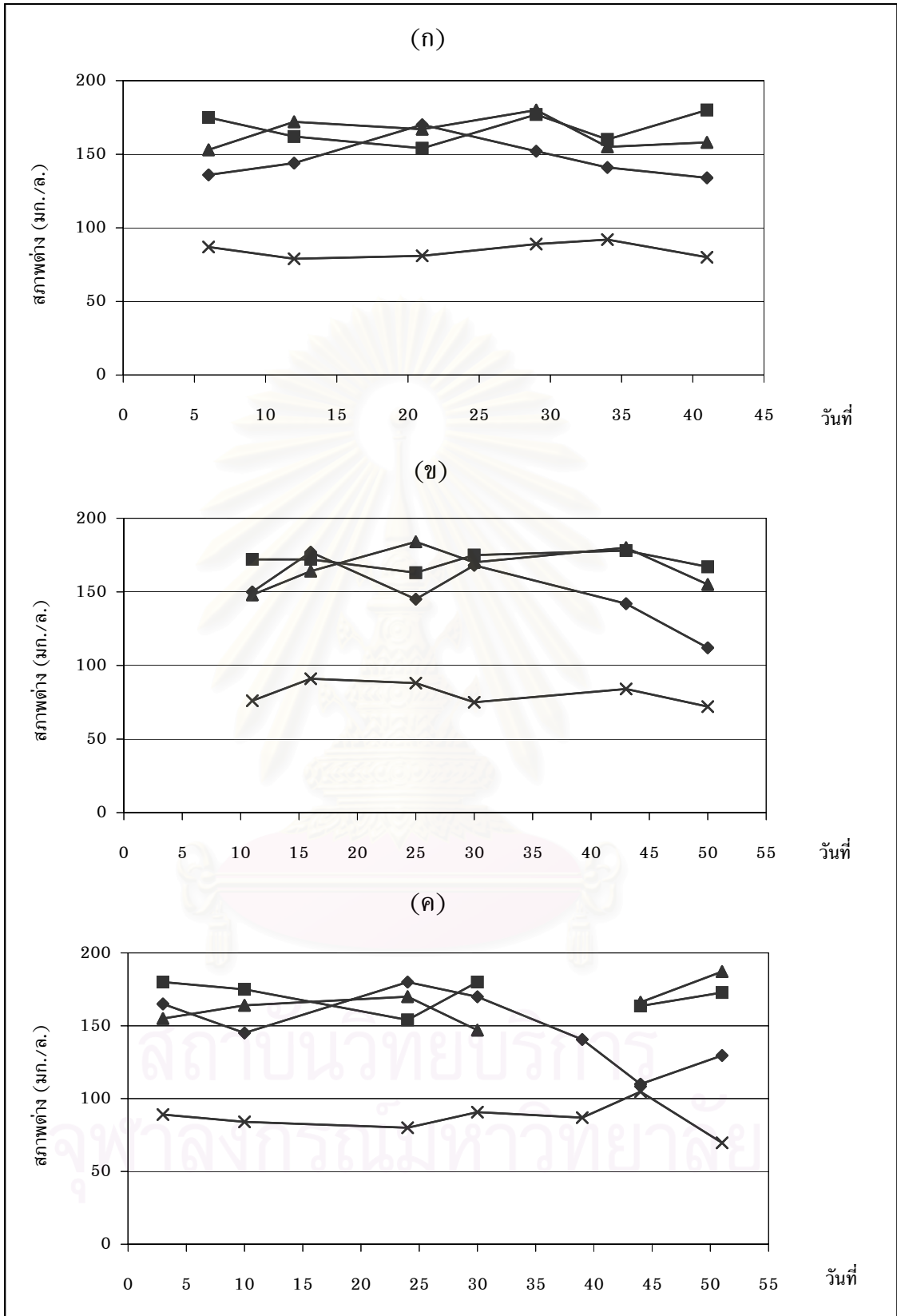
ตารางที่ 4-3 ค่าสภาพต่างในส่วนต่างๆ ของทุกการทดลอง

การทดลองที่		น้ำเข้า (มก./ล.)	ส่วนแอนนอกซิก (มก./ล.)	ส่วนไร้ออกซิเจน (มก./ล.)	ส่วนเติมออกซิเจน (มก./ล.)
1	avg.	<b>146</b>	<b>168</b>	<b>164</b>	<b>85</b>
	N	6	6	6	6
	S.D.	13.3	10.7	10.7	5.4
2	avg.	<b>149</b>	<b>171</b>	<b>167</b>	<b>81</b>
	N	6	6	6	6
	S.D.	22.7	5.4	14.0	7.8
3	avg.	<b>149</b>	<b>171</b>	<b>165</b>	<b>86</b>
	N	7	6	6	7
	S.D.	24.7	10.3	13.8	10.7

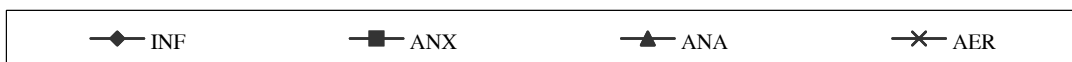


รูปที่ 4-1 พีเอชตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3





รูปที่ 4-2 ค่าสภาพต่างตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3



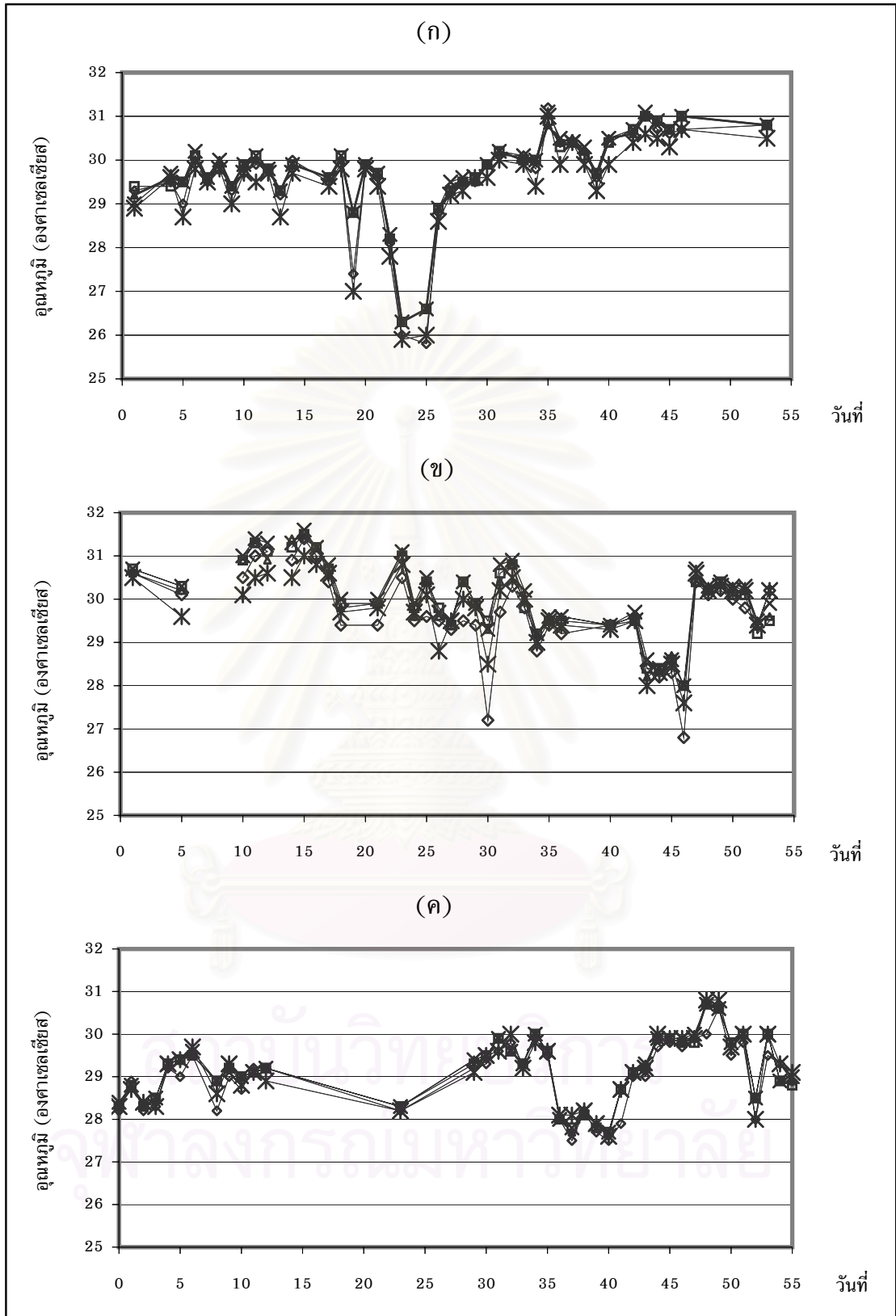
#### 4.2.2 อุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ด้วยอุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์จึงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิบรรยากาศ ในถังปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่ากับ 27.7 องศาเซลเซียส ช่วงต้นเดือนตุลาคม 2545 และอุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 31.6 องศาเซลเซียส ช่วงปลายเดือนเมษายน 2545 ช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์อยู่ที่ 29 – 30 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วง Mesophilic (Grady และคณะ, 1999) อันเป็นช่วงอุณหภูมิปกติในประเทศไทย ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบ

จากตารางที่ 4-4 พบว่าอุณหภูมิของน้ำเข้า น้ำออก และในส่วนต่างๆ ของถังปฏิกรณ์นั้นมีค่าไม่ต่างกันมากนัก โดยอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกจะต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์เล็กน้อย เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์มีอุปกรณ์เพื่อให้จุลชีพในระบบแขวนลอยอยู่เสมอ ได้แก่ ไบโควนในส่วนแอนนออกซิก กับส่วนไร้ออกซิเจน และเครื่องเติมออกซิเจน ในส่วนเติมออกซิเจน อุปกรณ์เหล่านี้เป็นตัวนำความร้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทำให้ภายในถังปฏิกรณ์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนน้ำเข้าและน้ำออกนั้นถูกเก็บไว้ในถังพักจึงมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับบรรยากาศมากกว่า

ตารางที่ 4-4 ค่าอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของทุกการทดลอง

การทดลองที่		น้ำเข้า °C	ส่วนแอนนออกซิก °C	ส่วนไร้ออกซิเจน °C	ส่วนเติมออกซิเจน °C	น้ำออก °C
1	avg.	29.6	29.7	29.7	29.8	29.4
	N	40	40	40	40	40
	S.D.	1.13	0.43	0.41	0.45	0.48
2	avg.	29.7	30.0	30.0	30.1	29.8
	N	37	37	37	37	37
	S.D.	1.00	0.75	0.78	0.80	0.90
3	avg.	29.0	29.2	29.2	29.2	29.2
	N	40	40	40	40	40
	S.D.	0.77	0.68	0.67	0.67	0.74



รูปที่ 4-3 อุณหภูมิตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3



#### 4.2.3 ออกซิเจนละลาย

จากตารางที่ 4-5 ค่าออกซิเจนละลายในส่วนแอนนอซิก และส่วนไร้ออกซิเจนมีค่าประมาณ 0.15 มก./ล. ตลอดทั้ง 3 การทดลอง ซึ่งค่าออกซิเจนละลายดังกล่าวไม่ได้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และการคายฟอสฟอรัสของระบบ

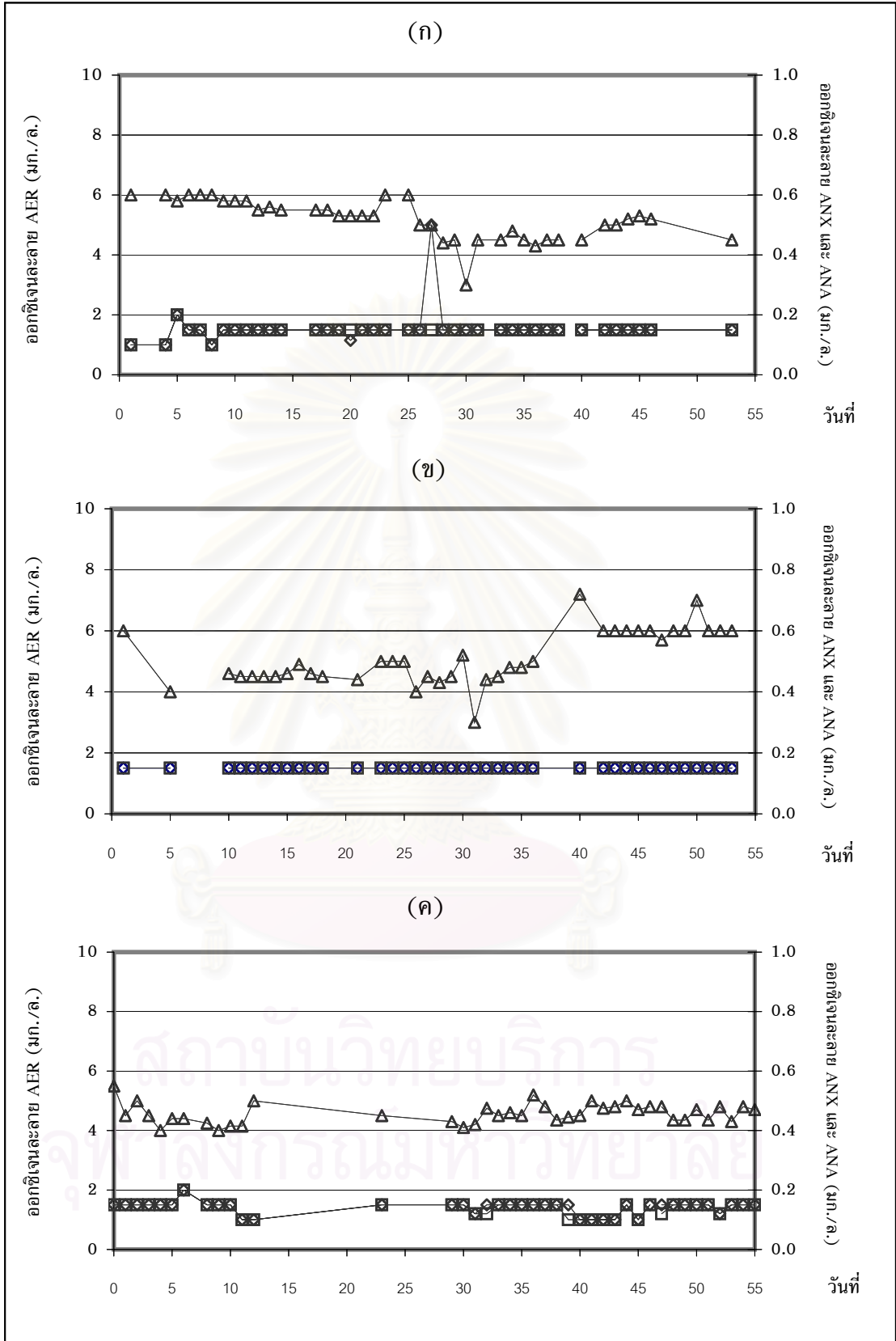
ปริมาณออกซิเจนที่เติมในส่วนเติมออกซิเจน แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเติมด้วยเครื่องอัดอากาศ (AC) ใต้ชุดแผ่นเยื่อเพื่อให้เกิดการกรองแบบไหลขนานซึ่งมีค่าคงที่อัตราการไหลอากาศ 60 ลิตรต่อนาที และส่วนที่สองจากเครื่องเติมอากาศเพื่อให้จุลชีพแขวนลอยในระบบ

ค่าออกซิเจนละลายในส่วนเติมออกซิเจน มีค่าแตกต่างกันระหว่างการทดลองที่ 2 (อายุสัปดาห์ 40 วัน) และ 3 (อายุสัปดาห์ 80 วัน) เนื่องจากออกซิเจนที่เติมทั้ง 2 การทดลองมีปริมาณคงที่ ซึ่งได้จากเครื่องเติมออกซิเจน และเครื่องอัดอากาศใต้ชุดของแผ่นเยื่อ ในขณะที่ปริมาณเชื้อจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจนของการทดลองที่ 3 มีค่ามากกว่า และอัตราการใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายเซลล์ (respiration) ของจุลชีพจะสูงขึ้นเมื่ออายุสัปดาห์สูงขึ้น ทำให้ออกซิเจนละลายที่เหลือในระบบของการทดลองที่ 3 มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ 2 แม้อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ (Specific oxygen uptake rate) ของการทดลองที่ 2 ซึ่งเท่ากับ 18.27 มก. $O_2$ /ก. MLVSS-ชม. สูงกว่าการทดลองที่ 3 ซึ่งเท่ากับ 10.83 มก. $O_2$ /ก. MLVSS-ชม. (การทดลองอยู่ในภาคผนวก ญ) ก็ตาม อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะที่ลดลงเมื่ออายุสัปดาห์เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Eckenfelder (2000) และ Muller และคณะ (1969)

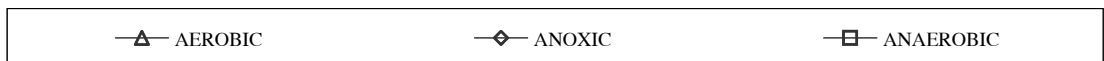
ค่าออกซิเจนละลายในส่วนเติมออกซิเจนมีค่ามากกว่า 2.0 มก./ล. ในทุกการทดลอง จึงไม่ทำให้เกิดการจำกัดการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Painter, 1977 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999)

ตารางที่ 4-5 ค่าออกซิเจนละลายในส่วนต่างๆ ของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ส่วนแอนนอซิก (มก./ล.)	ส่วนไร้ออกซิเจน (มก./ล.)	ส่วนเติมออกซิเจน (มก./ล.)
1	avg.	<b>0.16</b>	<b>0.15</b>	<b>5.18</b>
	N	39	39	39
	S.D.	0.06	0.02	0.67
2	avg.	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>5.12</b>
	N	39	39	39
	S.D.	0	0	0.88
3	avg.	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>4.57</b>
	N	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
	S.D.	0.02	0.02	0.33



รูปที่ 4-4 ออกซิเจนละลายตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3



#### 4.2.4 ของแข็งแขวนลอย

จากตารางที่ 4-6 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของทุกการทดลองเท่ากับ 100% ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อเท่ากับ 0.4 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่ากระดาษกรองที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยซึ่งมีขนาด 0.45 ไมครอน ดังนั้นอนุภาคที่ผ่านแผ่นเยื่อออกมากับน้ำทิ้งได้จึงสามารถผ่านกระดาษกรองที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้

ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบ เกิดจากการหมักของน้ำตาลที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ภายในถังเตรียมน้ำเสีย โดยตะกอนที่เกิดขึ้นมีสีขาวขุ่น

ตารางที่ 4-6 ค่าของแข็งแขวนลอยของทุกการทดลอง

การทดลองที่		น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)
1	avg.	83	0
	N	6	6
	S.D.	13.3	0
2	avg.	88	0
	N	6	6
	S.D.	18.5	0
3	avg.	79	0
	N	5	5
	S.D.	19.8	0

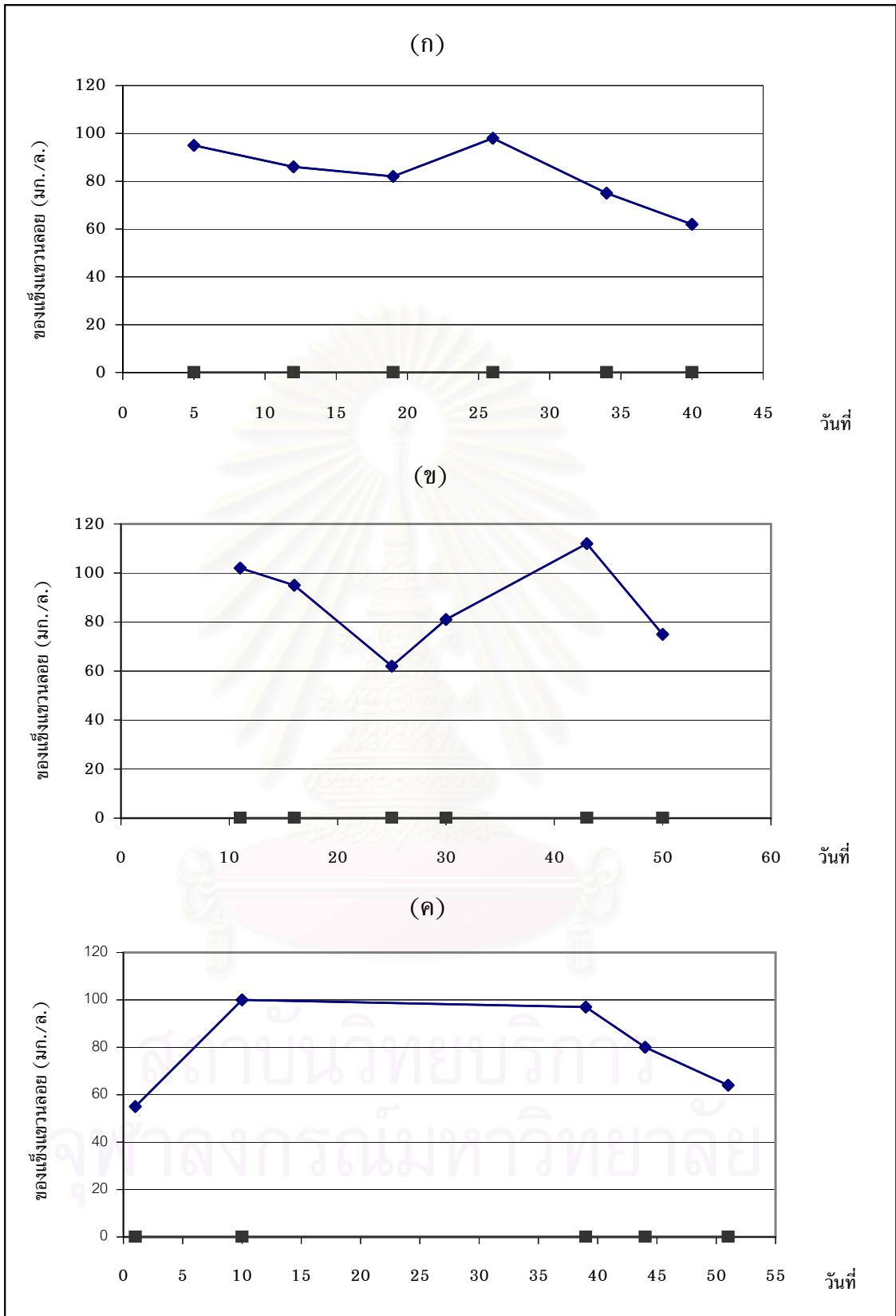
#### 4.2.5 เอสวีไอ

ค่าเอสวีไอ (Sludge Volume Index, SVI) เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการตะกอนของสลัดจ์ จากการทดลองพบว่า ค่าเอสวีไอของส่วนเติมออกซิเจนอยู่ในช่วง 80 – 150 มล./ก. ซึ่งเป็นช่วงที่จุลชีพมีความสามารถในการตกตะกอนระดับปานกลาง (Grady และคณะ, 1999)

เนื่องจากระบบที่ใช้ในการทดลองควบคุมค่าอายุสลัดจ์ให้มีค่าสูง ทำให้อัตราส่วนอาหารต่อปริมาณสลัดจ์ (F/M Ratio) มีค่าต่ำ ประมาณ 0.20 ต่อวัน จึงเป็นการส่งเสริมให้แบคทีเรียแบบเส้นใยเกิดขึ้นในระบบได้ง่าย และจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องเชื้อในระบบ ก็พบว่าแบคทีเรียแบบเส้นใยปรากฏอยู่ในทุกส่วนของระบบ

เมื่อวิเคราะห์ชุมชนของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการพีช พบว่าแบคทีเรียแบบเส้นใยที่ปรากฏในระบบตอบสนองกับโพรบ GAM42 ที่ใช้บ่งชนิดของ gamma Proteobacteria ซึ่งแบคทีเรียแบบเส้นใยที่อยู่ในกลุ่มนี้คือ Type 021N และ Type 1863 (Seviour และ Blackall, 1999) แต่เนื่องจากแบคทีเรียแบบเส้นใย Type 1863 พบในระบบที่มีอัตราส่วน





รูปที่ 4-5 ค่าของแข็งแขวนลอยตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3



อาหารต่อปริมาณสลัดจ์ (F/M) สูง ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นแบคทีเรียแบบเส้นใย Type 021N จึงน่าจะเป็นแบคทีเรียแบบเส้นใยส่วนใหญ่ในระบบ นอกจากนี้แบคทีเรียแบบเส้นใย Type 021N เกิดขึ้นในระบบที่มีการกำจัดธาตุอาหาร และมีอัตราส่วนอาหารต่อปริมาณสลัดจ์ต่ำ (Seviour และ Blackall, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง

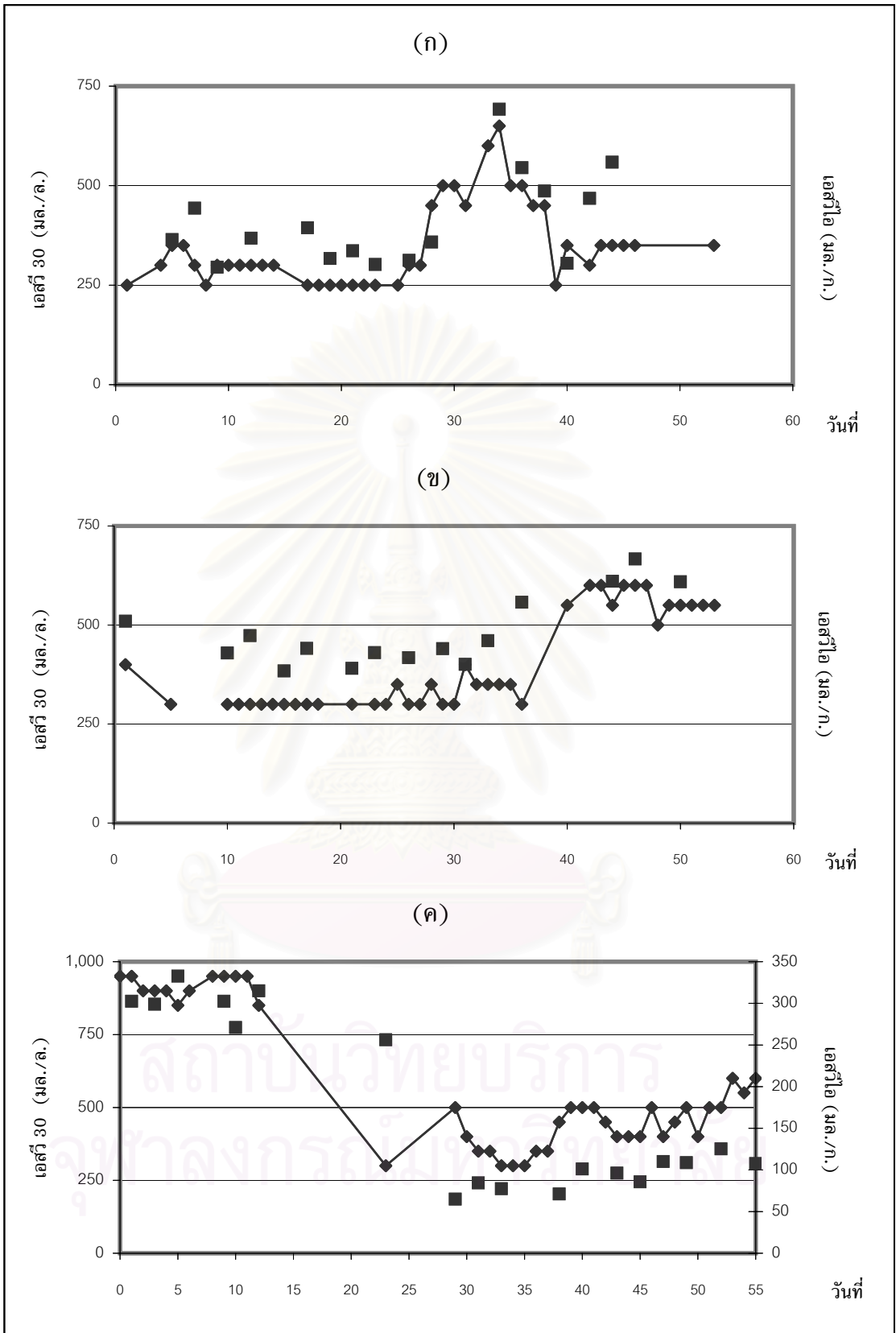
อย่างไรก็ตาม แม้จะพบแบคทีเรียแบบเส้นใยในระบบ แต่ค่าเอสวีไอ และเอสวี 30 ของทุกการทดลองก็มีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการสะสมแหล่งคาร์บอนในส่วนแอนน็อกซิก กับส่วนไร้ออกซิเจนของระบบ ซึ่งแบคทีเรียแบบสร้างฟล็อกในระบบมีความเร็วสูงสุดในการเก็บสะสมสารอาหารมากกว่าแบคทีเรียแบบเส้นใย (Van Loosdrecht และคณะ, 1997) นอกจากนี้สภาวะไร้ออกซิเจนในระบบก็จำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบเส้นใยอีกด้วย จึงช่วยควบคุมไม่ให้เกิดสลัดจ์อัดขึ้นในระบบ และแบคทีเรียแบบเส้นใยในระบบยังช่วยประสานระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในฟล็อก ทำให้ฟล็อกของระบบมีเสถียรภาพ และอาจมีส่วนทำให้ฟล็อกในระบบมีขนาดใหญ่ด้วย

ตารางที่ 4-7 ค่าเอสวี 30 และเอสวีไอของส่วนเติมออกซิเจน

การทดลองที่		เอสวี 30 มล./ล.	เอสวีไอ มล./ก.
1	avg.	428	98
	N	18	7
	S.D.	105	26
2	avg.	479	107
	N	21	7
	S.D.	118	20
3	avg.	478	105
	N	16	7
	S.D.	68	12

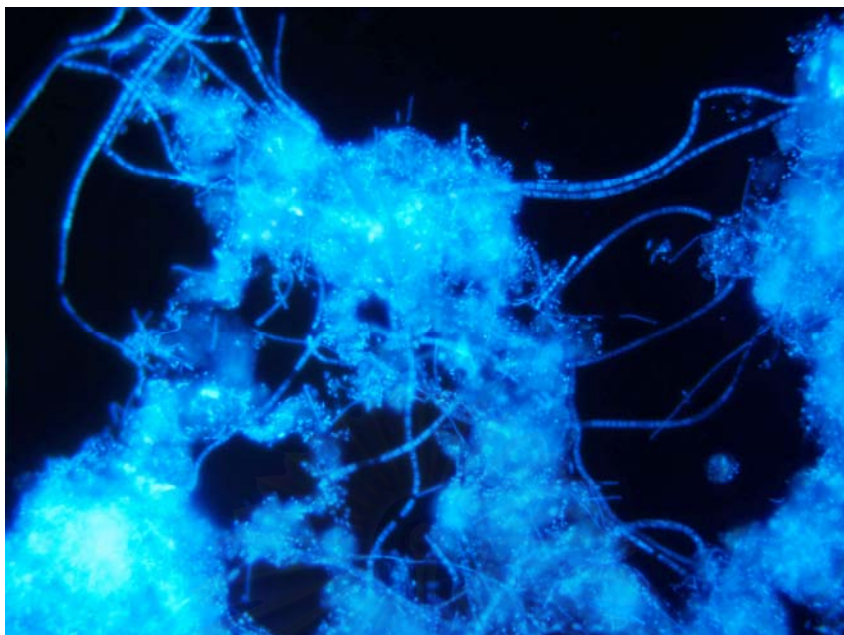
#### 4.3 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบ

ในงานวิจัยแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลองย่อย การทดลองที่ 1 และ 2 ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน การทดลองที่ 3 ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 80 วัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อค่าอายุสลัดจ์เพิ่มขึ้นค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) และเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

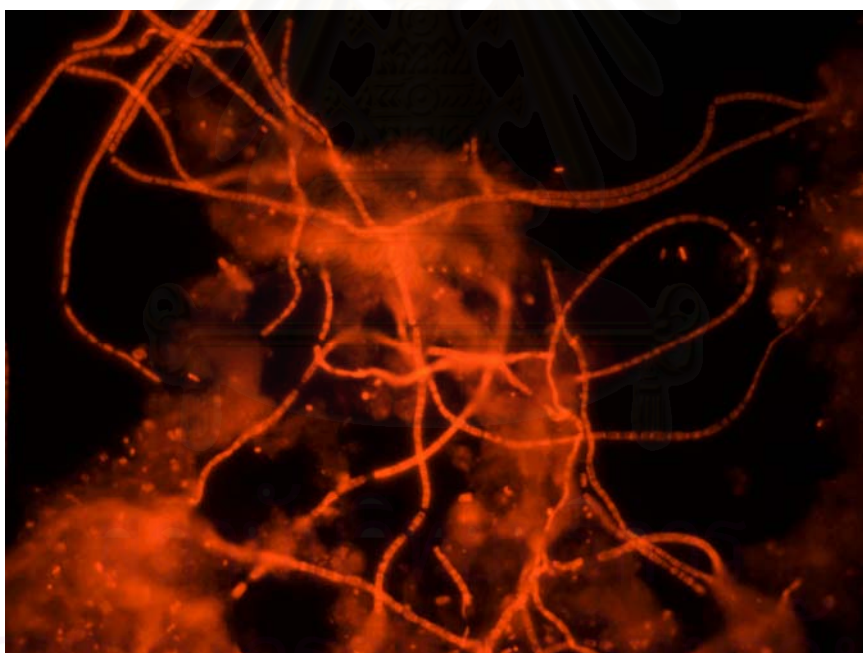


รูปที่ 4-6 เอสวี 30 และ เอสวีไอตลอดทั้งการทดลอง  
 (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3





(ก)



(ข)

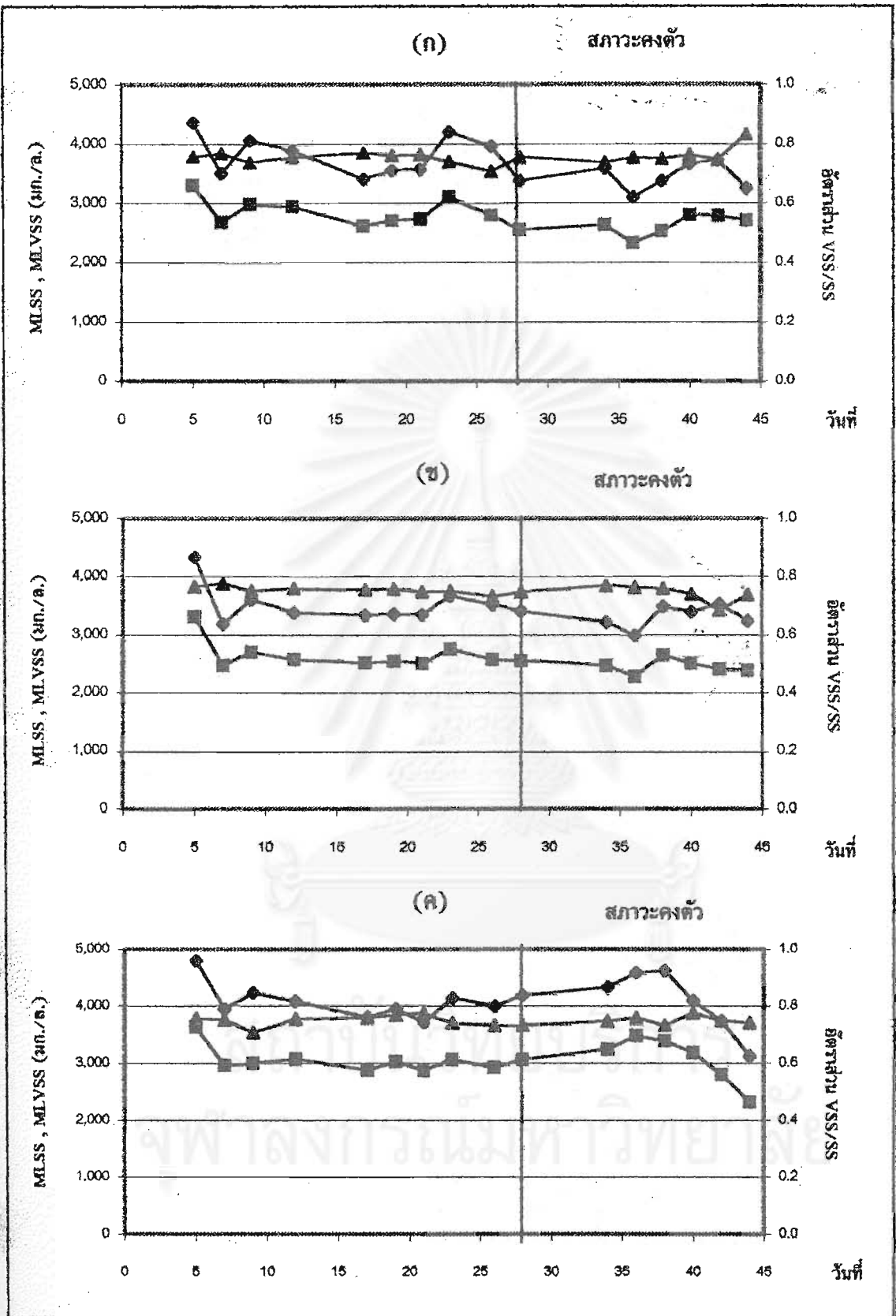
รูปที่ 4-7 การวิเคราะห์ชนิดแบคทีเรียแบบเส้นใยด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ GAM42

ตารางที่ 4-8 ค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอส ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ส่วนแอนนอซิก		ส่วนไร้ออกซิเจน		ส่วนเติมออกซิเจน	
		MLSS (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	MLSS (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)	MLSS (มก./ล.)	MLVSS (มก./ล.)
1	avg.	3,444	2,625	3,330	2,475	4,100	3,073
		VSS/SS = 0.76		VSS/SS = 0.74		VSS/SS = 0.75	
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	230	166	185	119	523	397
2	avg.	3,314	2,540	3,066	2,318	4,084	3,064
		VSS/SS = 0.74		VSS/SS = 0.74		VSS/SS = 0.73	
	N	7	5	7	5	7	5
	S.D.	269	168	238	202	598	569
3	avg.	4,037	3,229	3,675	2,921	4,582	3,611
		VSS/SS = 0.80		VSS/SS = 0.79		VSS/SS = 0.79	
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	294	308	463	443	403	358

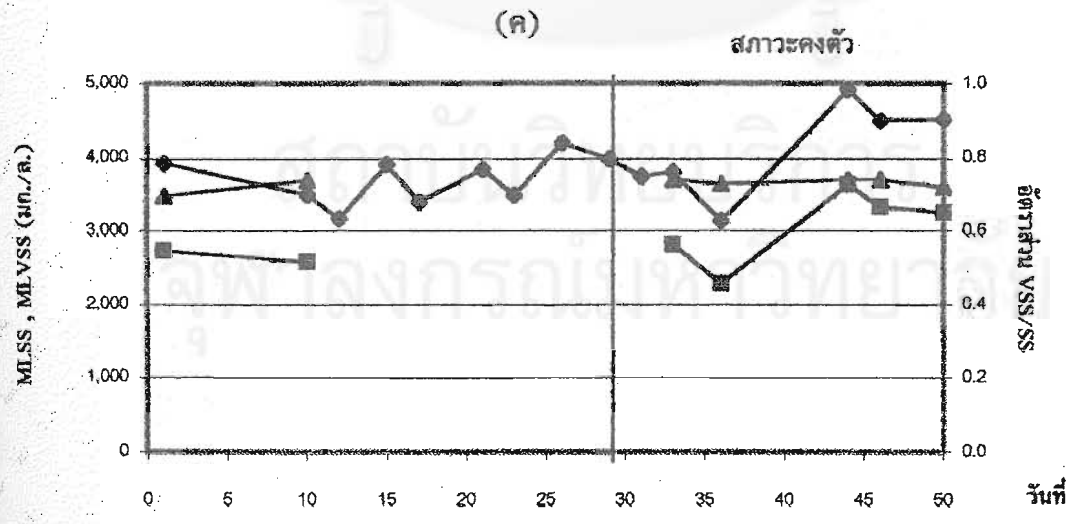
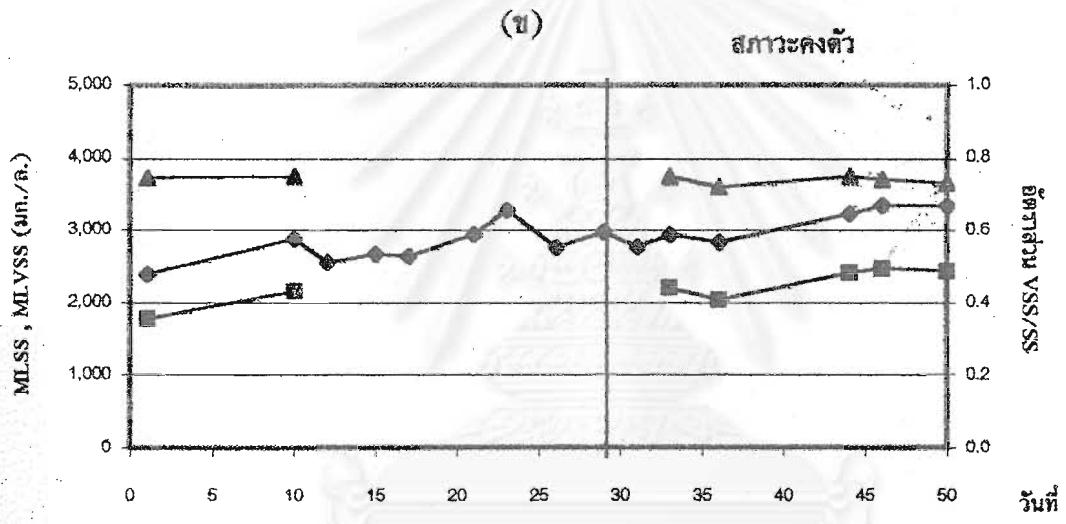
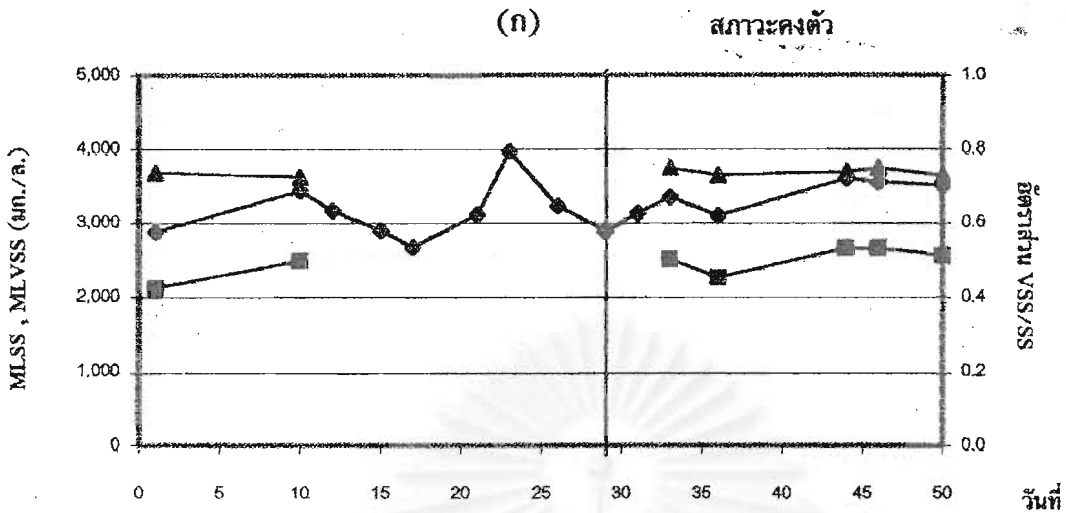
จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอส ของส่วนต่างๆ ในถังปฏิกรณ์มีค่าที่ไม่เท่ากัน ในส่วนแอนนอซิกจะมีค่าสูงกว่าส่วนไร้ออกซิเจนเล็กน้อย และส่วนเติมออกซิเจนมีค่าสูงกว่าส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดซีโอไซด์และฟอสฟอรัสของระบบ ซึ่งในส่วนแอนนอซิก และส่วนไร้ออกซิเจน จุลชีพในระบบจะดึงสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเซลล์ มาเก็บสะสมไว้ในเซลล์ ในอัตราที่สูงกว่าการนำสารอินทรีย์คาร์บอนไปใช้สังเคราะห์เซลล์ (Dionisi และคณะ, 2001) ทำให้ในส่วนแอนนอซิก และส่วนไร้ออกซิเจนมีอัตราการสังเคราะห์เซลล์ที่ต่ำ ซึ่งในส่วนเติมออกซิเจน จุลชีพที่เก็บกักสารอินทรีย์คาร์บอนไว้ จึงจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนที่สะสมไว้ในเซลล์สังเคราะห์เซลล์ ดังนั้นการเจริญเติบโตของจุลชีพในระบบส่วนใหญ่ จึงเกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจน

อัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสของระบบ เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าประมาณ 0.45 แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็น 0.60 0.65 และ 0.70 เมื่อเลี้ยงเชื้อผ่านไปได้ 80 140 และ 200 วันตามลำดับ ในการทดลองที่ 1 และ 2 อัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 0.75 ส่วนในการทดลองที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็น 0.79 สอดคล้องกับอัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอส ของระบบเอ็มปีอาร์ที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ (Fan และคณะ, 1996 ; Ueda และ Hata, 1999 ; Wagner และ Rosenwinkel, 2000)

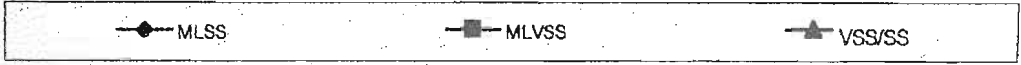


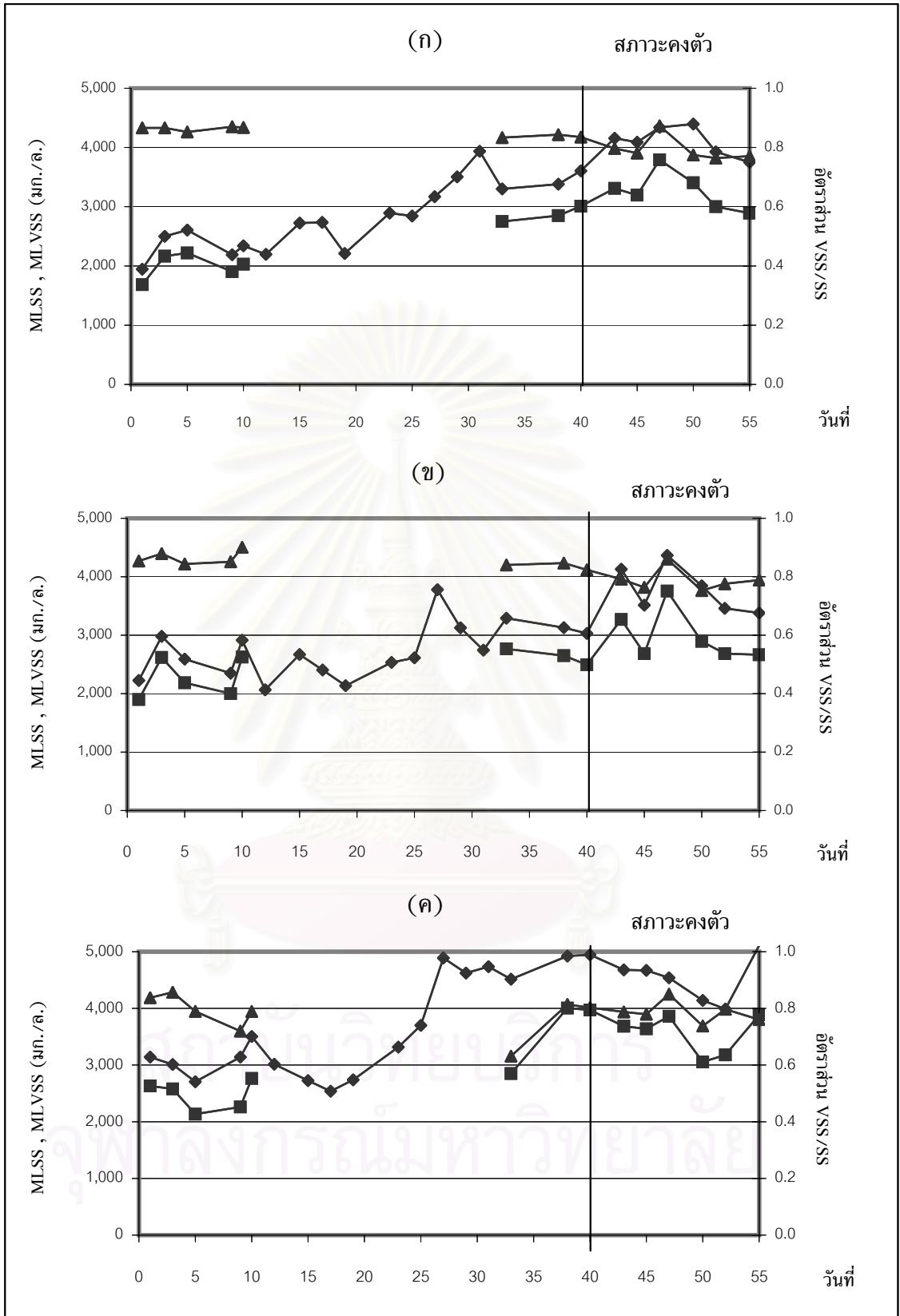
รูปที่ 4-8 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 1  
 (ก) ส่วนแอนนอกซิก (ข) ส่วนไร้ออกซิเจน (ค) ส่วนเติมออกซิเจน

◆ MLSS      ■ MLVSS      ▲ VSS/SS



รูปที่ 4-9 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 2  
 (ก) ส่วนแอนนออกซิก (ข) ส่วนไร้ออกซิเจน (ค) ส่วนเติมออกซิเจน

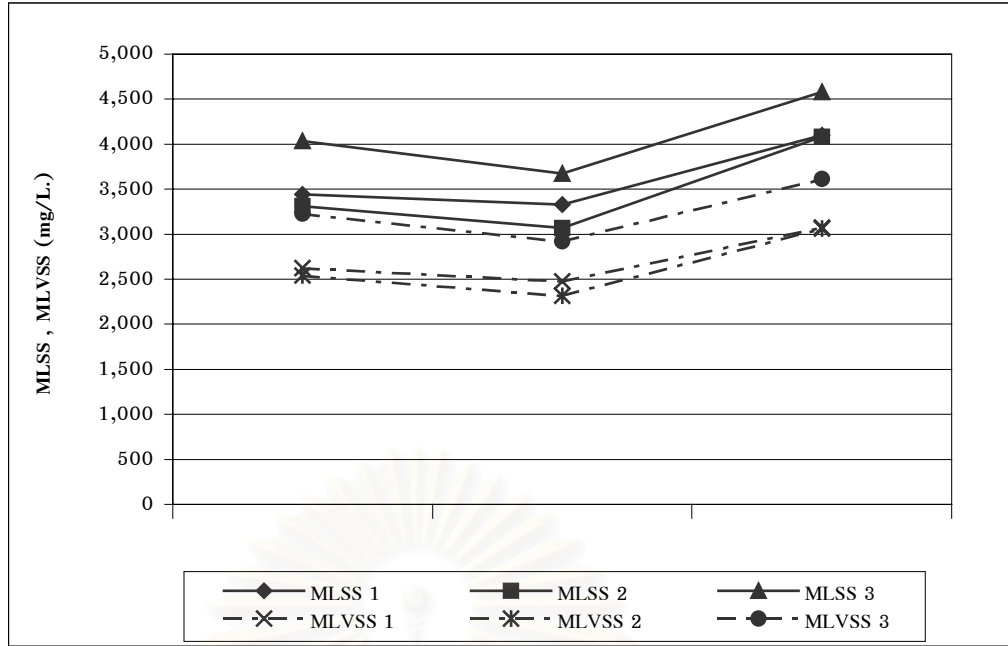




รูปที่ 4-10 ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบของการทดลองที่ 3  
 (ก) ส่วนแอนนอกซิก (ข) ส่วนไร้ออกซิเจน (ค) ส่วนเติมออกซิเจน

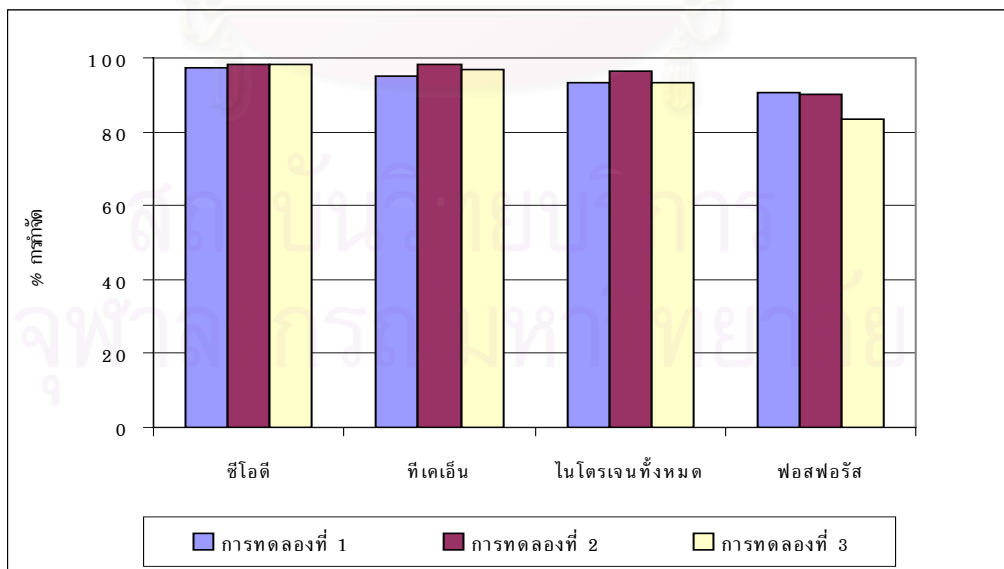






รูปที่ 4-11 ค่า MLSS และ MLVSS ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับการทดลองที่ 2 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์เท่ากันที่ 40 วัน พบว่าค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสของการทดลองที่ 2 มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองที่ 2 มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่าในการทดลองที่ 1 เพราะมีอัตราการป้อนน้ำเสียและค่าซีไอดีเฉลี่ยที่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงมีสารอินทรีย์ที่จะนำไปใช้สร้างเซลล์ที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสระหว่างการทดลองต่าง ๆ ของระบบที่พัฒนาขึ้นนี้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนักในแต่ละการทดลอง ทั้งนี้จะได้อธิบายในหัวข้อการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบต่อไป

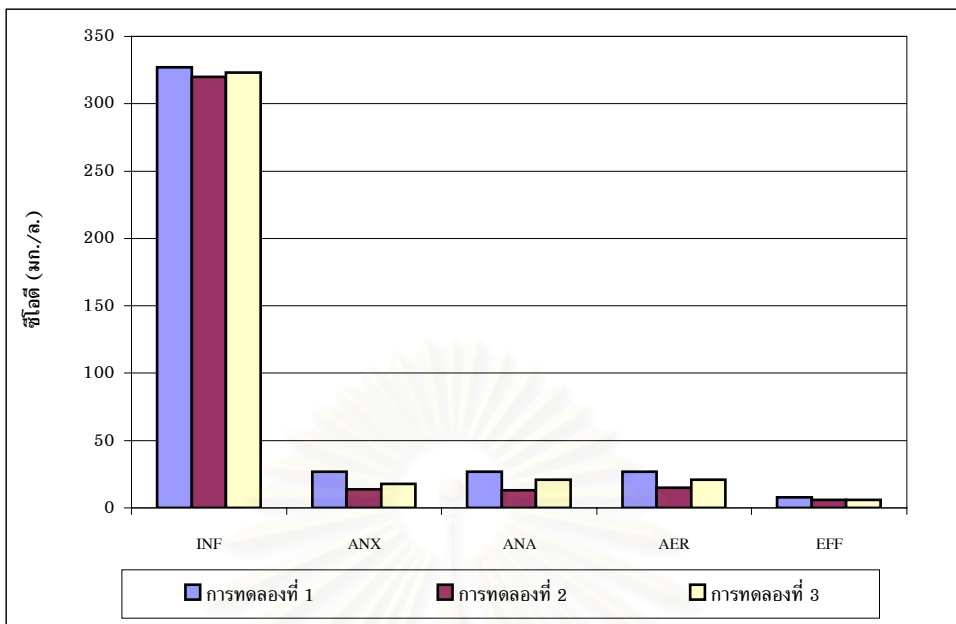
#### 4.4 การกำจัดซีโอดีของระบบ

ค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ น้ำตาลทราย และกรดอะซิติก ซึ่งเป็นซีโอดีที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ ดังนั้นจุลชีพในระบบจึงสามารถนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว ค่าซีโอดีเฉลี่ยที่ป้อนเข้าระบบมีค่าประมาณ 325 มก./ล. อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ยของการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 96.5 ลิตรต่อวัน 92.3 ลิตรต่อวัน และ 99.7 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เท่ากับ 0.34 0.33 และ 0.35 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะคงตัวในการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 97.5% 98.2% และ 98.1% ตามลำดับ

ตารางที่ 4-9 ค่าซีโอดีจากจุดเก็บตัวอย่างต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ค่าซีโอดี ( มก./ล. )					% การกำจัด
		น้ำเข้า	ส่วนแอนนอกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก	
1	avg.	327	27	27	27	8	97.5
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	2.36	10.06	11.51	10.29	2.04	1.77
2	avg.	320	14	13	15	6	98.2
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	22.51	4.88	6.31	5.66	4.01	1.29
3	avg.	323	18	21	21	6	98.1
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	15.20	5.86	7.59	7.03	6.13	1.86

จากตารางที่ 4-9 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบ ในแต่ละการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แม้การควบคุมระบบจะแตกต่างกันก็ตาม โดยค่าซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วในส่วนแอนนอกซิก และส่วนไร้ออกซิเจน จาก 325 มก.ซีโอดี/ล.ในน้ำเข้า ลดลงเหลือต่ำกว่า 40 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งในส่วนเติมออกซิเจนค่าซีโอดีก็ยังคงใกล้เคียงกับทั้ง 2 ส่วนแรก และปริมาณซีโอดีในส่วนเติมออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 40 มก.ซีโอดี/ล. นั้นไม่ทำให้เกิดการยับยั้งการจับใช้ฟอสฟอรัสของระบบ



รูปที่ 4-13 ค่าซีโอติจากจุดเก็บตัวอย่างต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

ค่าซีโอติในน้ำเข้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ระบบนั้นเนื่องจากกลไกการเก็บสะสมของจุลชีพในระบบ ทั้งนี้เพราะระบบดำเนินการในสภาวะที่ไม่สมดุล (unbalance condition) ซึ่งมีทั้งการเติมน้ำเสียแบบเป็นพักๆ (intermittent-fed) และระบบมีสภาวะไร้ออกซิเจนสลับกับการเติมออกซิเจน ทำให้จุลชีพดึงซีโอติในระบบเข้าไปสะสมไว้ในเซลล์ในรูปพีเอชเอ และกลัยโคเจนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นซีโอติที่เหลือในระบบจึงมีค่าต่ำมาก (10 - 40 มก.ซีโอติ/ล.)

จากการดูลมมวลซีโอติของระบบพบว่าค่าซีโอติที่หายไปในการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 59.5% 61.7% และ 75.7% ตามลำดับ (การคำนวณอยู่ในภาคผนวก ง) ซึ่งซีโอติที่หายไปในแต่ละการทดลองเกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ โดยสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเซลล์จุลชีพ โดยเฉพาะระบบเอ็มบีอาร์ซึ่งมีการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินออกจากระบบน้อยกว่าระบบบำบัดแบบสามัญทำให้สารอินทรีย์ที่ถูกใช้ในการสังเคราะห์เซลล์มีค่าต่ำกว่า ดังนั้นซีโอติที่หายไปจากระบบส่วนใหญ่จึงเกิดจากการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติไม่ถูกจำกัดเนื่องจากอัตราการทิ้งสลัดจ์ที่ลดลง เช่นเดียวกันกับ Wagner และ Rosenwinkel (2000) ซึ่งทดลองเดินระบบเอ็มบีอาร์โดยไม่ทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินเป็นเวลา 1 ปี พบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ในน้ำเสียถูกย่อยสลายโดยจุลชีพในระบบ และออกจากระบบในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

นอกจากนี้ซีโอติบางส่วนยังถูกใช้ไปในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นในส่วนแอนน็อกซิก แม้ว่าซีโอติถูกใช้เพื่อรีดิวซ์ไนเตรตไปเป็นก๊าซไนโตรเจนนี้ในระบบมีค่าไม่สูงนัก เนื่องจากใน

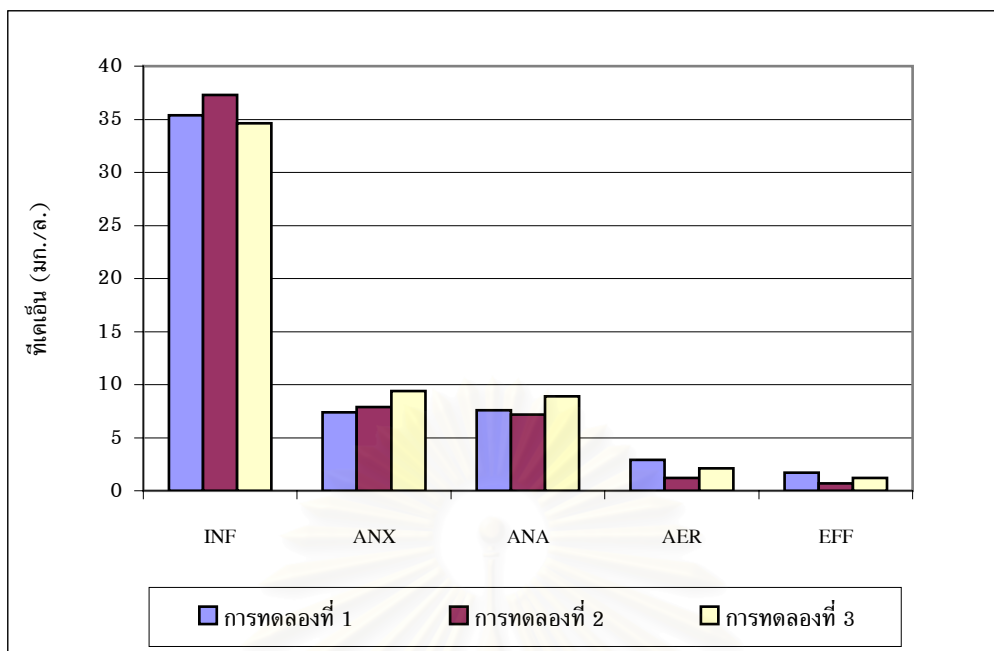
เตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนเกิดมีค่าต่ำ และซีโอดีที่ถูกใช้ไปในกลไกการเก็บกักโดยจุลชีพลุ่มพีเอโอเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส และกลุ่มจีเอโอ

#### 4.5 การกำจัดไนโตรเจนของระบบ

ค่าที่เคเอ็นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเตรียมมาจาก แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) มีค่าเฉลี่ยที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 35 มก./ล. คิดเป็นอัตราส่วน COD/TKN เท่ากับ 9.1 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนดีเยี่ยม ( Grady และคณะ, 1999 ) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นที่สภาวะคงตัวในการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 95.2% 98.2% และ 96.7% ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่สภาวะคงตัวในการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 93.4% 96.5% และ 93.3% ตามลำดับ มีไนโตรเจนในน้ำออกต่ำกว่า 0.02 มก./ล. และไนเตรตในน้ำออกต่ำกว่า 0.80 มก./ล. ในการทดลองที่ 1 และ 2 มีไนโตรเจนในน้ำออกต่ำกว่า 0.01 มก./ล. และไนเตรตในน้ำออกต่ำกว่า 1.60 มก./ล. ในการทดลองที่ 3

ตารางที่ 4-10 ค่าที่เคเอ็นจากจุดต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ค่าที่เคเอ็น ( มก./ล. )					% การกำจัด
		น้ำเข้า	ส่วนแอนนอกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก	
1	avg.	35.4	7.4	7.6	2.9	1.7	95.2
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	1.08	0.48	0.99	0.66	0.10	0.32
2	avg.	37.3	7.9	7.2	1.2	0.7	98.2
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	1.35	2.07	2.71	0.35	0.23	0.65
3	avg.	34.6	9.4	8.9	2.1	1.2	96.7
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	2.50	3.99	3.70	0.87	0.35	0.95



รูปที่ 4-14 ที่เคเอ็นจากจุดต่างๆที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

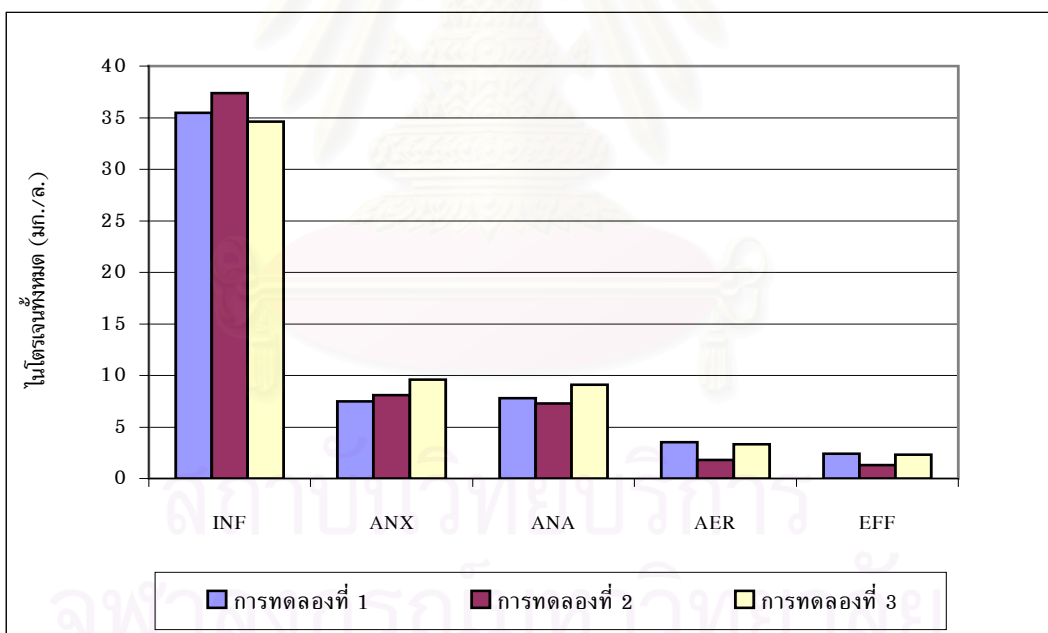
ที่เคเอ็นในโตรเจนในน้ำเข้าลดลงอย่างมากเมื่อเข้าสู่ระบบในส่วนแอนนออกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน ที่เคเอ็นที่ลดลงเนื่องจากถูกน้ำที่เวียนสลับจ้มาจากส่วนเติมออกซิเจนซึ่งมีค่าที่เคเอ็นต่ำมาเจือจาง และที่เคเอ็นที่ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์เซลล์ซึ่งเท่ากับ 716 810 และ 643 มก./วัน ในการทดลองที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (การคำนวณอยู่ในภาคผนวก ง)

ทำให้ค่าที่เคเอ็นที่ออกจากส่วนไร้ออกซิเจนแล้วเข้าส่วนเติมออกซิเจนมีค่าต่ำเพียง 7.2 - 8.9 มก./ล. และที่เคเอ็นที่ผ่านส่วนเติมออกซิเจนแล้วจะลดลงอีก เนื่องจากถูกออกซิไดซ์ด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในส่วนเติมออกซิเจน ทำให้ค่าที่เคเอ็นในน้ำทิ้งมีค่า 0.7-1.7 มก./ล.

ประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นในโตรเจนของระบบตลอดทั้ง 3 การทดลองมีค่าที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ใช้ระบบเอ็มบิอาร์ในการกำจัดที่เคเอ็นในโตรเจน โดย Fan และคณะ (2000) ได้ทดลองใช้ระบบเอ็มบิอาร์ในการกำจัดน้ำเสียชุมชนที่มีค่าที่เคเอ็นในโตรเจนในน้ำเสีย 43 - 56 มก./ล. ซึ่งระบบสามารถกำจัดที่เคเอ็นด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จนค่าที่เคเอ็นในโตรเจนในน้ำทิ้งต่ำกว่า 0.1 มก./ล. ถึงอย่างไรก็ตามไนเตรตไนโตรเจนในน้ำทิ้งมีค่าสูงถึง 32 - 43 มก./ล. ซึ่งขัดแย้งกับผลของงานวิจัยนี้ ทั้งนี้เพราะว่าระบบของ Fan และคณะ เป็นเพียงถังเติมออกซิเจนเพียงใบเดียวจึงไม่สามารถกำจัดไนเตรตไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ขณะที่ระบบที่ใช้ในงานวิจัยมีสภาวะแอนนออกซิกซึ่งทำให้เกิดการกำจัดไนเตรตด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ไนเตรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในส่วนเติมออกซิเจนของงานวิจัยนี้ยังมีค่าต่ำเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นในระบบ

ตารางที่ 4-11 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดจากจุดต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่	ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ( มก./ล. )						% การกำจัด
	น้ำเข้า	ส่วนแอนนอกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก		
1	avg.	35.5	7.5	7.8	3.5	2.4	93.4
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	1.12	0.49	1.01	0.59	0.18	0.6
2	avg.	37.4	8.1	7.3	1.8	1.3	96.5
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	1.34	2.04	2.67	0.45	0.30	0.82
3	avg.	34.6	9.6	9.1	3.3	2.3	93.3
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	2.51	3.88	3.54	1.14	0.50	1.30



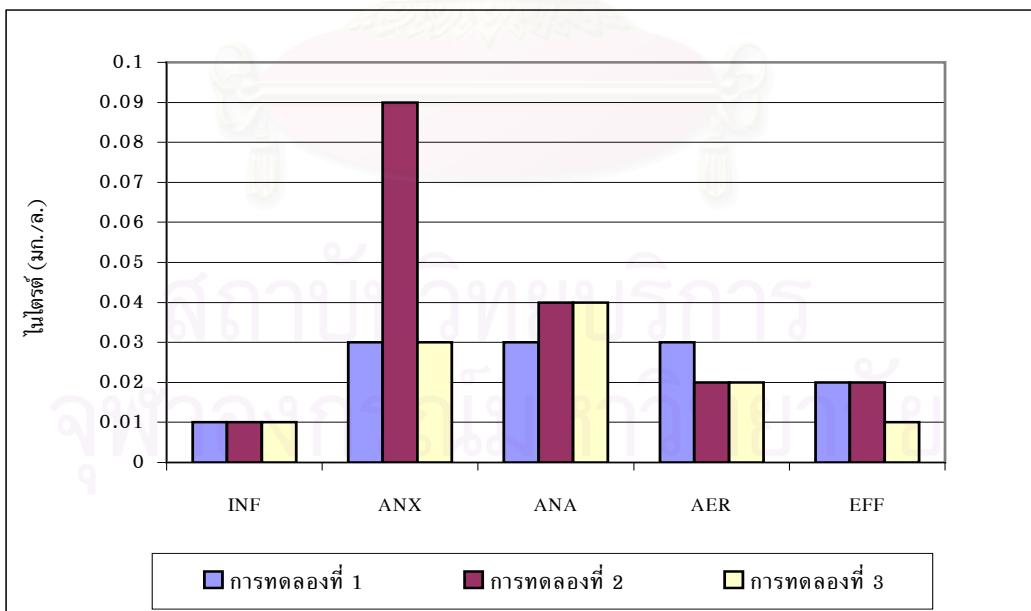
รูปที่ 4-15 ไนโตรเจนทั้งหมดจากจุดต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าสูง สอดคล้องกับการทดลองของ Choo และ Stensel (2000) ที่ใช้ระบบ SBMBR (Sequencing batch membrane biological reactor) บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยในหนึ่งรอบการทำงานของระบบมีช่วงเวลาเติมน้ำเสีย 0.5 ชม. ช่วงเวลาเติมออกซิเจน 2.0 ชม. และช่วงกรองออกกับพักถังรวมกันเท่ากับ 1.5 ชม. พบว่า เกิด

ปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นในระบบ แม้ว่าค่าออกซิเจนในช่วงเติมออกซิเจนจะมีค่า 0.1 – 7.2 มก./ล. ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด 87 – 93% โดยเมื่อค่าออกซิเจนละลายลดลง จะทำให้อัตราของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในระบบจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.9 ต่อไป

ตารางที่ 4-12 ค่าไนไตรต์จากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ค่าไนไตรต์ ( มก./ล. )				
		น้ำเข้า	ส่วนแอนนออกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก
1	avg.	<b>0.01</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.02</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
2	avg.	<b>0.01</b>	<b>0.09</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.01	0.05	0.04	0.02	0.02
3	avg.	<b>0.01</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.01	0.30	0.04	0.02	0.01



รูปที่ 4-16 ไนไตรต์จากจุดต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

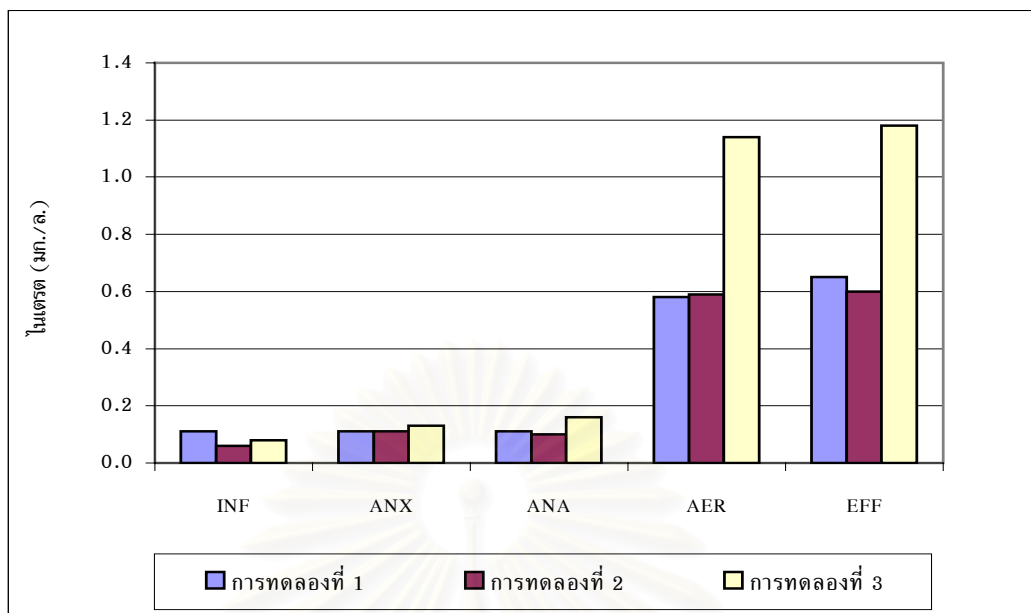
ไนโตรต์ไนโตรเจนในน้ำเข้าระบบมาจากน้ำประปาที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากมิได้เติมสารเคมีใดที่มีไนโตรตเป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์น้ำเสีย ไนโตรต์ไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในส่วนแอนนอซิก กับส่วนไร้ออกซิเจน เนื่องมาจากไนโตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจน ทำให้ค่าไนโตรตในทั้งสองส่วนสูงขึ้น ในส่วนเติมออกซิเจนไนโตรตลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไนเตรเตชัน (เปลี่ยนไนโตรตไปเป็นไนเตรต) และเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไนเตรเตชัน (เปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนโตรต) แต่เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไนเตรเตชันที่สมบูรณ์ เพราะมีออกซิเจนที่มากเกินไป ทำให้ไนโตรตในส่วนเติมออกซิเจนมีค่าลดลง

ในการทดลองที่ 2 ไนโตรตในส่วนแอนนอซิกที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 1 และ 3 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองที่ 2 มีค่าที่เคเอ็นสูงกว่าการทดลองที่ 1 และ 3 (37.3 มก./ล.สำหรับการทดลองที่ 2 และ 35.4 กับ 34.6 สำหรับการทดลองที่ 1 และ 3) และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนนอซิกของการทดลองที่ 2 เท่ากับ 75% ของทั้งหมด ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นในส่วนแอนนอซิกมากจึงมีไนโตรตสูงกว่าการทดลองอื่นๆ อย่างไรก็ตามไนโตรตที่เกิดขึ้นก็เปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรตหรือก๊าซไนโตรเจนสมบูรณ์เมื่อผ่านส่วนไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 4-13 ค่าไนเตรตจากจุดต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่		ค่าไนเตรต ( มก./ล. )				
		น้ำเข้า	ส่วนแอนนอซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก
1	avg.	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.58</b>	<b>0.65</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.04	0.05	0.07	0.13	0.17
2	avg.	<b>0.06</b>	<b>0.11</b>	<b>0.10</b>	<b>0.59</b>	<b>0.60</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.02	0.02	0.02	0.14	0.14
3	avg.	<b>0.08</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>1.14</b>	<b>1.18</b>
	N	7	7	7	7	7
	S.D.	0.04	0.15	0.21	0.32	0.31





รูปที่ 4-17 ไนเตรตจากจุดตัวอย่างต่างๆที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

ไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเข้าระบบมาจากน้ำประปาที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากมิได้เติมสารเคมีใดที่มีไนเตรตเป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์น้ำเสีย ไนเตรตที่ถูกเวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนมีค่าลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในส่วนแอนนออกซิก เนื่องจากไนเตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนมีค่าต่ำ การลดไนเตรตด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจึงเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนแอนนออกซิกเท่านั้น โดยมีอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตที่ถูกกำจัดเท่ากับ 680 640 และ 300 กรัมซีโอดีต่อกรัมไนเตรตที่ถูกกำจัด ในการทดลองที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่ได้ถูกรายงานไว้ใน WEF (1998) สำหรับระบบที่ใช้เมทานอลเป็นสารอาหาร ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 3.2 – 6.0

ในส่วนเติมออกซิเจนไนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน อย่างไรก็ตามค่าที่เกิดขึ้นก็ยังมีค่าต่ำกว่าในระบบเอ็มปีอาร์ทั่วไป (Ueda และ Hata, 1999 ; Yoon และคณะ, 2000) เพราะไนเตรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันส่วนใหญ่ถูกรีดิวซ์ด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันภายในฟล็อกซึ่งเกิดสภาวะแอนนออกซิกขึ้น

ไนเตรตในส่วนเติมออกซิเจน และในน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัวของการทดลองที่ 3 มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ 1 และ 2 ทั้งนี้เนื่องจากผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อการกำจัดไนโตรเจน ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

#### 4.6 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ

ค่าฟอสฟอรัสสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเตรียมจาก โปแทสเซียมไดไฮดรอเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีค่าเฉลี่ยที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 7.9 มก./ล. คิดเป็นอัตราส่วน COD/TP เท่ากับ 41 ซึ่งถือว่าเหมาะแก่การบำบัดด้วยระบบทางชีวภาพ (Grady และคณะ, 1999) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวในการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 90.5% 90.2% และ 83.3% ตามลำดับ

ตารางที่ 4-14 ค่าฟอสฟอรัสจากจุดต่างๆ ที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

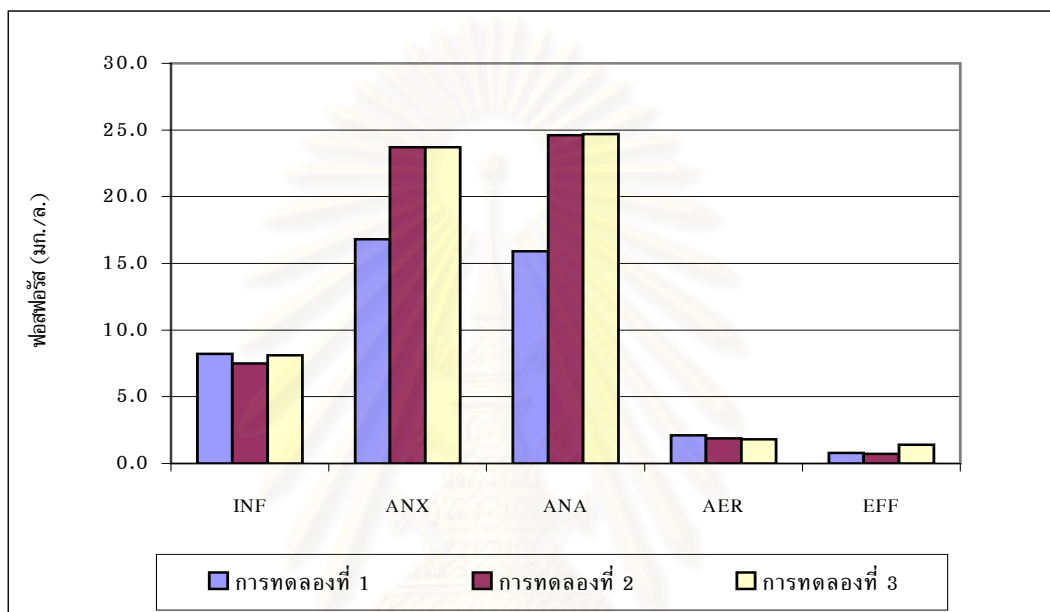
การทดลองที่		ค่าฟอสฟอรัส ( มก./ล. )					% การกำจัด
		น้ำเข้า	ส่วนแอนน็อกซิก	ส่วนไร้ออกซิเจน	ส่วนเติมออกซิเจน	น้ำออก	
1	avg.	8.2	16.8	15.9	2.1	0.8	90.5
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	1.12	8.36	9.38	1.12	0.53	6.87
2	avg.	7.5	23.7	24.6	1.9	0.7	90.2
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	0.98	8.54	9.60	1.76	0.88	12.03
3	avg.	8.1	23.7	24.7	1.8	1.4	83.3
	N	7	7	7	7	7	7
	S.D.	0.84	8.17	9.48	1.85	1.85	19.63

ในการทดลองเริ่มต้นซึ่งควบคุมระบบที่ค่าอายุสลัดจ์ 80 วัน และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิก ต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 25% ต่อ 75 % ตั้งแต่วันที่ 29 กรกฎาคม 2544 ถึงวันที่ 31 มกราคม 2545 รวมระยะเวลา 6 เดือน ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ออกจากระบบระหว่างวันที่ 21 มกราคม 2545 ถึง 31 มกราคม 2545 มีค่าอยู่ระหว่าง 4.0 – 7.5 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 28 % แม้ระบบมีการคายฟอสฟอรัสในส่วนแอนน็อกซิก กับส่วนไร้ออกซิเจนตลอดการทดลอง แต่กลับไม่สามารถจะจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากพอในส่วนเติมออกซิเจน ทำให้มีค่าฟอสฟอรัสที่สูงในน้ำออก แม้จะมีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ (Phosphorus Content) 0.057 กรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมวีเอสเอส (5.7%) ซึ่งมากกว่าปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของระบบทั่วไปก็ตาม (1.0–2.5%)

หลังจากนั้นได้ควบคุมระบบตามการทดลองที่ 1 พบว่า ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสตั้งแต่วันที่ทำการเก็บค่า ค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกส่วนใหญ่ต่ำกว่า 1.0 มก./ล. มีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ 0.076 กรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมวีเอสเอส การทดลองที่ 2 มีปริมาณฟอสฟอรัส

ในเซลล์ 0.084 กรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมวีเอสเอส และการทดลองที่ 3 มีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ 0.107 กรัมฟอสฟอรัสต่อกรัมวีเอสเอส

ตลอดทั้ง 3 การทดลองจุลชีพในระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ ด้วยกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพอย่างชัดเจน กล่าวคือในส่วนแอนนอซิก กับส่วนไร้ออกซิเจน จุลชีพคายฟอสฟอรัสออกมาจากเซลล์ และจับใช้ในส่วนเติมออกซิเจน แสดงว่าในระบบมีจุลชีพในกลุ่มพีเอโออาศัยอยู่



รูปที่ 4-18 ฟอสฟอรัสจากจุดต่างๆที่สถานะคงตัวของทุกการทดลอง

ค่าฟอสฟอรัสละลายที่เพิ่มขึ้นจากน้ำเข้าในส่วนแอนนอซิกและส่วนไร้ออกซิเจน เนื่องจากการคายฟอสฟอรัสของจุลชีพกลุ่มพีเอโอในระบบ ซึ่งฟอสฟอรัสละลายที่ถูกคายออกมาภายนอกเซลล์เกิดจากการย่อยสลายโพลีฟอสเฟตภายในเซลล์ของพีเอโอ พลังงานที่ได้จากการย่อยสลายโพลีฟอสเฟตนี้ใช้ในการดึงแหล่งคาร์บอนภายนอกเซลล์ ซึ่งได้แก่อะซิเตตและน้ำตาลทรายในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมเข้าสู่ระบบ โดยจะเก็บเข้าไปสะสมไว้ในเซลล์ในรูปของพีเอชเอ

ส่วนค่าฟอสฟอรัสละลายที่ลดลงในส่วนเติมออกซิเจนนั้น เกิดจากการจับใช้ฟอสฟอรัสละลายที่ออกมาจากส่วนไร้ออกซิเจนเข้าไปเก็บสะสมไว้ในเซลล์ของพีเอโอ พลังงานที่ใช้ในการดึงฟอสฟอรัสละลายนี้เกิดจากการย่อยสลายพีเอชเอที่ถูกสะสมไว้ขณะที่อยู่ในส่วนไร้ออกซิเจน

ในการทดลองที่ 1 ในส่วนแอนนอซิกกับส่วนไร้ออกซิเจนมีการคายฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 เนื่องจากสัดส่วนของพีเอโอในระบบมีน้อยกว่า หากเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์แล้วพบว่า การทดลองที่ 1 มีค่าต่ำที่สุด โดยในการทดลองที่ 1 มีค่า 7.6% ขณะที่การทดลองที่ 2 และ 3 มีค่า 8.4% และ 10.7% ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับการควบคุมระบบ

ด้วยอายุสลัดจ์ 40 วัน ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของระบบที่ทำให้ระบบยังสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างเพิ่มพูนมีค่าน้อยเท่ากับ 7.6%

ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่า 80% ซึ่งขัดแย้งกับการทดลองที่ผ่านมาของ อภิรดี ดวงใจ (2543) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20 25 30 32.5 และ 35 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการเอสบีอาร์แบบไร้ออกซิเจน/เติมออกซิเจน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เท่ากับ 58% และ 40% ตามลำดับ และมีความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสเท่ากับ 1,658 และ 1,210 มก./ล. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบให้มีค่าที่สูงทำให้มีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในระบบปริมาณมาก จึงสามารถลดผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดลงได้

อย่างไรก็ตามนอกจากพีเอโอที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว เชื่อว่ายังเกิดจุลินทรีย์กลุ่มจีเอโอขึ้นในระบบด้วย เนื่องจากการเดินระบบที่ส่งเสริมให้จีเอโอสามารถดำรงอยู่ในระบบได้ (Mino และคณะ, 1998) ได้แก่

- ก.) มีการเติมน้ำตาล ซึ่งเป็นแหล่งกลูโคสให้จีเอโอ
- ข.) มีเวลากัก และอายุสลัดจ์สูง
- ค.) มีเวลาเติมออกซิเจนที่มากเกินไป

ตารางที่ 4-15 อัตราส่วนซีโอดีที่ใช้ต่อฟอสฟอรัสที่กำจัดที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

การทดลองที่	ซีโอดีที่ใช้ (มก.COD/ล.)	ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด (มกP./ล.)	อัตราส่วน COD /TP (มก.COD/มก.P)
1	319	7.4	43.1
2	314	6.8	46.6
3	317	6.7	47.3

จากตารางที่ 4-15 พบว่าอัตราส่วนซีโอดีที่ใช้ต่อฟอสฟอรัสที่กำจัดได้ของระบบมีค่าระหว่าง 43.1 - 47.3 แม้จะต่ำกว่าช่วง 50 - 59 ซึ่ง Ekama และ Marais (1984) สรุปไว้สำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชน แต่เนื่องจากระบบเติมน้ำเสียที่ย่อยได้ง่ายกว่าน้ำเสียชุมชน ซึ่ง Abu-ghararah และ Randall (1991 อ้างโดย Randall และคณะ, 1992) ได้เปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนหลายชนิดที่ป้อนแก่ระบบอีบีอาร์ พบว่าเมื่อเติมอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอน จะทำให้อัตราส่วนซีโอดีที่ใช้ต่อฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 16.8

นั่นหมายความว่าในการกำจัดฟอสฟอรัสปริมาณเท่ากัน ระบบที่ใช้ในการทดลองต้องใช้แหล่งคาร์บอน (ซีโอดี) ปริมาณที่มากกว่าระบบที่เติมอะซิเตตอย่างเดียวยถึง 2.6 เท่า ทั้งที่ระบบก็มีทั้งอะซิเตต และน้ำตาลทราย ซึ่งถูกจับใช้ได้ง่าย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าคาร์บอนที่ใช้ไปโดยระบบไม่ได้ถูกใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยพีเอโอเพียงอย่างเดียวและจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นใน

ระบบน่าจะเป็นจีเอโอ ซึ่งบนพื้นฐานความเชื่อที่ว่าจีเอโอ กับพีเอโอเป็นจุลชีพคนละชนิดกัน จุลชีพทั้งสองกลุ่มจึงแย่งชิงแหล่งคาร์บอน เนื่องจากเมตาบอลิซึมของจีเอโอที่แตกต่างจากพีเอโอ คือ มีการสะสมแหล่งคาร์บอนในรูปพีเอสเอ และใช้กลัยโคเจนในสภาวะไร้ออกซิเจน มีการสะสม กลัยโคเจน และใช้พีเอสเอในสภาวะเติมออกซิเจน แต่ไม่มีการคายและจับใช้ฟอสฟอรัส (Mino และคณะ, 1998) จึงทำให้จีเอโอไม่ช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัส แต่แข่งขันในการแย่งชิงแหล่งคาร์บอนกับพีเอโอ

#### 4.7 ผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัด

การเปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิก ต่อส่วนไร้ออกซิเจน ที่มีต่อการบำบัดนั้น ได้เปรียบเทียบการทดลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราการแบ่งน้ำเสีย 25 % ต่อ 75 % กับการทดลองที่ 2 ซึ่งมีอัตราการแบ่งน้ำเสีย 75 % ต่อ 25 % โดยได้ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วัน เท่ากันทั้ง 2 การทดลอง

การดำเนินการของระบบซึ่งมีวิธีการลดการอุดตันของแผ่นเยื่อด้วยการไม่กรองอย่างต่อเนื่อง โดยให้มีการเติมน้ำเสีย 10 นาทีและหยุดเติมน้ำเสีย 10 นาทีทำให้ระบบมีการดำเนินการในรูปแบบเติมน้ำเสียเป็นพัก ๆ (Intermittently-fed)

ดังนั้นขณะที่ระบบหยุดพักการเติมน้ำเสีย 10 นาทีนี้ ไบโควนในส่วนแอนน็อกซิก และส่วนไร้ออกซิเจนยังคงทำงานอยู่ จึงเกิดการกวนผสมเข้ากันระหว่างส่วนแอนน็อกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจนทำให้ค่าเอ็มแอลเอสเอสของทั้ง 2 ส่วน มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

จากการทดสอบความแตกต่างของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในส่วนแอนน็อกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจนทางสถิติด้วยการทดสอบชนิดที่แบบ 2 ด้าน (two-tailed t-test) ตามตารางที่ 4-16 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างส่วนแอนน็อกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน

ดังนั้นอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจน จึงไม่มีนัยสำคัญต่อกลไกการกำจัดโดยรวมของระบบ เพราะการเดินระบบในลักษณะแบบเติมน้ำเสียเป็นพัก ๆ ทำให้เกิดการกวนผสมระหว่างส่วนแอนน็อกซิก และส่วนไร้ออกซิเจน ในช่วงที่ไม่มีการการเติมน้ำเสีย

นอกจากนี้ปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่เกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจน ทำให้ค่าไนเตรตที่เวียนมาพร้อมกับสลัดจ์จากส่วนเติมออกซิเจนมีค่าต่ำ ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จึงไม่มีนัยสำคัญต่อการกำจัดไนเตรต จึงทำให้อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ดังจะได้อธิบายต่อไป

ตารางที่ 4-16 การทดสอบทางสถิติเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบระหว่าง  
ส่วนแอนนอซิกกับส่วนไร้ออกซิเจนด้วย T-Test

พารามิเตอร์	df	$\alpha$	Critical Value	t value	C
COD					
การทดลองที่ 1	29	0.05	2.045	0.504	S
การทดลองที่ 2	28	0.05	2.052	0.604	S
Phosphorus					
การทดลองที่ 1	27	0.05	2.052	-0.118	S
การทดลองที่ 2	27	0.05	2.052	0.055	S
TKN					
การทดลองที่ 1	28	0.05	2.048	-0.544	S
การทดลองที่ 2	26	0.05	2.056	0.121	S
Total-N					
การทดลองที่ 1	28	0.05	2.048	-0.570	S
การทดลองที่ 2	26	0.05	2.056	0.140	S
NO3-N					
การทดลองที่ 1	30	0.05	2.042	-0.150	S
การทดลองที่ 2	28	0.05	2.048	-0.826	S
NO2-N					
การทดลองที่ 1	25	0.05	2.060	-0.601	S
การทดลองที่ 2	24	0.05	2.064	1.654	S

df - องศาความเป็นอิสระ

$\alpha$  - ระดับนัยสำคัญ

Critical value - ค่าที่เปิดเผยได้จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบที่

T value - ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม Microsoft Excel

S - ประสิทธิภาพเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ

D - ประสิทธิภาพไม่เท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-17 การทดสอบทางสถิติเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกำจัดเปรียบเทียบระหว่าง อัตราการแบ่งน้ำเสีย 25% : 75% และ 75% : 25% ด้วย T-Test

พารามิเตอร์	df	$\alpha$	Critical Value	t value	C
COD	27	0.05	2.052	-2.052	S
Phosphorus	25	0.05	2.060	0.110	S
TKN	26	0.05	2.056	-4.615	D
Total-N	26	0.05	2.056	-4.540	D
NO <sub>3</sub> -N	29	0.05	2.045	-1.283	S
NO <sub>2</sub> -N	29	0.05	2.045	-0.753	S

#### 4.7.1 ผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดซีโอดี

จากตารางที่ 4-17 พบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะว่าซีโอดีที่เติมให้แก่ระบบเป็นซีโอดีที่ย่อยสลายได้ง่าย จุลชีพในระบบจึงสามารถนำไปใช้ในกลไกต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องไฮดรอลิซิสก่อน

นอกจากนี้การควบคุมค่าอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วันทั้งการทดลองที่ 1 และ 2 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้ง 2 การทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญด้วย ซึ่งอธิบายได้ด้วยจากสมการที่ 4-1 และสมการที่ 4-2

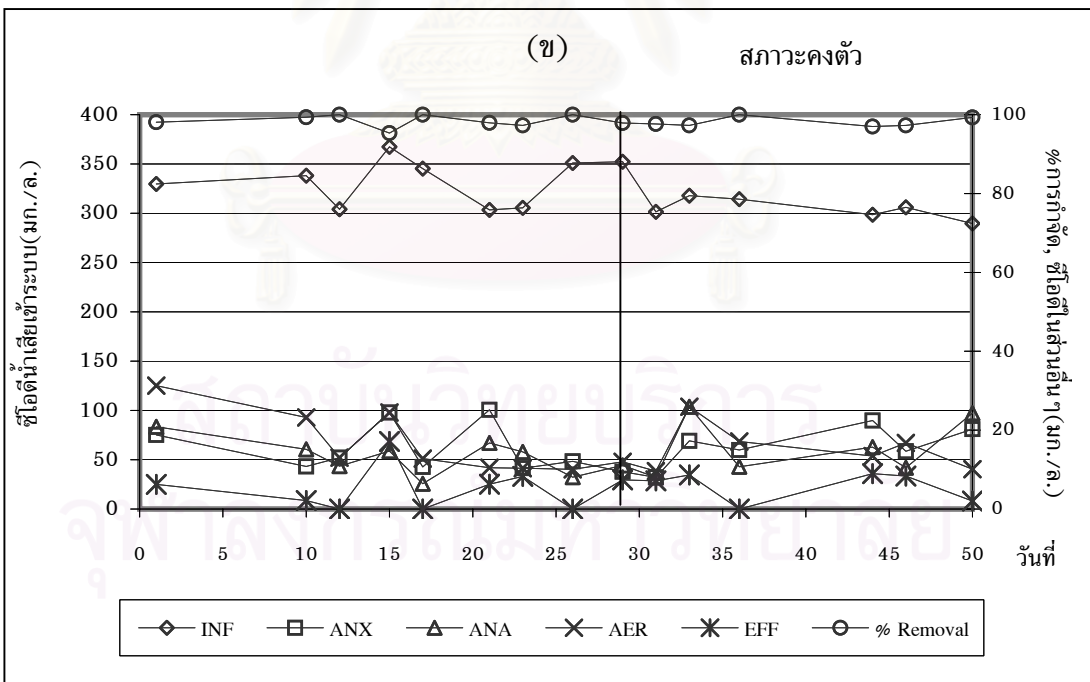
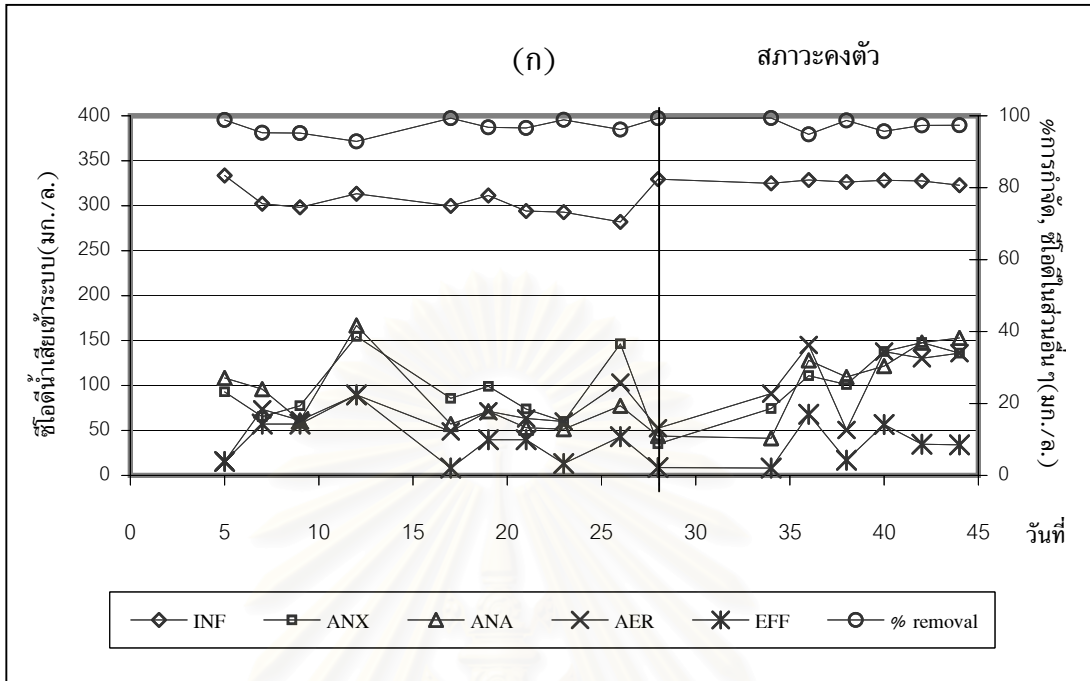
$$X = \frac{\theta_c Y (S_0 - S)}{\tau (1 + k_d \theta_c)} \quad (4-1)$$

$$\eta = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \quad (4-2)$$

เมื่อ	X	คือ ความเข้มข้นของจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจน (มก./ล.)
	$\theta_c$	คือ อายุสลัดจ์ (วัน)
	Y	คือ ค่ายิลด์ของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟในระบบ
	$S_0$	คือ ค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ (มก./ล.)
	S	คือ ค่าซีโอดีในน้ำจากส่วนเติมออกซิเจน (มก./ล.)
	$\tau$	คือ เวลาเก็บกักของระบบ (วัน)
	$k_d$	คือ อัตราการสลายตัวของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟในระบบ
	$\eta$	คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)

จากสมการที่ (4-2) จะได้ว่า

$$\eta \cdot S_0 = (S_0 - S) \quad (4-3)$$



รูปที่ 4-19 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อซีโอดี  
 อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ANX : ANA (ก) 25% : 75% (ข) 75% : 25%



และแทนค่าจากสมการที่ (4-3) ในสมการที่ (4-1) จะได้ว่า

$$X = \frac{\theta_c Y \eta S_0}{\tau (1 + k_d \theta_c)} \quad (4-4)$$

ดังนั้น

$$\eta = \frac{X \tau (1 + k_d \theta_c)}{\theta_c Y S_0} \quad (4-5)$$

$$\eta = \frac{X \tau (1/\theta_c + k_d)}{Y S_0} \quad (4-6)$$

จากสมการที่ 4-6 เนื่องจากค่ายิลด์ ( $Y$ ) ค่าอัตราการสลายตัว ( $k_d$ ) และเวลากัก ( $\tau$ ) ของระบบมีค่าคงที่ทั้ง 2 การทดลอง และค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ของทั้งสองการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน (การทดลองที่ 1 เท่ากับ 327 มก./ล. และการทดลองที่ 2 เท่ากับ 320 มก./ล.) ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ( $\eta$ ) จึงแปรผกผันกับอายุสลัดจ์ ( $\theta_c$ ) และแปรผันกับความเข้มข้นของจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจน ( $X$ )

เมื่อกำหนดให้  $\tau / Y S_0$  เท่ากับค่าคงที่  $a$  ส่วน  $k_d$  เท่ากับค่าคงที่  $b$  สมการที่ 4-6 จึงจัดรูปสมการใหม่ได้ตามสมการที่ 4-7

$$\eta = \frac{aX + bX}{\theta_c} \quad (4-7)$$

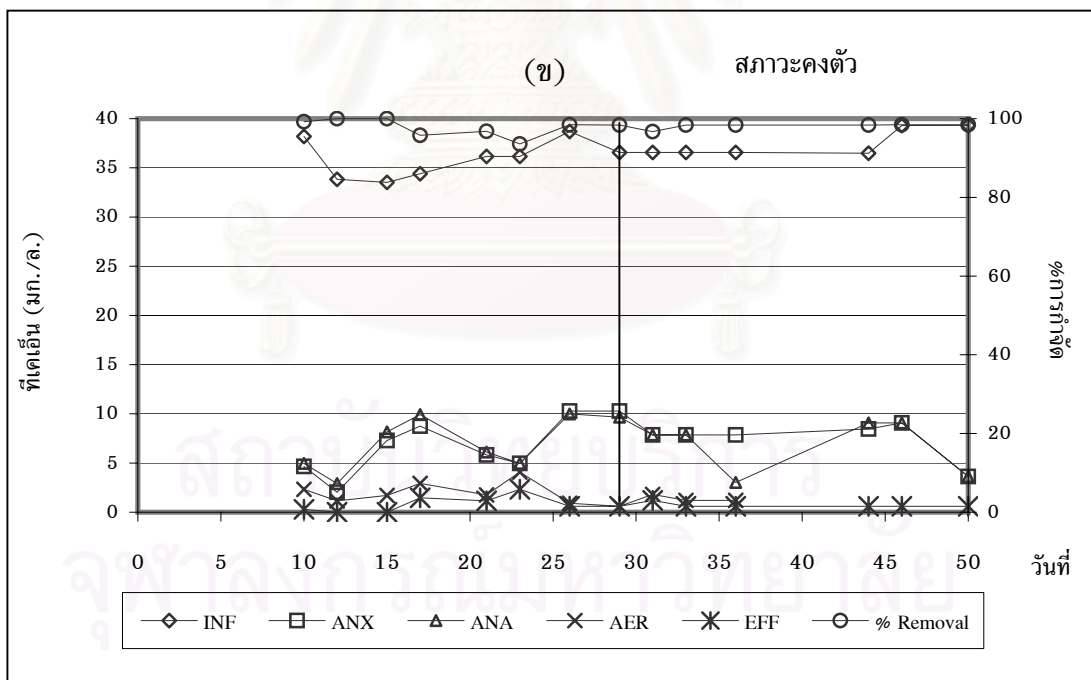
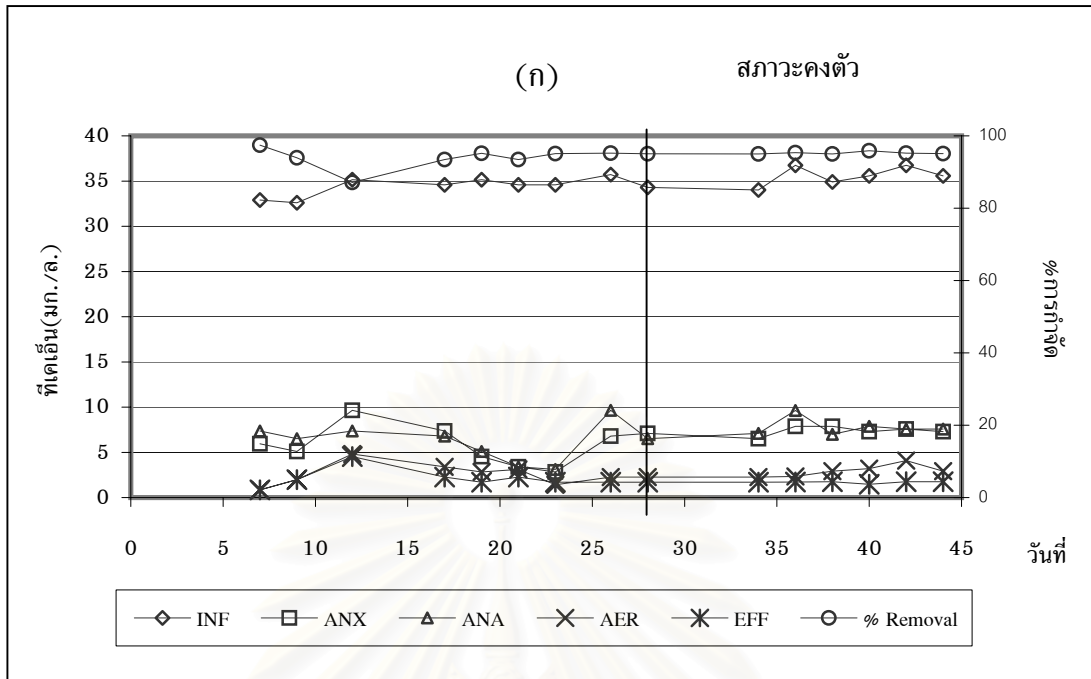
ซึ่งในการทดลองที่ 1 และ 2 ได้ควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ 40 วันเท่ากัน ทำให้ความเข้มข้นของจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจนมีค่าๆเท่ากัน ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $\theta_c$  และ  $X$  ที่เท่ากันทั้ง 2 การทดลองในสมการที่ 4-7 จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้งสองการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์จึงพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจึงมีผลเนื่องมาจากการควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 40 วัน มากกว่าอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าระบบ

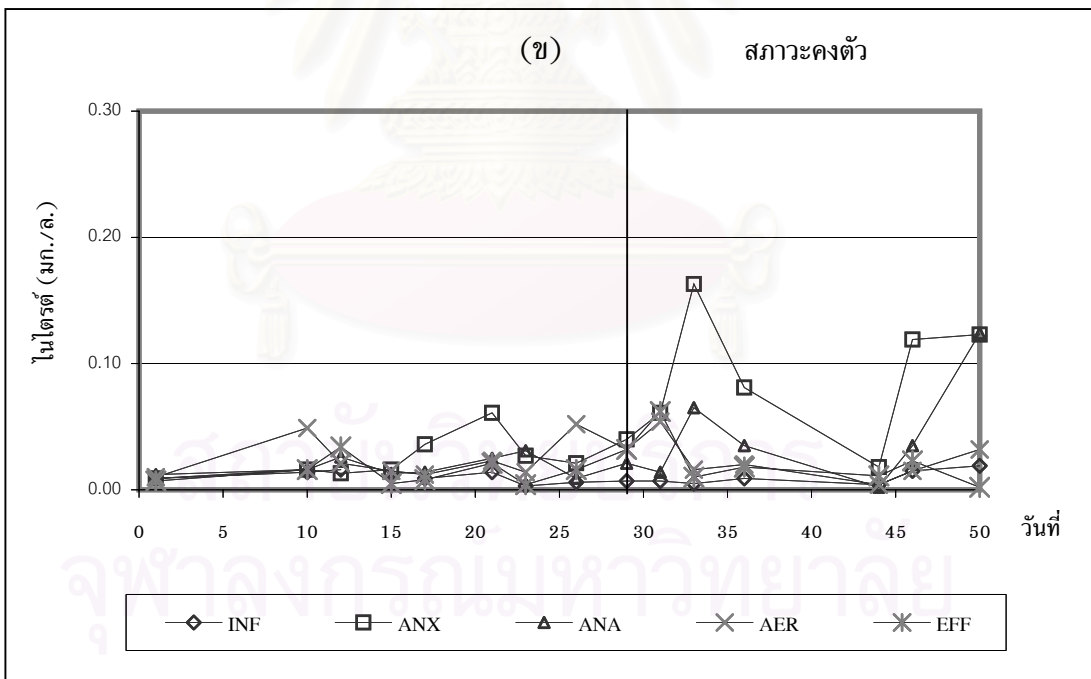
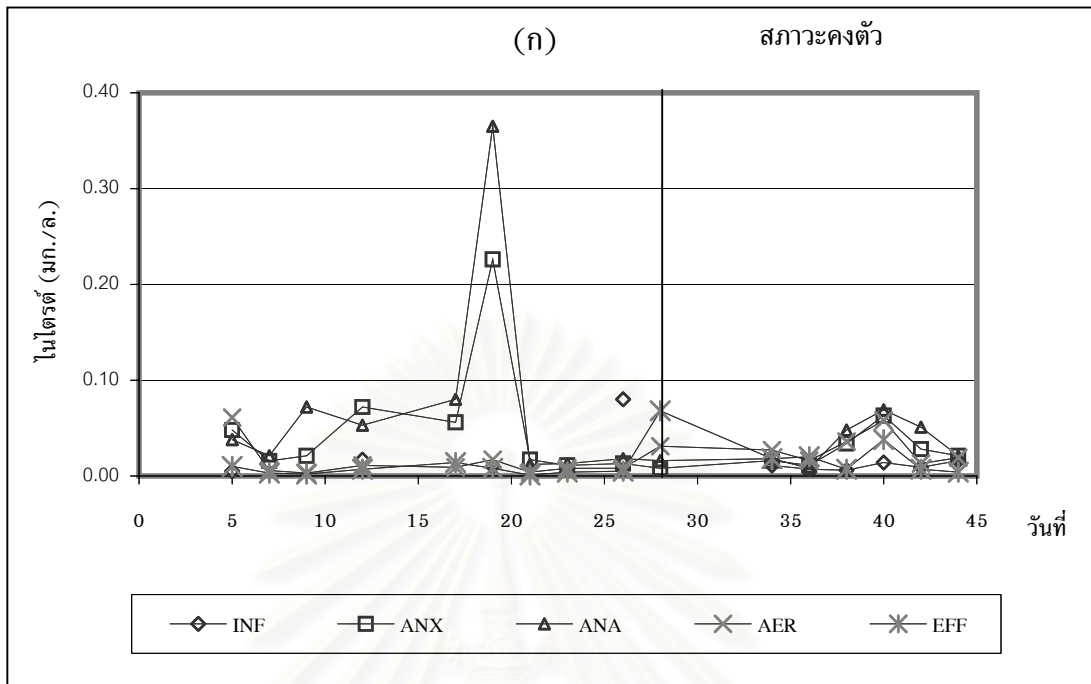
#### 4.7.2 ผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดไนโตรเจน

จากการทดลองพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นและไนโตรเจนทั้งหมดเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อค่าไนเตรต และไนไตรต์ในน้ำทิ้ง

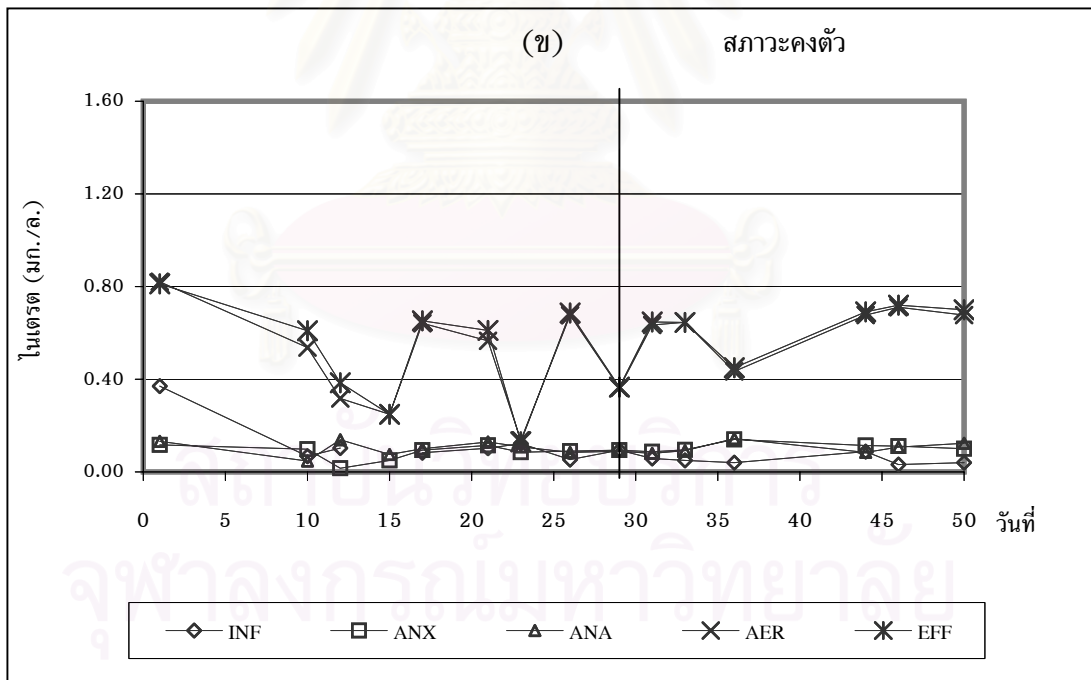
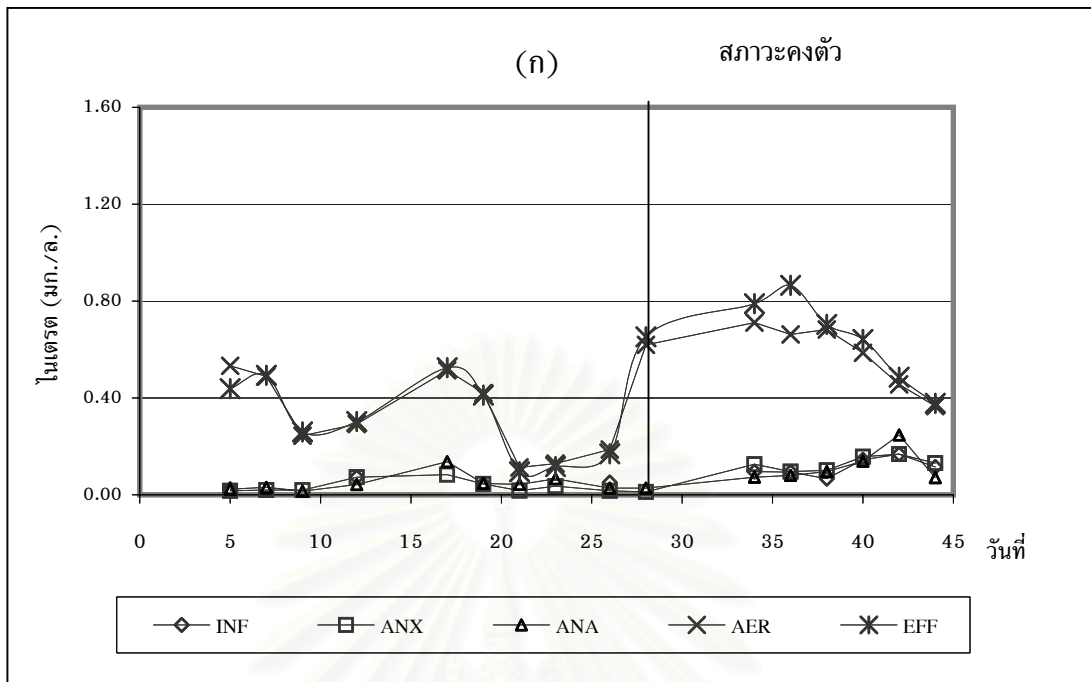
จากตารางที่ 4-6 ค่าที่เคเอ็นที่ออกจากส่วนไร้ออกซิเจนของทั้ง 2 การทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน คือเท่ากับ 7.6 มก./ล. ในการทดลองที่ 1 และเท่ากับ 7.2 มก./ล. ในการทดลองที่ 2 แต่เมื่อผ่านส่วนเติมออกซิเจนแล้ว ในการทดลองที่ 2 สามารถลดค่าที่เคเอ็นได้มากกว่าในการทดลองที่ 1 ทั้งนี้อาจเนื่องซีโอดีที่เหลือในส่วนเติมออกซิเจนของการทดลองที่ 1 มีค่ามากกว่าของการทดลองที่ 2 ซึ่งซีโอดีที่เหลืออยู่ในส่วนเติมออกซิเจนนี้ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยา



รูปที่ 4-20 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อที่เคเอ็น  
อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ANX : ANA (ก) 25% : 75% (ข) 75% : 25%



รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อไนไตรต์  
อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ANX : ANA (ก) 25% : 75% (ข) 75% : 25%



รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อไนเตรด  
อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ANX : ANA (ก) 25% : 75% (ข) 75% : 25%

ไนตริฟิเคชัน อย่างไรก็ตามค่าที่เคเอ็นที่ผ่านส่วนเติมออกซิเจนของทั้ง 2 การทดลองก็มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในการทดลองที่ 1 มีค่า 2.9 มก./ล. และในการทดลองที่ 2 มีค่า 1.2 มก./ล.

ดังนั้นผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียเองจึงไม่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจนในส่วนแอนนออกซิก และส่วนไร้ออกซิเจน

จากแนวคิดของระบบที่ต้องการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนนออกซิก เพื่อให้เกิดการกำจัด ไนเตรต ด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบใช้แหล่งคาร์บอนภายนอก (Exogenous Denitrification) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่แบ่งเข้าส่วนแอนนออกซิก ยิ่งปริมาณคาร์บอนมากก็จะกำจัดไนเตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนได้มาก แต่เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่เกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจน ทำให้ไนเตรตที่เวียนมามีค่าต่ำมากจนทำให้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตที่ถูกกำจัดมีค่า 680 และ 640 ในการทดลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 3.2 -6.0 ซึ่งรายงานโดย WEF (1998) อยู่มาก ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่เกิดจากความแตกต่างของอัตราการแบ่งน้ำเสียจึงไม่มีผลต่อการกำจัดไนเตรตของระบบ

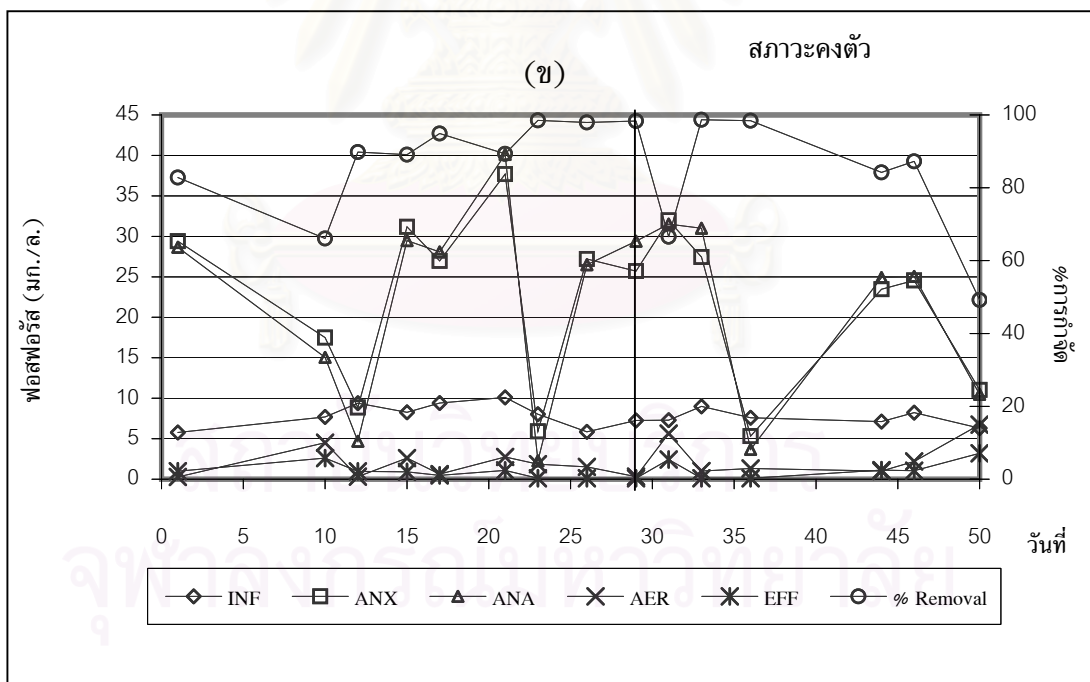
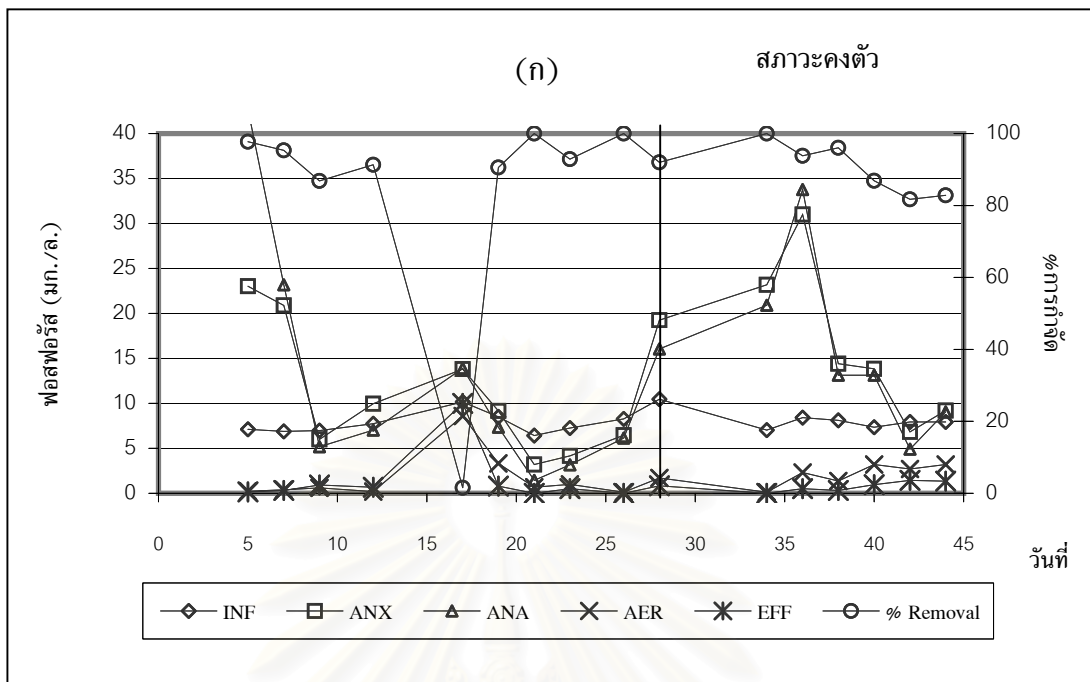
#### 4.7.3 ผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียต่อการกำจัดฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4-17 พบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากแนวคิดของระบบที่ต้องการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนไร้ออกซิเจนนั้น เพื่อให้เกิดการคายฟอสฟอรัสขึ้น และแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนนออกซิก เพื่อลดไนเตรตด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งเป็นการลดผลกระทบของไนเตรตที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส (Henze และคณะ, 1996)

แต่เนื่องจากไนเตรตที่ลดลงอย่างมากด้วยปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในส่วนเติมออกซิเจน ทำให้ไนเตรตที่เวียนมาในส่วนแอนนออกซิกจึงไม่รบกวนกลไกการกำจัดฟอสฟอรัส และการเดินระบบแบบเติมน้ำเสียเป็นพัก ๆ ทำให้เกิดการกวนผสมระหว่างส่วนแอนนออกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน

ดังนั้นอัตราการแบ่งน้ำเสียจึงไม่ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากไม่มีไนเตรตมารบกวนกลไกการกำจัด แม้ว่าอัตราการคายฟอสฟอรัสในการทดลองที่ 1 จะมีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ 2 ซึ่งเกิดขึ้นจากสัดส่วนของพีเอโอในระบบของการทดลองที่ 1 มีต่ำกว่าในการทดลองที่ 2

อย่างไรก็ตามแม้ผลที่ได้จากการทดลองจะพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ก แต่เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้ในงานวิจัยกับระบบของ Ueda และ Hata (1999) และ Yoon และคณะ (2000) ซึ่งมีรูปแบบของกระบวนการใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ในงานวิจัย ต่างกันเพียงการทดลองทั้งสองมีการเติมน้ำเสียที่ถังแรกเพียงจุดเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบที่ใช้ในงานวิจัยสูงกว่าระบบทั้งสอง ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากลักษณะการเติมน้ำเสียที่ต่างกันนี้ก็เป็นได้ นอกจากนี้เวลากักของส่วนต่าง ๆ ใน



รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบผลของอัตราการแบ่งน้ำเสียที่มีต่อฟอสฟอรัส  
 อัตราการแบ่งน้ำเสียเข้า ANX : ANA (ก) 25% : 75% (ข) 75% : 25%

ระบบมีมากเกินไป จึงไม่เห็นความแตกต่างในการกำจัดอินทรีย์มาจากอัตราการแบ่งน้ำเสียอย่างชัดเจน

#### 4.8 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัด

การเปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อการบำบัดนั้น ได้เปรียบเทียบการทดลองที่ 2 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ 40 วัน กับการทดลองที่ 3 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ 80 วัน โดยมีอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากันทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งเท่ากับ 75% ต่อ 25%

ตารางที่ 4-18 การทดสอบทางสถิติเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกำจัดเปรียบเทียบระหว่างอายุสลัดจ์ 40 และ 80 วันด้วย T-Test

พารามิเตอร์	df	$\alpha$	Critical Value	t value	C
COD	23	0.05	2.069	0.841	S
Phosphorus	19	0.05	2.093	1.279	S
TKN	27	0.05	2.052	3.048	D
Total-N	27	0.05	2.052	5.545	D
NO <sub>3</sub> -N	24	0.05	2.064	-6.108	D
NO <sub>2</sub> -N	28	0.05	2.048	0.778	S

##### 4.8.1 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดซีโอดี

จากตารางที่ 4-18 พบว่า อายุสลัดจ์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะว่าซีโอดีที่เติมให้แก่ระบบเป็นซีโอดีที่ย่อยสลายได้ง่าย จุลชีพในระบบจึงสามารถนำไปใช้ในกลไกต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว แม้ว่าอายุสลัดจ์ของการทดลองที่ 3 ซึ่งมากกว่า จะทำให้ปริมาณของเชื้อจุลชีพในระบบมีมากกว่า แต่ก็ไม่มีผลต่อการกำจัดนัก

จากสมการที่ 4-2 และ 4-6

$$\eta = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \quad (4-2)$$

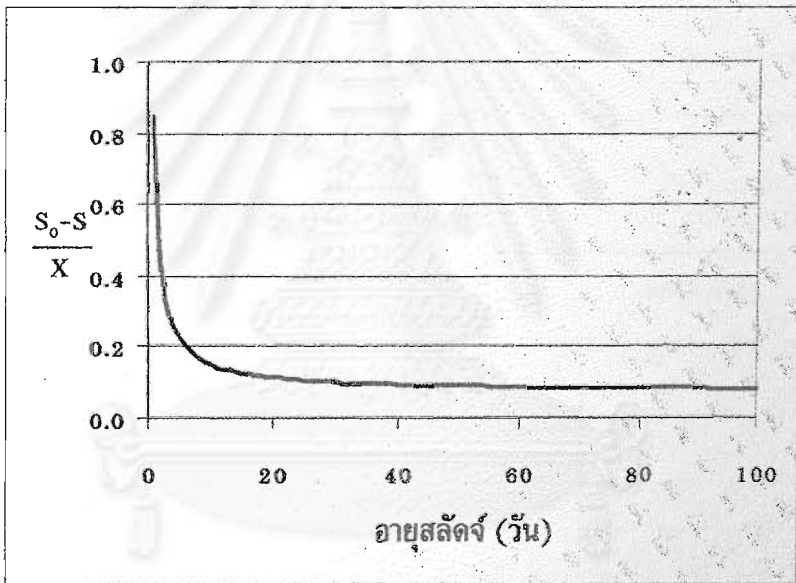
$$\eta = \frac{X \tau (1/\theta_c + k_d)}{Y S_0} \quad (4-6)$$

เมื่อแทนค่า  $\eta$  จากสมการที่ 4-2 ในสมการที่ 4-6 จะได้

$$\frac{(S_0 - S)}{S_0 X} = \frac{\tau (1/\theta_c + k_d)}{Y S_0} \quad (4-8)$$

$$\frac{(S_0 - S)}{X} = \frac{\tau (1/\theta_c + k_d)}{Y} \quad (4-9)$$

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ของอัตราการจับใช้สารอาหารจำเพาะ [Specific substrate utilization rate, SSUR ในเทอร์ม  $(S_0 - S)/X$ ] กับค่าอายุสลัดจ์ โดยแทนค่า  $\tau$ ,  $k_d$ ,  $Y$  และ  $S_0$  ที่ได้จากการทดลอง จะได้กราฟตามรูปที่ 4-24



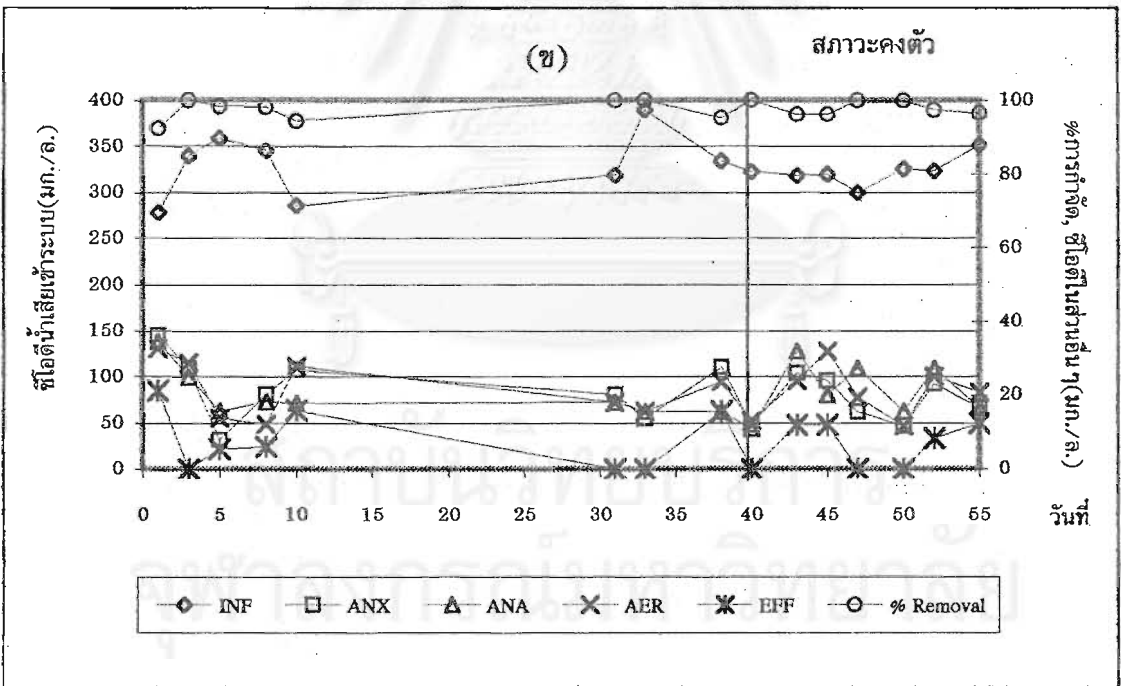
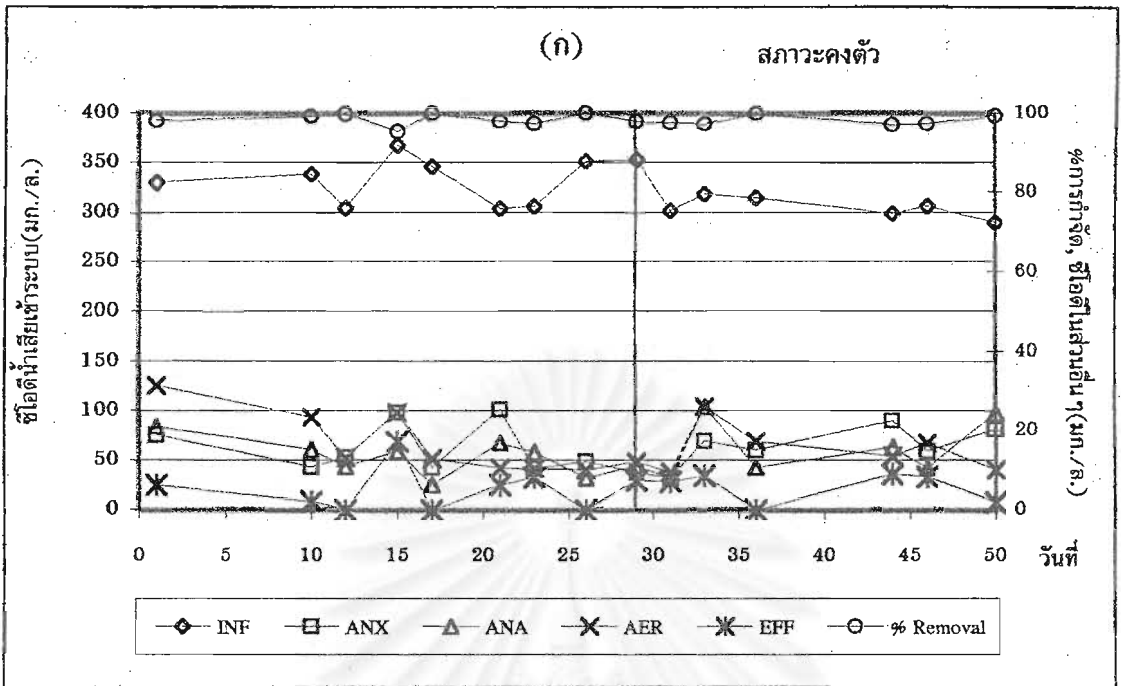
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ของอัตราการจับใช้สารอาหารจำเพาะกับอายุสลัดจ์

จากรูปที่ 4-24 พบว่าอัตราการจับใช้สารอาหารจำเพาะมีค่าคงที่ประมาณ 0.10 เมื่อเริ่มควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 10 วัน และอัตราดังกล่าวมีค่า 0.092 และ 0.082 ที่อายุสลัดจ์ 40 และ 80 วันตามลำดับ แล้วเมื่อคูณกลับด้วยค่าความเข้มข้นจุลชีพที่ได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ 4,084 และ 4,582 มก./ล. ที่อายุสลัดจ์ 40 และ 80 วันตามลำดับ จะได้อัตราการจับใช้สารอาหารของทั้ง 2 การทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.8.2 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดไนโตรเจน

จากตารางที่ 4-18 พบว่า อายุสลัดจ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นไนโตรเจนทั้งหมดและไนเตรตในน้ำทิ้งอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ให้สูง

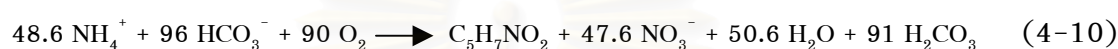




รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อซีไอดี  
 (ก) อายุสลัดจ์ 40 วัน (ข) อายุสลัดจ์ 80 วัน

ขึ้นเป็น 80 วันโดยการทิ้งเซลล์ที่น้อยลงในการทดลองที่ 3 ทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้สังเคราะห์เซลล์ใหม่มีค่าลดลง จากภาคผนวก ง พบว่าปริมาณไนโตรเจนที่นำไปสังเคราะห์เซลล์ใหม่มีค่า 702 มก./วัน ในการทดลองที่ 2 และ 436 มก./วัน ในการทดลองที่ 3 เป็นผลให้ค่าที่เคเอ็น และไนโตรเจนทั้งหมดที่ออกจากส่วนไร้ออกซิเจน (TKNana , TNana) เข้าสู่ส่วนเติมออกซิเจนของการทดลองที่ 2 ต่ำกว่าการทดลองที่ 3

จากสมการสตอยชิโอเมตริกของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจนของ Halling-Sorensen และ Jorgensen (1993 อ้างโดย Seviour และ Blackall, 1999) ตามสมการที่ 4-10



แสดงว่าแอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_4^+$ ) ที่เข้ามาในส่วนเติมออกซิเจน จะถูกแปรเปลี่ยนเป็น 2 รูปได้แก่ 1.) ถูกใช้เพื่อสังเคราะห์เซลล์ของไนตริไฟเออร์แบคทีเรีย ( $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ ) และ 2.) ถูกเปลี่ยนรูปด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันไปเป็นไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ )

และเนื่องจากระบบมีการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน ดังนั้นไนโตรเจนที่ถูกใช้เพื่อสังเคราะห์เซลล์ใหม่จะเท่ากับปริมาณไนโตรเจนที่ทิ้งไปกับสลัดจ์ส่วนเกิน

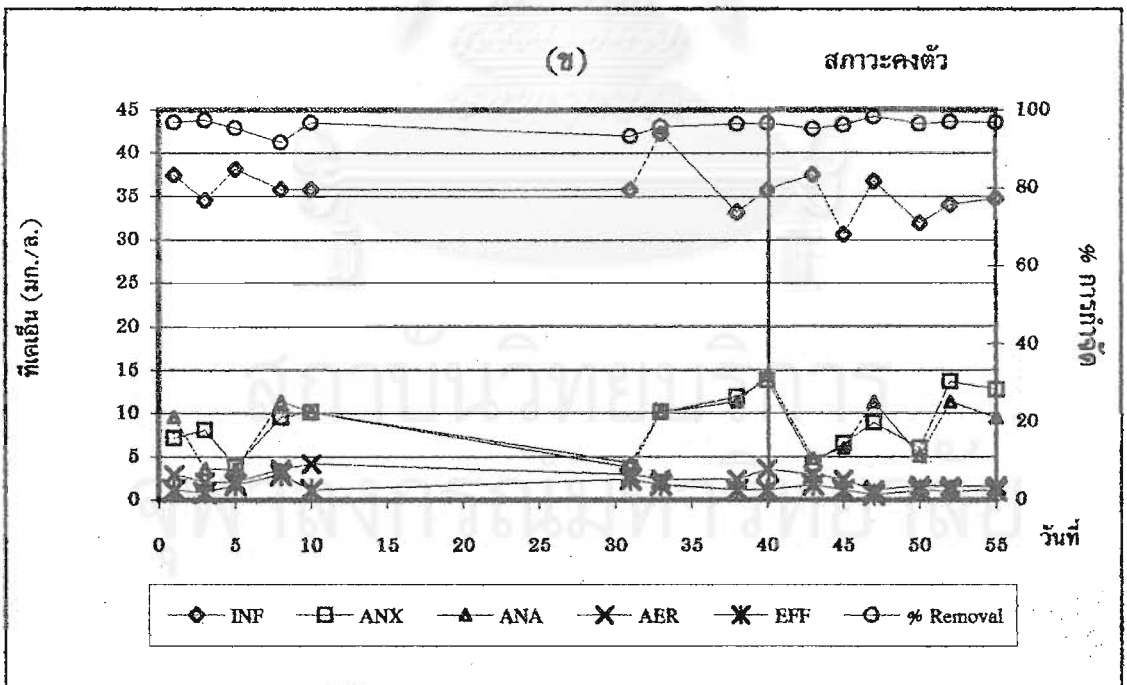
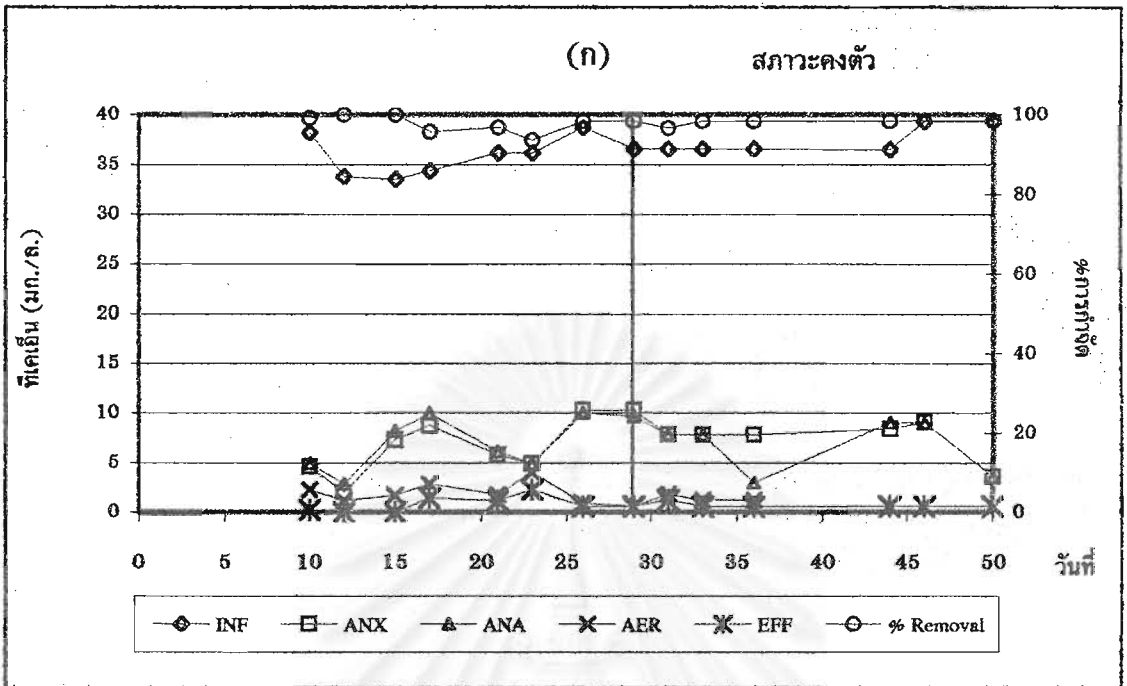
ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่จุลชีพใช้สังเคราะห์เซลล์ในส่วนเติมออกซิเจนของการทดลองที่ 2 เท่ากับ 429 มก.ไนโตรเจน/วัน ( $1.250 \text{ ลิตร/วัน} \times 0.112 \text{ มก.ไนโตรเจน/มก.วีเอสเอส} \times 3,066 \text{ มก.วีเอสเอส/ลิตร}$ ) และเท่ากับ 260 มก.ไนโตรเจน/วัน ( $0.625 \text{ ลิตร/วัน} \times 0.115 \text{ มก.ไนโตรเจน/มก.วีเอสเอส} \times 3,611 \text{ มก.วีเอสเอส/ลิตร}$ ) สำหรับการทดลองที่ 3

ดังนั้นปริมาณไนเตรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-10 โดยแอมโมเนียที่เหลือจากการสังเคราะห์เซลล์แล้วจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรตทั้งหมด

ตารางที่ 4-19 การคำนวณตามสมการสตอยชิโอเมตริก

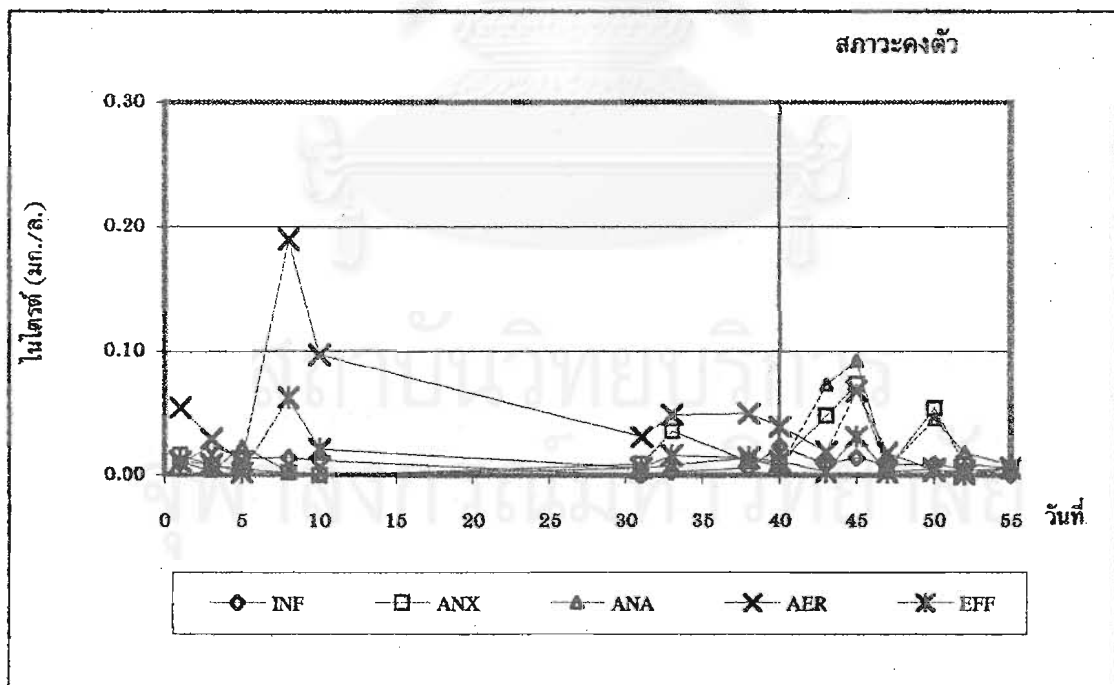
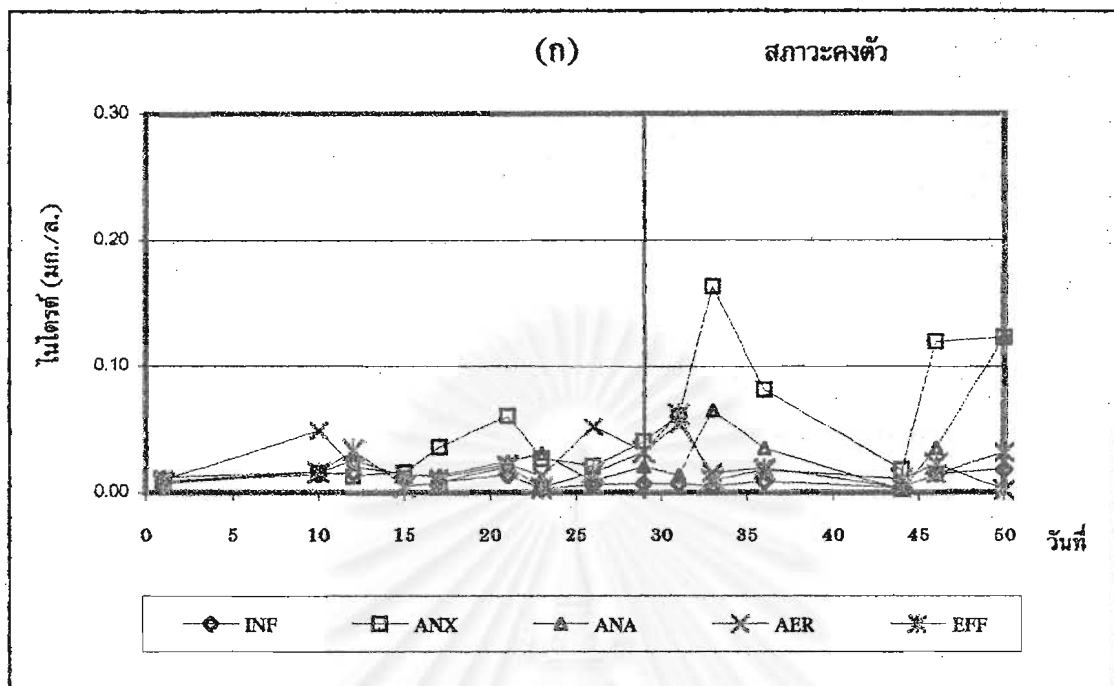
การทดลองที่	total $\text{NH}_4^+$ for Oxidized (มก.N/วัน)	$\text{NH}_4^+$ for cell synthesis (มก.N/วัน)	Calculate $\text{NO}_3^-$ occur (มก.N/วัน)	Measured $\text{NO}_3^-$ occur (มก.N/วัน)	$\text{NO}_3^-$ loss by SND (มก.N/วัน)
2	1120	429	677	125	552
3	1490	260	1205	250	955

เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมมาจากแอมโมเนียคลอไรด์ จึงใช้ค่าที่เคเอ็นเป็นตัวแทนของแอมโมเนียในน้ำ ซึ่งจากการคำนวณในตารางที่ 4-19 แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา

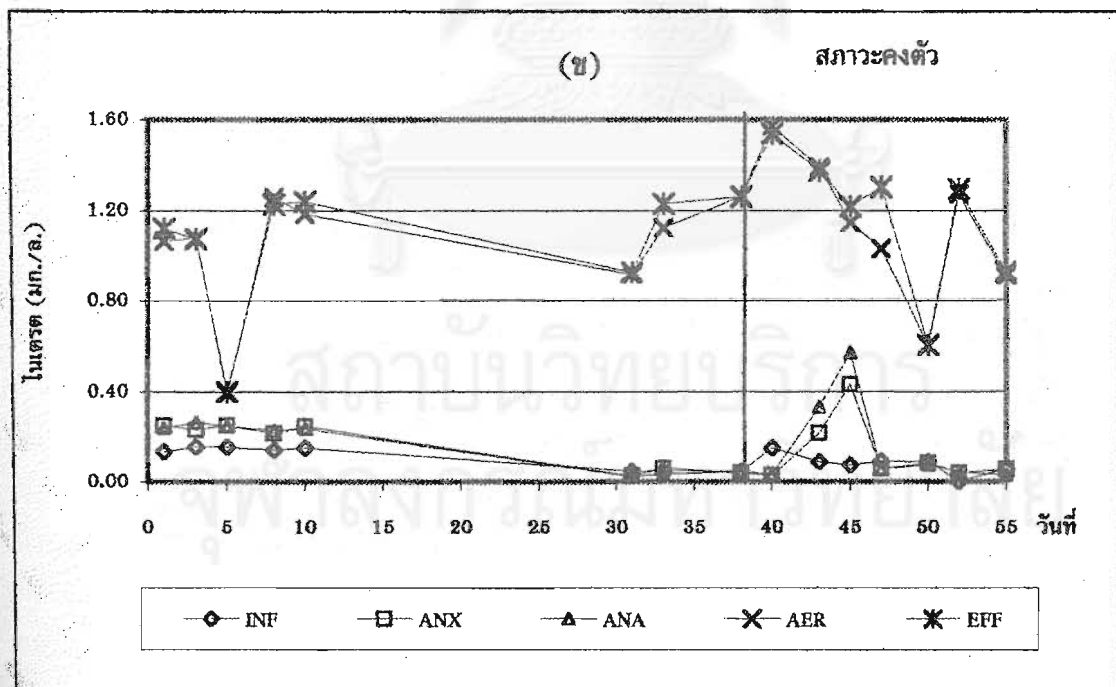
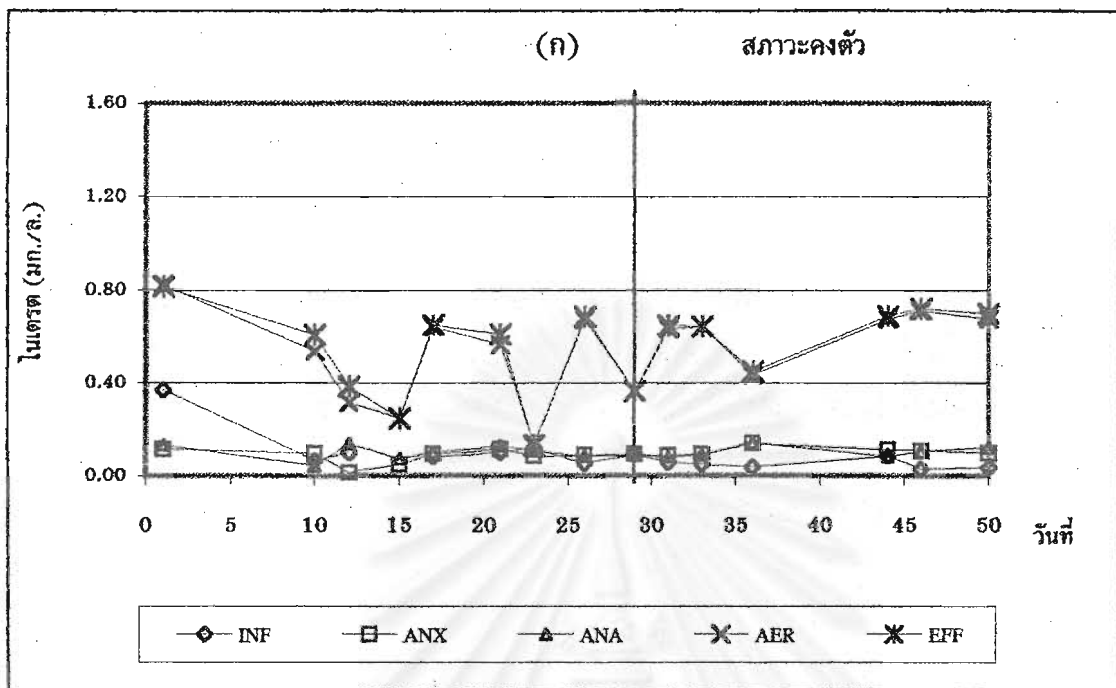


รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อที่เคเอ็น

(ก) อายุสลัดจ์ 40 วัน (ข) อายุสลัดจ์ 80 วัน



รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อไนเตรต  
(ก) อายุสลัดจ์ 40 วัน (ข) อายุสลัดจ์ 80 วัน



รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบผลของอายุสัลดัจที่มีต่อไนเตรต

(ก) อายุสัลดัจ 40 วัน (ข) อายุสัลดัจ 80 วัน

เอสเอ็นดีของอายุสลัดจ์ 80 วันมีค่าสูงกว่าที่อายุสลัดจ์ 40 วัน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนแอนนออกซิกในฟล็อกที่มากกว่า ซึ่งจะได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.9 ต่อไป

อย่างไรก็ตามแม้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่อายุสลัดจ์ 80 วันจะสูงกว่าที่ 40 วันก็ตาม แต่เนื่องจากแอมโมเนียที่เข้าส่วนเติมออกซิเจนที่สูงกว่ามาก ทำให้ไนเตรตในน้ำทิ้งที่อายุสลัดจ์ 80 วันมีค่าสูงกว่าที่ 40 วัน

จากภาคผนวกที่ ฉ-1 และ ฉ-2 เมื่อนำจุลชีพในระบบมาทดลองแบบแบตช์เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Nitrification Rate, SNR) พบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.49 และ 1.39 มก.ทีเคเอ็น/ก.วีเอสเอส-ชม. ในการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของค่าอายุสลัดจ์ทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน และมีอัตราต่ำกว่าการทดลองของ Zhang และคณะ (1997) ซึ่งเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ระหว่างระบบเอ็มบีอาร์กับระบบซีเอเอส (Conventional A/S) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบเอ็มบีอาร์สูงกว่าระบบซีเอเอส โดยระบบเอ็มบีอาร์เท่ากับ 2.28 มก.แอมโมเนีย/ก.MLSS-ชม. และระบบซีเอเอสเท่ากับ 0.96 มก.แอมโมเนีย/ก.MLSS-ชม.

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าของระบบเนื่องจากในงานวิจัยต้องการให้อัตราของปฏิกิริยามีความใกล้เคียงกับสภาพของระบบมากที่สุด จึงไม่ได้เติมแอมโมเนียไนโตรเจนเพิ่มก่อนการทดลองแบบแบตช์ ทำให้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับที่ออกจากส่วนไร้ออกซิเจน ซึ่งเท่ากับ 10.3 และ 13.2 มก./ล.สำหรับการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองตามมาตรฐานแล้วจะเติมแอมโมเนียไนโตรเจนก่อนการทดลองให้ได้ประมาณ 20 มก.ไนโตรเจน/ล.

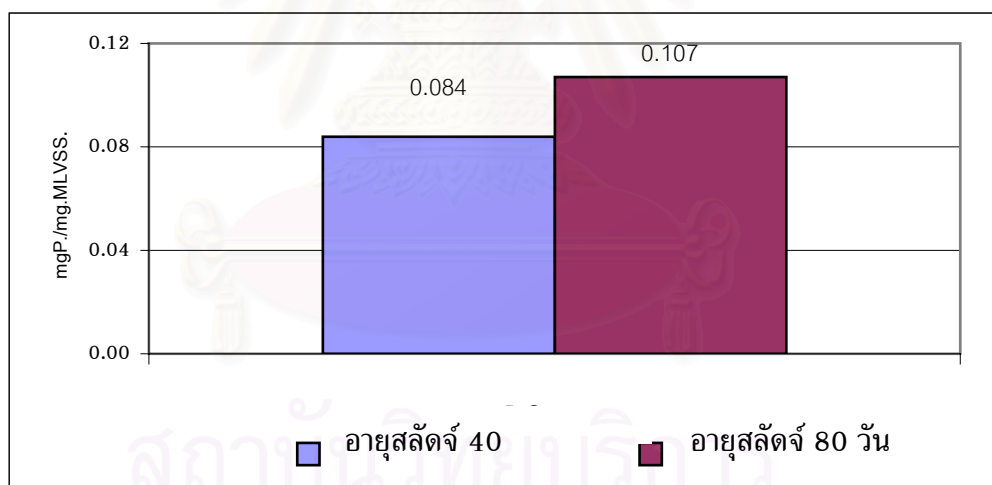
จากภาคผนวกที่ ช-1 และ ช-2 เมื่อนำจุลชีพในระบบมาทดลองแบบแบตช์เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ (Specific Denitrification Rate, SDNR) พบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.07 และ 0.19 มก. $\text{NO}_3$ /ก.วีเอสเอส-ชม. ในการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากในการทดลองแบบแบตช์ของการทดลองที่ 3 มีค่าไนเตรตเริ่มต้นสูงกว่าในการทดลองที่ 2 โดยในการทดลองที่ 3 มีค่าไนเตรตเริ่มต้น 0.95 มก./ล. และการทดลองที่ 2 มีค่า 0.35 มก./ล.

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบต่ำกว่าการทดลองของ Zhang และคณะ (1997) ซึ่งพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของระบบเอ็มบีอาร์ที่มีการเติมสารอินทรีย์ในปฏิกิริยา มีค่าระหว่าง 4.25 – 6.40 ก.ไนเตรต/กก.SS-ชม. และ Metcalf และ Eddy (2002) ซึ่งรายงานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะของระบบแบบ Pre-Denitrification เท่ากับ 0.04 – 0.42 ก. $\text{NO}_x$  / ก.VSS-วัน วัน (1.67–17.5 มก.ไนเตรต/ก.VSS-ชม.) ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองตามมาตรฐานแล้วจะเติมไนเตรตไนโตรเจนก่อนการทดลองให้ได้ประมาณ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนในงานวิจัยนี้ต้องการให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงสภาพจริง จึงไม่ได้เติมไนเตรตเพิ่มเข้าไป ทำให้ปริมาณไนเตรตเริ่มต้นของการทดลองมีค่าเท่ากับไนเตรตและไนไตรต์ในส่วนเติมออกซิเจน

จากการทดลองแบบแบตช์พบว่า เชื้อจุลชีพในระบบสามารถลดไนเตรตไนโตรเจนให้ต่ำกว่า 0.1 มก./ล. ภายใน 90 นาที และ 180 นาทีในการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ว่าเวลากักน้ำของส่วนแอนนอซิกรวมกับส่วนไร้ออกซิเจนที่ยาวนาน ทำให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในระบบเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จนส่วนใหญ่ของส่วนแอนนอซิกเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้น

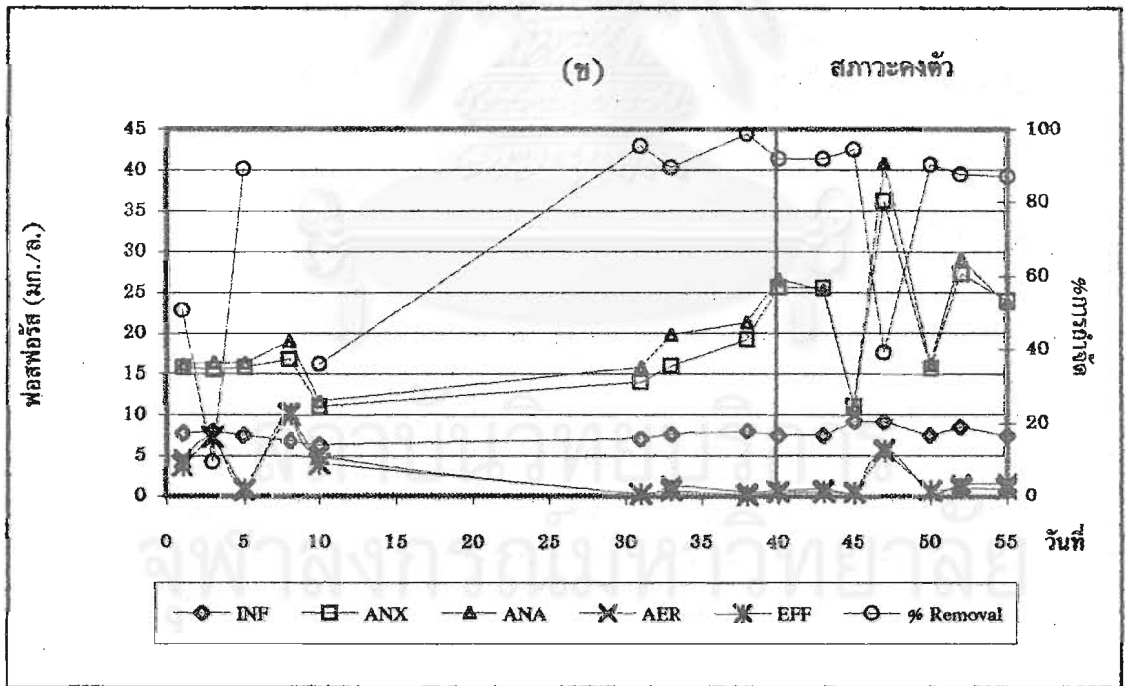
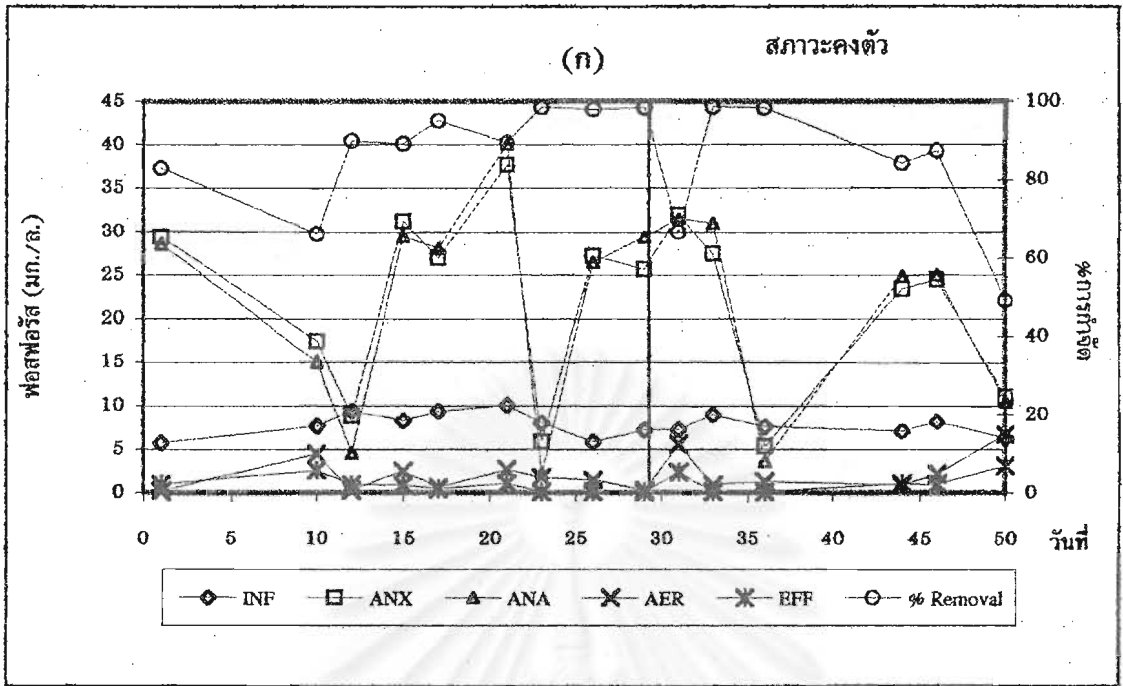
#### 4.8.3 ผลของอายุสลัดจ์ต่อการกำจัดฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4-18 พบว่า อายุสลัดจ์ของระบบที่ 40 วันและ 80 วันมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจาก อายุสลัดจ์ที่มากขึ้นทำให้ค่าฟอสฟอรัสในเซลล์ (Phosphorus Content) ของจุลชีพมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดยังคงสูงอยู่ แม้อัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินที่ลดลง ซึ่งการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินเป็นวิธีการเดียวที่จะระบายฟอสฟอรัสออกจากระบบในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ สอดคล้องกับการทดลองของ Wentzel และคณะ (1988 อ้างโดย WEF, 1998) ซึ่งพบว่าอัตราส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ของจุลชีพมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการสลายตัวของพีเอโอมีค่าต่ำกว่าแบคทีเรียแบบเฮเทอโรโทรฟในระบบ เมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ให้สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของพีเอโอในระบบสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของอายุสลัดจ์ที่ค่าต่างๆ

จากภาคผนวกที่ ซ-1 และ ซ-2 เมื่อนำจุลชีพในระบบมาทดลองแบบแบตช์เพื่อหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Release Rate, SPRR) พบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 17.05 และ 7.35 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม. ในการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับ ปริยดา เหล่าร์จิจินดา (2541) ได้ค่าอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะเท่ากับ 8.4 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม. เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-30 เปรียบเทียบผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อฟอสฟอรัส

(ก) อายุสลัดจ์ 40 วัน (ข) อายุสลัดจ์ 80 วัน



และ อภิรตี ดวงใจ (2543) ซึ่งทดลองที่ 30 องศาเซลเซียสได้ค่าอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะเท่ากับ 17.69 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม.

อัตราการคายฟอสฟอรัสที่ต่ำเมื่ออายุสลัดจ์สูงขึ้น เนื่องจากการทดลองแบบแบตช์ของจุลชีพที่มีอายุสลัดจ์ 80 วัน มีไนเตรตที่เวียนมาจากส่วนเติมออกซิเจนมากกว่าที่อายุสลัดจ์ 40 วัน พบว่าไนเตรตรบกวนอัตราการคายฟอสฟอรัสในระยะแรก ทำให้ในช่วง 90 นาทีแรก อัตราการคายฟอสฟอรัสที่อายุสลัดจ์ 40 วัน มีมากกว่าที่อายุสลัดจ์ 80 วันถึง 2 เท่า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 300 นาที ค่าฟอสฟอรัสที่คายออกมาของทั้ง 2 การทดลองก็มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับการทดลองที่ว่าค่าฟอสฟอรัสที่ผ่านส่วนไร้ออกซิเจนแล้วมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 การทดลอง ดังนั้นเวลาเก็บกักของส่วนแอนน็อกซิก กับส่วนไร้ออกซิเจนจึงมีค่าเพียงพอดังกล่าว การกำจัดฟอสฟอรัส จึงช่วยลดผลกระทบของไนเตรตได้ทั้งหมด

จากภาคผนวกที่ ฅ-1 และ ฅ-2 เมื่อนำจุลชีพในระบบมาทดลองแบบแบตช์เพื่อหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ (Specific Phosphorus Uptake Rate, SPUR) พบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 3.38 และ 4.10 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม. ในการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในการทดลองของปรีดา เหล่ารุจิจินดา (2541) ได้ค่าอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะเท่ากับ 18.0 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม. เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ อภิรตี ดวงใจ (2543) ซึ่งพบว่าอัตราการจับใช้จำเพาะที่ 30 องศาเซลเซียสเท่ากับ 28.81 มก.ฟอสฟอรัส/ก.วีเอสเอส-ชม. เนื่องจากการทดลองแบบแบตช์สำหรับการทดลองนี้ ต้องการให้มีความใกล้เคียงกับสภาพของระบบมากที่สุด จึงไม่มีการเติมฟอสฟอรัสเพิ่มก่อนการทดลองแบบแบตช์ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสละลายเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับในส่วนไร้ออกซิเจน ซึ่งในการทดลองปกติจะมีการเติมฟอสฟอรัส เพื่อให้ได้ค่าฟอสฟอรัสละลายเริ่มต้น 30 - 50 มก./ล.

การจับใช้ฟอสฟอรัสในส่วนเติมออกซิเจนของทั้ง 2 การทดลองมีค่าใกล้เคียงกันตลอดที่ทำการทดลองแบบแบตช์ และสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสจนมีค่าต่ำกว่า 1 มก./ล. เมื่อทดสอบไปได้ 180 และ 360 นาที สำหรับการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

#### 4.9 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในฟล็อก

จากการทดลองพบว่า ไนเตรตไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีค่าต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของระบบมีค่าสูง ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในส่วนเติมออกซิเจนของระบบ

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเอ็นดีเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะคือ การเกิดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฟล็อก และการเกิดเนื่องจากชนิดของเชื้อจุลชีพ ดังนั้นในการทดลองจึงได้วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของระบบที่ค่าอายุสลัดจ์ 40 และ 80 วัน เพื่ออธิบายการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีอันเนื่องมาจากลักษณะกายภาพ รวมทั้งการบ่งบอกชนิดแบคทีเรียด้วยวิธีการฟิชเพื่อบอกชนิดของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจนเกิดขึ้นในระบบ

โดยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Floc) ของระบบใช้เครื่อง Particle Size Analyser ของ Malvern Mastersizer ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) หลังการทดลองที่ 2 เท่ากับ 140 ไมครอน และหลังการทดลองที่ 3 เท่ากับ 190 ไมครอน โดยขนาดอนุภาคในทุกส่วนแอนนออกซิก ส่วนไร้ออกซิเจน และส่วนเต็มออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่ออายุสัปดาห์เท่ากัน (ภาคผนวก ฎ)

ขนาดอนุภาคในระบบมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคในระบบเอ็มบีอาร์ที่ศึกษามาของ Zhang และคณะ (1997) ที่พบว่าขนาดอนุภาคในระบบเอ็มบีอาร์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 60 ไมครอน อย่างไรก็ตามยังมีความสอดคล้องอยู่ที่ว่าขนาดอนุภาคในระบบเอ็มบีอาร์เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสในระบบ โดยอนุภาคจะมีขนาดเล็กลง เมื่อความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสลดลง

แต่จากการทดลองของ Choo และ Stensel (2000) ซึ่งใช้ระบบ SBMBR ในการบำบัดน้ำเสียพบว่า เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นในระบบ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด 87 – 93% ซึ่งในระบบมีขนาดอนุภาคของฟล็อกประมาณ 140 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองนี้ ผู้วิจัยจึงเชื่อว่ามีปฏิกิริยาเอสเอ็นดีเกิดขึ้นในระบบด้วย

แต่เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี ขึ้นอยู่กับขนาดของฟล็อก ค่าออกซิเจนละลาย และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Pochana และ Keller, 1999) ผู้วิจัยจึงได้คำนวณอัตราส่วนสภาวะแอนนออกซิกต่อสภาวะเต็มออกซิเจนในฟล็อก ตามขั้นตอนในงานวิจัยของ Choo และ Stensel (2000) โดยใช้สมการของ Muller และคณะ (1966) [สมการที่ 4-11] และสมการของ LaMotta (1976) [สมการที่ 4-12] ดังนี้

$$D_{O_2} = (0.14 d - 4.0) \times 10^{-6} \quad (4-11)$$

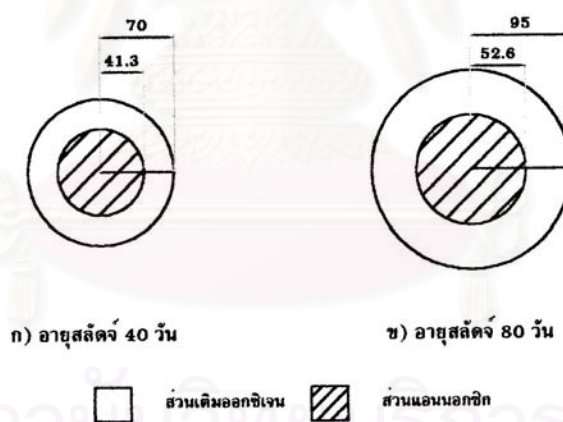
$$\delta = \left[ \frac{2 D_{O_2} C_s}{\rho \text{ SOUR}} \right]^{0.5} \quad (4-12)$$

- เมื่อ  $D_{O_2}$  คือ อัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในฟล็อก (Oxygen Diffusivity) เท่ากับ  $1.56 \times 10^{-5}$  ซม.<sup>2</sup>/วินาที เมื่อขนาดฟล็อก 140 ไมครอน เท่ากับ  $2.26 \times 10^{-5}$  ซม.<sup>2</sup>/วินาที เมื่อขนาดฟล็อก 190 ไมครอน
- $d$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของฟล็อก (ไมครอน)
- $\delta$  คือ ความลึกของออกซิเจนที่ละลายเข้าไปในฟล็อก (ซม.)
- $C_s$  คือ ออกซิเจนละลายที่ผิวหน้าฟล็อก (มก./ล.)
- $\rho$  คือ ความหนาแน่นของฟล็อก เท่ากับ 1.06 กรัม/ซม.<sup>3</sup>
- SOUR คือ อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ (มก./ก./ชม.)

ตารางที่ 4-20 เปรียบเทียบความลึกของออกซิเจนที่ซึมเข้าฟล็อก  
ระหว่างอายุสลัดจ์ 40 วัน และ 80 วัน

การทดลองที่	อายุสลัดจ์รวม (วัน)	d (micron)	$C_s$ (mg/L.)	SOUR (mgO <sub>2</sub> /gVSS/hr.)	$\delta$ (micron)
2	40	140	5.12	18.270	28.7
3	80	190	4.57	10.830	42.4

จากการคำนวณพบว่า ทั้งการทดลองที่ 2 และ 3 ภายในฟล็อกจะเกิดสถานะแอนน็อกซิกขึ้น เนื่องจากออกซิเจนไม่สามารถซึมเข้าไปในฟล็อกได้ทั้งหมด ตามรูปที่ 3-29 ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีโดยลักษณะทางกายภาพขึ้นในระบบ โดยการทดลองที่ 3 มีปริมาณส่วนแอนน็อกซิกสูงกว่าในการทดลองที่ 2 สอดคล้องกับการคำนวณโดยสมการสตอยชิโอเมตริกในหัวข้อที่ 4.8.2 ที่ว่าการลดลงของไนเตรตในการทดลองที่ 3 มีมากกว่าการทดลองที่ 2 ปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่เกิดขึ้น ทำให้ไนเตรตในน้ำทิ้งมีค่าต่ำทั้ง 2 การทดลอง



รูปที่ 4-31 สัดส่วนสถานะแอนน็อกซิกต่อแอโรบิกในฟล็อก  
ในส่วนเติมออกซิเจน

ตารางที่ 4-21 อัตราส่วนส่วนแอนนออกซิกและส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อก  
(การคำนวณอยู่ในภาคผนวก จ)

การทดลองที่	Vanx	Vaer	Vanx
	Vt	Vt	Vaer
2	0.20	0.80	0.26
3	0.17	0.83	0.20

อัตราส่วนของส่วนแอนนออกซิกและส่วนเติมออกซิเจนนี้มีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะในส่วนเติมออกซิเจน เนื่องจากแบบจำลองที่คำนวณนี้พบว่า จุลชีพในฟล็อกทั้งหมดไม่ได้ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น มีเพียงจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อกเท่านั้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น

ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะที่แท้จริง จึงต้องคำนวณเฉพาะส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อกเท่านั้น แต่สำหรับการปรับแก้อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะไม่สามารถคำนวณเฉพาะส่วนเติมออกซิเจนได้ เพราะในส่วนแอนนออกซิกภายในฟล็อกพีเอโอก็ สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้ เพียงแต่ใช้ในเตรตแทนออกซิเจนเท่านั้น ซึ่งการใช้ไนเตรตออกซิไดซ์พีเอชเอนี้ให้อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสต่ำกว่าการใช้ออกซิเจน

ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ

การทดลองที่	Specific Nitrification Rate (mg.TKN/g.VSS-Hr.)	
	Observe	Truth
2	1.49	1.86
3	1.39	1.67

เมื่อพิจารณาว่าฟล็อกที่เกิดขึ้นในระบบมีขนาดเท่ากันทั้งในส่วนแอนนออกซิก ส่วนไร้ออกซิเจน และส่วนเติมออกซิเจน ดังนั้นการแบ่งสภาวะของฟล็อกในส่วนแอนนออกซิก กับส่วนไร้ออกซิเจน จึงควรมีลักษณะเดียวกัน แต่ในส่วนแอนนออกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจนจะเกิดสภาวะแอนนออกซิกในส่วนนอกของผิวฟล็อก และในส่วนในของฟล็อกจะเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนเนื่องจาก ไนเตรตซึมเข้าไปในฟล็อกได้บางส่วน

การคำนวณอัตราการแพร่ของไนเตรตเข้าไปในฟล็อกใช้สมการที่ 4-12 โดยใช้ค่าไนเตรตรอบฟล็อกในระบบแทนค่า  $C_s$  ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ (SDNR) แทนอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ (SOUR) และใช้ค่าอัตราการแพร่ไนเตรตเข้าไป

ในฟล็อกจากสมการของ LaMotta (1976) สมการที่ 4-13 ซึ่งผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4-23

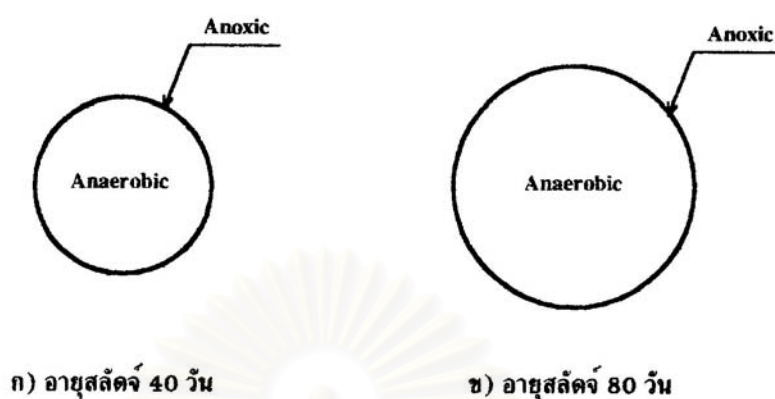
$$D = \frac{S_i (Qx)^2}{2 \rho \text{ SDNR } (1-x) A^2} \quad (4-13)$$

- เมื่อ D คือ อัตราการแพร่ของไนเตรตเข้าไปในฟล็อก  
 $S_i$  คือ ความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้น  
 Q คือ อัตราการไหลผ่านฟล็อก  
 x คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของฟล็อก เท่ากับ 1.06 กรัม/ซม.<sup>3</sup>  
 SDNR คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ  
 A คือ พื้นที่ผิวของฟล็อก

ตารางที่ 4-23 เปรียบเทียบความลึกของไนเตรตที่ซึมเข้าฟล็อก  
ระหว่างอายุสลัดจ์ 40 วัน และ 80 วัน

การทดลองที่	อายุสลัดจ์รวม (วัน)	D ( $\times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	$C_{\text{NO}_x}$ (mg/L.)	SDNR (mgNO <sub>3</sub> /gVSS/hr.)	$\delta$ (micron)
2	40	7.92	0.60	0.070	1.1
3	80	7.30	1.20	0.190	0.9

จากการคำนวณพบว่าเกิดส่วนแอนนออกซิกที่ฟล็อกน้อยมาก เนื่องจากมีไนเตรตเวียนมาจากส่วนเดิมออกซิเจนต่ำ ดังนั้นฟล็อกและส่วนแอนนออกซิกส่วนใหญ่ จึงเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้น ตามรูปที่ 4-32



รูปที่ 4-32 สัปดาห์สถานะแอนน็อกซิกต่อแอนแอโรบิกในฟล็อก  
ในส่วนแอนน็อกซิก

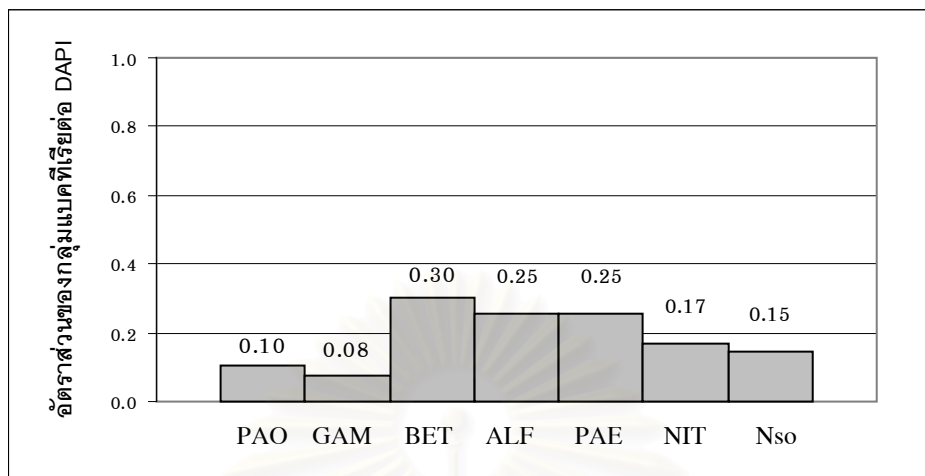
#### 4.10 ชุมชนของแบคทีเรียในระบบ (Bacterial Community)

จากการวิเคราะห์ชุมชนของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการพีช (ภาคผนวก ข) โดยใช้โพรบชนิดต่างๆที่จำเพาะกับแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม และแต่ละชนิดตามตารางที่ 4- 24

ตารางที่ 4-24 โพรบที่ใช้ในการทดลองและความจำเพาะต่อแบคทีเรีย

โพรบที่ใช้	แบคทีเรียที่จำเพาะต่อโพรบ
PAO(mix)	PAO-cluster
GAM42	gamma subclass Proteobacteria
BET42	beta subclass Proteobacteria
ALF968	alpha subclass Proteobacteria
PAE997	Pseudomonas spp.
NIT3	Nitrobacter spp.
Nso190	betaproteobacterial ammonia-oxidizing bacteria

การวิเคราะห์ได้กระทำหลังการทดลองที่ 2 และ 3 จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของแบคทีเรียในระบบเป็นไปตามรูปที่ 4-33



รูปที่ 4-33 อัตราส่วนของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆในระบบ

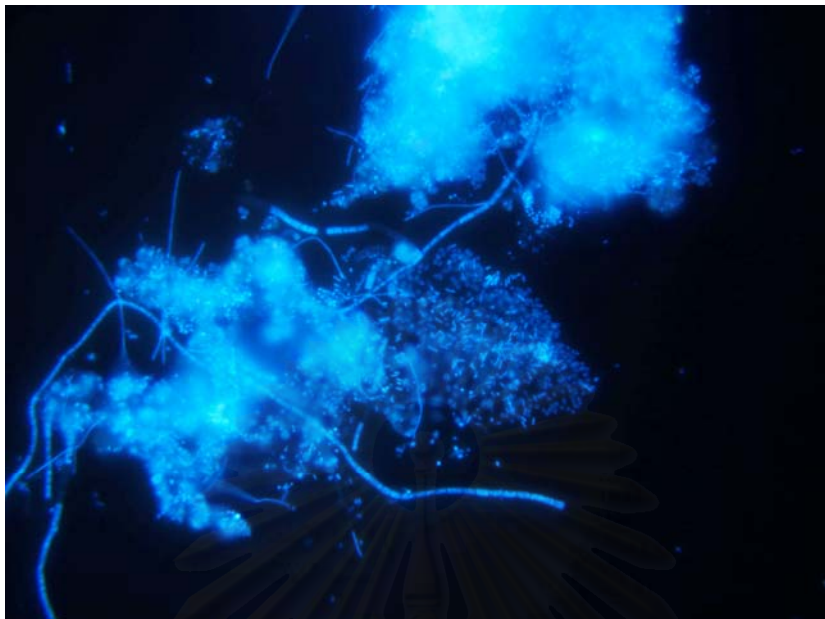
จากการทดลองพบว่าแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบได้แก่ beta subclass Proteobacteria และ alpha subclass Proteobacteria ดังแสดงในรูปที่ 4-34 และ 4-35 ตามลำดับ ส่วน gamma subclass Proteobacteria ในรูปที่ 4-36 นั้นมีสัดส่วนน้อยที่สุดในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาว่าระบบที่กำลังจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้อย่างเพิ่มพูนนั้นมี beta subclass Proteobacteria และ High % G+C gram positive bacteria (HGCGPB) เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นของระบบ (Lee และคณะ, 2002 ; Bond และคณะ, 1999) เช่นเดียวกับระบบเอ็มบีอาร์ที่ใช้กำจัดไนโตรเจนในการศึกษาของ Luxmy และคณะ (2000) ซึ่งพบ beta subclass Proteobacteria และ alpha subclass Proteobacteria เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบ

#### 4.10.1 ชุมชนแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไนโตรเจน

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในระบบได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม beta subclass proteobacteria ammonia oxidizing bacteria (AOB) ซึ่งบ่งชนิดได้ด้วยโพรบ Nso190 ดังแสดงในรูปที่ 4-37 และ *nitrobacter ssp.* ซึ่งบ่งชนิดได้ด้วยโพรบ NIT3 ดังแสดงในรูปที่ 4-38 ทั้งนี้เนื่องจากระบบควบคุมอายุสลัดจ์ไว้ที่ค่าสูงทำให้แบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มที่มีอัตราการเติบโตจำเพาะต่ำ สามารถดำรงอยู่ในระบบได้

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่ถูกยอมรับได้แก่ *Thiosphaera Pantotropa* ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ในเวลาเดียวกัน (Seviuor และ Blackall, 1999)

นอกจากนี้แบคทีเรียตัวอื่นที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีได้แก่ *Alcaligenes faecalis Pseudomonas aeruginosa* และ *Zoogloea ramigera* (Robertson และ Kuenen, 1992 อ้างโดย Seviuor และ Blackall, 1999)



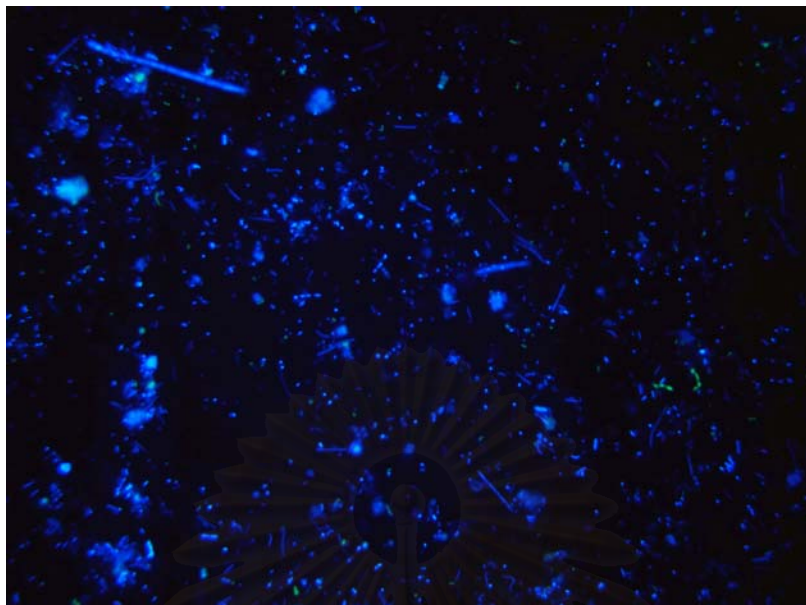
(ก)



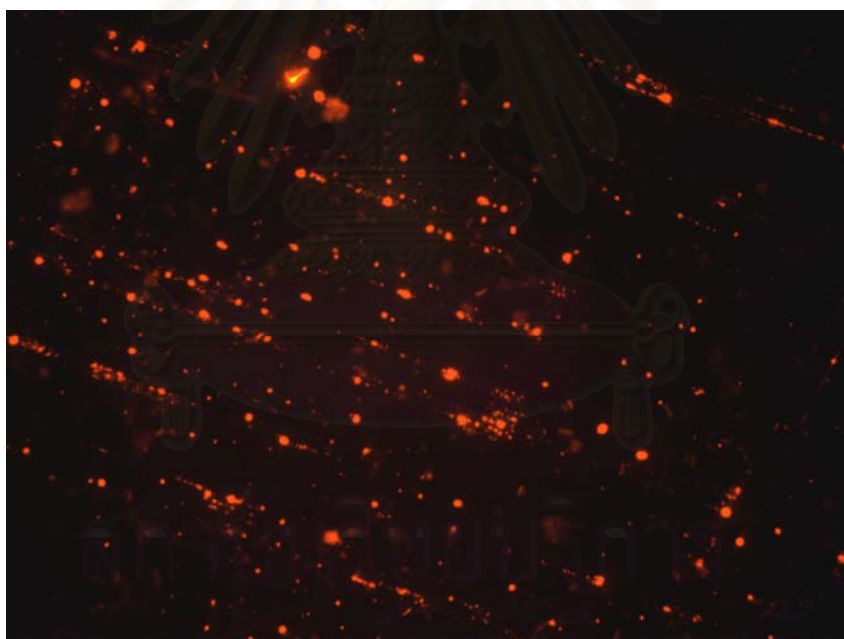
(ข)

รูปที่ 4-34 การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าคลาสด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ BET42



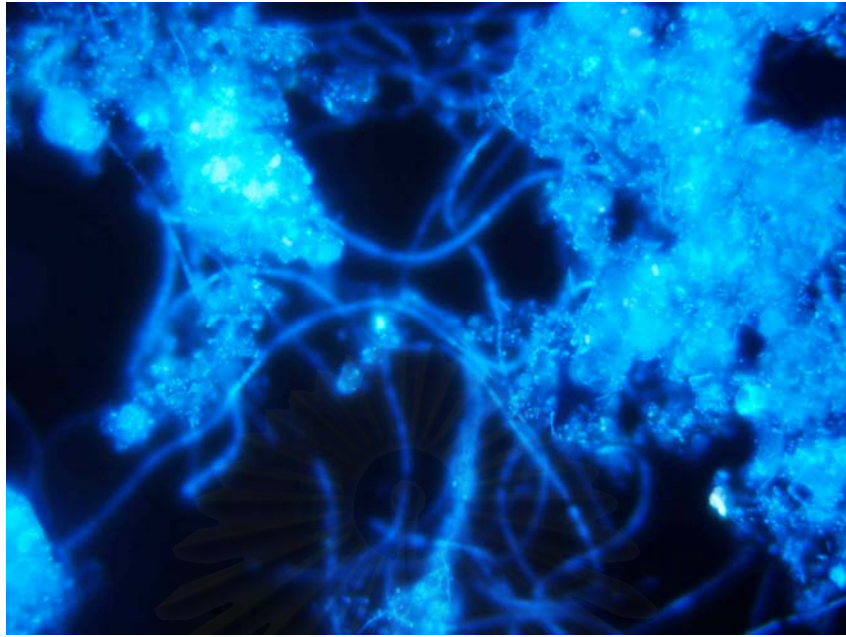


(ก)

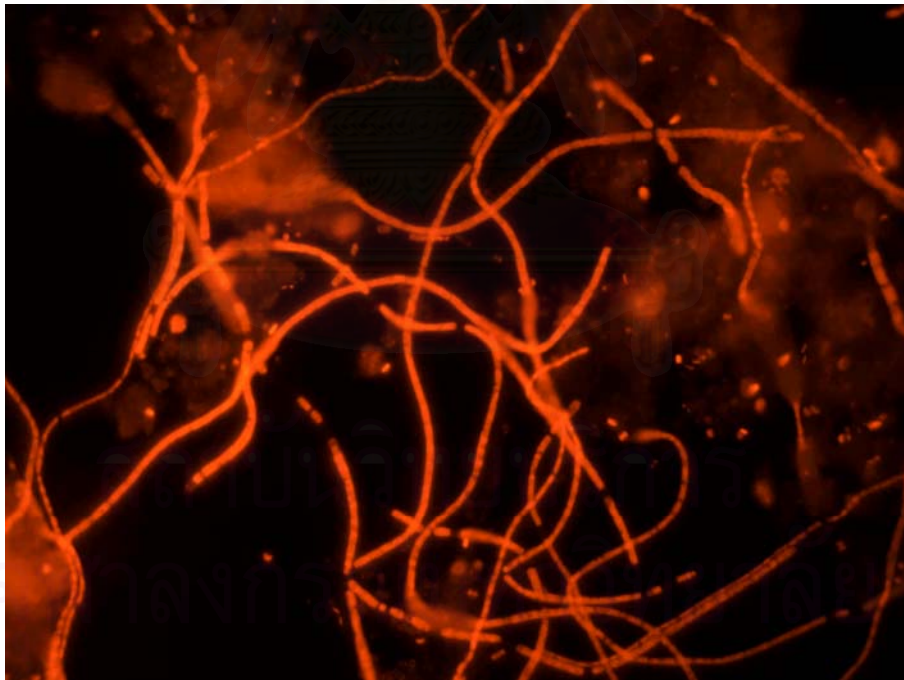


(ข)

รูปที่ 4-35 การวิเคราะห์ปริมาณแอลฟาชั้นคลาสด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุดสีฟ้าที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุดสีฟ้าที่ตอบสนองต่อโพรบ ALF968



(ก)

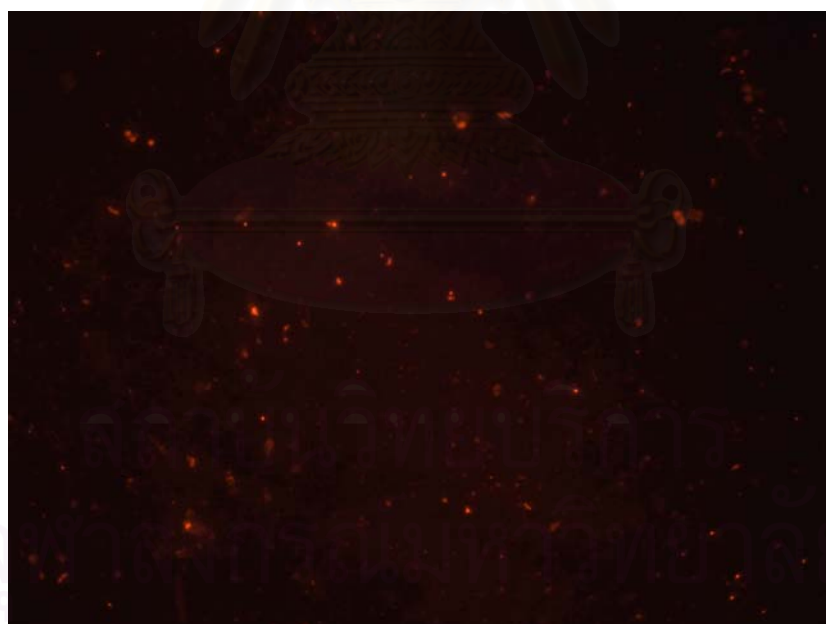


(ข)

รูปที่ 4-36 การวิเคราะห์ปริมาณแกมมาซบคลาสด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ GAM42

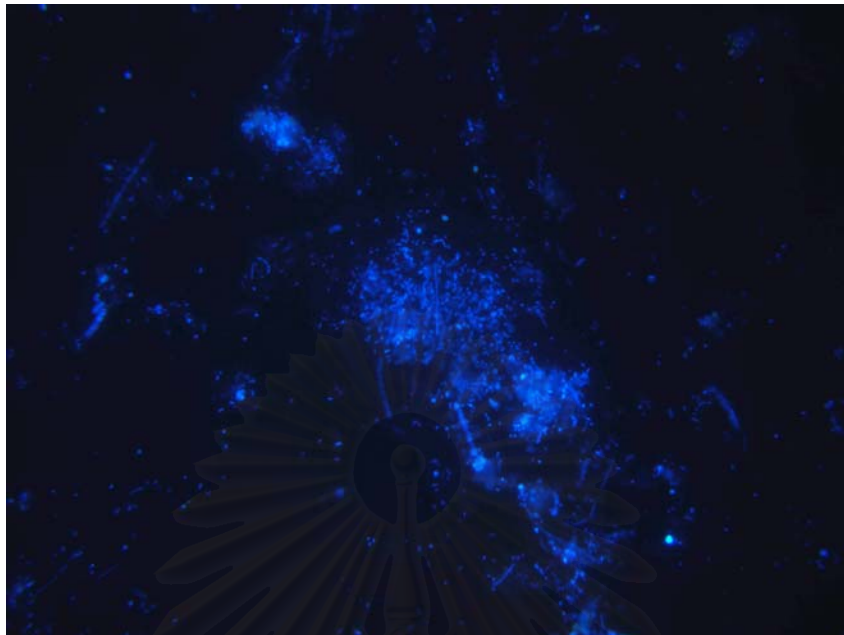


(ก)



(ข)

รูปที่ 4-37 การวิเคราะห์ปริมาณ AOB ด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ Nso190



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-38 การวิเคราะห์ปริมาณ *Nitobacter* spp. ด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ NIT3

ซึ่งจากการบ่งบอกชนิดของ *pseudomonas ssp.* ด้วยโพรบ PAE997 ดังรูปที่ 4-39 พบแบคทีเรียชนิด *pseudomonas ssp* มีปริมาณที่สูงถึง 25% ของแบคทีเรียทั้งหมดในระบบ แสดงว่าระบบสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.10.2 ชุมชนแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัส

โพรบที่ใช้ในการบ่งชนิดของพีเอโอในระบบ เป็นโพรบที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยของ Crocetti และคณะ (2000) ซึ่งเป็นโพรบผสม ของโพรบ PAO462 PAO651 และ PAO846

จากการทดลองพบว่า พีเอโอในระบบซึ่งใช้โพรบพีเอโอผสมในการบ่งชี้มีประมาณ 10% เมื่อเทียบกับ DAPI แสดงว่าในระบบมีพีเอโอเกิดขึ้น สอดคล้องกับผลการกำจัดฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบ

สำหรับจีเอโอในระบบยังไม่สามารถบ่งชี้ได้โดยตรง แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า จีเอโออยู่ในกลุ่ม alpha subclass Proteobacteria (Bond และคณะ, 1999) ซึ่งจากการทดลองก็พบว่า มีแบคทีเรียในกลุ่มดังกล่าวในปริมาณที่สูง

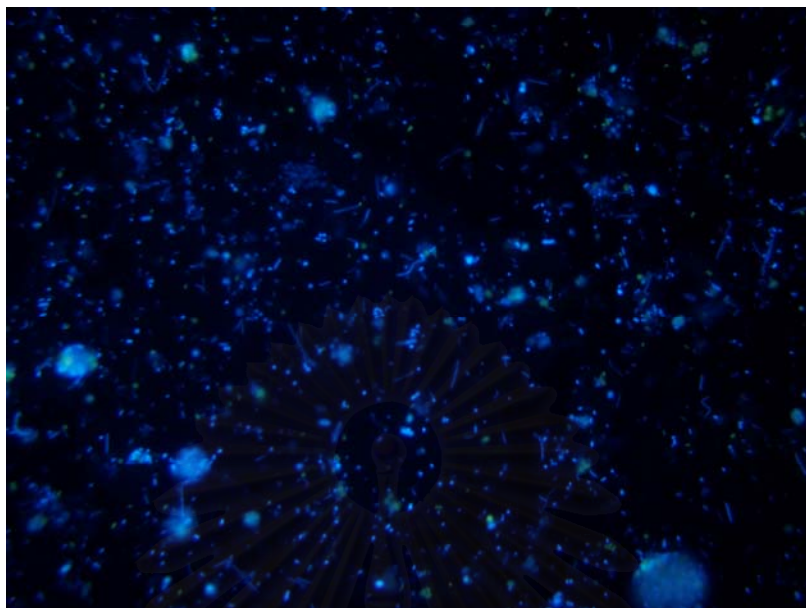
พีเอโอในฟล็อกมีลักษณะกระจายตัวทั่วทั้งฟล็อก ตามรูปที่ 4-40 และพีเอโอที่ตอบสนองกับโพรบมีรูปร่างเป็นวงรีมีขนาดใหญ่ ดังนั้นทำให้ฟล็อกของระบบสามารถสะสมฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่มากอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสทั่วไป

#### 4.10.3 ชุมชนแบคทีเรียแบบเส้นใย

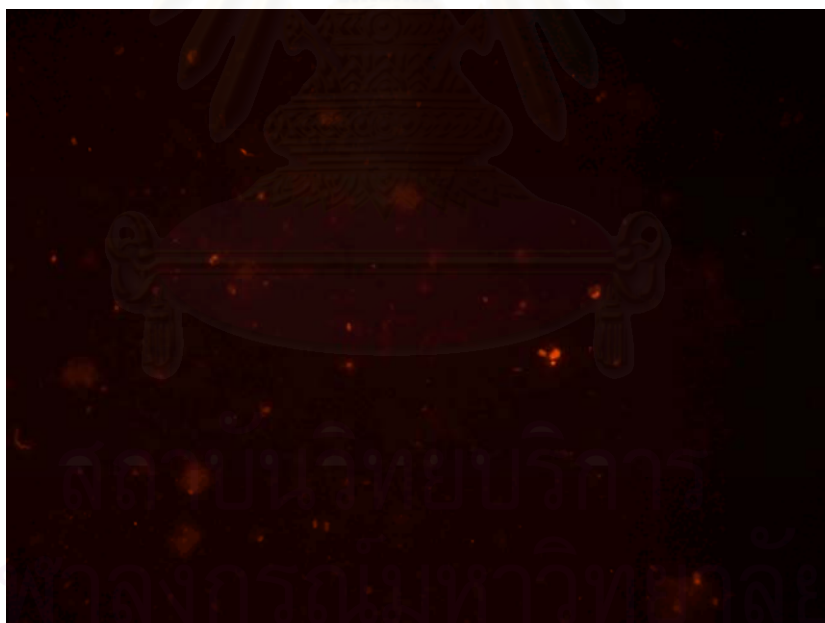
จากการเก็บตัวอย่างทั้งส่วนแอนนอกซิก ส่วนไร้ออกซิเจน และส่วนเติมออกซิเจนเพื่อวิเคราะห์ชนิดแบคทีเรียด้วยวิธีการพีช พบว่าทุกส่วนมีแบคทีเรียชนิดเส้นใยอยู่อย่างหนาแน่นในระบบ จากการวิเคราะห์ด้วยโพรบ GAM42 ซึ่งจำเพาะกับแบคทีเรียในกลุ่ม gamma subclass Proteobacteria พบว่าแบคทีเรียแบบเส้นใยส่วนใหญ่ในระบบตอบสนองกับโพรบดังกล่าว ดังรูปที่ 4-7 เพราะฉะนั้นแบคทีเรียแบบเส้นใยที่เป็นกลุ่มเด่นในระบบ จึงอยู่ในกลุ่ม gamma subclass Proteobacteria ซึ่งแบคทีเรียแบบเส้นใยที่อยู่ในกลุ่มนี้คือ Type 021N และ Type 1863 (Seviour และ Blackall, 1999) แต่เนื่องจากแบคทีเรียแบบเส้นใย Type 1863 พบในระบบที่มีอัตราส่วนอาหารต่อปริมาณสลัดจ์ (F/M) สูง ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นแบคทีเรียแบบเส้นใย Type 021N จึงน่าจะเป็นแบคทีเรียแบบเส้นใยส่วนใหญ่ในระบบ นอกจากนี้แบคทีเรียแบบเส้นใย Type 021N เกิดขึ้นในระบบที่มีการกำจัดธาตุอาหาร และมีอัตราส่วนอาหารต่อปริมาณสลัดจ์ต่ำ (Seviour และ Blackall, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง ดังนั้นจึงสรุปว่าแบคทีเรียแบบเส้นใยที่พบในระบบเป็น Type 021N เป็นส่วนใหญ่

#### 4.10.4 การปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะด้วยวิธีพีช

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะที่สามารถปรับแก้ด้วยปริมาณจุลชีพที่เกี่ยวข้องได้แก่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ และอัตราการคายและจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ซึ่ง

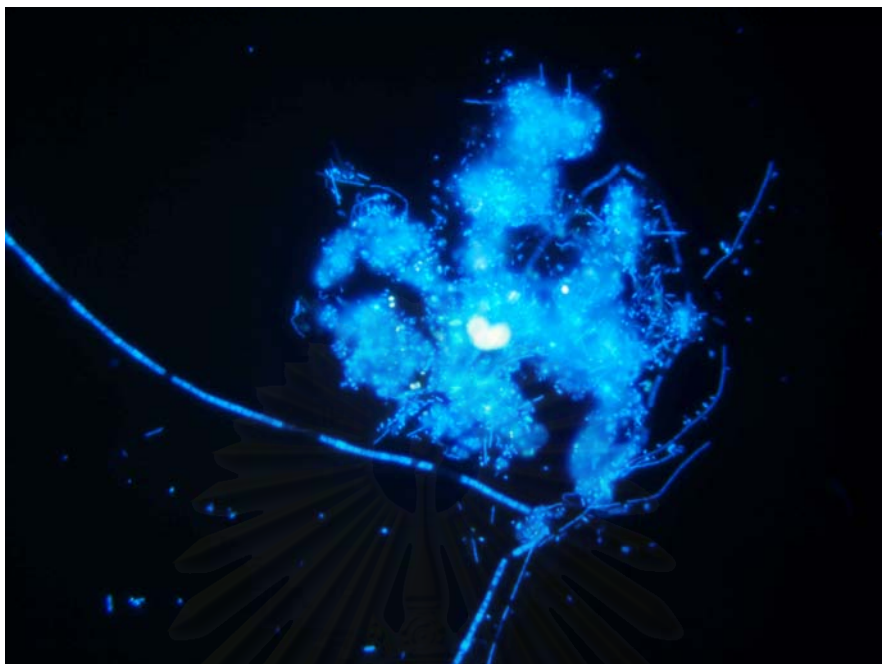


(ก)



(ข)

รูปที่ 4-39 การวิเคราะห์ปริมาณ *Pseudomonas* spp. ด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ PAE997



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-40 การวิเคราะห์ปริมาณพีเอโอด้วยวิธีฟิช  
(ก) จุลชีพที่ตอบสนองต่อ DAPI (ข) จุลชีพที่ตอบสนองต่อโพรบ PAO

อัตราปฏิกิริยาจำเพาะที่ได้วิเคราะห์มานั้น เป็นค่าที่เกิดขึ้นโดยเปรียบเทียบมาจากจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดในระบบ ซึ่งแทนด้วยค่าเอ็มแอลวีเอสเอส

ในขณะที่ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนั้นเกิดจากแบคทีเรียเพียง 2 กลุ่มได้แก่ AOB (Ammonia oxidizing bacteria) และ NOB (Nitrite oxidizing bacteria) เท่านั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโพรบ Nso190 และ NIT3 พบว่ามีแบคทีเรียในกลุ่ม beta subclass proteobacteria ammonia oxidizing bacteria (AOB) 15% และพบ *nitrobacter ssp.* ซึ่งอยู่ในกลุ่ม NOB 17% ดังนั้นจึงมีแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มในระบบ 32% เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน การคายและจับใช้ฟอสฟอรัสก็เกิดขึ้นได้ด้วยแบคทีเรียกลุ่มฟีโอโอเท่านั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโพรบ PAO พบว่ามีฟีโอโอในระบบเพียง 10%

การปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ และอัตราการคายและจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะแสดงไว้ในตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 การปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะต่าง ๆ ด้วยวิธีพีช

Specific Nitrification Rate (mg.TKN/g.VSS.nitri* -Hr.)		Specific Phosphorus Release Rate (mg.P/g.VSS.PAOs-Hr.)		Specific Phosphorus Uptake Rate (mg.P/g.VSS.PAOs-Hr.)	
Observe	Truth	Observe	Truth	Observe	Truth
1.86	5.81	17.04	170.40	3.38	33.80
1.67	5.22	7.35	73.50	4.10	41.00

\* nitri-nitrifiers

#### 4.11 การดำเนินการและควบคุมระบบ

เนื่องจากการทดลองต้องการควบคุมอัตรากระบวนการบรทุกสารอินทรีย์ และเวลากักของระบบให้คงที่ จึงต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้ง (ค่าฟลักซ์ของแผ่นเยื่อ) ให้คงที่ จากสมการการกรองของแผ่นเยื่อ

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (2-2)$$

เมื่อ J คืออัตราการไหลผ่านแผ่นเยื่อ

$\Delta P$  คือผลต่างของความดันผิวแผ่นเยื่อด้านป้อนสารกับด้านเพอมีเอต

$\mu$  คือความหนืดของสารละลาย

$R_t$  คือความต้านทานรวม



เพื่อควบคุมค่าฟลักซ์ (J) ให้คงที่จะต้องปล่อยให้ค่าความดันลดผ่านแผ่นเยื่อ ( $\Delta P$ ) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยควบคุมไม่ให้ความดันลดผ่านแผ่นเยื่อเกินกว่า 30 กิโลปาสกาล หากความดันลดผ่านแผ่นเยื่อถึงค่าดังกล่าวก็จะทำการล้างแผ่นเยื่อด้วยสารเคมี และระหว่างนี้หากค่าฟลักซ์ลดลงมากก็จะล้างด้วยน้ำประปาก่อน

ค่าฟลักซ์เฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่า 13.5 ลิตร/ตร.ม.-ชม. (0.324 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน) ค่าฟลักซ์ที่สูงนี้ทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าแผ่นเยื่ออย่างรวดเร็ว เมื่อดำเนินระบบได้ 75 วันได้ทำการฉีดล้างแผ่นเยื่อด้วยน้ำเปล่าครั้งแรก แต่ความดันลดผ่านแผ่นเยื่อก็เพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับเดิมเมื่อดำเนินระบบผ่านไป 5 วัน และหลังจากดำเนินระบบได้ 160 วันได้ทำการล้างแผ่นเยื่อด้วยสารละลายผสมระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) 1.2% ปรากฏว่าค่าความดันลดผ่านแผ่นเยื่อลดลงจาก 30 กิโลปาสกาล เหลือ 6 กิโลปาสกาล แต่จากนั้นค่าความดันลดผ่านแผ่นเยื่อก็เพิ่มขึ้นเป็น 25 กิโลปาสกาล เมื่อดำเนินการระบบได้ 10 วัน ในการทดลองที่ 3 เมื่อดำเนินระบบได้ประมาณ 400 วัน ต้องฉีดล้างแผ่นเยื่อด้วยน้ำเปล่าประมาณ 1 ครั้งต่อวัน และล้างด้วยสารละลายผสมอาทิตย์ละครั้ง เพื่อควบคุมค่าฟลักซ์ของระบบให้คงที่

ตารางที่ 4-26 การดำเนินการเพื่อควบคุมฟลักซ์ของระบบในแต่ละการทดลอง

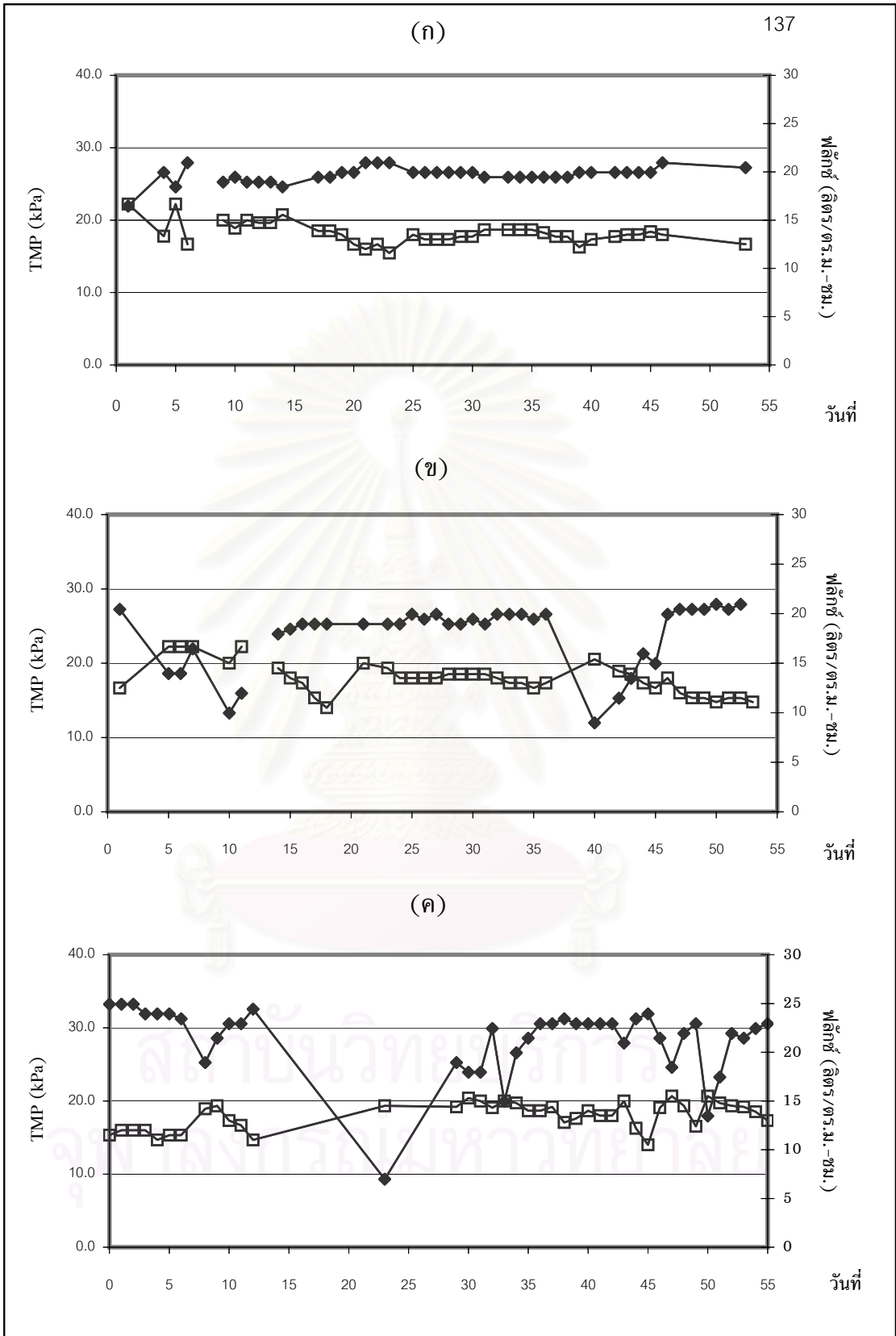
การทดลองที่	Operating time (day)	MLSS <sub>aer</sub> (mg/L.)	J (L/m <sup>2</sup> -hr.)	TMP (kPa)	Chemical wash (ครั้ง)
1	53	4,100	13.65	26.2	2
2	53	4,084	13.34	25.2	2
3	55	4,582	13.55	28.4	7

ค่าฟลักซ์และความดันผ่านแผ่นเยื่อแสดงไว้ในรูปที่ 4-41 ความต้านทานของแผ่นเยื่อที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ เนื่องจากค่าฟลักซ์ในการดำเนินการที่สูงเกินไป

จากการศึกษาของ Choo และ Lee (1996) ได้แบ่งค่าความต้านทานรวม ( $R_t$ ) เป็นความต้านทานเนื่องจากแผ่นเยื่อ ( $R_m$ ) ความต้านทานที่เกิดจากโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) ความต้านทานจากภายนอก ( $R_{cf}$ ) และความต้านทานภายใน ( $R_{if}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4-9

$$R_t = R_m + R_p + R_{cf} + R_{if} \quad (4-14)$$

ซึ่ง  $R_m$  เป็นค่าคงที่ของแผ่นเยื่อ จากการทดลองพบว่า  $R_m$  ของแผ่นเยื่อที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ  $1.44 \times 10^5$  ต่อเมตร ค่า  $R_p$  กับ  $R_{cf}$  สามารถลดลงหรือกำจัดออกได้ด้วยการล้างน้ำประปา



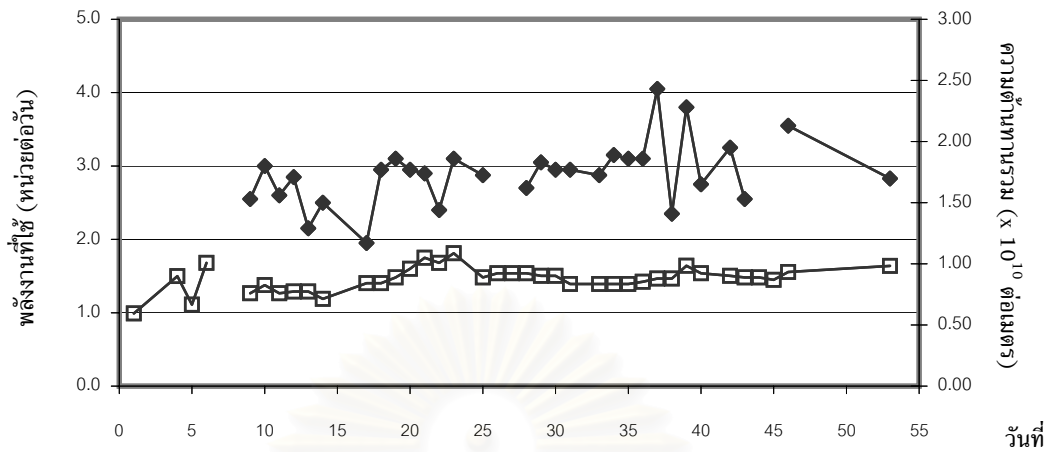
รูปที่ 4-41 ค่าความดันลดผ่านแผ่นเยื่อ และค่าฟลักซ์ตลอดทั้งการทดลอง

(ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3

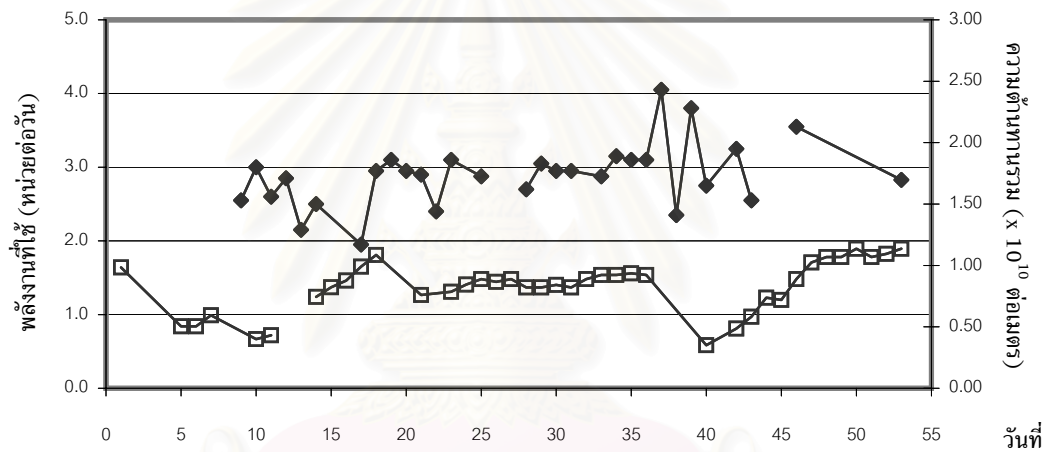


(ก)

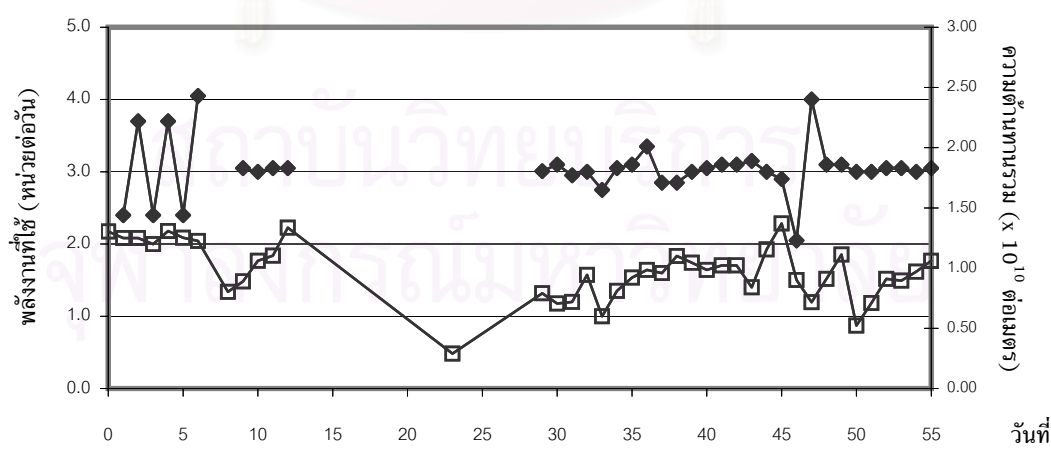
138



(ข)



(ค)



รูปที่ 4-42 ค่าพลังงานที่ใช้ และค่าความต้านทานรวมตลอดทั้งการทดลอง

(ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 2 (ค) การทดลองที่ 3

◆ ENERGY

—ER<sub>i</sub>

ส่วนค่า  $R_{if}$  เป็นความต้านทานภายในหรือความต้านทานถาวรซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้ ก่อนเริ่มการทดลองย่อยจะทำการล้างแผ่นเยื่อด้วยสารเคมี เพื่อให้ความต้านทานรวมเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานรวมของระบบแสดงไว้ในรูปที่ 4-41

สำหรับพลังงานที่ใช้ในระบบได้แก่ พลังงานที่ให้แก่เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ เครื่องสูบน้ำออก เครื่องสูบลมวนเวียนสลัดจ์ เครื่องกวนในส่วนแอนน็อกซิก และส่วนไร้ออกซิเจน เครื่องเติมอากาศ และเครื่องอัดอากาศ ซึ่งตรวจวัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า โดยหน่วยไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ที่ถูกใช้ไปของระบบมีค่าเฉลี่ย 2.90 2.84 และ 3.04 หน่วยไฟฟ้าต่อวันในการทดลองที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 29.92 29.96 และ 31.63 หน่วยไฟฟ้าต่อลิตรของน้ำทิ้งตามลำดับ ในการทดลองที่ 3 พบว่าพลังงานที่ใช้ไปในระบบมีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อที่นานขึ้น จึงเกิดการอุดตันถาวรมากขึ้นด้วย ทำให้ต้องใช้พลังงานในการดูดน้ำทิ้งผ่านแผ่นเยื่อมากขึ้น รวมทั้งความเข้มข้นของจุลชีพในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องสูญเสียพลังงานในการกวนผสมเชื้อจุลชีพในระบบมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในของระบบแสดงไว้ในรูปที่ 4-42

#### 4.12 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบกับระบบบำบัดที่มีอยู่

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดของระบบแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าลงทุน (Investment cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบ (Operation cost) ซึ่งยังเป็นหัวข้อย่อย ๆ ตามตารางที่ 4-27

ตารางที่ 4-27 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดของระบบ A<sup>3</sup>-MBR

หัวข้อที่	รายละเอียด	ค่าใช้จ่าย
1.	ค่าลงทุน (Investment cost)	
1.1	แผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน 0.3 ตารางเมตร	12,500 บาท
1.2	ถังปฏิกรณ์ อะคิลิก 108 ลิตร	5,000 บาท
1.3	กล่องแบ่งน้ำเสีย (DB 1 , DB2 , DB3)	450 บาท
1.4	ถังเก็บน้ำเสีย 90 ลิตร และ 60 ลิตร	300 บาท
1.5	เครื่องกวน (M1 , M2)	1,000 บาท
1.6	เครื่องเติมอากาศ (A1 , A2)	1,500 บาท
1.7	เครื่องอัดอากาศ (AC)	800 บาท
1.8	ชุดควบคุมการทำงาน (Timer Relay 2 ตัว)	1,000 บาท
1.9	อุปกรณ์ประกอบ ท่อ วาล์ว เกจ	600 บาท
1.10	ค่าแรงงานในการติดตั้ง	1,000 บาท
	ราคารวมค่าลงทุน (หัวข้อที่ 1.1 ถึง 1.10)	24,150 บาท

ตารางที่ 4-27 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดของระบบ (ต่อ)

หัวข้อที่	รายละเอียด	ค่าใช้จ่าย
2.	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบ (Operating cost)	
2.1	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินการระบบ (ใช้สำหรับ P1 P2 P3 M1 M2 A1 A2 และ AC)	2,738 บาท/ปี
2.2	ค่ากำจัดสลัดจ์ส่วนเกิน (2.25 ลิตร/วัน ; SRT 40 d.)	246 บาท/ปี
2.3	ค่าซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์	3,000 บาท/ปี
	ราคารวมค่าดำเนินการระบบ (หัวข้อที่ 2.1 ถึง 2.3)	5,984 บาท/ปี

จากตารางที่ 4-27 พบว่าค่าลงทุนของระบบ A<sup>3</sup>-MBR เท่ากับ 24,150 บาท และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบเท่ากับ 5,984 บาทต่อปี ซึ่งประกอบด้วย ค่าไฟฟ้าที่ใช้ ค่ากำจัดสลัดจ์ส่วนเกิน และค่าซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินระบบคิดเป็น 46% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการดำเนินการระบบ ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบได้แก่ เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ เครื่องสูบน้ำออก เครื่องสูบลมเวียนสลัดจ์ เครื่องกวนในส่วนแอนน็อกซิก และส่วนไร้ออกซิเจน เครื่องเติมอากาศ และเครื่องอัดอากาศ ซึ่งตรวจวัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า โดยคิดคำนวณค่าใช้จ่ายจากอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของระบบซึ่งเท่ากับ 3 หน่วยต่อวัน และค่าไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยละ 2.50 บาท จึงเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินการระบบเท่ากับ 2,738 บาทต่อปี (3.0 หน่วยไฟฟ้า/วัน x 365 วันต่อปี x 2.50 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า)

ค่ากำจัดสลัดจ์ส่วนเกินคิดเป็น 4% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการดำเนินการระบบ ซึ่งเป็นข้อดีของระบบ A<sup>3</sup>-MBR ซึ่งมีการระบายสลัดจ์ส่วนเกินออกจากระบบในปริมาณต่ำกว่าระบบเอเอสทั่วไป โดยคิดค่าใช้จ่ายเมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 40 วัน ซึ่งมีอัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินมากที่สุด 2.25 ลิตรต่อวัน และค่าใช้จ่ายที่ให้แก่เทศบาลเพื่อนำไปกำจัดเท่ากับ 300 บาทต่อลบ.ม.สลัดจ์ จึงเป็นค่ากำจัดสลัดจ์ส่วนเกินเท่ากับ 246 บาทต่อปี

ค่าซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ของระบบคิดเป็น 50% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการดำเนินการระบบ ซึ่งในค่าใช้จ่ายส่วนนี้ของระบบเอเอสมีค่าประมาณ 20% (กรมควบคุมมลพิษ ,2538) ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นต้นแบบขนาดทดลอง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายส่วนนี้มีอัตราส่วนที่สูงขึ้น

ข้อกำหนด (Calculation Assumption) ( อริยะ เตกษณานนท์ , 2543)  
 กำลังการผลิตน้ำดี (Q) 35 ลบ.ม./ปี เป็นอัตราเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดลอง  
 อายุการใช้งานเมมเบรน 3 ปี (n.) และอายุการใช้งานของระบบ 15 ปี (N.)  
 อัตราดอกเบี้ยเงินกู้โครงการสิ่งแวดล้อม 8% ต่อปี (i)

ตารางที่ 4-28 ขั้นตอนการคำนวณ และผลการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่าย

ขั้นตอนการคำนวณ	
1. มูลค่าปัจจุบันของแผ่นเยื่อซึ่งเปลี่ยนทุก 3 ปี ตลอดอายุการใช้งาน 15 ปี ( $MF_N$ )	41,517 บาท
2. ต้นทุนสร้าง-ติดตั้ง (ไม่รวมค่าแผ่นเยื่อ) (Inv.)	11,650 บาท
3. มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ ( $OP_N$ )	51,220 บาท
4. เงินลงทุนทั้งหมดของโครงการ (Tinv.)	104,387 บาท
5. ค่าใช้หนี้คืนเงินต้นรวม ( $Tinv_N$ )	12,195 บาท/ปี
6. กำลังการผลิตน้ำดี	35 ลบ.ม./ปี
7. ต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าเสื่อมราคา	171 บาท/ลบ.ม.
8. ต้นทุนการผลิตรวมค่าเสื่อมราคา	348 บาท/ลบ.ม.

#### สูตรการคำนวณ

$$MF_N = 12,500 \times [1 + 1/(1+i)^3 + 1/(1+i)^6 + 1/(1+i)^9 + 1/(1+i)^{12}]$$

$$OP_N = 5,984 \times [(1+i)^N - 1] / [i(1+i)^N]$$

$$Tinv = (Inv. + MF_N + OP_N)$$

$$Tinv_N = Tinv \times [i(1+i)^N / ((1+i)^N - 1)]$$

$$\text{ต้นทุนไม่รวมค่าเสื่อม} = OP / Q$$

$$\text{ต้นทุนรวมค่าเสื่อม} = Tinv_N / Q$$

จากตารางที่ 4-28 พบว่าต้นทุนในการบำบัดเมื่อไม่รวมค่าเสื่อมราคาของระบบ  $A^3$ -MBR เท่ากับ 171 บาทต่อลบ.ม. และต้นทุนในการบำบัดเมื่อรวมค่าเสื่อมราคาเท่ากับ 348 บาทต่อลบ.ม. ซึ่งสูงกว่าระบบของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) ซึ่งทดลองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสทีพัฒนาโดยติดตั้งแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันขนาดพื้นที่ผิวแผ่นเยื่อ 4.0 ตารางเมตรแทนถังตกตะกอน ในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนในน้ำเสีย เมื่อควบคุมระบบเป็นแบบเติมอากาศเป็นพัก ๆ (Intermittent aeration) ที่มีรอบเวลาการเติมอากาศ 120 นาทีต่อรอบการทำงานทั้งหมด 240 นาที และไม่มีการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบ

ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และไนโตรเจนทั้งหมดที่สภาวะคงตัวแฝง เท่ากับ 90% และ 87.6% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ อย่างไรก็ตามระบบของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) นั้นไม่ได้มุ่งเน้นที่จะกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ในขณะที่ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้

ต้นทุนการผลิตรวมค่าเสื่อมราคาเมื่อเดินระบบของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) มีค่าประมาณ 130 บาทต่อลบ.ม. โดยระบบมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้ 93.1 ลบ.ม.ต่อปี ซึ่งสูงกว่าระบบที่ใช้ในการทดลองที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้ 35.0 ลบ.ม.ต่อปี

ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของระบบในการทดลองของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) ที่สูงกว่าในการทดลองนี้ เพราะแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลองของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) นั้นมีพื้นที่ผิวถึง 4.0 ตารางเมตร ซึ่งสูงกว่าในการทดลองนี้ที่มีพื้นที่ผิวแผ่นเยื่อ 0.3 ตารางเมตรมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียต่อหน่วยการบำบัดสูงขึ้นด้วย

นอกจากนี้ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียของระบบที่ใช้ในการทดลอง ที่มีค่าสูงกว่าระบบของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) เพราะระบบที่ใช้ในการทดลองมีการเติมอากาศ และกวนผสมในส่วนแอนน็อกซิกและส่วนไร้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มเติมจากการกำจัดไนโตรเจน ทำให้มีค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดที่สูงขึ้นจาก 4.58 หน่วยไฟฟ้าต่อลบ.ม. ในระบบของ อริยะ เตกษณานนท์ (2543) เป็น 31.28 หน่วยไฟฟ้าต่อลบ.ม.ในการทดลองนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบ A<sup>3</sup>-MBR ซึ่งพัฒนาขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง โดยมีค่าซีโอดีเฉลี่ยตลอดงานวิจัยเท่ากับ 325 มก./ล. ค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยตลอดงานวิจัยเท่ากับ 35.8 มก./ล. และฟอสฟอรัสทั้งหมดเฉลี่ยตลอดงานวิจัยเท่ากับ 7.9 มก./ล. พบว่า

ในการทดลองที่ 1 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 40 วัน และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 25% ต่อ 75% มีอัตราป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 96.5 ลิตรต่อวัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 97.5% มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 95.2% มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 93.4% มีไนโตรเจนในน้ำออก 0.02 มก./ล. มีไนเตรตในน้ำออก 0.65 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 90.5 %

ในการทดลองที่ 2 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 40 วัน และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% มีอัตราป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 92.3 ลิตรต่อวัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 98.2% มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 98.2% มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 96.5% มีไนโตรเจนในน้ำออก 0.02 มก./ล. มีไนเตรตในน้ำออก 0.60 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 90.2 %

ในการทดลองที่ 3 ซึ่งควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบไว้ที่ 80 วัน และอัตราการแบ่งน้ำเสียเข้าส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนไร้ออกซิเจนเท่ากับ 75% ต่อ 25% มีอัตราป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 99.7 ลิตรต่อวัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 98.1% มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 96.7% มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 93.3% มีไนโตรเจนในน้ำออก 0.01 มก./ล. มีไนเตรตในน้ำออก 1.18 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย 83.3%



การกำจัดซีโอดีของระบบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนแอนนออกซิกและส่วนไร้ออกซิเจน เนื่องจากการเก็บสะสม (Storage) ของจุลชีพในระบบทั้งพีเอโอ และจีเอโอ โดยมีดีไนตริไฟเออร์ ซึ่งอยู่ในกลุ่มเซพเทอโรโทรฟเป็นส่วนน้อยมากที่เกิดการสะสม

จากการทดลองพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียและอายุสลัดจ์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ

การกำจัดไนโตรเจนของระบบ พบว่าเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นในส่วนเติมออกซิเจนของระบบเนื่องจากฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ของระบบ (มีขนาดอนุภาคฟล็อกเฉลี่ยของอายุสลัดจ์ 40 วัน และ 80 วัน เท่ากับ 140 และ 190 ไมครอนตามลำดับ จึงเกิดการกำจัดทั้งที่เคเอ็นไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจนในส่วนเติมออกซิเจนขึ้นพร้อมกัน ค่าที่เคเอ็นและไนเตรตที่ออกจากระบบ จึงมีค่าต่ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดจึงมีค่าสูงทุกการทดลอง นอกจากนี้ยังเป็นผลให้ไนเตรตที่เวียนมายังส่วนแอนนออกซิกมีค่าต่ำจนส่วนใหญ่ของส่วนแอนนออกซิกเกิดเป็นสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งส่งผลดีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วย

จากการทดลองพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ขณะที่อายุสลัดจ์มีผลต่อไนเตรตที่เกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจน

การกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบจะต้องใช้แหล่งคาร์บอนมากกว่าที่ควร เนื่องจากเกิดจุลชีพกลุ่มจีเอโอขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามจีเอโอในระบบก็ยังไม่ทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสไม่เกิดขึ้น พีเอโอในระบบทำให้เกิดการคายฟอสฟอรัสในส่วนแอนนออกซิกกับส่วนไร้ออกซิเจน และจับใช้ในส่วนเติมออกซิเจน โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์สำหรับการทดลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 7.6 8.4 และ 10.7% ตามลำดับ และปฏิกิริยาเอสเอ็นดีที่ส่วนเติมออกซิเจนทำให้ไนเตรตที่เวียนมายังส่วนแอนนออกซิกมีค่าต่ำ จึงไม่รบกวนการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ

จากการทดลองพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับอายุสลัดจ์ซึ่งไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเช่นกันเนื่องจากปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ชุมชนของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการพีช พบว่า เบต้าซับคลาสไฟท์โอแบคทีเรีย (Beta subclass proteobacteria) เป็นจุลชีพกลุ่มเด่นในระบบ และ แอลฟาซับคลาสไฟท์โอแบคทีเรีย (Alpha subclass proteobacteria) มีปริมาณรองลงมา นอกจากนี้ยังพบ *nitrosomonas nitrobacter pseudomonas* และพีเอโอในระบบ และคาดว่าแบคทีเรียแบบเส้นใยที่พบในระบบเป็นแบคทีเรียแบบเส้นใย Type 021N

จากการดำเนินระบบด้วยค่าฟลักซ์เฉลี่ย 13.5 ลิตร/ตร.ม.-ชม. มาเป็นเวลา 400 วันพบว่า ต้องล้างแผ่นเยื่อบ่อยขึ้นเพื่อรักษาค่าฟลักซ์ให้คงที่ เนื่องจากการอุดตันชนิดที่ไม่สามารถล้าง

ออกด้วยสารเคมี หรือการอุดตันถาวรที่เกิดขึ้นตลอดการวิจัย โดยสารเคมีที่ใช้ล้างแผ่นเยื่อ เป็นสารเคมีผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 1.2%

จากการคำนวณต้นทุนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบโดยไม่รวมค่าเสื่อมราคามีค่าใช้จ่าย 171 บาทต่อลบ.ม. และหากรวมค่าเสื่อมราคาแล้วมีค่าใช้จ่าย 348 บาทต่อลบ.ม. ที่กำลังการบำบัดน้ำเสีย 35 ลบ.ม./ปี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสที่พัฒนาโดยติดตั้งแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชันแทนถังตกตะกอน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ไนโตรเจนที่ใกล้เคียงกัน แต่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงกว่า ซึ่งก็ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เพราะระบบที่ใช้ในการทดลองมีการเติมอากาศ และกวนผสมในส่วนแอนน็อกซิกและส่วนไร้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มเติมจากการกำจัดไนโตรเจน โดยระบบที่นำมาเปรียบเทียบกับต้นทุนการบำบัดน้ำเสียรวมค่าเสื่อมราคาประมาณ 130 บาทต่อลบ.ม. และมีกำลังกำลังการบำบัดน้ำเสีย 93.1 ลบ.ม./ปี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาการนำระบบ  $A^3$ -MBR ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากตึกสูง ซึ่งจะมีผลกระทบอันเนื่องมาจากความซับซ้อนขององค์ประกอบน้ำเสียที่มีต่อระบบ
2. ศึกษากระบวนการการก่อกำเนิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ในระบบ  $A^3$ -MBR อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นในระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสของระบบมีค่าสูง
3. ศึกษาผลของการลดขนาดของถังปฏิกรณ์  $A^3$ -MBR ทั้งในส่วนแอนน็อกซิก ส่วนไร้ออกซิเจน และส่วนเติมออกซิเจน ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เพื่อประหยัดพื้นที่ที่ใช้ในการบำบัดของระบบ
4. ศึกษาอัตราการสะสมและใช้พีเอชเอและกลัยโคเจนของจุลชีพในระบบ เพื่อคำนวณอัตราส่วนของจีเอโอที่เกิดขึ้นในระบบ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ (2538). แนวทางควบคุมปัญหาน้ำเสียสำหรับองค์กรบริหารท้องถิ่น. เรือนแก้วการพิมพ์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ
- ปรีดา เหล่ารุจิจินดา (2541). ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์ (2543). ผลของเวลากักแอนแอโรบิกและความเข้มข้นสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิดอะโซที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกันโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์ (2538). คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์ (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์ (2541). กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรพล สายพานิช (2539). วิศวกรรมน้ำเสีย. เอกสารประกอบการสอนวิชา 2107614 Design of Wastewater Collection and Treatment plant. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2541). เอกสารการฝึกอบรมทางวิชาการ การออกแบบโรงบำบัดน้ำเสีย.
- อภิรดี ดวงใจ (2543). ผลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ในช่วงเมโสฟิลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริยะ เตกษณานนท์ (2543) การนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีไมโครฟิลเตรชันแบบเบรนนแบบจุ่มตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Baetens, D., Vanrolleghem, P.A., van Loosdrecht, M.C.M., Hosten, L.H. (1999). Temperature effects in bio-p removal., Wat. Sci. Tech. Vol. 39, No. 1: 215 – 225.
- Bitton, G. (1994). Wastewater microbiology., Wiley-Liss, New York.
- Bond, P. L., Keller, J., Blackall, L. L. (1999). Bio-p nad non-bio-p bacteria identification by a novel microbial approach., Wat. Sci. Tech. Vol. 6 : 13 – 20.
- Brindle, K. and Stephenson, T. (1995). Mini-review the application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters., Biotechnology and Bioengineering. Vol. 49, No. 6: 601 – 610.
- Carlsson, H., Aspegren, H. and Hilmer, A. (1996). Interactions between wastewater quality and phosphorus release in the anaerobic reactor of the EBPR process., Water Research. Vol. 30, No. 6: 1517 – 1527.
- Choo, K-.H. and Lee, C-.H. (1996). Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor., Water Research. Vol. 30, No. 8: 1771 – 1780.
- Choo, K-.H. and Stensel, H. D. (2000). Sequencing batch membrane reactor treatment: nitrogen removal and membrane fouling evaluation., Water. Environ. Res. Vol. 72, No. 4: 490 – 498.
- Chuang, S-.H., Ouyang, C-.F., Wang, Y-.B. (1996). Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition., Water Research. Vol. 30, No. 12: 2961 – 2968.
- Comeau, Y., Rabinowitz, B., Hall, K.J. and Oldham, W.K. (1987). Phosphate release and uptake in enhanced biological phosphorus removal for wastewater., JWPCE. Vol. 59, No. 7: 707 – 715.
- Crocetti, G. R., Hugenholtz, P., Bond, P. L., Schuler, A., Keller, J., Jenkins, D., Blackall, L. L. (2000). Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA -directed probes for their detection and quantitation., Appl. Environ. Microbiol. Vol 66, No. 3: 1175 – 1182.
- Daigger, G.T. and Littleton, H.X. (2000). Characterization of simultaneous nutrient removal in staged,closed-loop bioreactors., Water. Environ. Res. Vol. 72, No. 3: 330 – 339.

- Defrance, L., Jaffin, M.Y., Gupta, B., Paullier, P. and Geaugey, U. (2000). Contribution of various constituents of activated sludge to membrane bioreactor fouling., Bioresource Technology. Vol. 73: 105 – 112.
- Dionisi, D., Majone, M., Ramadori, R., Beccari, M. (2001). The storage of acetate under anoxic conditions., Water Research. Vol. 35, No. 11: 2661 – 2668.
- Droste, R.L. (1997). Theory and practice of water and wastewater treatment., John Wiley & Sons, Inc.
- Du Preez, J.C. and Toerien, D.F. (1978). The effect of temperature on the growth of *Acinetobacter Calcoaceticus*., Water SA Vol. 4, 10 – 13.
- Eckenfelder, W. W. Jr. (2000). Industrial water pollution control., 3<sup>rd</sup> edition., McGraw-Hill. New York.
- Fan, X-J., Urbain, V., Qian, Y. and Manem, J. (2000). Ultrafiltration of activated sludge with ceramic membranes in a cross-flow process., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No. 10-11: 243 – 250.
- Gander, M.A., Jefferson, B. and Judd, S.J. (2000). Membrane bioreactors for use in small wastewater treatment plants : membrane materials and effluent quality., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No.1:205 – 211.
- Grady, C.P.L., Jr. and Lim, H.C. (1980). Biological wastewater treatment: Theory and application., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y.
- Grady, C.P.L., Jr., Daigger, G.T. and Lim, H.C. (1999). Biological wastewater treatment. 2<sup>nd</sup> edition., Revised and expanded., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y.
- Gunder, B. and Krauth, K. (1999). Replacement of secondary clarification by membrane separation results with tubular, plate and hollow fiber modules., Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No. 4-5:311 – 320.
- Helmer, C. and Kunst, S. (1998). Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants., Wat. Sci. Tech. Vol. 37, No. 4-5:531 – 539.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J.C. and Arvin, E. (1996). Wastewater treatment: biological and chemical processes., Springer- Verlag, Berlin.
- Jardin, N. and Popel, H.J. (1996a). Influence of the enhanced biological phosphorus removal on the waste activated sludge production., Wat. Sci. Tech. Vol. 34, No. 1-2:17 – 23.
- Jardin, N. and Popel, H.J. (1996b). Behavior of waste activated sludge from enhanced biological phosphorus removal during sludge treatment., Water. Environ. Res. Vol. 68, No. 6:965 – 973.

- Jefferson, B., Laine, A.L., Judd, S.J. and Stephenson, T. (2000). Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No.1: 197 – 204.
- Juni, E. (1978). Genetics and physiology of *Acinetobacter*., Ann. Rev. Microbiol. Vol 32, 349 – 371.
- Kolega, M., Grohmann, G.S., Chiew, R.F. and Day, A.W. (1991). Disinfection and clarification of treated sewage by advanced microfiltration., Wat. Sci. Tech. Vol. 23 :1609 – 1618.
- Kuba, T., Wachtmeister, A., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1994). Effect of nitrate on phosphorus release in biological phosphorus removal systems., Wat. Sci. Tech. Vol. 30, No. 6:263 – 269.
- Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1996). Effect of cyclic oxygen exposure on activity of denitrifying phosphorus removal bacteria., Wat. Sci. Tech. Vol. 34, No. 1-2\_:33 – 40.
- LaMotta, E. J. (1976). Internal diffusion and reaction in biological films., Envi. Sci. Tech. Vol. 10, No. 8: 765–769.
- Lee, T. J., Kawaharasaki, M., Matsumura, M., Nakamura, K. (2002). Microbial community structures of activated sludges dominated with polyphosphate accumulating bacteria and glycogen accumulating bacteria., Environ. Tech. Vol 23 : 747 – 755.
- Li, L. (1988). Nitrogen and phosphorus removal in intermittent activated sludge process., AIT Master Thesis, Bangkok, Thailand.
- Lie, E. and Welander, T. (1994). Influence of DO and oxidation–reduction potential on denitrification rate of activated sludge., Wat. Sci. Tech. Vol. 30, No. 6: 91 – 100.
- Liu, W.-T., Mino, T., Matsuo, T. and Nakamura, K. (1996). Biological phosphorus removal processes effect of pH on anaerobic substrate metabolism., Wat. Sci. Tech. Vol. 34, No. 1-2: 25 – 32.
- Luxmy, B.S., Nakajima, F. and Yamamoto, K. (2000). Analysis of bacterial community in membrane separation bioreactors by fluorescent *in situ* hybridization (FISH) and denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) techniques., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No. 10-11: 259 – 268.

- Magara, Y. and Itoh, M. (1991). The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultra-membrane filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants., Wat. Sci. Tech. Vol. 23 : 1583 – 1590.
- Mamais, D. and Jenkins, D. (1992). The effects of MCRT and temperature on enhanced biological phosphorus removal., Wat. Sci. Tech. Vol. 26, No. 5-6: 955 – 965.
- McCarty, P.L., Beck, L. and Amant, P.St. (1969). Biological denitrification of wastewater by addition of organic materials., Proceedings of the 24<sup>th</sup> Purdue Ind. Waste Conf., Purdue University, Lafayette, Ind.
- Meinhold, J., Pedersen, H., Arnold, E., Isaacs, S. and Henze, M. (1998). Effect of continuous addition of an organic substrate to the anoxic phase on biological phosphorus removal., Wat. Sci. Tech. Vol. 38, No. 1: 97 – 105.
- Messalam, R., Brenner, A., Shandalov, S., Leroux, Y., Uzlaner, P., Oron, G. and Wolf, D. (2000). Pilot study of sequencing batch reactor biological treatment and microfiltration for reclamation and reuse of municipal wastewater., Wat. Sci. Tech. Vol. 42, No. 1-2: 263 – 268.
- Metcalf and Eddy (2002). Wastewater engineering: Treatment and reuse, 4<sup>th</sup> edition., McGraw-Hill.
- Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1998). Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process., Water Research. Vol. 32, No. 11: 3193 – 3207.
- Muller, J. A., Boyle, W. C., Lightfoot, E. N. (1966). Oxygen diffusion through a pure culture floc of zoogloea ramigera., Proceedings of the 21<sup>st</sup> Purdue Ind. Waste Conf., Purdue University, Lafayette, Ind.: 964
- Painter, H.A. and Loveless, J.E. (1983). Effect of temperature and pH on the growth rate constants of nitrifying bacteria in the activated sludge process., Wat. Sci. Tech. Vol. 17: 237 – 248.
- Pliankarom, S. (1996). Application of the air blackflushing technique in a membrane bioreactor for septic wastewater treatment., AIT Master Thesis, Bangkok, Thailand.
- Pochana, K. and Keller, J. (1999). Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND)., Wat. Sci. Tech. Vol. 39, No. 6: 61 – 68.
- Poecella, D.B. and Bishop, A.B. (1975). Comprehensive management of phosphorus water pollution., Ann Arbor Science, Ann Arbor.

- Randall, C.W., Barnard, J.L. and Stensel, H.D. (1992). Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal., Water Quality Management Library, Vol. 5, Technomic Publishing CO., Lancaster, PA.
- Randall, C.W. and Chapin, R.W. (1997). Acetic acid inhibition of biological phosphorus removal., Water. Environ. Res. Vol. 69, No. 5: 955 – 960.
- Satoh, H., Ramey, W.D., Koch, F.A., Oldham, W.K., Mino, T. and Matsuo, T. (1996). Anaerobic substrate uptake by the enhanced biological phosphorus removal activated sludge treating real sewage., Wat. Sci. Tech. Vol. 34, No. 1-2: 9 – 16.
- Schnoor, J.L. (1996). Environmental modeling fate and transports in water, air, and soil., John Wiley & Sons.
- Sedlek, R.L. (1991). Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater : principle and practice., The Soap and Detergent Association.
- Seo, G.T., Lee, T.S., Moon, B.H., Lim, J.H. and Lee, K.S. (2000). Two stage intermittent aeration membrane bioreactor for simultaneous organic nitrogen and phosphorus removal., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No. 10-11: 217 – 225.
- Seviour, R.J. and Blackall, L.L. (1999). The microbiology of activated sludge., Kluwer Academic Publishers.
- Smith, C.V., Jr., Di Gregorio, D. and Talcott, R.M. (1969). The use of ultrafiltration membrane for activated sludge separation., Proceedings of the 24<sup>th</sup> Purdue Ind. Waste Conf., Purdue University, Lafayette, Ind.
- Stevens, G.M., Barnard, J.L. and Rabinowitz, B. (1999). Optimizing biological nutrient removal in anoxic zones., Wat. Sci. Tech. Vol. 39, No. 6: 113 – 118.
- Talat, M. (1988). Application of direct membrane separation to activated sludge., AIT Master Thesis, Bangkok, Thailand.
- Tam, N.F.Y., Leung, G.L.W. and Wong, Y.S. (1994). The effects of external carbon loading on nitrogen removal in sequencing batch reactors., Wat. Sci. Tech. Vol. 30, No. 6: 73 – 81.
- Ueda, T. and Hata, K. (1999). Domestic wastewater treatment by a submerged membrane bioreactor with gravitation filtration., Water Research. Vol. 33, No. 12: 2888 – 2892.
- Van Loosdrecht, M. C. M., Pot, M. A., Heijnen, J. J. (1997). Importance of bacterial storage polymers in bioprocesses., Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 1: 41 – 47.



- Wagner, J. and Rosenwinkel, K.H. (2000). Sludge production in membrane bioreactor under different conditions., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No. 10-11: 251 – 258.
- WEF. (1998). Biological and chemical systems for nutrient removal., special publication, U.S.A.
- WEF and ASCE. (1992). Integrated biological processes for nutrient control. Design of municipal wastewater treatment plants volume II, U.S.A. : Book Press.
- Yamamoto, K., Hiasa, H., Talat, M. and Matsuo, T. (1989). Direct solid liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank., Wat. Sci. Tech. Vol. 21:43 – 54.
- Yoon, S-.H., Kim, H-.S., Park, J-.K., Kim, H. and Sung, J-.Y. (2000). Influence of important operational parameters on performance of a membrane bioreactor., Wat. Sci. Tech. Vol. 41, No. 10-11: 235 – 242.
- Zhang, B., Yamamoto, K., Ohgaki, S., Kamiko, N. (1997). Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation., Wat. Sci. Tech. Vol. 35, No. 6: 37 – 44.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลพารามิเตอร์ในงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ค่า MLSS และ MLVSS ของชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ลำดับวัน	ส่วนแอนนออกซิก			ส่วนไร้ออกซิเจน			ส่วนเติมออกซิเจน		
		MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS
18-Feb-45	5	4,365	3,305	0.76	4,335	3,315	0.76	4,800	3,630	0.76
20-Feb-45	7	3,505	2,690	0.77	3,195	2,480	0.78	3,945	2,965	0.75
22-Feb-45	9	4,060	2,990	0.74	3,605	2,705	0.75	4,235	3,000	0.71
25-Feb-45	12	3,895	2,945	0.76	3,390	2,580	0.76	4,075	3,075	0.75
02-Mar-45	17	3,405	2,620	0.77	3,345	2,525	0.75	3,805	2,885	0.76
04-Mar-45	19	3,560	2,715	0.76	3,365	2,555	0.76	3,945	3,030	0.77
06-Mar-45	21	3,580	2,740	0.77	3,350	2,510	0.75	3,715	2,880	0.78
08-Mar-45	23	4,200	3,105	0.74	3,680	2,765	0.75	4,140	3,070	0.74
11-Mar-45	26	3,970	2,805	0.71	3,530	2,585	0.73	4,000	2,930	0.73
13-Mar-45	28	3,380	2,555	0.76	3,415	2,560	0.75	4,185	3,070	0.73
19-Mar-45	34	3,585	2,640	0.74	3,220	2,480	0.77	4,335	3,245	0.75
21-Mar-45	36	3,100	2,335	0.75	3,005	2,295	0.76	4,585	3,485	0.76
23-Mar-45	38	3,380	2,535	0.75	3,495	2,660	0.76	4,625	3,395	0.73
25-Mar-45	40	3,675	2,805	0.76	3,395	2,515	0.74	4,100	3,185	0.78
27-Mar-45	42	3,730	2,790	0.75	3,535	2,420	0.68	3,740	2,805	0.75
29-Mar-45	44	3,255	2,715	0.83	3,245	2,395	0.74	3,130	2,325	0.74
จำนวน*		7	7	7	7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		3,444	2,625	0.76	3,330	2,475	0.74	4,100	3,073	0.75
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		230	166	0.03	185	119	0.03	523	397	0.02
ค่าต่ำที่สุด		3,100	2,335	0.74	3,005	2,295	0.68	3,130	2,325	0.73
ค่าสูงที่สุด		3,730	2,805	0.83	3,535	2,660	0.77	4,625	3,485	0.78

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

ตารางที่ ก-2 ค่าซีไอดีของชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ลำดับวัน	ซีไอดี (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
18-Feb-45	5	334	23	27	4	4	98.8
20-Feb-45	7	302	16	24	18	14	95.3
22-Feb-45	9	298	19	15	15	14	95.2
25-Feb-45	12	313	39	42	22	22	92.9
02-Mar-45	17	300	21	14	12	2	99.3
04-Mar-45	19	311	25	18	18	10	96.8
06-Mar-45	21	294	18	13	16	10	96.6
08-Mar-45	23	293	15	13	15	3	98.9
11-Mar-45	26	282	37	19	26	11	96.2
13-Mar-45	28	330	9	11	13	2	99.3
19-Mar-45	34	325	19	10	23	2	99.4
21-Mar-45	36	329	28	32	36	17	94.8
23-Mar-45	38	326	25	27	13	4	98.7
25-Mar-45	40	328	34	30	34	14	95.7
27-Mar-45	42	328	37	37	33	9	97.4
29-Mar-45	44	323	34	38	34	8	97.4
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		327	27	27	27	8	97.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		2.3	10.1	11.5	10.3	5.8	1.8
ค่าต่ำที่สุด		323	9	10	13	2	94.8
ค่าสูงที่สุด		330	37	38	36	17	99.4

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

156

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแวนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-3 ค่าฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 1

157

วันที่	ลำดับวัน	ฟอสฟอรัส (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
18-Feb-45	5	7.1	23.0	42.7	0.2	0.2	97.8
20-Feb-45	7	6.9	20.9	23.2	0.4	0.3	95.3
22-Feb-45	9	7.0	6.0	5.2	0.6	0.9	86.8
25-Feb-45	12	7.7	10.0	7.0	0.2	0.7	91.3
02-Mar-45	17	10.2	13.8	13.9	8.6	10.0	1.6
04-Mar-45	19	8.5	9.2	7.4	3.3	0.8	90.6
06-Mar-45	21	6.4	3.2	1.4	0.7	0.0	100.0
08-Mar-45	23	7.3	4.2	3.2	1.0	0.5	92.9
11-Mar-45	26	8.3	6.5	6.1	0.1	0.0	100.0
13-Mar-45	28	10.5	19.3	16.1	1.7	0.8	92.0
19-Mar-45	34	7.0	23.2	20.9	0.1	0.0	100.0
21-Mar-45	36	8.4	31.0	33.8	2.3	0.5	93.8
23-Mar-45	38	8.1	14.4	13.1	1.4	0.3	96.1
25-Mar-45	40	7.4	13.9	13.1	3.2	1.0	86.9
27-Mar-45	42	7.9	6.8	4.9	2.7	1.5	81.7
29-Mar-45	44	7.9	9.2	9.1	3.2	1.4	82.8
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		8.2	16.8	15.9	2.1	0.8	90.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		1.12	8.36	9.38	1.12	0.53	6.9
ค่าต่ำที่สุด		7.0	6.8	4.9	0.1	0.0	81.7
ค่าสูงที่สุด		10.5	31.0	33.8	3.2	1.5	100.0

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนน็อกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-4 ค่าที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1

158

วันที่	ลำดับวัน	ที่เคเอ็น (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
20-Feb-45	7	32.9	6.0	7.4	0.9	0.9	97.4
22-Feb-45	9	32.6	5.1	6.5	2.0	2.0	93.9
25-Feb-45	12	35.2	9.6	7.4	4.8	4.5	87.1
02-Mar-45	17	34.6	7.4	6.8	3.4	2.3	93.4
04-Mar-45	19	35.2	4.5	5.1	2.8	1.7	95.2
06-Mar-45	21	34.6	3.4	3.4	3.1	2.3	93.4
08-Mar-45	23	34.6	2.8	3.1	1.4	1.7	95.1
11-Mar-45	26	35.7	6.8	9.6	2.3	1.7	95.2
13-Mar-45	28	34.3	7.1	6.5	2.3	1.7	95.0
19-Mar-45	34	34.0	6.5	7.1	2.3	1.7	95.0
21-Mar-45	36	36.7	7.9	9.6	2.3	1.7	95.3
23-Mar-45	38	34.9	7.9	7.0	2.9	1.8	95.0
25-Mar-45	40	35.6	7.3	7.9	3.2	1.5	95.9
27-Mar-45	42	36.7	7.6	7.6	4.1	1.8	95.2
29-Mar-45	44	35.6	7.3	7.6	2.9	1.8	95.1
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		35.4	7.4	7.6	2.9	1.7	95.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		1.08	0.48	0.99	0.66	0.10	0.3
ค่าต่ำที่สุด		34.0	6.5	6.5	2.3	1.5	95.0
ค่าสูงที่สุด		36.7	7.9	9.6	4.1	1.8	95.9

\* จำนวนเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 1

159

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
20-Feb-45	7	32.9	6.0	7.4	1.3	1.3	95.9
22-Feb-45	9	32.6	5.1	6.6	2.2	2.2	93.1
25-Feb-45	12	35.2	9.8	7.5	5.1	4.8	86.3
02-Mar-45	17	34.6	7.5	7.0	3.9	2.8	91.9
04-Mar-45	19	35.2	4.8	5.5	3.3	2.1	94.0
06-Mar-45	21	34.6	3.4	3.5	3.2	2.4	93.2
08-Mar-45	23	34.6	2.9	3.2	1.6	1.8	94.7
11-Mar-45	26	35.9	6.8	9.7	2.5	1.9	94.8
13-Mar-45	28	34.3	7.1	6.6	2.9	2.4	92.9
19-Mar-45	34	34.1	6.7	7.2	3.0	2.5	92.7
21-Mar-45	36	36.8	8.0	9.7	3.0	2.6	93.0
23-Mar-45	38	35.0	8.0	7.1	3.6	2.5	93.0
25-Mar-45	40	35.7	7.5	8.1	3.8	2.1	94.0
27-Mar-45	42	36.9	7.8	7.9	4.5	2.2	93.9
29-Mar-45	44	35.7	7.4	7.7	3.3	2.1	94.0
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		35.5	7.5	7.7	3.5	2.4	93.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		1.12	0.49	1.01	0.59	0.18	0.60
ค่าต่ำที่สุด		34.1	6.7	6.6	2.9	2.1	92.7
ค่าสูงที่สุด		36.9	8.0	9.7	4.5	2.6	94.0

\* จำนวนเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแวนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-6 ค่าไนเตรตของชุดการทดลองที่ 1

160

วันที่	ลำดับวัน	ไนเตรต (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
18-Feb-45	5	0.023	0.017	0.023	0.533	0.438
20-Feb-45	7		0.020	0.031	0.489	0.494
22-Feb-45	9		0.019	0.015	0.244	0.260
25-Feb-45	12	0.073	0.073	0.042	0.292	0.303
02-Mar-45	17		0.083	0.137	0.514	0.525
04-Mar-45	19	0.045	0.045	0.047	0.420	0.412
06-Mar-45	21		0.017	0.043	0.113	0.095
08-Mar-45	23		0.036	0.066	0.129	0.116
11-Mar-45	26	0.051	0.017	0.028	0.187	0.169
13-Mar-45	28		0.012	0.028	0.619	0.652
19-Mar-45	34	0.096	0.126	0.073	0.711	0.789
21-Mar-45	36	0.094	0.096	0.080	0.662	0.865
23-Mar-45	38	0.067	0.101	0.096	0.683	0.704
25-Mar-45	40	0.145	0.157	0.139	0.586	0.642
27-Mar-45	42	0.168	0.168	0.247	0.456	0.486
29-Mar-45	44	0.115	0.131	0.071	0.366	0.378
จำนวน*		6	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.11	0.11	0.10	0.58	0.65
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.04	0.05	0.07	0.13	0.17
ค่าต่ำที่สุด		0.07	0.01	0.03	0.37	0.38
ค่าสูงที่สุด		0.17	0.17	0.25	0.71	0.87

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-7 ค่าไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1

161

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรเจน (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
18-Feb-45	5	0.005	0.048	0.038	0.061	0.010
20-Feb-45	7		0.016	0.021	0.006	0.003
22-Feb-45	9		0.021	0.072	0.003	0.002
25-Feb-45	12	0.017	0.072	0.053	0.011	0.007
02-Mar-45	17		0.056	0.080	0.009	0.014
04-Mar-45	19	0.010	0.226	0.365	0.017	0.008
06-Mar-45	21		0.017	0.012	0.004	0.001
08-Mar-45	23		0.011	0.013	0.008	0.004
11-Mar-45	26	0.080	0.013	0.018	0.008	0.005
13-Mar-45	28		0.008	0.016	0.031	0.068
19-Mar-45	34	0.011	0.016	0.018	0.027	0.018
21-Mar-45	36	0.007	0.011	0.008	0.016	0.020
23-Mar-45	38	0.006	0.034	0.048	0.036	0.007
25-Mar-45	40	0.014	0.063	0.069	0.058	0.038
27-Mar-45	42	0.009	0.028	0.051	0.013	0.007
29-Mar-45	44	0.016	0.021	0.021	0.019	0.004
จำนวน*		6	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.01	0.03	0.03	0.03	0.02
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
ค่าต่ำที่สุด		0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
ค่าสูงที่สุด		0.02	0.06	0.07	0.06	0.07

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 13 มีนาคม - 29 มีนาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอมโมเนีย ; ANA = ส่วนไนโตรเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-8 ค่าของแข็งแวนลอยของชุดการทดลองที่ 1

162

วันที่	ลำดับวัน	ของแข็งแวนลอย (มก./ล.)	
		INF	EFF
18-Feb-45	5	95	0
25-Feb-45	12	86	0
04-Mar-45	19	82	0
11-Mar-45	26	98	0
19-Mar-45	34	75	0
25-Mar-45	40	62	0
จำนวน		6	6
ค่าเฉลี่ย		83.0	0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		13.30	0
ค่าต่ำที่สุด		62.0	0
ค่าสูงที่สุด		98.0	0

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-9 ค่าสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 1

163

วันที่	ลำดับวัน	สภาพต่าง (มก.หินปูน/ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
19-Feb-45	6	136	175	153	87
25-Feb-45	12	144	162	172	79
06-Mar-45	21	170	154	167	81
14-Mar-45	29	152	177	180	89
19-Mar-45	34	141	160	155	92
26-Mar-45	41	134	180	158	80
จำนวน		6	6	6	6
ค่าเฉลี่ย		146	168	164	85
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		13	11	11	5
ค่าต่ำที่สุด		134	154	153	79
ค่าสูงที่สุด		170	180	180	92

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของชุดการทดลองที่ 1

164

วันที่	ลำดับวัน	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
19-Feb-45	6	106	28	35	20
25-Feb-45	12	120	20	36	23
06-Mar-45	21	145	29	26	21
14-Mar-45	29	136	33	36	19
19-Mar-45	34	141	42	36	26
26-Mar-45	41	134	34	27	25
จำนวน		6	6	6	6
ค่าเฉลี่ย		130	31	33	22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		15	7	5	3
ค่าต่ำที่สุด		106	20	26	19
ค่าสูงที่สุด		145	42	36	26

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 1

165

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
14-Feb-45	1	6.48	7.23	7.19	7.51	7.60
17-Feb-45	4	5.48	7.49	7.46	7.72	7.77
18-Feb-45	5	5.44	7.36	7.34	7.74	7.78
19-Feb-45	6	5.67	7.37	7.36	7.81	7.90
20-Feb-45	7	5.83	7.37	7.34	7.70	7.76
21-Feb-45	8	6.05	7.63	7.56	7.89	8.02
22-Feb-45	9	5.61	7.40	7.50	7.79	7.79
23-Feb-45	10	5.72	7.34	7.46	7.70	7.79
24-Feb-45	11	5.67	7.52	7.45	7.89	7.90
25-Feb-45	12	5.52	7.43	7.46	7.53	7.64
26-Feb-45	13	5.59	7.54	7.61	7.82	7.71
27-Feb-45	14	5.05	7.48	7.49	7.71	7.63
02-Mar-45	17	5.46	7.40	7.40	7.41	7.44
03-Mar-45	18	5.41	7.30	7.31	7.43	7.53
04-Mar-45	19	5.50	7.22	7.20	7.31	7.45
05-Mar-45	20	5.31	7.29	7.30	7.41	7.49
06-Mar-45	21	5.42	7.13	7.21	7.47	7.53
07-Mar-45	22	5.42	7.12	7.20	7.37	7.52
08-Mar-45	23	5.53	7.21	7.25	7.42	7.53
10-Mar-45	25	5.20	7.00	7.02	7.27	7.46
11-Mar-45	26	5.27	7.12	7.13	7.31	7.60
12-Mar-45	27	5.39	7.09	6.98	7.37	7.67
13-Mar-45	28	5.41	7.06	7.10	7.25	7.44
14-Mar-45	29	5.32	7.12	7.16	7.31	7.52
15-Mar-45	30	5.69	7.14	7.16	7.20	7.40
16-Mar-45	31	5.86	6.95	6.99	7.24	7.35
18-Mar-45	33	5.89	7.05	7.06	7.18	7.44
19-Mar-45	34	5.82	7.07	7.06	7.36	7.45
20-Mar-45	35	5.83	6.96	6.61	7.17	7.46
21-Mar-45	36	5.18	6.85	6.86	7.26	7.52
22-Mar-45	37	5.75	7.02	7.02	7.30	7.42
23-Mar-45	38	5.56	7.15	7.12	7.39	7.49
24-Mar-45	39	5.23	7.25	7.17	7.52	7.55

ตารางที่ ก-11 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 1 (ต่อ)

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
25-Mar-45	40	5.26	7.04	7.03	7.37	7.38
27-Mar-45	42	5.29	7.60	7.27	7.47	7.00
28-Mar-45	43	5.21	6.94	6.92	7.21	7.32
29-Mar-45	44	5.50	6.98	6.96	7.42	7.42
30-Mar-45	45	5.33	7.21	7.23	7.37	7.49
31-Mar-45	46	5.48	6.89	6.83	7.17	7.39
07-Apr-45	53	5.69	6.90	6.95	7.38	7.51
จำนวน		40	40	40	40	40
ค่าเฉลี่ย		5.53	7.21	7.19	7.45	7.55
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.27	0.18	0.17	0.11	0.13
ค่าต่ำที่สุด		5.18	6.85	6.61	7.17	7.00
ค่าสูงที่สุด		6.48	7.63	7.61	7.89	8.02

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-12 ค่าอณุมิของชุดการทดลองที่ 1

167

วันที่	ลำดับวัน	อณุมิ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
14-Feb-45	1	29.3	29.4	29.2	29.0	28.9
17-Feb-45	4	29.5	29.4	29.6	29.7	29.6
18-Feb-45	5	29.0	29.5	29.5	29.5	28.7
19-Feb-45	6	30.1	30.1	30.0	30.2	29.8
20-Feb-45	7	29.5	29.6	29.6	29.6	29.5
21-Feb-45	8	29.9	29.8	30.0	30.0	29.8
22-Feb-45	9	29.3	29.4	29.4	29.4	29.0
23-Feb-45	10	29.7	29.9	29.9	29.9	29.7
24-Feb-45	11	29.9	30.1	30.0	30.1	29.5
25-Feb-45	12	29.8	29.8	29.8	29.8	29.7
26-Feb-45	13	29.2	29.3	29.3	29.3	28.7
27-Feb-45	14	30.0	29.9	29.9	29.9	29.7
02-Mar-45	17	29.5	29.6	29.6	29.6	29.4
03-Mar-45	18	29.9	30.1	30.0	30.1	29.8
04-Mar-45	19	27.4	28.8	28.8	28.8	27.0
05-Mar-45	20	29.9	29.9	29.9	29.9	29.8
06-Mar-45	21	29.6	29.7	29.7	29.7	29.4
07-Mar-45	22	28.1	28.2	28.2	28.3	27.8
08-Mar-45	23	26.0	26.3	26.3	26.3	25.9
10-Mar-45	25	25.8	26.6	26.6	26.6	26.0
11-Mar-45	26	28.8	28.9	28.9	28.9	28.6
12-Mar-45	27	29.4	29.3	29.3	29.5	29.2
13-Mar-45	28	29.5	29.5	29.5	29.6	29.3
14-Mar-45	29	29.5	29.6	29.5	29.6	29.6
15-Mar-45	30	29.9	29.9	29.9	29.9	29.6
16-Mar-45	31	30.1	30.2	30.2	30.2	30.0
18-Mar-45	33	30.1	30.0	30.0	30.1	29.9
19-Mar-45	34	29.8	30.0	30.0	30.0	29.4
20-Mar-45	35	31.2	30.9	30.8	31.1	31.0
21-Mar-45	36	30.4	30.3	30.4	30.5	29.9
22-Mar-45	37	30.4	30.4	30.5	30.4	30.4
23-Mar-45	38	30.2	30.1	30.2	30.3	29.9
24-Mar-45	39	29.6	29.7	29.7	29.6	29.3



ตารางที่ ก-12 ค่าอนุมัติของชุดการทดลองที่ 1 (ต่อ)

168

วันที่	ลำดับวัน	อนุมัติ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
25-Mar-45	40	30.4	30.4	30.5	30.5	29.9
27-Mar-45	42	30.7	30.7	30.6	30.7	30.4
28-Mar-45	43	31.0	31.0	31.0	31.1	30.6
29-Mar-45	44	30.7	30.9	30.9	30.9	30.5
30-Mar-45	45	30.6	30.7	30.7	30.7	30.3
31-Mar-45	46	30.7	31.0	31.0	31.0	30.7
07-Apr-45	53	30.8	30.8	30.8	30.8	30.5
จำนวน		40	40	40	40	40
ค่าเฉลี่ย		29.6	29.7	29.7	29.8	29.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.13	0.43	0.41	0.45	0.48
ค่าต่ำที่สุด		29.6	29.7	29.7	29.6	29.3
ค่าสูงที่สุด		31.2	31.0	31.0	31.1	31.0

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-13 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 1

169

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
14-Feb-45	1	0.10	0.10	6.00
17-Feb-45	4	0.10	0.10	6.00
18-Feb-45	5	0.20	0.20	5.80
19-Feb-45	6	0.15	0.15	6.00
20-Feb-45	7	0.15	0.15	6.00
21-Feb-45	8	0.10	0.10	6.00
22-Feb-45	9	0.15	0.15	5.80
23-Feb-45	10	0.15	0.15	5.80
24-Feb-45	11	0.15	0.15	5.80
25-Feb-45	12	0.15	0.15	5.50
26-Feb-45	13	0.15	0.15	5.60
27-Feb-45	14	0.15	0.15	5.50
02-Mar-45	17	0.15	0.15	5.50
03-Mar-45	18	0.15	0.15	5.50
04-Mar-45	19	0.15	0.15	5.30
05-Mar-45	20	0.12	0.15	5.30
06-Mar-45	21	0.15	0.15	5.30
07-Mar-45	22	0.15	0.15	5.30
08-Mar-45	23	0.15	0.15	6.00
10-Mar-45	25	0.15	0.15	6.00
11-Mar-45	26	0.15	0.15	5.00
12-Mar-45	27	0.50	0.15	5.00
13-Mar-45	28	0.15	0.15	4.40
14-Mar-45	29	0.15	0.15	4.50
15-Mar-45	30	0.15	0.15	3.00
16-Mar-45	31	0.15	0.15	4.50
18-Mar-45	33	0.15	0.15	4.50
19-Mar-45	34	0.15	0.15	4.80
20-Mar-45	35	0.15	0.15	4.50

ตารางที่ ก-13 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 1 (ต่อ)

170

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
21-Mar-45	36	0.15	0.15	4.30
22-Mar-45	37	0.15	0.15	4.50
23-Mar-45	38	0.15	0.15	4.50
25-Mar-45	40	0.15	0.15	4.50
27-Mar-45	42	0.15	0.15	5.00
28-Mar-45	43	0.15	0.15	5.00
29-Mar-45	44	0.15	0.15	5.20
30-Mar-45	45	0.15	0.15	5.30
31-Mar-45	46	0.15	0.15	5.20
07-Apr-45	53	0.15	0.15	4.50
จำนวน		39	39	39
ค่าเฉลี่ย		0.16	0.15	5.18
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.06	0.02	0.67
ค่าต่ำที่สุด		0.10	0.10	3.00
ค่าสูงที่สุด		0.50	0.20	6.00

ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-14 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
14-Feb-45	1	250			412.95		120.00		16.5	21.9	16.67	46.30	0.594
17-Feb-45	4	300			420.55		96.00		20.0	26.6	13.33	37.04	0.900
18-Feb-45	5	350	4,800	73			120.00		18.5	24.6	16.67	46.30	0.666
19-Feb-45	6	350			426.25		90.00		21.0	27.9	12.50	34.72	1.008
20-Feb-45	7	300	3,945	89									
21-Feb-45	8	250			431.85								
22-Feb-45	9	300	4,235	59	434.40	2.55	108.00	23.61	19.0	25.3	15.00	41.67	0.760
23-Feb-45	10	300			437.40	3.00	102.00	29.41	19.5	25.9	14.17	39.35	0.826
24-Feb-45	11	300			440.00	2.60	108.00	24.07	19.0	25.3	15.00	41.67	0.760
25-Feb-45	12	300	4,075	74	442.85	2.85	106.00	26.89	19.0	25.3	14.72	40.90	0.774
26-Feb-45	13	300			445.00	2.15	106.00	20.28	19.0	25.3	14.72	40.90	0.774
27-Feb-45	14	300			447.50	2.50	112.00	22.32	18.5	24.6	15.56	43.21	0.713
02-Mar-45	17	250	3,805	79	453.35	1.95	100.00	19.50	19.5	25.9	13.89	38.58	0.842
03-Mar-45	18	250			456.30	2.95	100.00	29.50	19.5	25.9	13.89	38.58	0.842
04-Mar-45	19	250	3,945	63	459.40	3.10	97.20	31.89	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
05-Mar-45	20	250			462.35	2.95	90.00	32.78	20.0	26.6	12.50	34.72	0.960
06-Mar-45	21	250	3,715	67	465.25	2.90	86.40	33.56	21.0	27.9	12.00	33.33	1.050
07-Mar-45	22	250			467.65	2.40	90.00	26.67	21.0	27.9	12.50	34.72	1.008
08-Mar-45	23	250	4,140	60	470.75	3.10	83.50	37.13	21.0	27.9	11.60	32.21	1.086
10-Mar-45	25	250			476.50	2.88	97.20	29.58	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
11-Mar-45	26	300	4,000	63			93.60		20.0	26.6	13.00	36.11	0.923

ตารางที่ ก-14 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 1 (ต่อ)

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
12-Mar-45	27	300			482.45		93.60		20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
13-Mar-45	28	450	4,185	72	485.15	2.70	93.60	28.85	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
14-Mar-45	29	500			488.20	3.05	95.70	31.87	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
15-Mar-45	30	500			491.15	2.95	95.70	30.83	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
16-Mar-45	31	450			494.10	2.95	100.80	29.27	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
18-Mar-45	33	600			499.85	2.88	100.80	28.52	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
19-Mar-45	34	650	4,335	138	503.00	3.15	100.80	31.25	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
20-Mar-45	35	500			506.10	3.10	100.80	30.75	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
21-Mar-45	36	500	4,585	109	509.20	3.10	98.60	31.44	19.5	25.9	13.69	38.04	0.854
22-Mar-45	37	450			513.25	4.05	95.70	42.32	19.5	25.9	13.29	36.92	0.880
23-Mar-45	38	450	4,625	97	515.60	2.35	95.70	24.56	19.5	25.9	13.29	36.92	0.880
24-Mar-45	39	250			519.40	3.80	87.80	43.28	20.0	26.6	12.19	33.87	0.984
25-Mar-45	40	350	4,100	61	522.15	2.75	93.60	29.38	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
27-Mar-45	42	300	3,740	94	528.65	3.25	95.70	33.96	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
28-Mar-45	43	350			531.20	2.55	97.20	26.23	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
29-Mar-45	44	350	3,130	112			97.20		20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
30-Mar-45	45	350			537.65		99.36		20.0	26.6	13.80	38.33	0.869
31-Mar-45	46	350			541.20	3.55	97.20	36.52	21.0	27.9	13.50	37.50	0.933
07-Apr-45	53	350			561.00	2.83	90.00	31.43	20.5	27.3	12.50	34.72	0.984
จำนวน		40	16	16	36	30	38	30	38	38	38	38	38
ค่าเฉลี่ย		348	4,085	82	479.99	2.90	98.31	29.92	19.7	26.2	13.65	37.93	0.875
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		104	404	23	39	0.44	7.99	5.51	0.8	1.1	1.11	3.08	0.099

ตารางที่ ก-15 ค่าMLSS และ MLVSS ของชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ลำดับวัน	ส่วนแอนนออกซิก			ส่วนไร้ออกซิเจน			ส่วนเติมออกซิเจน		
		MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS
08-Apr-45	1	2,890	2,130	0.74	2,395	1,785	0.75	3,925	2,730	0.70
17-Apr-45	10	3,445	2,500	0.73	2,880	2,160	0.75	3,495	2,580	0.74
19-Apr-45	12	3,175			2,560			3,170		
22-Apr-45	15	2,905			2,680			3,905		
24-Apr-45	17	2,675			2,650			3,400		
28-Apr-45	21	3,120			2,950			3,840		
30-Apr-45	23	3,970			3,285			3,485		
03-May-45	26	3,235			2,765			4,190		
06-May-45	29	2,905			2,990			3,975		
08-May-45	31	3,140			2,770			3,745		
10-May-45	33	3,360	2,520	0.75	2,945	2,209	0.75	3,800	2,812	0.74
13-May-45	36	3,105	2,267	0.73	2,840	2,045	0.72	3,140	2,292	0.73
21-May-45	44	3,610	2,671	0.74	3,230	2,423	0.75	4,915	3,637	0.74
23-May-45	46	3,560	2,670	0.75	3,345	2,475	0.74	4,500	3,330	0.74
27-May-45	50	3,520	2,570	0.73	3,340	2,438	0.73	4,515	3,251	0.72
จำนวน*		7	5	5	7	5	5	7	5	5
ค่าเฉลี่ย*		3,314	2,540	0.74	3,066	2,318	0.74	4,084	3,064	0.73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		269	166	0.01	238	185	0.01	598	523	0.01
ค่าต่ำที่สุด		2,905	2,267	0.73	2,770	2,045	0.72	3,140	2,292	0.72
ค่าสูงที่สุด		3,610	2,671	0.75	3,345	2,475	0.75	4,915	3,637	0.74

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

ตารางที่ ก-16 ค่าซีไอดีของชุดการทดลองที่ 2

174

วันที่	ลำดับวัน	ซีไอดี (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
08-Apr-45	1	330	19	21	31	6	98.1
17-Apr-45	10	338	11	15	23	2	99.4
19-Apr-45	12	304	13	11	13	0	100.0
22-Apr-45	15	367	24	15	24	17	95.3
24-Apr-45	17	345	11	6	13	0	100.0
28-Apr-45	21	303	25	17	10	6	97.9
30-Apr-45	23	306	10	14	10	8	97.3
03-May-45	26	351	12	8	10	0	100.0
06-May-45	29	352	9	11	12	7	97.9
08-May-45	31	301	8	8	10	7	97.6
10-May-45	33	318	17	26	26	9	97.3
13-May-45	36	314	15	11	17	0	100.0
21-May-45	44	299	22	16	13	9	97.0
23-May-45	46	306	15	10	17	8	97.3
27-May-45	50	290	20	24	10	2	99.3
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		327.6	16.2	14.2	18.0	5.7	98.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		24.61	6.58	4.55	8.30	6.00	1.68
ค่าต่ำที่สุด		303.4	10.3	6.4	10.3	0.0	95.3
ค่าสูงที่สุด		367.4	25.2	20.9	31.3	17.1	100.0

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-17 ค่าฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2

175

วันที่	ลำดับวัน	ฟอสฟอรัส (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
08-Apr-45	1	5.8	29.4	28.7	0.3	1.0	82.8
17-Apr-45	10	7.7	17.5	15.1	4.5	2.6	66.1
19-Apr-45	12	9.4	8.9	4.7	0.3	1.0	89.8
22-Apr-45	15	8.3	31.2	29.5	2.6	0.9	89.1
24-Apr-45	17	9.4	27.0	28.1	0.6	0.5	94.9
28-Apr-45	21	10.1	37.7	40.1	2.7	1.1	89.3
30-Apr-45	23	8.0	5.9	2.3	1.9	0.1	98.5
03-May-45	26	5.9	27.2	26.5	1.5	0.1	98.0
06-May-45	29	7.3	25.7	29.4	0.3	0.1	98.3
08-May-45	31	7.3	32.0	31.5	5.6	2.4	66.6
10-May-45	33	9.0	27.5	31.0	1.0	0.1	98.7
13-May-45	36	7.6	5.3	3.7	1.3	0.1	98.4
21-May-45	44	7.1	23.5	24.9	1.0	1.1	84.2
23-May-45	46	8.2	24.6	25.1	2.2	1.0	87.3
27-May-45	50	6.3	11.0	10.5	6.7	3.2	49.2
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		7.5	23.7	24.6	1.9	0.7	90.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.98	8.54	9.60	1.76	0.88	12.03
ค่าต่ำที่สุด		5.9	5.3	3.7	0.3	0.1	66.6
ค่าสูงที่สุด		9.0	32.0	31.5	5.6	2.4	98.7

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 3 พฤษภาคม - 23 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-18 ค่าที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2

176

วันที่	ลำดับวัน	ที่เคเอ็น (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
17-Apr-45	10	38.2	4.7	5.0	2.3	0.3	99.2
19-Apr-45	12	33.8	2.0	2.9	1.2	0.0	100.0
22-Apr-45	15	33.5	7.3	8.2	1.7	0.0	100.0
24-Apr-45	17	34.4	8.8	9.9	2.9	1.5	95.8
28-Apr-45	21	36.2	5.8	6.1	1.8	1.2	96.8
30-Apr-45	23	36.2	5.0	5.0	4.1	2.3	93.6
03-May-45	26	38.7	10.3	10.0	0.9	0.6	98.4
06-May-45	29	36.6	10.3	9.7	0.6	0.6	98.4
08-May-45	31	36.6	7.9	7.9	1.8	1.2	96.7
10-May-45	33	36.6	7.9	7.9	1.2	0.6	98.4
13-May-45	36	36.6	7.9	3.0	1.2	0.6	98.4
21-May-45	44	36.5	8.5	9.1	1.2	0.6	98.4
23-May-45	46	39.3	9.1	9.1	1.2	0.6	98.5
27-May-45	50	39.3	3.6	3.6	1.2	0.6	98.5
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		37.3	7.9	7.2	1.2	0.7	98.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		1.35	2.07	2.71	0.35	0.23	0.65
ค่าต่ำที่สุด		36.5	3.6	3.0	0.6	0.6	96.7
ค่าสูงที่สุด		39.3	10.3	9.7	1.8	1.2	98.5

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเดมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-19 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 2

177

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
17-Apr-45	10	38.3	4.8	5.0	2.9	0.9	97.6
19-Apr-45	12	33.9	2.1	3.1	1.5	0.4	98.8
22-Apr-45	15	33.5	7.4	8.3	2.0	0.3	99.2
24-Apr-45	17	34.5	8.9	10.0	3.6	2.1	93.9
28-Apr-45	21	36.3	6.0	6.3	2.3	1.8	95.1
30-Apr-45	23	36.3	5.1	5.1	4.2	2.5	93.2
03-May-45	26	38.8	10.4	10.1	1.6	1.3	96.6
06-May-45	29	36.7	10.4	9.8	1.0	1.0	97.3
08-May-45	31	36.6	8.0	8.0	2.5	1.9	94.8
10-May-45	33	36.6	8.1	8.0	1.9	1.3	96.6
13-May-45	36	36.6	8.1	3.2	1.7	1.1	97.1
21-May-45	44	36.6	8.6	9.2	1.9	1.3	96.4
23-May-45	46	39.4	9.3	9.2	1.9	1.3	96.6
27-May-45	50	39.4	3.9	3.9	1.9	1.3	96.7
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		37.4	8.1	7.3	1.8	1.3	96.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		1.34	2.04	2.67	0.45	0.30	0.82
ค่าต่ำที่สุด		36.6	3.9	3.2	1.0	1.0	94.8
ค่าสูงที่สุด		39.4	10.4	9.8	2.5	1.9	97.3

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเดมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

ตารางที่ ก-20 ค่าไนเตรตของชุดการทดลองที่ 2

178

วันที่	ลำดับวัน	ไนเตรต (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
08-Apr-45	1	0.370	0.117	0.132	0.821	0.812
17-Apr-45	10	0.068	0.098	0.047	0.537	0.609
19-Apr-45	12	0.103	0.016	0.139	0.317	0.385
22-Apr-45	15		0.050	0.075	0.249	0.249
24-Apr-45	17	0.083	0.094	0.100	0.642	0.652
28-Apr-45	21	0.102	0.115	0.129	0.566	0.611
30-Apr-45	23	0.122	0.085	0.108	0.137	0.130
03-May-45	26	0.053	0.090	0.084	0.676	0.686
06-May-45	29	0.094	0.094	0.089	0.363	0.366
08-May-45	31	0.058	0.087	0.080	0.634	0.647
10-May-45	33	0.050	0.095	0.092	0.646	0.645
13-May-45	36	0.040	0.140	0.144	0.434	0.450
21-May-45	44	0.088	0.114	0.084	0.677	0.691
23-May-45	46	0.032	0.111	0.107	0.711	0.720
27-May-45	50	0.040	0.100	0.124	0.677	0.700
จำนวน*		7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.06	0.11	0.10	0.59	0.60
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.02	0.02	0.02	0.14	0.14
ค่าต่ำที่สุด		0.03	0.09	0.08	0.36	0.37
ค่าสูงที่สุด		0.09	0.14	0.14	0.71	0.72

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF =

ตารางที่ ก-21 ค่าไนโตรต์ของชุดการทดลองที่ 2

179

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรต์ (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
08-Apr-45	1	0.009	0.009	0.012	0.010	0.007
17-Apr-45	10	0.014	0.016	0.016	0.049	0.016
19-Apr-45	12	0.016	0.013	0.026	0.021	0.034
22-Apr-45	15		0.016	0.013	0.015	0.005
24-Apr-45	17	0.009	0.036	0.014	0.012	0.008
28-Apr-45	21	0.014	0.061	0.025	0.023	0.021
30-Apr-45	23	0.003	0.027	0.031	0.014	0.004
03-May-45	26	0.006	0.021	0.009	0.052	0.016
06-May-45	29	0.007	0.040	0.021	0.032	0.032
08-May-45	31	0.007	0.061	0.014	0.054	0.062
10-May-45	33	0.005	0.163	0.065	0.016	0.010
13-May-45	36	0.009	0.081	0.035	0.020	0.018
21-May-45	44	0.004	0.018	0.002	0.004	0.011
23-May-45	46	0.015	0.119	0.035	0.015	0.023
27-May-45	50	0.019	0.123	0.124	0.032	0.002
จำนวน*		7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.01	0.09	0.04	0.02	0.02
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.01	0.05	0.04	0.02	0.02
ค่าต่ำที่สุด		0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
ค่าสูงที่สุด		0.02	0.16	0.12	0.05	0.06

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 6 พฤษภาคม - 27 พฤษภาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF =

ตารางที่ ก-22 ค่าของแข็งแวนลอยของชุดการทดลองที่ 2

180

วันที่	ลำดับวัน	ของแข็งแวนลอย (มก./ล.)	
		INF	EFF
18-Apr-45	11	102	0
23-Apr-45	16	95	0
02-May-45	25	62	0
07-May-45	30	81	0
20-May-45	43	112	0
27-May-45	50	75	0
จำนวน		6	6
ค่าเฉลี่ย		87.8	0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		18.52	0
ค่าต่ำที่สุด		62.0	0
ค่าสูงที่สุด		112.0	0

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-23 ค่าสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 2

181

วันที่	ลำดับวัน	สภาพต่าง (มก.หินปูน/ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
18-Apr-45	11	150	172	148	76
23-Apr-45	16	177	172	164	91
02-May-45	25	145	163	184	88
07-May-45	30	168	175	170	75
20-May-45	43	142	178	180	84
27-May-45	50	112	167	155	72
จำนวน		6	6	6	6
ค่าเฉลี่ย		149	171	167	81
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		23	5	14	8
ค่าต่ำที่สุด		112	163	148	72
ค่าสูงที่สุด		177	178	184	91

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-24 ค่ากรตไขมันระเหยง่ายของชุดการทดลองที่ 2

182

วันที่	ลำดับวัน	กรตไขมันระเหยง่าย (มก./ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
18-Apr-45	11	146	34	37	17
23-Apr-45	16	142	28	33	29
02-May-45	25	145	45	34	23
07-May-45	30	138	36	37	18
20-May-45	43	140	47	29	22
27-May-45	50	110	31	28	23
จำนวน		6	6	6	6
ค่าเฉลี่ย		137	37	33	22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		13	8	4	4
ค่าต่ำที่สุด		110	28	28	17
ค่าสูงที่สุด		146	47	37	29

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-25 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 2

183

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
08-Apr-45	1	5.61	6.87	6.88	7.44	7.39
12-Apr-45	5	5.74	7.14	7.18	7.17	7.26
17-Apr-45	10	5.57	7.24	7.14	7.47	7.46
18-Apr-45	11	4.93	6.79	6.81	7.34	7.34
19-Apr-45	12	5.13	6.95	6.96	7.08	7.02
21-Apr-45	14	5.33	6.80	6.78	7.37	7.34
22-Apr-45	15	5.56	6.85	6.87	7.36	7.46
23-Apr-45	16	5.06	6.74	6.77	7.21	7.37
24-Apr-45	17	5.38	6.79	6.84	7.58	7.53
25-Apr-45	18	5.50	7.16	7.18	7.46	7.70
28-Apr-45	21	5.49	7.04	7.06	7.50	7.71
30-Apr-45	23	4.75	7.15	7.20	7.36	7.63
01-May-45	24	5.28	7.20	7.28	7.35	7.61
02-May-45	25	5.78	7.02	7.00	7.27	7.53
03-May-45	26	5.37	6.74	6.75	7.16	7.28
04-May-45	27	4.91	6.91	6.91	7.20	7.33
05-May-45	28	5.30	6.98	7.01	7.22	7.49
06-May-45	29	5.55	7.10	7.09	7.41	7.61
07-May-45	30	5.08	7.15	7.10	7.33	7.55
08-May-45	31	5.21	7.01	7.05	7.11	7.63
09-May-45	32	5.01	6.89	6.96	7.25	7.65
10-May-45	33	5.21	7.01	6.99	7.39	7.66
11-May-45	34	5.39	7.05	7.05	7.29	7.69
12-May-45	35	5.49	6.84	6.89	7.24	7.50
13-May-45	36	5.36	6.99	6.96	7.21	7.52
17-May-45	40	6.47	7.02	7.08	7.33	7.69
19-May-45	42	5.28	6.92	6.92	7.15	7.56
20-May-45	43	5.37	6.97	6.97	7.18	7.48
21-May-45	44	5.03	6.83	6.81	7.19	7.46
22-May-45	45	6.02	6.89	6.90	7.25	7.49
23-May-45	46	5.70	7.15	7.13	7.36	7.46
24-May-45	47	5.09	6.78	6.77	6.93	7.56
25-May-45	48	5.27	6.95	6.96	7.19	7.42



ตารางที่ ก-25 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

184

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
26-May-45	49	5.43	6.98	7.05	7.24	7.54
27-May-45	50	5.36	7.15	7.17	7.30	7.52
28-May-45	51	5.80	7.00	7.02	7.21	7.31
29-May-45	52	5.67	7.02	7.02	7.13	7.41
30-May-45	53	5.49	6.95	6.94	7.21	7.38
จำนวน		37	37	37	37	37
ค่าเฉลี่ย		5.39	6.98	6.99	7.27	7.49
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.33	0.10	0.11	0.10	0.10
ค่าต่ำที่สุด		5.03	6.78	6.77	6.93	7.31
ค่าสูงที่สุด		6.47	7.24	7.28	7.58	7.71

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-26 ค่าอณุมิของชุดการทดลองที่ 2

185

วันที่	ลำดับวัน	อณุมิ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
08-Apr-45	1	30.6	30.7	30.6	30.7	30.5
12-Apr-45	5	30.1	30.3	30.2	30.3	29.6
17-Apr-45	10	30.5	30.9	30.9	31.0	30.1
18-Apr-45	11	31.0	31.3	31.3	31.4	30.5
19-Apr-45	12	31.1	31.1	30.9	31.3	30.6
21-Apr-45	14	30.9	31.2	31.4	31.3	30.5
22-Apr-45	15	31.4	31.5	31.4	31.6	31.0
23-Apr-45	16	31.0	31.2	31.2	31.2	30.8
24-Apr-45	17	30.4	30.7	30.6	30.8	30.6
25-Apr-45	18	29.4	29.9	29.8	30.0	29.7
28-Apr-45	21	29.4	29.9	29.9	30.0	29.8
30-Apr-45	23	30.5	31.0	31.1	31.1	30.8
01-May-45	24	29.5	29.8	29.6	29.9	29.7
02-May-45	25	29.6	30.4	30.4	30.5	30.1
03-May-45	26	29.5	29.8	29.6	29.7	28.8
04-May-45	27	29.3	29.4	29.5	29.5	29.5
05-May-45	28	29.5	30.4	30.4	30.4	30.0
06-May-45	29	29.4	29.9	29.9	29.9	29.8
07-May-45	30	27.2	29.5	29.3	29.3	28.5
08-May-45	31	29.7	30.6	30.4	30.8	30.2
09-May-45	32	30.3	30.8	30.8	30.9	30.5
10-May-45	33	29.8	29.8	30.0	30.2	30.0
11-May-45	34	28.8	29.2	29.2	29.2	29.0
12-May-45	35	29.4	29.5	29.5	29.6	29.5
13-May-45	36	29.2	29.5	29.6	29.6	29.4
17-May-45	40	29.4	29.4	29.4	29.4	29.3
19-May-45	42	29.6	29.5	29.6	29.7	29.5
20-May-45	43	28.4	28.4	28.2	28.6	28.0
21-May-45	44	28.2	28.4	28.4	28.4	28.3
22-May-45	45	28.3	28.6	28.7	28.6	28.5
23-May-45	46	26.8	28.0	28.0	28.0	27.6
24-May-45	47	30.4	30.4	30.4	30.7	30.6
25-May-45	48	30.1	30.2	30.2	30.3	30.2

ตารางที่ ก-26 ค่าอณุมิของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

186

วันที่	ลำดับวัน	อณุมิ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
26-May-45	49	30.2	30.4	30.4	30.4	30.3
27-May-45	50	30.0	30.1	30.3	30.3	30.2
28-May-45	51	29.8	30.1	30.2	30.3	30.2
29-May-45	52	29.4	29.2	29.5	29.5	29.4
30-May-45	53	30.2	29.5	29.6	29.9	30.2
จำนวน		37	37	37	37	37
ค่าเฉลี่ย		29.7	30.0	30.0	30.1	29.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.00	0.75	0.78	0.80	0.90
ค่าต่ำที่สุด		26.8	28.0	28.0	28.0	27.6
ค่าสูงที่สุด		31.4	31.5	31.4	31.6	31.0

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-27 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 2

187

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
08-Apr-45	1	0.15	0.15	6.00
12-Apr-45	5	0.15	0.15	4.00
17-Apr-45	10	0.15	0.15	4.60
18-Apr-45	11	0.15	0.15	4.50
19-Apr-45	12	0.15	0.15	4.50
20-Apr-45	13	0.15	0.15	4.50
21-Apr-45	14	0.15	0.15	4.50
22-Apr-45	15	0.15	0.15	4.60
23-Apr-45	16	0.15	0.15	4.90
24-Apr-45	17	0.15	0.15	4.60
25-Apr-45	18	0.15	0.15	4.50
28-Apr-45	21	0.15	0.15	4.40
30-Apr-45	23	0.15	0.15	5.00
01-May-45	24	0.15	0.15	5.00
02-May-45	25	0.15	0.15	5.00
03-May-45	26	0.15	0.15	4.00
04-May-45	27	0.15	0.15	4.50
05-May-45	28	0.15	0.15	4.30
06-May-45	29	0.15	0.15	4.50
07-May-45	30	0.15	0.15	5.20
08-May-45	31	0.15	0.15	3.00
09-May-45	32	0.15	0.15	4.40
10-May-45	33	0.15	0.15	4.50
11-May-45	34	0.15	0.15	4.80
12-May-45	35	0.15	0.15	4.80
13-May-45	36	0.15	0.15	5.00
17-May-45	40	0.15	0.15	7.20

ตารางที่ ก-27 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

188

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
19-May-45	42	0.15	0.15	6.00
20-May-45	43	0.15	0.15	6.00
21-May-45	44	0.15	0.15	6.00
22-May-45	45	0.15	0.15	6.00
23-May-45	46	0.15	0.15	6.00
24-May-45	47	0.15	0.15	5.70
25-May-45	48	0.15	0.15	6.00
26-May-45	49	0.15	0.15	6.00
27-May-45	50	0.15	0.15	7.00
28-May-45	51	0.15	0.15	6.00
29-May-45	52	0.15	0.15	6.00
30-May-45	53	0.15	0.15	6.00
จำนวน		39	39	39
ค่าเฉลี่ย		0.15	0.15	5.12
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.00	0.00	0.88
ค่าต่ำที่สุด		0.15	0.15	3.00
ค่าสูงที่สุด		0.15	0.15	7.20

ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-28 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
14-Feb-45	1	250			412.95		120.00		16.5	21.9	16.67	46.30	0.594
17-Feb-45	4	300			420.55		96.00		20.0	26.6	13.33	37.04	0.900
18-Feb-45	5	350	4,800	73			120.00		18.5	24.6	16.67	46.30	0.666
19-Feb-45	6	350			426.25		90.00		21.0	27.9	12.50	34.72	1.008
20-Feb-45	7	300	3,945	89									
21-Feb-45	8	250			431.85								
22-Feb-45	9	300	4,235	59	434.40	2.55	108.00	23.61	19.0	25.3	15.00	41.67	0.760
23-Feb-45	10	300			437.40	3.00	102.00	29.41	19.5	25.9	14.17	39.35	0.826
24-Feb-45	11	300			440.00	2.60	108.00	24.07	19.0	25.3	15.00	41.67	0.760
25-Feb-45	12	300	4,075	74	442.85	2.85	106.00	26.89	19.0	25.3	14.72	40.90	0.774
26-Feb-45	13	300			445.00	2.15	106.00	20.28	19.0	25.3	14.72	40.90	0.774
27-Feb-45	14	300			447.50	2.50	112.00	22.32	18.5	24.6	15.56	43.21	0.713
02-Mar-45	17	250	3,805	79	453.35	1.95	100.00	19.50	19.5	25.9	13.89	38.58	0.842
03-Mar-45	18	250			456.30	2.95	100.00	29.50	19.5	25.9	13.89	38.58	0.842
04-Mar-45	19	250	3,945	63	459.40	3.10	97.20	31.89	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
05-Mar-45	20	250			462.35	2.95	90.00	32.78	20.0	26.6	12.50	34.72	0.960
06-Mar-45	21	250	3,715	67	465.25	2.90	86.40	33.56	21.0	27.9	12.00	33.33	1.050
07-Mar-45	22	250			467.65	2.40	90.00	26.67	21.0	27.9	12.50	34.72	1.008
08-Mar-45	23	250	4,140	60	470.75	3.10	83.50	37.13	21.0	27.9	11.60	32.21	1.086
10-Mar-45	25	250			476.50	2.88	97.20	29.58	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
11-Mar-45	26	300	4,000	63			93.60		20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
07-May-45	30	300			630.35	2.95	100.00	29.50	19.5	25.9	13.89	38.58	0.842

ตารางที่ ก-28 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
08-May-45	31	400	3,745	80	633.45	3.10	100.00	31.00	19.0	25.3	13.89	38.58	0.820
09-May-45	32	350			636.90	3.45	97.20	35.49	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
10-May-45	33	350	3,800	92	639.65	2.75	93.60	29.38	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
11-May-45	34	350			643.30	3.65	93.60	39.00	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
12-May-45	35	350			646.05	2.75	90.00	30.56	19.5	25.9	12.50	34.72	0.936
13-May-45	36	300	3,140	111	648.85	2.80	93.60	29.91	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
17-May-45	40	550			658.75	2.47	110.80	22.34	9.0	12.0	15.39	42.75	0.351
19-May-45	42	600			664.65	2.95	102.20	28.86	11.5	15.3	14.19	39.43	0.486
20-May-45	43	600			668.25	3.60	100.00	36.00	13.5	17.9	13.89	38.58	0.583
21-May-45	44	550	4,915	122	670.75	2.50	93.60	26.71	16.0	21.3	13.00	36.11	0.738
22-May-45	45	600			673.70	2.95	90.00	32.78	15.0	19.9	12.50	34.72	0.720
23-May-45	46	600	4,500	133	676.65	2.95	97.20	30.35	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
24-May-45	47	600			679.65	3.00	86.40	34.72	20.5	27.3	12.00	33.33	1.025
25-May-45	48	500			683.05	3.40	82.80	41.06	20.5	27.3	11.50	31.94	1.069
26-May-45	49	550			685.75	2.70	82.80	32.61	20.5	27.3	11.50	31.94	1.069
27-May-45	50	550	4,515	122			79.80		21.0	27.9	11.08	30.79	1.136
28-May-45	51	550			692.95		82.80		20.5	27.3	11.50	31.94	1.069
29-May-45	52	550			696.05	3.10	82.80	37.44	21.0	27.9	11.50	31.94	1.095
30-May-45	53	550			697.95	1.90	79.80	23.81	21.0	27.9	11.08	30.79	1.136
จำนวน		41	15	15	37	32	39	32	39	39	39	39	39
ค่าเฉลี่ย		382	4,085	86	558.84	2.84	96.02	29.96	19.0	25.2	13.34	37.05	0.869
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		133	458	25	112	0.41	10.32	5.41	2.6	3.5	1.43	3.98	0.178

ตารางที่ ก-29 ค่า MLSS และ MLVSS ของการทดลองที่ 3

วันที่	ลำดับวัน	ส่วนแอนนออกซิก			ส่วนไร้ออกซิเจน			ส่วนเติมออกซิเจน		
		MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS
02-Sep-45	1	1,945	1,685	0.87	2,225	1,900	0.85	3,140	2,630	0.84
04-Sep-45	3	2,500	2,165	0.87	2,980	2,620	0.88	3,010	2,580	0.86
06-Sep-45	5	2,605	2,220	0.85	2,590	2,185	0.84	2,705	2,135	0.79
10-Sep-45	9	2,190	1,905	0.87	2,350	2,000	0.85	3,140	2,260	0.72
11-Sep-45	10	2,340	2,030	0.87	2,915	2,625	0.90	3,505	2,765	0.79
13-Sep-45	12	2,195			2,065			3,015		
16-Sep-45	15	2,725			2,670			2,725		
18-Sep-45	17	2,735			2,405			2,538		
20-Sep-45	19	2,210			2,135			2,740		
24-Sep-45	23	2,893			2,533			3,316		
26-Sep-45	25	2,843			2,613			3,700		
28-Sep-45	27	3,170			3,780			4,890		
30-Sep-45	29	3,503			3,127			4,623		
02-Oct-45	31	3,935			2,745			4,735		
04-Oct-45	33	3,300	2,750	0.83	3,290	2,765	0.84	4,515	2,850	0.63
09-Oct-45	38	3,380	2,850	0.84	3,130	2,650	0.85	4,923	4,005	0.81
11-Oct-45	40	3,605	3,010	0.83	3,030	2,495	0.82	4,945	3,970	0.80
14-Oct-45	43	4,155	3,310	0.80	4,130	3,270	0.79	4,680	3,685	0.79



ตารางที่ ก-29 ค่า MLSS และ MLVSS ของการทดลองที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ลำดับวัน	ส่วนแอนนอกซิก			ส่วนไร้ออกซิเจน			ส่วนเติมออกซิเจน		
		MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS	MLSS	MLVSS	VSS/SS
16-Oct-45	45	4,090	3,195	0.78	3,515	2,685	0.76	4,670	3,640	0.78
18-Oct-45	47	4,340	3,790	0.87	4,365	3,755	0.86	4,540	3,860	0.85
21-Oct-45	50	4,395	3,405	0.77	3,845	2,895	0.75	4,140	3,055	0.74
23-Oct-45	52	3,926	3,000	0.76	3,460	2,685	0.78	3,990	3,180	0.80
26-Oct-45	55	3,750	2,890	0.77	3,380	2,665	0.79	5,110	3,885	0.76
จำนวน*		7	7	7	7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		4,037	3,229	0.80	3,675	2,921	0.79	4,582	3,611	0.79
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		294	308	0.04	463	443	0.04	403	358	0.04
ค่าต่ำที่สุด		3,605	2,890	0.76	3,030	2,495	0.75	3,990	3,055	0.74
ค่าสูงที่สุด		4,395	3,790	0.87	4,365	3,755	0.86	5,110	3,970	0.85

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

\*\*วันที่ 27 กันยายน 2545 เติมเชื้อจากระบบบำบัดของห้างมานูญครอง

วันที่	ลำดับวัน	ซีไอดี (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
02-Sep-45	1	279	36	35	33	21	92.4
04-Sep-45	3	339	27	25	29	0	100.0
06-Sep-45	5	359	8	16	14	6	98.5
09-Sep-45	8	346	20	18	12	6	98.2
11-Sep-45	10	286	27	18	28	16	94.4
02-Oct-45	31	320	20	18	18	0	100.0
04-Oct-45	33	390	14	16	16	0	100.0
09-Oct-45	38	334	28	16	24	16	95.3
11-Oct-45	40	323	12	11	13	0	100.0
14-Oct-45	43	319	26	32	24	12	96.2
16-Oct-45	45	320	24	20	32	12	96.3
18-Oct-45	47	300	16	27	20	0	100.0
21-Oct-45	50	326	12	16	12	0	100.0
23-Oct-45	52	324	23	27	25	8	97.4
26-Oct-45	55	352	17	17	21	12	96.5
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		323	18	21	21	6	98.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		15.2	5.9	7.6	7.0	6.1	1.9
ค่าต่ำที่สุด		300	12	11	12	0	96.2
ค่าสูงที่สุด		352	26	32	32	12	100.0

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	ลำดับวัน	ฟอสฟอรัส (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
02-Sep-45	1	7.7	15.8	16.1	4.6	3.8	50.8
04-Sep-45	3	8.0	15.5	16.5	7.2	7.3	9.5
06-Sep-45	5	7.5	15.8	16.3	1.1	0.8	89.3
09-Sep-45	8	6.8	16.8	19.0	10.4	10.1	
11-Sep-45	10	6.4	11.1	11.7	5.1	4.1	36.1
02-Oct-45	31	7.1	14.0	15.9	0.3	0.3	95.5
04-Oct-45	33	7.7	16.0	19.8	1.4	0.8	89.7
09-Oct-45	38	8.1	19.2	21.3	0.6	0.1	98.8
11-Oct-45	40	7.5	25.7	26.7	0.8	0.6	92.0
14-Oct-45	43	7.5	25.6	25.3	1.0	0.6	92.0
16-Oct-45	45	9.3	11.0	11.1	0.8	0.5	94.5
18-Oct-45	47	9.2	36.2	40.8	5.9	5.6	39.1
21-Oct-45	50	7.5	15.7	16.2	0.7	0.7	90.4
23-Oct-45	52	8.5	27.3	29.1	1.6	1.0	87.8
26-Oct-45	55	7.5	24.0	23.7	1.7	1.0	87.1
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		8.1	23.6	24.7	1.8	1.4	83.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.84	8.17	9.48	1.85	1.85	19.63
ค่าต่ำที่สุด		7.5	11.0	11.1	0.7	0.5	39.1
ค่าสูงที่สุด		9.3	36.2	40.8	5.9	5.6	94.5

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	ลำดับวัน	ฟอสฟอรัส (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
02-Sep-45	1	37.5	7.2	9.5	3.0	1.2	96.8
04-Sep-45	3	34.6	8.1	3.6	2.1	0.9	97.4
06-Sep-45	5	38.2	3.9	3.6	2.1	1.8	95.3
09-Sep-45	8	35.8	9.5	11.3	3.6	3.0	91.7
11-Sep-45	10	35.8	10.1	10.1	4.2	1.2	96.7
02-Oct-45	31	35.8	3.7	4.2	3.0	2.4	93.3
04-Oct-45	33	42.3	10.1	10.1	2.4	1.8	95.8
09-Oct-45	38	33.2	11.9	11.3	2.4	1.2	96.4
11-Oct-45	40	35.8	13.7	14.3	3.6	1.2	96.7
14-Oct-45	43	37.6	4.2	4.8	3.0	1.8	95.2
16-Oct-45	45	30.7	6.6	6.0	2.4	1.2	96.1
18-Oct-45	47	36.8	8.9	11.3	1.2	0.6	98.4
21-Oct-45	50	32.0	6.0	5.0	1.7	1.1	96.5
23-Oct-45	52	34.1	13.7	11.3	1.6	1.1	96.9
26-Oct-45	55	34.9	12.7	9.5	1.6	1.1	96.8
จำนวน*		7	7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		34.5	9.4	8.9	2.1	1.2	96.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		2.50	3.99	3.70	0.87	0.35	0.95
ค่าต่ำที่สุด		30.7	4.2	4.8	1.2	0.6	95.2
ค่าสูงที่สุด		37.6	13.7	14.3	3.6	1.8	98.4

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-33 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 3

196

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)					% การกำจัด
		INF	ANX	ANA	AER	EFF	
02-Sep-45	1	37.6	7.4	9.8	4.1	2.3	93.8
04-Sep-45	3	34.8	8.3	3.8	3.2	2.0	94.3
06-Sep-45	5	38.3	4.1	3.9	2.5	2.2	94.3
09-Sep-45	8	36.0	9.8	11.6	5.0	4.3	88.1
11-Sep-45	10	36.0	10.4	10.4	5.5	2.4	93.2
02-Oct-45	31	35.8	3.7	4.3	3.9	3.3	90.7
04-Oct-45	33	42.4	10.2	10.2	3.6	3.0	92.9
09-Oct-45	38	33.3	12.0	11.4	3.7	2.5	92.6
11-Oct-45	40	36.0	13.8	14.3	5.2	2.7	92.4
14-Oct-45	43	37.7	4.4	5.2	4.4	3.2	91.6
16-Oct-45	45	30.8	7.1	6.6	3.6	2.4	92.1
18-Oct-45	47	36.9	9.0	11.4	2.2	1.9	94.9
21-Oct-45	50	32.1	6.1	5.2	2.3	1.7	94.6
23-Oct-45	52	34.1	13.8	11.4	2.9	2.3	93.1
26-Oct-45	55	34.9	12.8	9.6	2.5	2.1	94.1
จำนวน*		7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
ค่าเฉลี่ย*		34.6	9.6	9.1	3.3	2.3	93.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		2.51	3.88	3.54	1.14	0.50	1.30
ค่าต่ำที่สุด		30.8	4.4	5.2	2.2	1.7	91.6
ค่าสูงที่สุด		37.7	13.8	14.3	5.2	3.2	94.9

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	ลำดับวัน	ไนเตรต (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
02-Sep-45	1	0.134	0.249	0.239	1.065	1.120
04-Sep-45	3	0.156	0.232	0.262	1.078	1.074
06-Sep-45	5	0.156	0.251	0.248	0.394	0.401
09-Sep-45	8	0.141	0.214	0.227	1.257	1.228
11-Sep-45	10	0.150	0.246	0.237	1.185	1.238
02-Oct-45	31	0.048	0.026	0.024	0.916	0.926
04-Oct-45	33	0.050	0.061	0.035	1.123	1.230
09-Oct-45	38	0.047	0.040	0.048	1.263	1.261
11-Oct-45	40	0.150	0.029	0.032	1.572	1.539
14-Oct-45	43	0.089	0.216	0.332	1.390	1.374
16-Oct-45	45	0.076	0.433	0.573	1.147	1.217
18-Oct-45	47	0.093	0.059	0.058	1.032	1.303
21-Oct-45	50	0.089	0.083	0.075	0.603	0.606
23-Oct-45	52	0.002	0.040	0.045	1.272	1.293
26-Oct-45	55	0.058	0.057	0.031	0.910	0.929
จำนวน*		7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.08	0.13	0.16	1.13	1.18
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.04	0.15	0.21	0.32	0.31
ค่าต่ำที่สุด		0.00	0.03	0.03	0.60	0.61
ค่าสูงที่สุด		0.15	0.43	0.57	1.57	1.54

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

วันที่	ลำดับวัน	ไนโตรต์ (มก./ล.)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
02-Sep-45	1	0.010	0.016	0.011	0.055	0.011
04-Sep-45	3	0.023	0.008	0.003	0.029	0.009
06-Sep-45	5	0.014	0.005	0.023	0.011	0.002
09-Sep-45	8	0.014	0.002	0.003	0.190	0.063
11-Sep-45	10	0.012	0.000	0.000	0.097	0.021
02-Oct-45	31	0.000	0.009	0.006	0.031	0.006
04-Oct-45	33	0.003	0.035	0.008	0.049	0.016
09-Oct-45	38	0.006	0.011	0.014	0.050	0.014
11-Oct-45	40	0.023	0.010	0.006	0.039	0.011
14-Oct-45	43	0.009	0.048	0.073	0.019	0.003
16-Oct-45	45	0.014	0.073	0.092	0.068	0.031
18-Oct-45	47	0.008	0.004	0.005	0.018	0.003
21-Oct-45	50	0.009	0.054	0.045	0.004	0.005
23-Oct-45	52	0.005	0.009	0.018	0.004	0.001
26-Oct-45	55	0.001	0.006	0.008	0.006	0.006
จำนวน*		7	7	7	7	7
ค่าเฉลี่ย*		0.01	0.03	0.04	0.02	0.01
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน*		0.01	0.03	0.04	0.02	0.01
ค่าต่ำที่สุด		0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
ค่าสูงที่สุด		0.02	0.07	0.09	0.07	0.03

\* คำนวณเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว 11 ตุลาคม - 26 ตุลาคม 2545

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

วันที่	ลำดับวัน	ของแข็งแวนลอย (มก./ล.)	
		INF	EFF
02-Sep-45	1	55	0
11-Sep-45	10	100	0
10-Oct-45	39	97	0
15-Oct-45	44	80	0
22-Oct-45	51	64	0
จำนวน		5	5
ค่าเฉลี่ย		79	0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		20	0
ค่าต่ำที่สุด		55	0
ค่าสูงที่สุด		100	0

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; EFF = น้ำออก



วันที่	ลำดับวัน	สภาพต่าง (มก.หินปูน/ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
04-Sep-45	3	165	180	155	89
11-Sep-45	10	145	175	164	84
25-Sep-45	24	180	154	170	80
01-Oct-45	30	170	180	147	91
10-Oct-45	39	141			87
15-Oct-45	44	110	164	166	105
22-Oct-45	51	130	173	187	70
จำนวน		7	6	6	7
ค่าเฉลี่ย		149	171	165	86
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		25	10	14	11
ค่าต่ำที่สุด		110	154	147	70
ค่าสูงที่สุด		180	180	187	105

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

วันที่	ลำดับวัน	กรตไขมันระเหยง่าย (มก./ล.)			
		INF	ANX	ANA	AER
04-Sep-45	3	152	40	36	24
11-Sep-45	10	120	38	35	19
25-Sep-45	24	137	31	37	18
01-Oct-45	30	160	35	33.2	23
10-Oct-45	39	140			20
15-Oct-45	44	110	46	28.12	23
22-Oct-45	51	125	36	35	19.2
จำนวน		7	6	6	7
ค่าเฉลี่ย		135	38	34	21
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		18	5	3	2
ค่าต่ำที่สุด		110	31	28	18
ค่าสูงที่สุด		160	46	37	24

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนอกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

ตารางที่ ก-39 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
01-Sep-45	0	4.94	7.06	7.04	7.35	7.52
02-Sep-45	1	4.66	7.05	7.07	7.45	7.58
03-Sep-45	2	4.78	7.20	7.18	7.55	7.70
04-Sep-45	3	4.67	7.01	7.03	7.31	7.52
05-Sep-45	4	4.82	7.05	7.06	7.28	7.42
06-Sep-45	5	4.85	7.21	7.25	7.49	7.53
07-Sep-45	6	5.10	7.09	7.14	7.35	7.53
09-Sep-45	8	5.02	7.18	7.16	7.26	7.30
10-Sep-45	9	5.34	7.15	7.11	7.00	7.25
11-Sep-45	10	5.15	7.16	7.12	7.34	7.42
12-Sep-45	11	5.23	7.28	7.25	7.11	7.25
13-Sep-45	12	4.85	7.17	7.17	7.28	7.34
24-Sep-45	23	5.11	6.83	6.89	7.16	7.78
30-Sep-45	29	6.50	6.95	7.04	6.86	7.41
01-Oct-45	30	5.25	6.90	6.85	7.35	7.42
02-Oct-45	31	5.30	7.01	6.99	7.26	7.40
03-Oct-45	32	6.55	6.96	6.95	7.17	7.49
04-Oct-45	33	5.18	6.88	6.84	7.15	7.49
05-Oct-45	34	5.40	6.98	6.94	7.21	7.40
06-Oct-45	35	5.43	7.14	7.03	7.21	7.59
07-Oct-45	36	6.37	7.14	7.09	7.46	7.64
08-Oct-45	37	5.40	6.93	6.93	7.23	7.33
09-Oct-45	38	5.24	6.82	6.80	7.18	7.37
10-Oct-45	39	5.37	6.82	6.77	7.12	7.34
11-Oct-45	40	5.26	6.86	6.85	7.17	7.30
12-Oct-45	41	5.61	7.06	7.02	7.60	7.79
13-Oct-45	42	5.17	7.14	7.20	7.36	7.46
14-Oct-45	43	5.39	7.05	7.06	7.37	7.51
15-Oct-45	44	6.13	6.85	6.59	7.19	7.39
16-Oct-45	45	5.08	6.92	6.96	7.04	7.23
17-Oct-45	46	5.50	6.91	6.92	7.22	7.38
18-Oct-45	47	5.14	6.82	6.81	7.27	7.39
19-Oct-45	48	5.45	6.87	6.86	6.96	7.30

ตารางที่ ก-39 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ)

203

วันที่	ลำดับวัน	พีเอช				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
20-Oct-45	49	5.57	6.97	6.92	7.01	7.28
21-Oct-45	50	5.48	7.16	7.13	7.30	7.43
22-Oct-45	51	5.51	6.98	6.94	7.04	7.22
23-Oct-45	52	5.19	7.08	7.05	7.38	7.47
24-Oct-45	53	5.45	6.98	6.99	7.19	7.38
25-Oct-45	54	5.65	5.75	6.77	7.32	7.58
26-Oct-45	55	5.34	6.88	6.92	7.09	7.24
จำนวน		39	39	39	39	39
ค่าเฉลี่ย		5.35	6.98	6.99	7.24	7.43
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.44	0.33	0.15	0.17	0.15
ค่าต่ำที่สุด		5.08	5.75	6.59	6.96	7.22
ค่าสูงที่สุด		6.55	7.28	7.25	7.60	7.79

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-40 ค่าอณุมุมิของชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ลำดับวัน	อณุมุมิ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
01-Sep-45	0	28.2	28.3	28.3	28.4	28.3
02-Sep-45	1	28.9	28.8	28.8	28.8	28.7
03-Sep-45	2	28.2	28.3	28.3	28.4	28.4
04-Sep-45	3	28.3	28.5	28.5	28.5	28.3
05-Sep-45	4	29.2	29.3	29.3	29.3	29.3
06-Sep-45	5	29.0	29.4	29.4	29.4	29.4
07-Sep-45	6	29.5	29.5	29.5	29.6	29.7
09-Sep-45	8	28.2	28.9	28.9	28.9	28.6
10-Sep-45	9	29.0	29.2	29.2	29.3	29.3
11-Sep-45	10	28.7	29.0	29.0	29.0	28.8
12-Sep-45	11	29.2	29.1	29.1	29.1	29.1
13-Sep-45	12	29.2	29.2	29.2	29.2	28.9
24-Sep-45	23	28.2	28.3	28.3	28.3	28.2
30-Sep-45	29	29.2	29.3	29.4	29.4	29.1
01-Oct-45	30	29.3	29.5	29.5	29.5	29.5
02-Oct-45	31	29.6	29.9	29.9	29.9	29.6
03-Oct-45	32	29.8	29.6	29.6	29.6	30.0
04-Oct-45	33	29.3	29.3	29.3	29.3	29.2
05-Oct-45	34	29.9	30.0	30.0	30.0	29.8
06-Oct-45	35	29.5	29.6	29.6	29.6	29.6
07-Oct-45	36	28.0	28.0	28.0	28.0	28.1
08-Oct-45	37	27.5	27.8	27.7	27.8	28.1
09-Oct-45	38	28.2	28.1	28.1	28.2	28.2
10-Oct-45	39	27.7	27.8	27.9	27.9	27.9
11-Oct-45	40	27.5	27.7	27.7	27.7	27.6
12-Oct-45	41	27.9	28.7	28.7	28.7	28.7
13-Oct-45	42	29.0	29.1	29.1	29.1	29.1
14-Oct-45	43	29.0	29.2	29.2	29.3	29.2
15-Oct-45	44	29.7	29.9	29.9	29.9	30.0
16-Oct-45	45	29.8	29.9	29.9	29.9	29.9
17-Oct-45	46	29.7	29.8	29.8	29.9	29.9
18-Oct-45	47	29.9	29.8	29.9	30.0	29.9
19-Oct-45	48	30.0	30.7	30.7	30.7	30.8

ตารางที่ ก-40 ค่าอณุมุมิของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ)

205

วันที่	ลำดับวัน	อณุมุมิ(องศาเซลเซียส)				
		INF	ANX	ANA	AER	EFF
20-Oct-45	49	30.6	30.6	30.6	30.6	30.8
21-Oct-45	50	29.5	29.8	29.8	29.8	29.7
22-Oct-45	51	29.8	30.0	30.0	30.0	30.0
23-Oct-45	52	28.0	28.5	28.5	28.5	28.0
24-Oct-45	53	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0
25-Oct-45	54	29.3	28.9	28.9	28.9	29.3
26-Oct-45	55	28.9	28.8	28.9	29.0	29.1
จำนวน		40	40	40	40	40
ค่าเฉลี่ย		29.0	29.2	29.2	29.2	29.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.77	0.75	0.76	0.75	0.78
ค่าต่ำที่สุด		27.5	27.7	27.7	27.7	27.6
ค่าสูงที่สุด		30.6	30.7	30.7	30.7	30.8

INF = น้ำเสียป้อนเข้าระบบ ; ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน ; EFF = น้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-41 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 3

206

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
01-Sep-45	0	0.15	0.15	5.50
02-Sep-45	1	0.15	0.15	4.50
03-Sep-45	2	0.15	0.15	5.00
04-Sep-45	3	0.15	0.15	4.50
05-Sep-45	4	0.15	0.15	4.00
06-Sep-45	5	0.15	0.15	4.40
07-Sep-45	6	0.20	0.20	4.40
09-Sep-45	8	0.15	0.15	4.25
10-Sep-45	9	0.15	0.15	4.00
11-Sep-45	10	0.15	0.15	4.15
12-Sep-45	11	0.10	0.10	4.15
13-Sep-45	12	0.10	0.10	5.00
24-Sep-45	23	0.15	0.15	4.50
30-Sep-45	29	0.15	0.15	4.30
01-Oct-45	30	0.15	0.15	4.10
02-Oct-45	31	0.12	0.12	4.20
03-Oct-45	32	0.15	0.12	4.75
04-Oct-45	33	0.15	0.15	4.50
05-Oct-45	34	0.15	0.15	4.60
06-Oct-45	35	0.15	0.15	4.50
07-Oct-45	36	0.15	0.15	5.20
08-Oct-45	37	0.15	0.15	4.80
09-Oct-45	38	0.15	0.15	4.35
10-Oct-45	39	0.15	0.10	4.45
11-Oct-45	40	0.10	0.10	4.50
12-Oct-45	41	0.10	0.10	5.00
13-Oct-45	42	0.10	0.10	4.75
14-Oct-45	43	0.10	0.10	4.80
15-Oct-45	44	0.15	0.15	5.00

ตารางที่ ก-41 ค่าออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ) 207

วันที่	ลำดับวัน	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)		
		ANX	ANA	AER
16-Oct-45	45	0.10	0.10	4.70
17-Oct-45	46	0.15	0.15	4.80
18-Oct-45	47	0.15	0.12	4.80
19-Oct-45	48	0.15	0.15	4.35
20-Oct-45	49	0.15	0.15	4.35
21-Oct-45	50	0.15	0.15	4.70
22-Oct-45	51	0.15	0.15	4.35
23-Oct-45	52	0.12	0.12	4.80
24-Oct-45	53	0.15	0.15	4.30
25-Oct-45	54	0.15	0.15	4.80
26-Oct-45	55	0.15	0.15	4.70
จำนวน		40	40	40
ค่าเฉลี่ย		0.14	0.14	4.57
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.02	0.02	0.33
ค่าต่ำที่สุด		0.10	0.10	4.00
ค่าสูงที่สุด		0.20	0.20	5.50

ANX = ส่วนแอนนออกซิก ; ANA = ส่วนไร้ออกซิเจน ; AER = ส่วนเติมออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-42 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
01-Sep-45	0	950			973.85		103.68	27.49	23.0	30.6	14.40	40.00	0.958
02-Sep-45	1	950	3,140	303	976.25	2.40	92.16	30.92	23.5	31.2	12.80	35.56	1.101
03-Sep-45	2	900			979.95	3.70	95.04	31.57	23.0	30.6	13.20	36.67	1.045
04-Sep-45	3	900	3,010	299	982.35	2.40	100.80	30.26	23.0	30.6	14.00	38.89	0.985
05-Sep-45	4	900			986.05	3.70	97.20	31.89	23.0	30.6	13.50	37.50	1.022
06-Sep-45	5	850	2,705	333	988.45	2.40	97.20	31.89	23.0	30.6	13.50	37.50	1.022
07-Sep-45	6	900			992.50	4.05	108.00	29.17	21.0	27.9	15.00	41.67	0.840
09-Sep-45	8	950			996.30		87.84	34.15	23.5	31.2	12.20	33.89	1.155
10-Sep-45	9	950	3,140	303	999.35	3.05	75.60	38.36	24.0	31.9	10.50	29.17	1.371
11-Sep-45	10	950	3,505	271	1002.35	3.00	102.96	19.91	21.5	28.6	14.30	39.72	0.902
12-Sep-45	11	950			1005.40	3.05	111.60	35.84	18.5	24.6	15.50	43.06	0.716
13-Sep-45	12	850	3,015	315	1008.45	3.05	104.40	29.69	22.0	29.2	14.50	40.28	0.910
24-Sep-45	23	300	3,316	256	1041.60		89.28	34.72	23.0	30.6	12.40	34.44	1.112
30-Sep-45	29	500	4,623	65	1059.65	3.01	111.60	26.88	13.5	17.9	15.50	43.06	0.522
01-Oct-45	30	400			1062.75	3.10	106.56	28.15	17.5	23.3	14.80	41.11	0.709
02-Oct-45	31	350	4,735	84	1065.70	2.95	104.40	29.21	22.0	29.2	14.50	40.28	0.910
03-Oct-45	32	350			1068.70	3.00	103.68	29.42	21.5	28.6	14.40	40.00	0.895
04-Oct-45	33	300	4,515	78	1071.45	2.75	100.08	29.98	22.5	29.9	13.90	38.61	0.971
05-Oct-45	34	300			1074.50	3.05	93.60	32.59	23.0	30.6	13.00	36.11	1.061
06-Oct-45	35	300			1077.60	3.10	100.80	30.75	21.5	28.6	14.00	38.89	0.921
07-Oct-45	36	350			1080.95	3.35	100.80	33.23	23.0	30.6	14.00	38.89	0.985

ตารางที่ ก-42 ค่าการดำเนินการระบบของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ)

วันที่	ลำดับวัน	SV <sub>30</sub> ml/L	MLSS mg/L	SVI ml/g	Meter kWh	diff kWh/d	Flowrate Litre/day	Energy kWh/m <sup>3</sup>	Pressure cm Hg	pressure KPa	Flux l/m <sup>2</sup> /h	Flux m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s x10 <sup>-7</sup>	Resistance m <sup>-1</sup> x 10 <sup>10</sup>
08-Oct-45	37	350			1083.80	2.85	93.60		20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
09-Oct-45	38	450	4,923	71	1086.65	2.85	93.60	30.45	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
10-Oct-45	39	500			1089.65	3.00	95.70	31.35	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
11-Oct-45	40	500	4,945	101	1092.70	3.05	95.70	31.87	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
12-Oct-45	41	500			1095.80	3.10	100.80	30.75	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
13-Oct-45	42	450			1098.90	3.10	100.80	30.75	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
14-Oct-45	43	400	4,680	96	1102.05	3.15	100.80	31.25	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
15-Oct-45	44	400			1105.05	3.00	100.80	29.76	19.5	25.9	14.00	38.89	0.835
16-Oct-45	45	400	4,670	86	1107.95	2.90	98.60	29.41	19.5	25.9	13.69	38.04	0.854
17-Oct-45	46	500			1110.00	2.05	95.70	21.42	19.5	25.9	13.29	36.92	0.880
18-Oct-45	47	400	4,540	110	1114.00	4.00	95.70	41.80	19.5	25.9	13.29	36.92	0.880
19-Oct-45	48	450			1117.10	3.10	87.80	35.31	20.0	26.6	12.19	33.87	0.984
20-Oct-45	49	500	4,140	109	1120.20	3.10	93.60	33.12	20.0	26.6	13.00	36.11	0.923
21-Oct-45	50	400			1123.20	3.00	95.70	31.35	20.0	26.6	13.29	36.92	0.902
22-Oct-45	51	500			1126.20	3.00	97.20	30.86	20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
23-Oct-45	52	500	3,990	125	1129.25	3.05	97.20		20.0	26.6	13.50	37.50	0.889
24-Oct-45	53	600			1132.30	3.05	99.36		20.0	26.6	13.80	38.33	0.869
25-Oct-45	54	550			1135.30	3.00	97.20	30.86	21.0	27.9	13.50	37.50	0.933
26-Oct-45	55	600	5,110	108	1138.35	3.05	90.00	33.89	20.5	27.3	12.50	34.72	0.984
จำนวน		39	18	18	39	37	39	37	39	39	39	39	39
ค่าเฉลี่ย		568	4,039	173	1067.40	3.04	97.55	31.63	21.3	28.4	13.55	37.64	0.965
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		233	811	104	53	0.39	9.88	5.62	3.5	4.7	1.37	3.81	0.234



ภาคผนวก ข

การบ่งบอกชนิดของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการฟิช  
(Fluorescent *in situ* Hybridization, FISH)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### การบ่งบอกชนิดของแบคทีเรียในระบบด้วยวิธีการฟิช (Fluorescent *in situ* Hybridization, FISH)

#### หลักการ

ดีเอ็นเอเป็นพอลิเมอร์ของนิวคลีโอไทด์ซึ่งแต่ละหน่วยประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล เบส และหมู่ฟอสเฟตในสัดส่วน 1:1:1 ความแตกต่างของดีเอ็นเอเกิดจากการเรียงตัวของเบสบนสายดีเอ็นเอเหล่านั้น ๆ เบสที่พบทั่วไปในดีเอ็นเอมี 4 ชนิดและสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. เบสพิริดีน มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยวงแหวน 1 วง เบสในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไซโทซีน (cytosine หรือ C) และ ไทมีน (thymine หรือ T)
2. เบสพิวรีน มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวน 2 วง คือวงแหวนพิริมิดีนเชื่อมกับวงแหวนอิมิดาโซล เบสในกลุ่มนี้ ได้แก่ อะดีนีน (adenine หรือ A) และ กัวนีน (guanine หรือ G)

เบสบนดีเอ็นเอจะต่ออยู่กับน้ำตาลซึ่งมีคาร์บอน 5 อะตอมที่ตำแหน่ง C-1' โดยมีหมู่ฟอสเฟตเป็นตัวเชื่อมระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 3' ของน้ำตาลโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 5' ของน้ำตาลโมเลกุลถัดไป

ดีเอ็นเอมีโครงสร้างเป็นเกลียวคล้ายขดลวดสปริง เรียกว่า ฮีลิกซ์ (Helix) และเกลียวของดีเอ็นเอเป็นเกลียวคู่เวียนขวา ถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างเบสที่อยู่บนสายตรงข้ามกัน โดยที่ A จับคู่กับ T ด้วยพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะ และ C จับกับ G ด้วยพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะ

การจับคู่กันของเบสบนสายของดีเอ็นเอเป็นกระบวนการที่จำเพาะและเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเบสบนสายดีเอ็นเอเป็นเบสคู่สมกัน (complementary bases) อย่างไรก็ตามสายดีเอ็นเอต่างชนิดแต่มีเบสบางส่วนเป็นเบสคู่สมกันอาจเกิดการจับเป็นเกลียวได้ในสภาวะที่ทำให้มีอุณหภูมิต่ำ และความเข้มข้นเกลือที่เหมาะสม การจับกันของเบสบนสายดีเอ็นเอที่ต่างกันเรียกว่า ไฮบริไดเซชัน (Hybridization) สิ่งมีชีวิตที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันจะมีลำดับเบสบนสายดีเอ็นเอคล้ายกัน จึงเกิดไฮบริไดเซชันได้ดีกว่าสิ่งมีชีวิตที่มีความแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟิช คือเป็นเทคนิคระดับโมเลกุลซึ่งใช้โพรบโอลิโกนิวคลีโอไทด์ (oligonucleotide probe) ที่สังเคราะห์ขึ้นไปจับกับชุดเบสบนสายอาร์เอ็นเอของสิ่งมีชีวิตที่ต้องการจะตรวจวัด โดยโพรบที่เข้าไปจับกับชุดเบสบนสายอาร์เอ็นเอด้วยวิธีไฮบริไดเซชันนี้สามารถตรวจวัดได้ด้วยแสงฟลูออเรสเซนซ์

#### วิธีการวิเคราะห์

1. ดูดตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ใส่ Eppendorf Tube
2. หมุนเหวี่ยงเซลล์ ด้วยความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1-3 นาที
3. เทน้ำใสส่วนบนออก เขย่า Eppendorf Tube ให้เซลล์หลุดออกมาจากผิว
4. เติม Fixative 750 ไมโครลิตร บ่มเชื้อ ( incubate ) 2 - 24 ชม.

5. หมุนเหวี่ยงเซลล์ ด้วยความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1-3 นาที
6. ดูด Fixative ออก
7. ล้างเซลล์ด้วย 1 X PBS จำนวน 2 ครั้ง
8. เติม 1 X PBS และ Ethanol ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 ให้ได้ปริมาตรรวมในหลอด 1 มิลลิลิตร
9. เจือจางเซลล์ด้วยอัตราส่วน 1 : 10
10. ใช้ Ultrasonic เพื่อให้ตะกอนแตกตัว เป็นเวลา 1-2 นาที
11. ดูดตัวอย่างที่เตรียม 4 ไมโครลิตรใส่ Slide
12. เอาเข้าตู้อบแห้งประมาณ 15 นาที
13. ไล่น้ำออกด้วย Ethanol Series 50% 80% และ 100% แช่ slide ให้ความเข้มข้นละ 3 นาที
14. เติมสารละลายผสมระหว่าง Hybrid Solution และ Probe ที่ต้องการศึกษา (ผสมกันด้วยอัตราส่วน Hybrid Solution : Probe เท่ากับ 9 : 1) ที่ตัวอย่าง 20 ไมโครลิตร
15. Hybridize ที่อุณหภูมิ 46<sup>o</sup> เป็นเวลา 1 - 1.5 ชั่วโมง
16. ล้าง Probe ออกด้วย Washing Buffer ที่อุณหภูมิ 48<sup>o</sup> เป็นเวลา 20 นาที
17. ล้าง Washing Buffer ออกด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ
18. ใส DAPI ที่ตัวอย่างทิ้งไว้ 5 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ
19. ปิดด้วย Cover slide
20. นำตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ในห้องมืด กล้องที่ใช้เป็นกล้องยี่ห้อ Olympus รุ่น DP50 แหล่งกำเนิดแสงใช้ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX60
21. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเก็บบันทึกภาพได้แก่ Viewfinder Lite และ Studio Lite
22. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในนับปริมาณเซลล์ได้แก่ Micro image



สลวขัฒนวิทย์นพริภว  
รูปที่ ข-1 ตัวอย่างโพรบที่ใช้ในการวิเคราะห์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สภามหาวิทยาลัย  
รูปที่ ข-2 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการทดลอง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค  
การคำนวณหาค่าผิดพลาดและอัตราการสลายตัวของระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค

### การคำนวณหาค่าyieldและอัตราการสลายตัวของระบบ

การคำนวณหาค่าyieldและอัตราการสลายตัวของจุลชีพในระบบ

นิยามของค่าyieldจุลชีพในระบบ (Yield) คือ อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่จุลชีพใช้ในการสังเคราะห์เซลล์จุลชีพต่อปริมาณสารอาหาร (Substrate) ที่ถูกใช้ไป หรือที่ถูกย่อยสลาย ซึ่งสารอาหารที่ใช้เปรียบเทียบกับนี้ ขึ้นอยู่กับสภาวะ และชนิดของจุลชีพ ที่เกี่ยวข้อง

หากเป็นสภาวะเติมออกซิเจน และจุลชีพเป็นแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟ ค่าyieldสารอาหารที่ใช้เปรียบเทียบกับก็คือ ปริมาณสารอินทรีย์ แต่หากเป็นแบคทีเรียออโตโทรฟซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สารอาหารที่ใช้เปรียบเทียบกับจะเป็น ปริมาณแอมโมเนีย

แต่สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทั้งแบบเติมออกซิเจนและไร้ออกซิเจนทั่วไป ที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งมีองค์ประกอบมากมายในน้ำเสีย ค่าyieldจึงเปรียบเทียบกับค่าซีโอดี หรือบีโอดีที่ถูกใช้ไป

ค่าyieldและอัตราการสลายตัวของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟในระบบสามารถคำนวณได้พร้อมกันจากสมการ

$$P_x = \frac{Y_H Q_i (C_i - C_{acr})}{1 + k_d \cdot \theta_c}$$

ซึ่งแปลงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{Q_i (C_i - C_{acr})}{P_x} = \frac{1}{Y_H} + \frac{k_d \cdot \theta_c}{Y_H}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างอายุสลัดจ์ กับอัตราส่วนอาหารต่อมวลจุลชีพที่ทิ้ง จะได้ความสัมพันธ์เท่ากับอัตราการสลายตัวต่อค่าyieldของระบบ และจุดตัดแกนวายเป็นผลผันของค่าyield

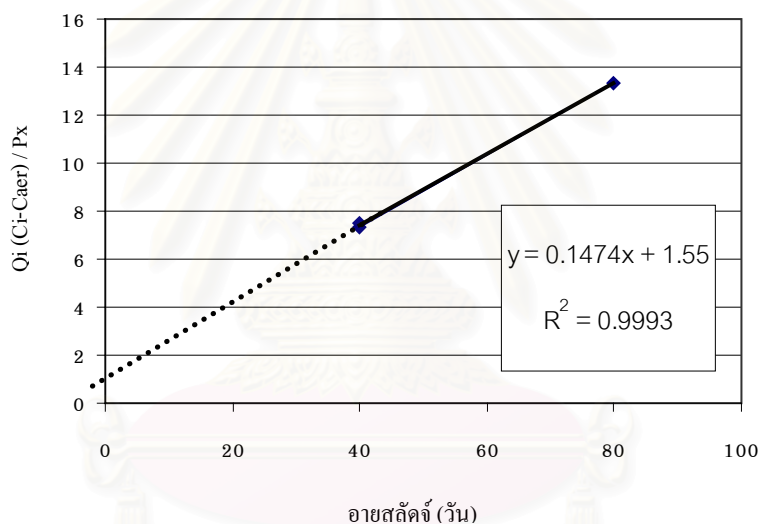
แต่เนื่องจากระบบที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสภาวะแอนน็อกซิก สภาวะไร้ออกซิเจน และสภาวะเติมออกซิเจน ซึ่งในแต่ละสภาวะจุลชีพในระบบมีค่าyieldที่แตกต่างกัน และการเจริญเติบโตส่วนใหญ่ของจุลชีพในระบบเกิดขึ้นในส่วนเติมออกซิเจน

ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้ปริมาณจุลชีพในส่วนเติมออกซิเจนเป็นตัวแทนของระบบ

ตารางที่ ค-1 การคำนวณค่ายิลด์และอัตราการสลายตัวของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟในระบบ

การทดลอง ที่	$\theta_c$ (วัน)	$C_i$ (มก./ล.)	$C_{acr}$ (มก./ล.)	$Q_i$ (ล./วัน)	$P_x$ (มก.VSS/วัน)	$\frac{Q_i (C_i - C_{acr})}{P_x}$
1	40	327	27	96.46	3841	7.53
2	40	320	15	92.33	3829	7.36
3	80	323	21	99.68	2257	13.34

ซึ่งจะสร้างกราฟได้ดังนี้



จากกราฟค่า

$$1 / Y_H = 1.55$$

และ


$$k_d / Y_H = 0.148$$

ดังนั้นจะได้ค่า

$$Y_H = 0.65 \text{ ก.VSS/ก.COD}$$

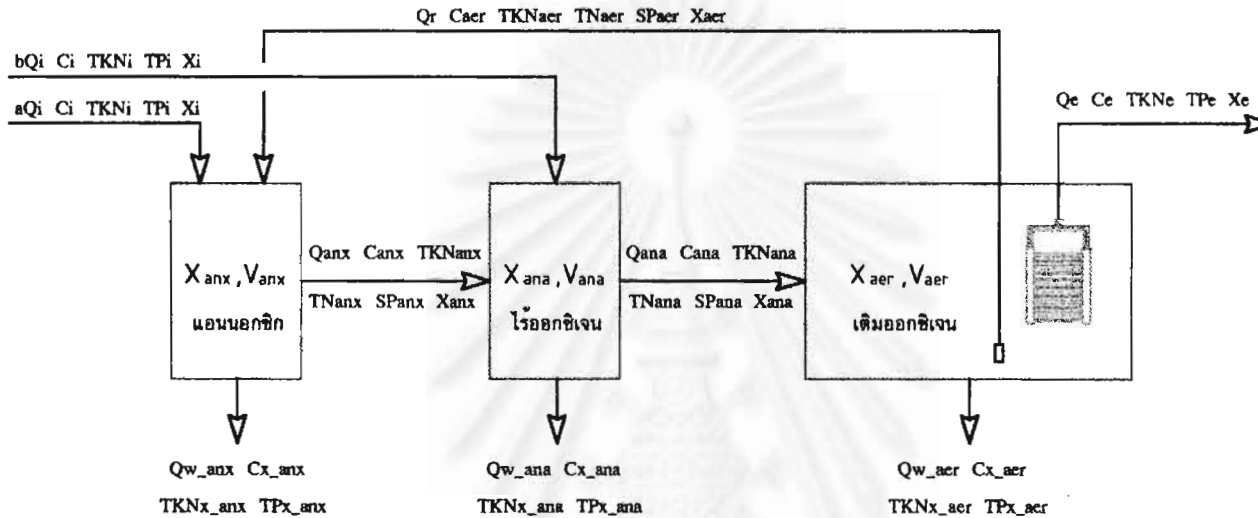
และ

$$k_d = 0.095 \text{ ต่อวัน}$$



ภาคผนวก ง  
สมุดมูลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**สัญลักษณ์**

- $Q_i$  = อัตราการไหลรวมของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (ลิตรต่อวัน)
- $Q_w$  = อัตราการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน (ลิตรต่อวัน)

- $C$  = ความเข้มข้นของซีโอดี (มก./ล.)
- $TKN$  = ความเข้มข้นของทีเคเอ็น (มก./ล.)
- $TN$  = ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)
- $TP$  = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.)
- $SP$  = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสละลาย (มก./ล.)
- $X$  = ความเข้มข้นของของแข็ง (มก./ล.)
- $V$  = ปริมาตรของส่วน (ลิตร)

- $anx$  = ของส่วนแอนนอกซิก
- $ana$  = ของส่วนไร้ออกซิเจน
- $acr$  = ของส่วนเติมออกซิเจน
- $x_{anx}$  = ความเข้มข้นในเซลล์จุลชีพจากส่วนแอนนอกซิก
- $x_{ana}$  = ความเข้มข้นในเซลล์จุลชีพจากส่วนไร้ออกซิเจน
- $x_{acr}$  = ความเข้มข้นในเซลล์จุลชีพจากส่วนเติมออกซิเจน
- $i$  = ของน้ำเสียเข้าระบบ
- $e$  = ของน้ำทิ้งที่ผ่านผ่นเยื่อแล้ว

	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
$Q_i$	96.46	92.33	99.68
$a$	0.25	0.75	0.75
$b$	0.75	0.25	0.25
$Q_{w\_anx}$	0.50	0.50	0.25
$Q_{w\_ana}$	0.50	0.50	0.25
$Q_{w\_acr}$	1.250	1.250	0.625

$Q_r$  = อัตราการเวียนสลัดจ์ 120 ลิตรต่อวัน

รูปที่ ง-1 การสมดุลมวลของระบบ

ภาคผนวก ง  
สมดุลมวลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ

1. สมดุลของชีโอดีในระบบ

ดุลมวลชีโอดีของการทดลองที่ 1 :

$$\begin{aligned} Q_i \times C_i &= Q_{w\_anx} \times C_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times C_{x\_ana} + \\ & Q_{w\_aer} \times C_{x\_aer} + Q_e \times C_{aer} \\ 96.46 \times 327 &= (0.50 \times 3,444 \times 1.20^*) + (0.50 \times 3,330 \times 1.20) + \\ & (1.25 \times 4,100 \times 1.20) + 94.21 \times 27 \\ 31,542 &= 12,758 \end{aligned}$$

ปริมาณชีโอดีที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 10.21 ก./วัน

ปริมาณชีโอดีที่หายไปเท่ากับ 59.5 %

ดุลมวลชีโอดีของการทดลองที่ 2 :

$$\begin{aligned} Q_i \times C_i &= Q_{w\_anx} \times C_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times C_{x\_ana} + \\ & Q_{w\_aer} \times C_{x\_aer} + Q_e \times C_{aer} \\ 92.33 \times 320 &= (0.50 \times 3,314 \times 1.20) + (0.50 \times 3,066 \times 1.20) + \\ & (1.25 \times 4,084 \times 1.20) + 90.08 \times 15 \\ 29,546 &= 11,305 \end{aligned}$$

ปริมาณชีโอดีที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 9.95 ก./วัน

ปริมาณชีโอดีที่หายไป 61.7 %

ดุลมวลชีโอดีของการทดลองที่ 3 :

$$\begin{aligned} Q_i \times C_i &= Q_{w\_anx} \times C_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times C_{x\_ana} + \\ & Q_{w\_aer} \times C_{x\_aer} + Q_e \times C_{aer} \\ 99.68 \times 323 &= (0.25 \times 4,037 \times 1.20) + (0.25 \times 3,675 \times 1.20) + \\ & (0.625 \times 4,582 \times 1.20) + 98.56 \times 21 \\ 32,197 &= 7,820 \end{aligned}$$

ปริมาณชีโอดีที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 5.75 ก./วัน

ปริมาณชีโอดีที่หายไป 75.7 %

\* อัตราส่วนชีโอดีต่อเอสเอสเท่ากับ 1.20 มก.ชีโอดี/มก.เอสเอส (Grady และคณะ ,1999)

## 2. สมดุลของไนโตรเจนในระบบ

ดุลมวลที่เคเอ็นของการทดลองที่ 1 :

$$Q_i \times \text{TKNi} = Q_{w\_anx} \times \text{TKNx\_anx} + Q_{w\_ana} \times \text{TKNx\_ana} + \\ Q_{w\_aer} \times \text{TKNx\_aer} + Q_e \times \text{TKNaer}$$

$$96.46 \times 35.4 = 0.50 \times 2,625 \times 0.112^* + 0.50 \times 2,475 \times 0.112 + \\ 1.250 \times 3,073 \times 0.112 + 94.21 \times 2.9$$

$$3,415 = 989$$

ปริมาณที่เคเอ็นที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 716 มก./วัน

ปริมาณที่เคเอ็นที่หายไปเท่ากับ 71%

ดุลมวลที่เคเอ็นของการทดลองที่ 2 :

$$Q_i \times \text{TKNi} = Q_{w\_anx} \times \text{TKNx\_anx} + Q_{w\_ana} \times \text{TKNx\_ana} + \\ Q_{w\_aer} \times \text{TKNx\_aer} + Q_e \times \text{TKNaer}$$

$$92.33 \times 37.3 = 0.50 \times 2,547 \times 0.112^* + 0.50 \times 2,338 \times 0.112 + \\ 1.250 \times 3,063 \times 0.112 + 90.08 \times 1.2$$

$$3,444 = 810$$

ปริมาณที่เคเอ็นที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 702 มก./วัน

ปริมาณที่เคเอ็นที่หายไปเท่ากับ 76%

ดุลมวลที่เคเอ็นของการทดลองที่ 3 :

$$Q_i \times \text{TKNi} = Q_{w\_anx} \times \text{TKNx\_anx} + Q_{w\_ana} \times \text{TKNx\_ana} + \\ Q_{w\_aer} \times \text{TKNx\_aer} + Q_e \times \text{TKNaer}$$

$$99.68 \times 34.6 = 0.25 \times 3,229 \times 0.115^* + 0.25 \times 2,921 \times 0.115 + \\ 0.625 \times 3,611 \times 0.115 + 98.56 \times 2.1$$

$$3,449 = 643$$

ปริมาณที่เคเอ็นที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์เท่ากับ 436 มก./วัน

ปริมาณที่เคเอ็นที่หายไปเท่ากับ 81%

\* อัตราส่วนที่เคเอ็นในเซลล์เท่ากับ 0.112 มก.ที่เคเอ็นต่อมก.วีเอสเอสในการทดลองที่

1 กับ 2 และเท่ากับ 0.115 ในการทดลองที่ 3

## 3. สมดุลของฟอสฟอรัสในระบบ

ตุลมวลฟอสฟอรัส ของการทดลองที่ 1 :

$$\begin{aligned}
 Q_i \times P_i &= Q_{w\_anx} \times TP_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times TP_{x\_ana} + \\
 & Q_{w\_aer} \times TP_{x\_aer} + Q_e \times SP_{aer} \\
 96.46 \times 8.2 &= 0.50 \times 2,625 \times 0.076^* + 0.50 \times 2,475 \times 0.076 + \\
 & 1.25 \times 3,073 \times 0.076 + 94.21 \times 2.1 \\
 791.0 &= 683.6
 \end{aligned}$$

ฟอสฟอรัสที่หายไปเท่ากับ 13.6 %

\*ฟอสฟอรัสในเซลล์เท่ากับ 7.6%

ตุลมวลฟอสฟอรัส ของการทดลองที่ 2 :

$$\begin{aligned}
 Q_i \times P_i &= Q_{w\_anx} \times TP_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times TP_{x\_ana} + \\
 & Q_{w\_aer} \times TP_{x\_aer} + Q_e \times SP_{aer} \\
 92.33 \times 7.5 &= 0.50 \times 2,547 \times 0.084^* + 0.50 \times 2,338 \times 0.084 + \\
 & 1.25 \times 3,063 \times 0.084 + 90.08 \times 1.9 \\
 692.5 &= 639.3
 \end{aligned}$$

ฟอสฟอรัสที่หายไปเท่ากับ 7.7 %

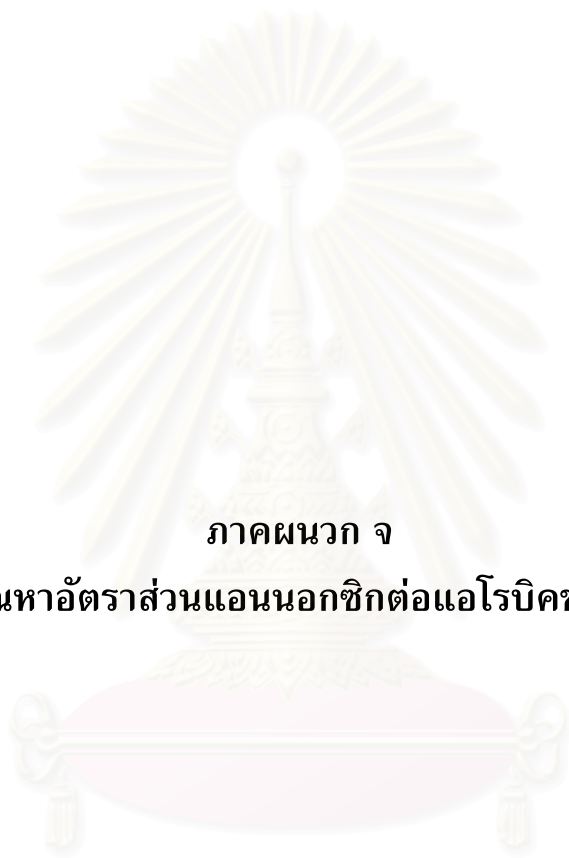
\*ฟอสฟอรัสในเซลล์เท่ากับ 8.4%

ตุลมวลฟอสฟอรัส ของการทดลองที่ 3 :

$$\begin{aligned}
 Q_i \times P_i &= Q_{w\_anx} \times TP_{x\_anx} + Q_{w\_ana} \times TP_{x\_ana} + \\
 & Q_{w\_aer} \times TP_{x\_aer} + Q_e \times SP_{aer} \\
 99.68 \times 8.1 &= 0.25 \times 3,229 \times 0.107^* + 0.25 \times 2,921 \times 0.107 + \\
 & 0.625 \times 3,611 \times 0.107 + 98.56 \times 1.8 \\
 807.4 &= 583.4
 \end{aligned}$$

ฟอสฟอรัสที่หายไปเท่ากับ 27.7 %

\*ฟอสฟอรัสในเซลล์เท่ากับ 10.7%



ภาคผนวก จ

การคำนวณหาอัตราส่วนแอนนอซิกต่อแอมโรบิคของเอสเอ็นดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก จ

## การคำนวณหาอัตราส่วนแอนน็อกซิกต่อแอโรบิกของเอสเอ็นดี

โดยมีสมมติเบื้องต้นว่าฟล็อกมีลักษณะเป็นทรงกลม และส่วนที่ออกซิเจนซึมถึงจะเกิดสภาวะเติมออกซิเจน (Aerobic) ส่วนที่ออกซิเจนซึมไม่ถึงจะเกิดสภาวะแอนน็อกซิก (Anoxic) ซึ่งอัตราส่วนของสภาวะแอนน็อกซิกต่อสภาวะเติมออกซิเจนของการทดลองที่ 2 และ 3 คำนวณได้ดังนี้

การทดลองที่ 2 : อายุสลัดจ์ 40 วัน

การคำนวณปริมาตรของฟล็อกอายุสลัดจ์ 40 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทั้งหมดของฟล็อก (Vt,40)} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \\ &= \frac{4}{3} \pi (70)^3 \\ &= 1,437,333 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

การคำนวณส่วนแอนน็อกซิกในฟล็อกอายุสลัดจ์ 40 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนแอนน็อกซิกในฟล็อก} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \\ (\text{Vanx,40}) &= \frac{4}{3} \pi (41.2)^3 \\ &= 293,056 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

การคำนวณส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อกอายุสลัดจ์ 40 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนเติมออกซิเจนในฟล็อก} &= Vt,40 - Vanx,40 \\ (\text{Vaer,40}) &= 1,437,333 - 293,056 \\ &= 1,144,277 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนแอนน็อกซิกต่อส่วนเติมออกซิเจน} &= 293,056 / 1,144,277 \\ &= 0.26 \end{aligned}$$

การทดลองที่ 3 : อายุสัตว์ 80 วัน

การคำนวณปริมาตรของฟล็อกอายุสัตว์ 80 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทั้งหมดของฟล็อก (Vt,80)} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \\ &= \frac{4}{3} \pi (95)^3 \\ &= 3,592,810 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

การคำนวณส่วนแอนนอกซิกในฟล็อกอายุสัตว์ 80 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนแอนนอกซิกในฟล็อก} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \\ (\text{Vax,80}) &= \frac{4}{3} \pi (52.6)^3 \\ &= 609,847 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

การคำนวณส่วนเต็มออกซิเจนในฟล็อกอายุสัตว์ 80 วัน :

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนเต็มออกซิเจนในฟล็อก} &= Vt,80 - Vax,80 \\ (\text{Vaer,80}) &= 3,592,810 - 609,847 \\ &= 2,982,963 \text{ ไมครอน}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนแอนนอกซิกต่อส่วนเต็มออกซิเจน} &= 609,847 / 2,982,963 \\ &= 0.20 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ฉ**  
**การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ**  
**( Specific Nitrification Rate, SNR )**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ  
การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ  
( Specific Nitrification Rate, SNR )

หลักการ

ในสภาวะเติมออกซิเจน ไนตริไฟเออร์ในระบบจะออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน พลังงานที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการบำรุงรักษาเซลล์ ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ไนไตรต์ และไนเตรต วิธีการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ จึงเอาเซลล์มาจากปลายส่วนไร้ออกซิเจนก่อนจะเข้าสู่ส่วนเติมออกซิเจน และควบคุมสภาวะที่เกิดขึ้นให้เป็นสภาวะเติมออกซิเจนด้วยการเติมอากาศ

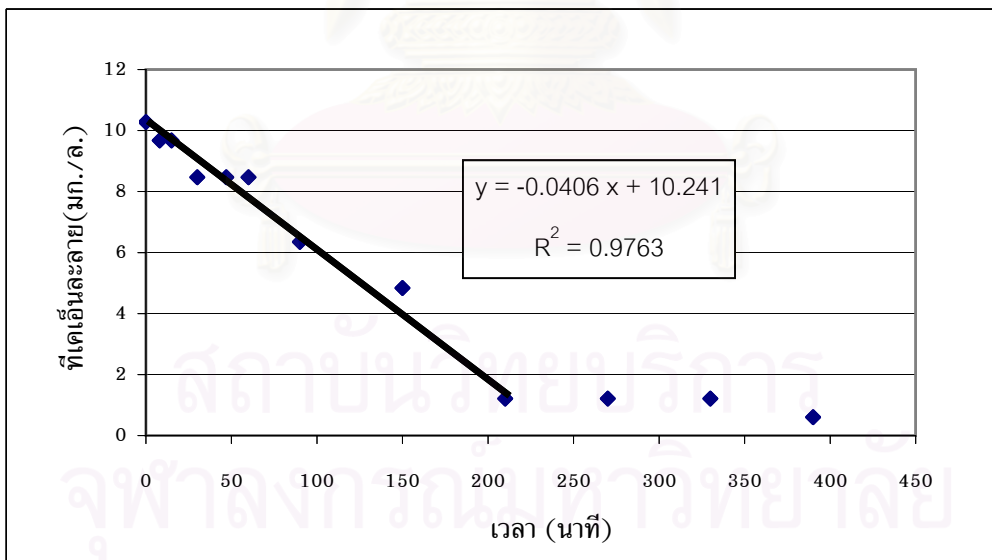
วิธีการ

1. นำเชื้อมาจากส่วนไร้ออกซิเจน 2,000 มิลลิลิตร
2. จัดบันทึกพีเอช ค่าออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิ
3. เติมออกซิเจนด้วยเครื่องเติมอากาศ
3. เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 20 มิลลิลิตร ดังนี้  
0 8 15 30 45 60 90 120 180 240 300 และ 360 นาที
4. นำตัวอย่างที่เก็บมาวัดค่าที่เคเอ็น ไนไตรต์ ไนเตรต แล้วสร้างกราฟระหว่างที่เคเอ็นกับเวลา
5. วัดค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอสของตัวอย่าง
6. นำค่าความชันในช่วงแรกจากกราฟที่สร้างขึ้นมาหารด้วยน้ำหนักของเชื้อในการทดลอง จะได้เท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะของระบบ

ฉ-1 การหาอัตราการปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ อายุสัตจ์ 40 วัน

228

เวลา (นาที)	ทีเคเอ็นละลาย (มก./ล.)
0	10.3
8	9.7
15	9.7
30	8.5
47	8.5
60	8.5
90	6.4
150	4.8
210	1.2
270	1.2
330	1.2
390	0.6

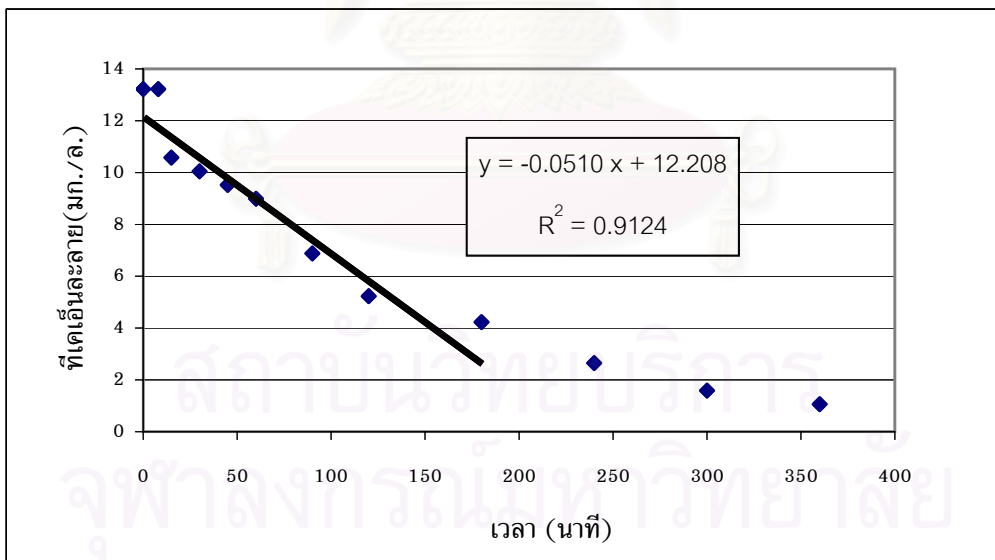


ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	1,640	มก./ล.
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน	2.436	มก.TKN/ล.-ชม.
อัตราการปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ	1.49	มก.TKN/ก.VSS-ช

ฉ-2 การหาอัตราการปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ อายุสลัดจ์ 80 วัน

229

เวลา (นาที)	ทีเคเอ็นละลาย (มก./ล.)
0	13.2
8	13.2
15	10.6
30	10.1
45	9.5
60	9.0
90	6.9
120	5.2
180	4.2
240	2.7
300	1.6
360	1.1



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,195	มก./ล.
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน	3.06	มก.TKN/ล.-ชม.
อัตราการปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจำเพาะ	1.39	มก.TKN/ก.VSS-ช



**ภาคผนวก ช**  
**การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ**  
**( Specific Denitrification Rate, SDNR )**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช  
การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ  
( Specific Denitrification Rate, SDNR )

หลักการ

ในสภาวะแอนน็อกซิก ดีไนตริไฟเออร์ในระบบจะใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยมีแหล่งคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน วิธีการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะคายจึงต้องเติมคาร์บอนให้เพียงพอเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน เนื่องจากรูปแบบการไหลของระบบ เซลล์มาจากส่วนเติมออกซิเจนจะถูกหมุนเวียนมาส่วนแอนน็อกซิก ดังนั้นจึงนำเซลล์มาจากปลายส่วนเติมออกซิเจนมาใช้หาค่า และควบคุมสภาวะที่เกิดให้เป็นสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยการกวน

วิธีการ

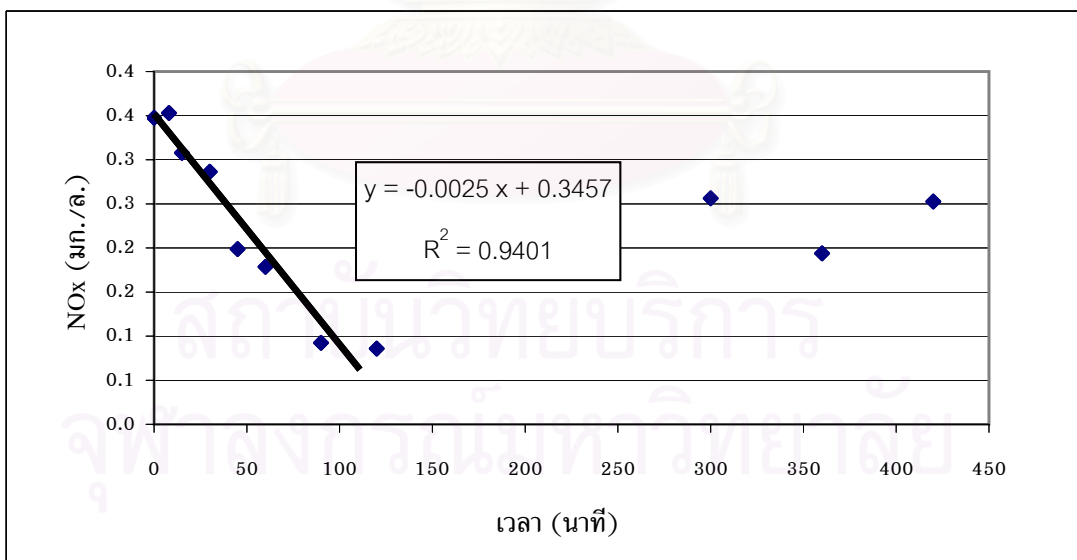
1. นำเชื้อมาจากส่วนเติมออกซิเจน 2,000 มิลลิลิตร
2. เติมสารเคมีต่าง ๆ ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนี้
 

- Acetic acid	0.6	มล.
- $K_2HPO_3$	0.073	กรัม
- $MgSO_4$	0.03	กรัม
- $CaCl_2$	0.01	กรัม
- $NH_4Cl$	0.30	กรัม
- $Na_2HCO_3$	0.56	กรัม (ทั้งหมดในน้ำ 2 ลิตร)
3. จัดบันทึกพีเอช และอุณหภูมิ
4. กวนผสมด้วย Magnetic Stirrer
5. เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่าง ๆ ครั้งละ 100 มิลลิลิตร ดังนี้  
0 8 15 30 45 60 90 120 180 240 300 และ 360 นาที
6. นำตัวอย่างที่เก็บมาวัดค่าไนโตรต ไนเตรต ที่เคเอ็น แล้วสร้างกราฟระหว่างไนเตรตกับเวลา
7. วัดค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอสของตัวอย่าง
8. นำค่าความชันในช่วงแรกจากกราฟที่สร้างขึ้นมาหารด้วยน้ำหนักของเชื้อในการทดลอง จะได้เท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะของระบบ



ช-1 การหาอัตราการปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ อายุสัตจ์ 40 วัน

เวลา (นาที)	ไนเตรต (มก./ล.)
0	0.35
8	0.35
15	0.31
30	0.29
45	0.20
60	0.18
90	0.09
120	0.09
180	0.20
240	0.26
300	0.26
360	0.19
420	0.25



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,142	มก./ล.
อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน	0.15	มก.NO3/ล-ชม.
อัตราการปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจำเพาะ	0.07	มก.NO3/ก.VSS-ชม.





**ภาคผนวก ซ**  
**การหาค่าอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ**  
**( Specific Phosphorus Release Rate, SPRR )**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช  
การหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ  
( Specific Phosphorus Release Rate, SPRR )

หลักการ

ในสภาวะไร้ออกซิเจนพีเอไอในระบบจะจับใช้คาร์บอนภายนอกเซลล์เพื่อมาเก็บสะสมไว้ในเซลล์ การเก็บสะสมคาร์บอนนี้ทำให้เกิดการคายฟอสฟอรัสออกมานอกเซลล์ เพื่อให้ได้พลังงานในการจับใช้คาร์บอน วิธีการหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะจึงต้องเติมคาร์บอนให้เพียงพอ และในเซลล์แบคทีเรียจะต้องมีฟอสฟอรัสสะสมอยู่แล้วในเซลล์ จึงเอาเซลล์มาจากส่วนเติมออกซิเจน ซึ่งเกิดการสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์แล้ว และควบคุมสภาวะที่เกิดขึ้นให้เป็นสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยการกวน

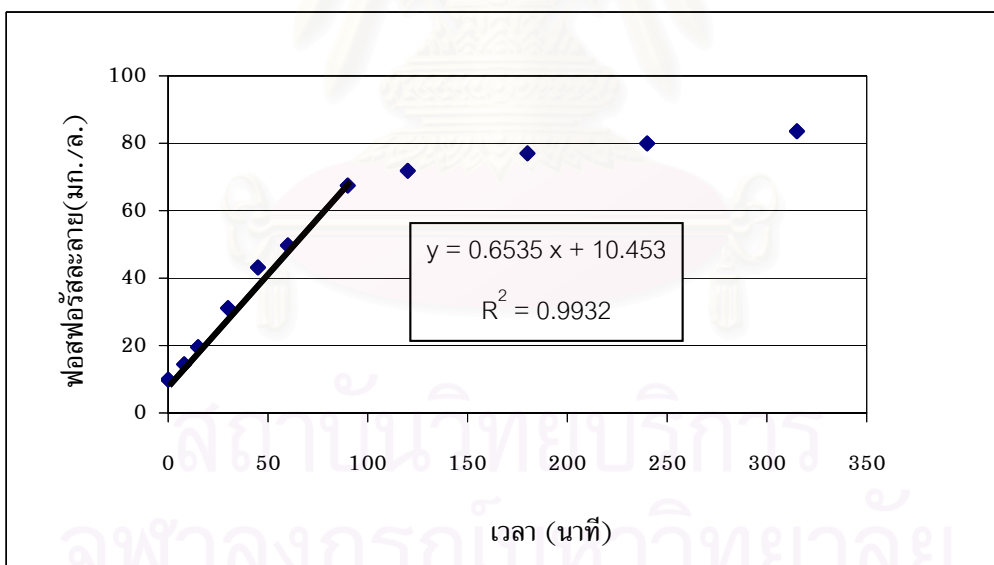
วิธีการ

1. นำเชื้อมาจากส่วนเติมออกซิเจน 2,000 มิลลิลิตร
2. เติมสารเคมีต่าง ๆ ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนี้
 

- Acetic acid	0.6	มล.
- MgSO <sub>4</sub>	0.03	กรัม
- CaCl <sub>2</sub>	0.01	กรัม
- NH <sub>4</sub> Cl	0.30	กรัม
- Na <sub>2</sub> HCO <sub>3</sub>	0.56	กรัม (ทั้งหมดในน้ำ 2 ลิตร)
3. จัดบันทึกพีเอช และอุณหภูมิ
4. กวนผสมด้วย Magnetic Stirrer
5. เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่าง ๆ ครั้งละ 20 มิลลิลิตร ดังนี้  
0 8 15 30 45 60 90 120 180 240 และ 300 นาที
6. นำตัวอย่างที่เก็บมาวัดค่าฟอสฟอรัสละลาย แล้วสร้างกราฟระหว่างฟอสฟอรัสละลายกับเวลา
7. วัดค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอสของตัวอย่าง
8. นำค่าความชันในช่วงแรกจากกราฟที่สร้างขึ้นมาหารด้วยน้ำหนักของเชื้อในการทดลอง จะได้เท่ากับอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะของระบบ

ซ-1 การหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ อายุสัตว์ 40 วัน

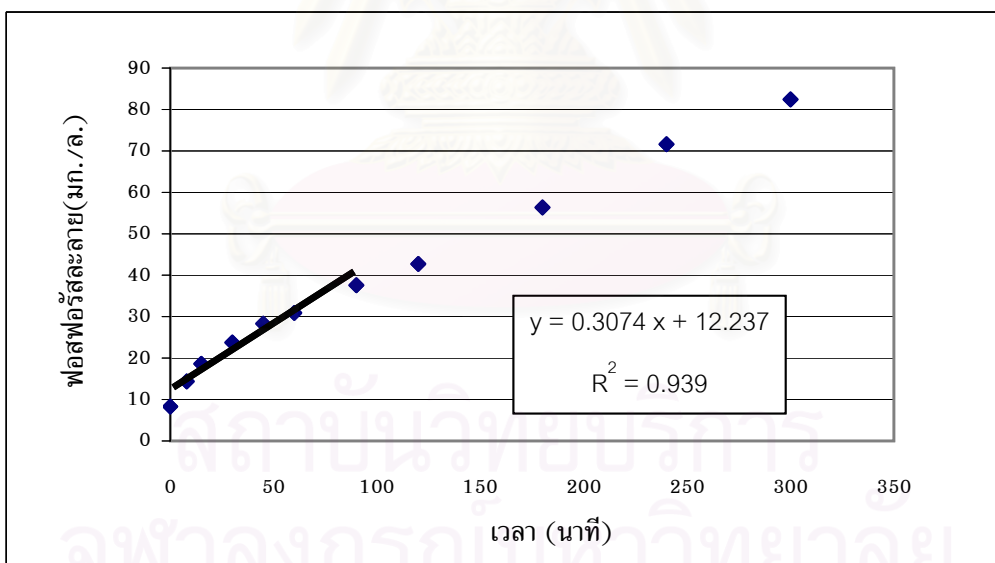
เวลา (นาที)	ฟอสฟอรัสละลาย (มก./ล.)
0	9.9
8	14.4
15	19.5
30	31.1
45	43.2
60	49.7
90	67.5
120	71.9
180	77.0
240	80.0
315	83.6




ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,300	มก./ล.
อัตราการคายฟอสฟอรัส	39.21	มก.P/ชม.
อัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ	17.04	มก.P/ก.VSS-ชม.

ช-2 การหาอัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ อายุสัตว์ 80 วัน

เวลา (นาที)	ฟอสฟอรัสละลาย (มก./ล.)
0	8.3
8	14.4
15	18.6
30	23.8
45	28.3
60	30.9
90	37.6
120	42.7
180	56.3
240	71.6
300	82.4



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,510	มก./ล.
อัตราการคายฟอสฟอรัส	18.44	มก.P/ชม.
อัตราการคายฟอสฟอรัสจำเพาะ	7.35	มก.P/ก.VSS-ชม.



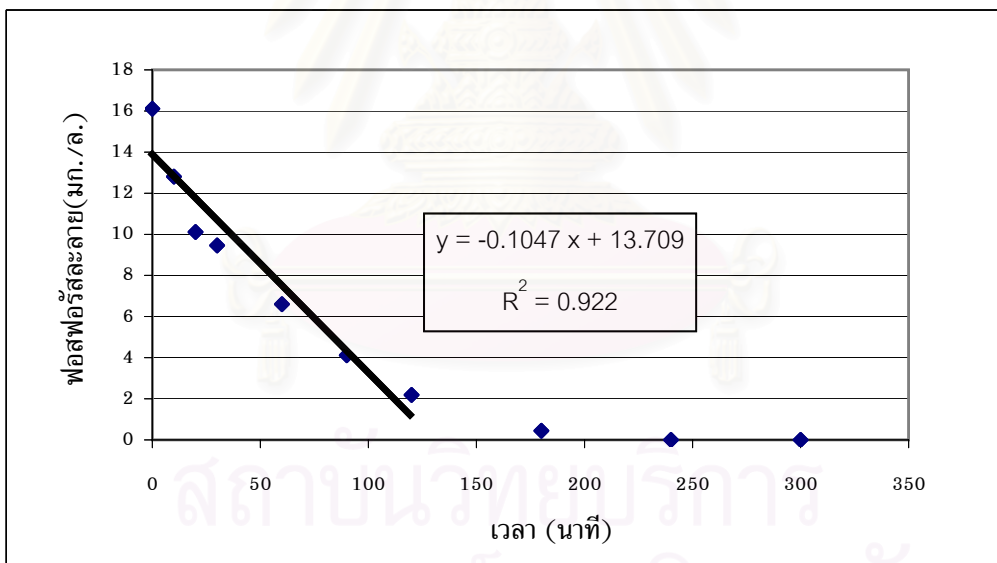
**ภาคผนวก ฅ**  
**การหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ**  
**( Specific Phosphorus Uptake Rate, SPUR )**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณ-1 การหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ อายุสัตจ์ 40 วัน

240

เวลา (นาที)	ฟอสฟอรัสละลาย (มก./ล.)
0	16.1
10	12.8
20	10.1
30	9.5
60	6.6
90	4.1
120	2.2
180	0.4
240	0.0
300	0.0



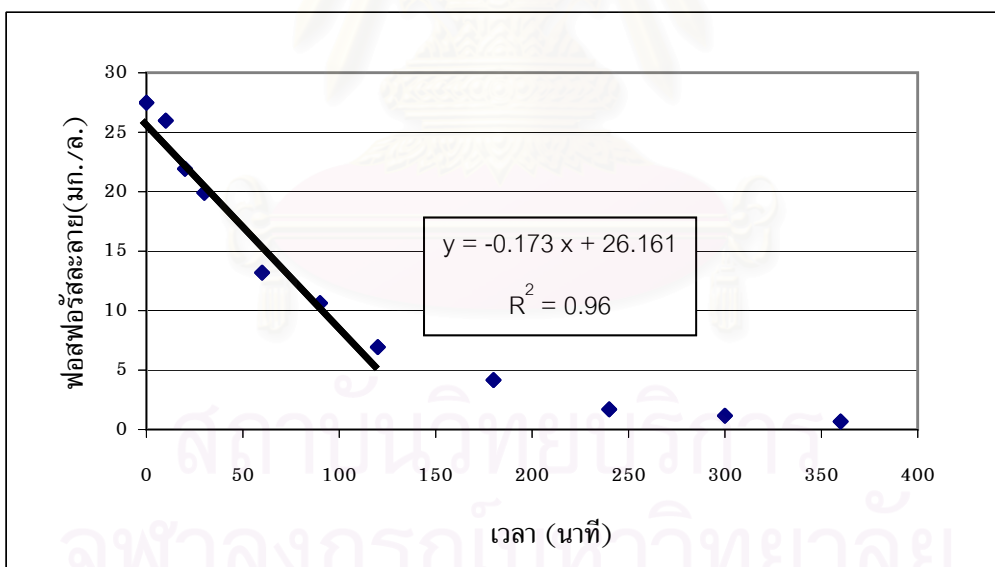
ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	1,860	มก./ล.
อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส	6.282	มก.P/ชม.
อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ	3.38	มก.P/ก.VSS-ชม.



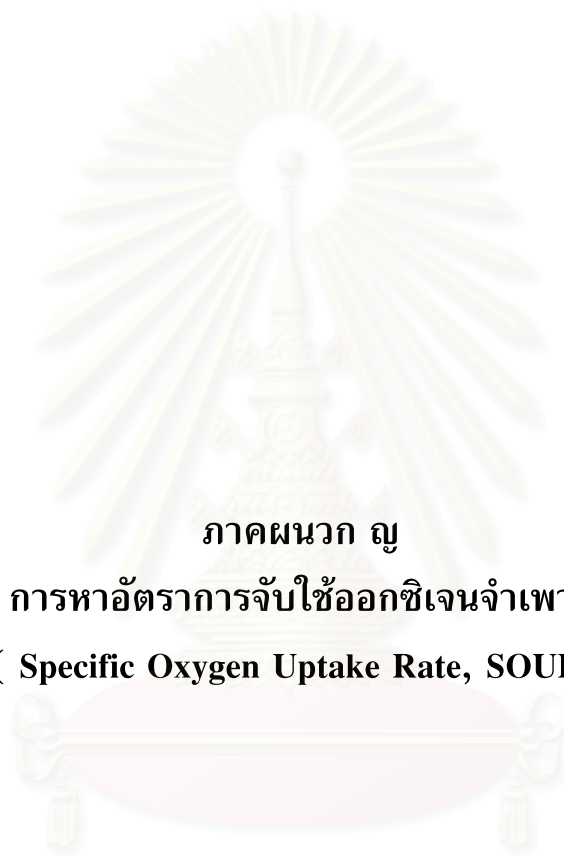
ณ-2 การหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ อายุสไลด์จ์ 80 วัน

241

เวลา (นาที)	ฟอสฟอรัสละลาย (มก./ล.)
0	27.5
10	26.0
20	21.9
30	19.9
60	13.2
90	10.6
120	6.9
180	4.2
240	1.7
300	1.2
360	0.67



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,530	มก./ล.
อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส	10.38	มก.P/ชม.
อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ	4.10	มก.P/ก.VSS-ชม.



ภาคผนวก ญ  
การหาอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ  
( Specific Oxygen Uptake Rate, SOUR )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ  
การหาอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ  
( Specific Oxygen Uptake Rate, SOUR )

วิธีการ

1. นำเชื้อมาจากส่วนไร้ออกซิเจน 2,000 มิลลิลิตร
2. จัดบันทึกพีเอช และอุณหภูมิ
3. เติมออกซิเจนด้วยเครื่องเติมอากาศให้ได้ค่าออกซิเจนเริ่มต้นประมาณ 6.0 มก./ล.
4. เก็บค่าออกซิเจนละลายด้วยเครื่องดีโอ ทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
5. สร้างกราฟระหว่างออกซิเจนละลายกับเวลา
6. วัดค่าเอ็มแอลเอสเอส และเอ็มแอลวีเอสเอสของตัวอย่าง
7. นำค่าความชันจากกราฟที่สร้างขึ้นมาหารด้วยน้ำหนักของเชื้อในการทดลอง จะได้เท่ากับอัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะของระบบ



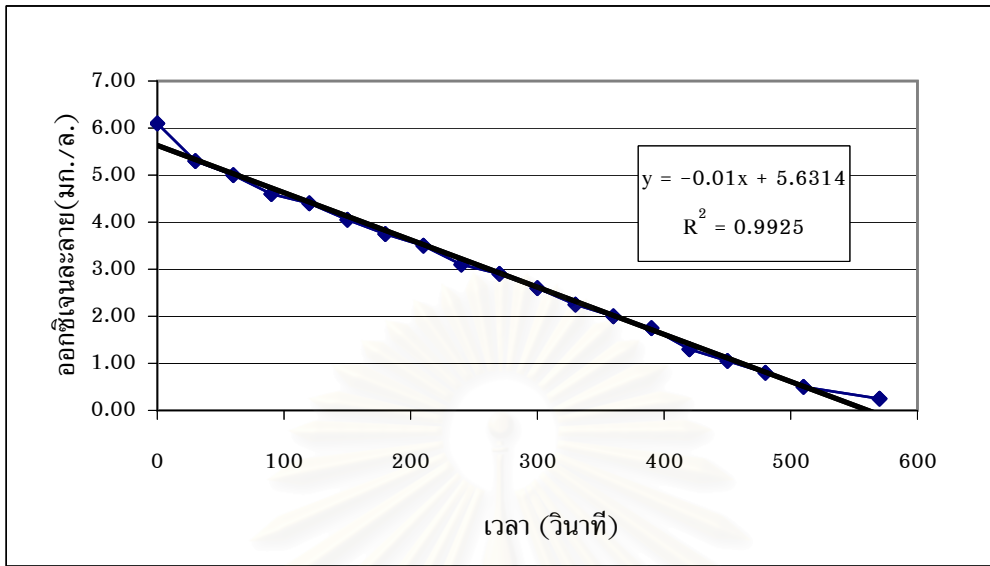
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ญ-1 การหาอัตราการจับใช้ออกซิเจนละลายจำเพาะ อายุสัตว์ 40 วัน

244

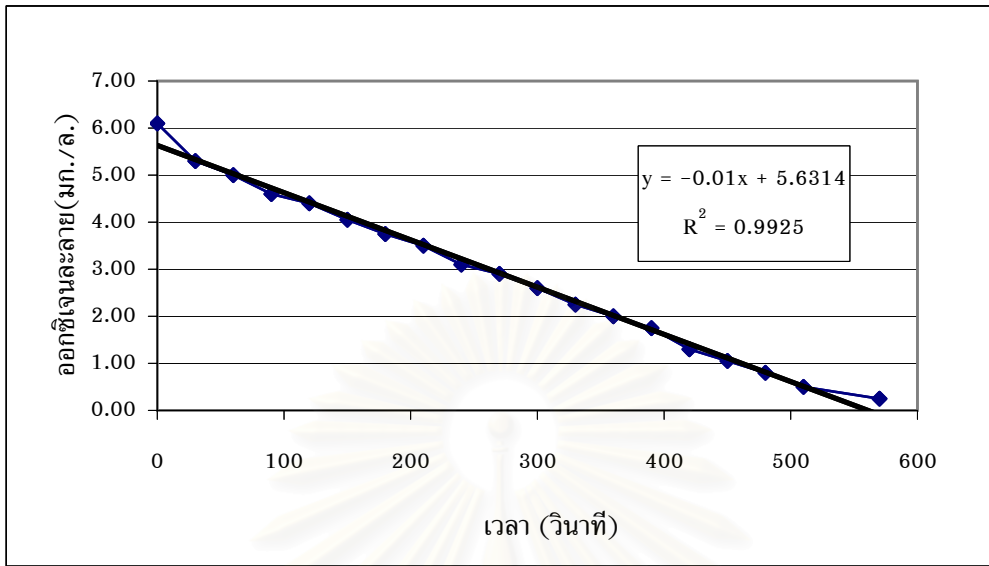
เวลา (วินาที)	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)
0	6.10
30	5.30
60	5.00
90	4.60
120	4.40
150	4.05
180	3.75
210	3.50
240	3.10
270	2.90
300	2.60
330	2.25
360	2.00
390	1.75
420	1.30
450	1.05
480	0.80
510	0.50
570	0.25
600	0.25
630	0.25
660	0.25

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	1,970	มก./ล.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนละลาย	36.00	มก.DO/ชม.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ	18.27	มก.DO/ก.VSS-ชม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



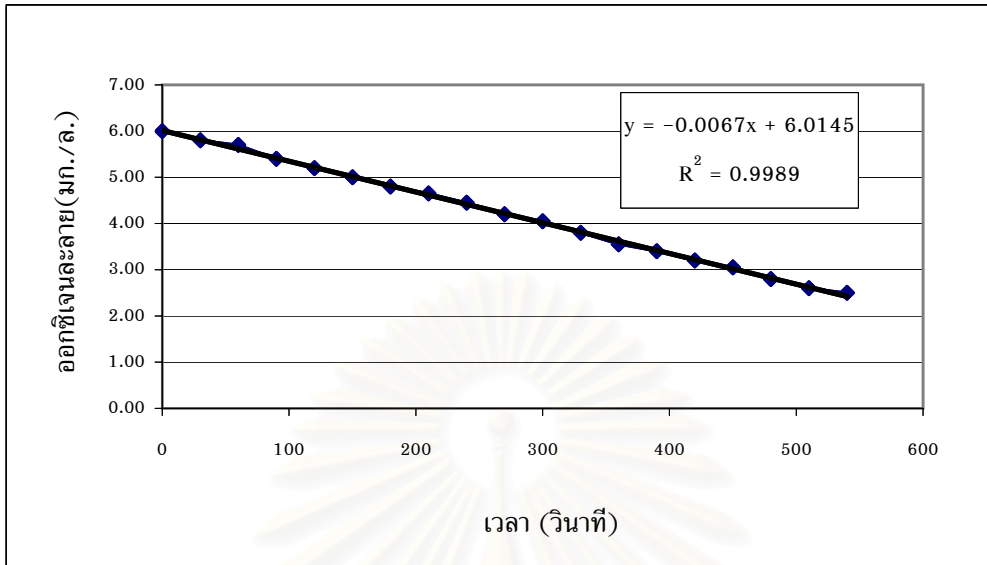
ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	1,970	มก./ล.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนละลาย	36.00	มก.DO/ชม.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ	18.27	มก.DO/ก.VSS-ชม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ญ-2 การหาอัตราการจับใช้ออกซิเจนละลายจำเพาะ อายุสัตว์ 80 วัน

246

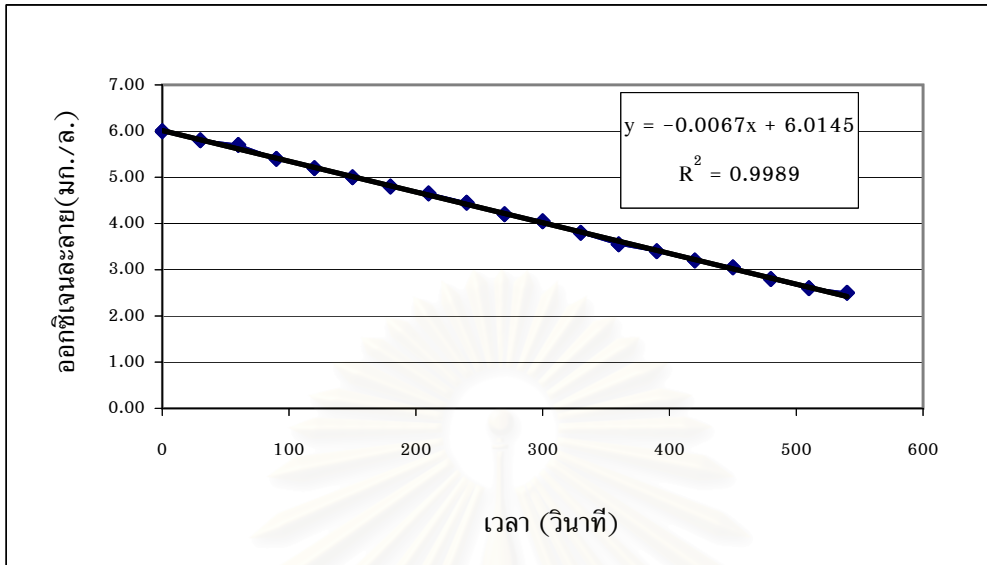
เวลา (วินาที)	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)
0	6.00
30	5.80
60	5.70
90	5.40
120	5.20
150	5.00
180	4.80
210	4.65
240	4.45
270	4.20
300	4.05
330	3.80
360	3.55
390	3.40
420	3.20
450	3.05
480	2.80
510	2.60
540	2.50
570	2.30
600	2.05
630	1.90
660	1.60
750	1.20
780	1.00



ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,227	มก./ล.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนละลาย	24.12	มก.DO/ชม.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ	10.83	มก.DO/ก.VSS-ชม.


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส	2,227	มก./ล.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนละลาย	24.12	มก.DO/ชม.
อัตราการจับใช้ออกซิเจนจำเพาะ	10.83	มก.DO/ก.VSS-ชม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฎ  
แผนภูมิการกระจายของขนาดอนุภาคในระบบ

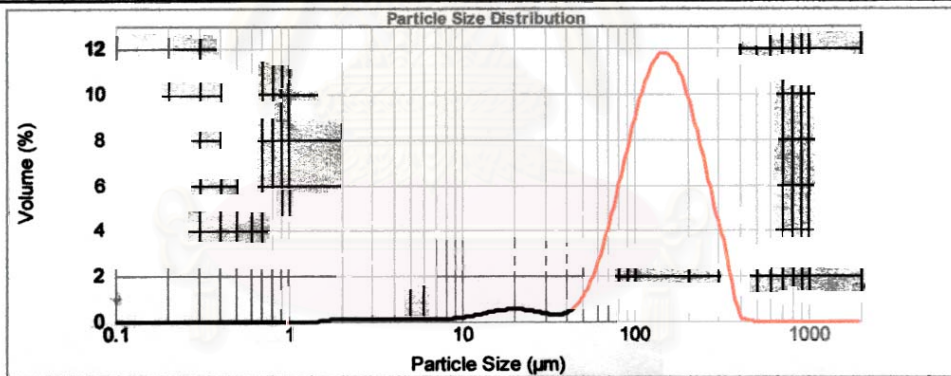
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** ANX\_40d  
**Sample Source & type:** water supply  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP  
**Result Source:** Measurement  
**Measured:** Tuesday, August 06, 2002 11:07:32 AM  
**Analysed:** Tuesday, August 06, 2002 11:07:33 AM

<b>Particle Name:</b> pellet	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle Rt:</b> 1.520	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 3.27 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.673 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0358 %Vol	<b>Span :</b> 1.354	<b>Uniformity:</b> 0.42	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.0758 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 79.177 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 152.058 um	

d(0.1): 67.542 um      d(0.5): 140.983 um      d(0.9): 258.437 um



—ANX\_40d, Tuesday, August 06, 2002 11:07:32 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.065	0.00	11.482	0.26	120.226	10.30	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.35	138.036	10.67	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.01	15.136	0.43	158.499	10.33	1659.597	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.680	0.07	17.376	0.48	181.970	9.31	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.09	19.969	0.46	208.990	7.62	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.186	0.10	22.909	0.44	239.889	6.05	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.11	26.303	0.35	275.423	4.27	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.894	0.11	30.200	0.28	316.228	2.66	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.11	34.674	0.27	363.078	1.68	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.11	39.811	0.22	416.669	1.09	4355.166	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.385	0.10	45.709	0.18	478.630	0.69	5011.672	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.09	52.481	1.88	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.08	60.285	2.63	630.957	0.00	6608.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.08	69.183	4.34	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.10	79.433	6.07	831.764	0.00	8708.638	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.13	91.201	7.79	954.988	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.19	104.713	9.29	1095.478	0.00		
0.105	0.00	1.088	0.00	11.482		120.226		1258.925	0.00		

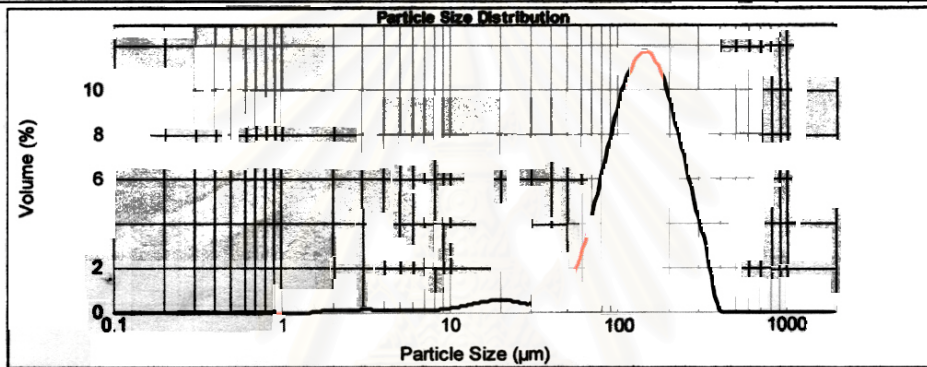
### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** ANA\_40d      **SOP Name:**      **Measured:** Tuesday, August 06, 2002 11:14:20 AM  
**Sample Source & type:** water supply      **Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP      **Analysed:** Tuesday, August 06, 2002 11:14:21 AM  
**Sample bulk lot ref:**      **Result Source:** Measurement

**Particle Name:** pellet      **Accessory Name:** Hydro 2000MU (A)      **Analysis model:** General purpose      **Sensitivity:** Normal  
**Particle Rt:** 1.520      **Absorption:** 0.1      **Size range:** 0.020 to 2000.000 um      **Obscuration:** 2.68 %  
**Dispersant Name:** Water      **Dispersant RI:** 1.330      **Weighted Residual:** 0.694 %      **Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0282 %Vol      **Span :** 1.363      **Uniformity:** 0.424      **Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 0.0782 m<sup>2</sup>/g      **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 76.716 um      **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 148.868 um

d(0.1): 65.583 um      d(0.5): 138.054 um      d(0.9): 253.719 um



ANA\_40d, Tuesday, August 06, 2002 11:14:20 AM

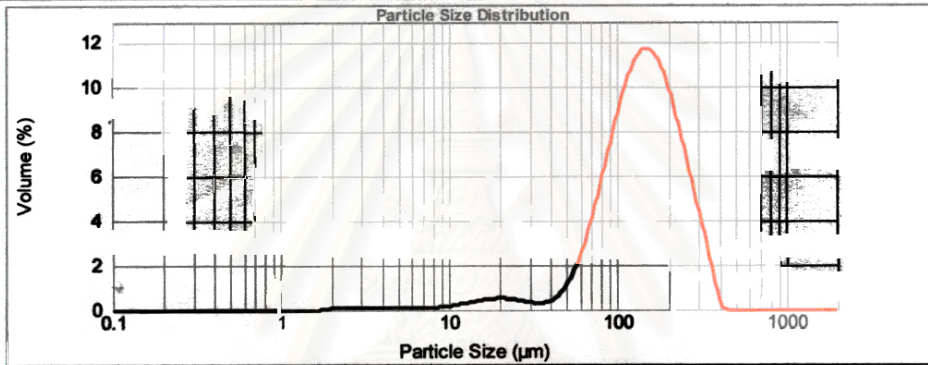
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.056	0.00	11.462	0.28	120.226	10.35
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.163	0.37	138.038	14.45
0.013	0.00	0.136	0.00	1.445	0.00	15.136	0.44	158.489	16.61
0.016	0.00	0.156	0.00	1.660	0.01	17.378	0.49	181.970	19.05
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.07	19.963	0.49	208.930	21.87
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.09	22.909	0.44	239.883	25.11
0.022	0.00	0.240	0.00	2.512	0.10	26.303	0.38	275.423	28.94
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.12	30.200	0.29	316.228	33.11
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.12	34.674	0.29	363.078	38.01
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.12	39.811	0.31	416.889	43.85
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.11	45.709	0.31	478.630	50.11
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.10	52.481	0.29	548.541	57.54
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.09	60.258	1.82	630.957	66.06
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.08	69.183	3.04	724.436	75.85
0.068	0.00	0.724	0.00	7.588	0.08	79.433	4.57	831.794	87.02
0.078	0.00	0.832	0.00	8.710	0.10	91.201	6.31	954.986	100.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.14	104.713	8.00	1088.478	0.00
0.105	0.00	1.089	0.00	11.462	0.20	120.226	9.43	1258.925	0.00

### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** AER\_40d  
**SOP Name:**  
**Measured:** Tuesday, August 06, 2002 11:21:33 AM  
**Sample Source & type:** water supply  
**Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP  
**Analysed:** Tuesday, August 06, 2002 11:21:34 AM  
**Sample bulk lot ref:**  
**Result Source:** Measurement

<b>Particle Name:</b> pellet	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle Rt:</b> 1.520	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 3.22 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.639 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0369 %Vol	<b>Span :</b> 1.363	<b>Uniformity:</b> 0.423	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.0728 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 82.405 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 152.330 um	

d(0.1): 67.321 um      d(0.5): 140.924 um      d(0.9): 259.447 um



AER\_40d, Tuesday, August 06, 2002 11:21:33 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.095	0.00	11.482	0.26	120.226	10.24	1259.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.35	136.036	10.60	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.42	156.499	10.26	1669.597	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.48	181.970	9.27	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.07	19.953	0.47	208.930	7.80	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.09	22.908	0.42	239.888	6.05	2511.888	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.10	26.303	0.35	275.423	4.31	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.894	0.11	30.200	0.28	316.228	2.61	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.11	34.674	0.25	363.078	1.61	3601.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.11	39.811	0.22	416.889	0.98	4385.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.10	45.709	0.19	478.630	0.58	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.10	52.481	0.17	549.541	0.35	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.09	60.256	0.15	630.957	0.22	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.08	69.188	0.13	724.436	0.14	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.589	0.10	79.433	0.11	831.794	0.09	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.14	91.201	0.09	954.993	0.06	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.965	0.00	10.000	0.19	104.713	0.07	1095.478	0.04		
0.105	0.00	1.095	0.00	11.482	0.26	120.226	0.25	1259.925	0.00		

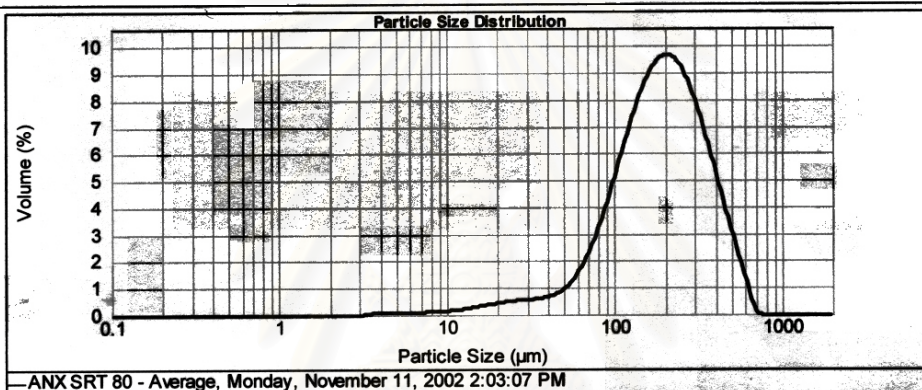


### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** ANX SRT 80 - Average  
**Sample Source & type:** water supply  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP  
**Result Source:** Averaged  
**Measured:** Monday, November 11, 2002 2:03:07 PM  
**Analysed:** Monday, November 11, 2002 2:03:08 PM

<b>Particle Name:</b> pellet	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle Rt:</b> 1.520	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 12.56 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant Ri:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.489 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.2129 %Vol	<b>Span :</b> 1.693	<b>Uniformity:</b> 0.52	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.0527 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 113.917 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 214.503 um	

d(0.1): 74.479 um                      d(0.5): 189.481 um                      d(0.9): 395.331 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.050	0.08	50.238	0.85	355.656	4.48
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.09	56.368	1.14	399.052	3.60
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.904	0.10	63.246	1.56	447.744	2.74
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.12	70.963	2.09	502.377	1.92
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.15	79.621	2.74	563.677	1.11
0.038	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.19	89.337	3.49	632.456	0.30
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.23	100.237	4.28	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.897	0.27	112.468	5.09	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.31	126.191	5.84	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.35	141.589	6.49	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.38	158.866	6.96	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.01	25.179	0.41	178.250	7.28	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.06	28.251	0.43	200.000	7.28	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.07	31.669	0.44	224.404	7.09	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.07	35.658	0.48	251.785	6.68	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.07	39.905	0.54	282.508	6.08	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.07	44.774	0.68	316.979	5.32		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.036	0.07	50.238		355.656			

Malvern Instruments Ltd. www.malvern.com  
 Malvern, UK  
 Tel. := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00  
 Serial Number : 34403-94

File name: Mai  
 Record Number: 12  
 15 Nov 2002 09:57:38 AM



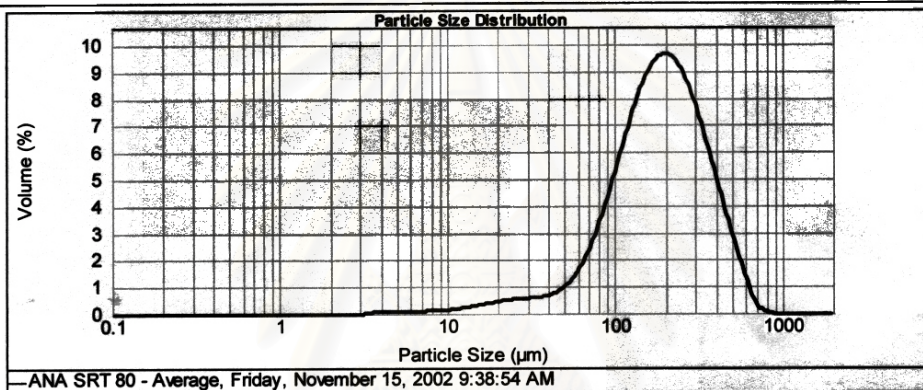
### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** ANA SRT 80 - Average  
**Sample Source & type:** water supply  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured:** Friday, November 15, 2002 9:38:54 AM  
**Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP  
**Analysed:** Friday, November 15, 2002 9:38:55 AM  
**Result Source:** Averaged

**Particle Name:** pellet  
**Particle Rt:** 1.520  
**Dispersant Name:** Water  
**Accessory Name:** Hydro 2000MU (A)  
**Absorption:** 0.1  
**Dispersant Rt:** 1.330  
**Analysis model:** General purpose  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Weighted Residual:** 0.428 %  
**Sensitivity:** Normal  
**Obscuration:** 12.90 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.2164 %Vol  
**Specific Surface Area:** 0.0533 m<sup>2</sup>/g  
**Span :** 1.713  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 112.505 um  
**Uniformity:** 0.529  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 212.460 um  
**Result units:** Volume

**d(0.1):** 73.485 um      **d(0.5):** 186.319 um      **d(0.9):** 392.596 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.026	0.08	50.238	0.87	355.656	4.29
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.982	0.09	55.398	1.18	399.052	3.43
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.10	63.246	1.61	447.744	2.61
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.13	70.953	2.16	502.377	1.82
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.15	79.621	2.84	563.677	1.06
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.19	89.337	3.60	632.468	0.40
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.23	100.237	4.41	709.627	0.12
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.897	0.28	112.468	5.23	796.214	0.01
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.32	126.191	5.98	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.36	141.599	6.59	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.39	158.666	7.03	1124.883	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.01	25.179	0.42	178.250	7.24	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.05	28.261	0.43	200.000	7.25	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.06	31.698	0.45	224.404	7.00	1598.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.07	35.609	0.49	251.785	6.53	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.00	5.697	0.07	39.905	0.55	282.508	5.90	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.07	44.774	0.67	316.979	5.12		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.026	0.08	50.238		355.656			

Malvern Instruments Ltd.,  
 Malvern, UK  
 Tel: +44(0) 1684-892456 Fax: +44(0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00  
 Serial Number: 34403-94

File name: MeasurementSet  
 Record Number: 7  
 15 Nov 2002 09:55:56 AM

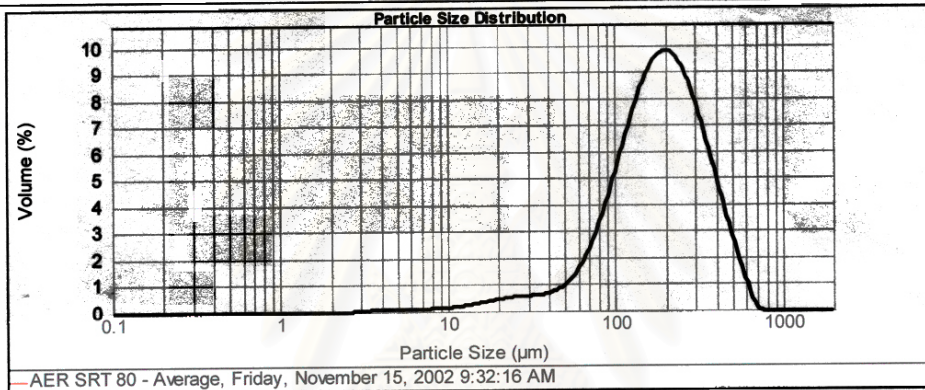
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### Result Pellet Analysis Report

**Sample Name:** AER SRT 80 - Average  
**Sample Source & type:** water supply  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** WINYOOPAS CHONPATATIP  
**Result Source:** Averaged  
**Measured:** Friday, November 15, 2002 9:32:16 AM  
**Analysed:** Friday, November 15, 2002 9:32:17 AM

<b>Particle Name:</b> pellet	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.520	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 13.78 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.334 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.2293 %Vol	<b>Span :</b> 1.675	<b>Uniformity:</b> 0.517	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.054 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 111.140 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 209.505 um	

d(0.1): 73.433 um                      d(0.5): 185.479 um                      d(0.9): 384.086 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.032	0.00	7.035	0.06	50.238	0.87	355.656	4.26
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.952	0.09	55.368	1.17	399.052	3.36
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.10	63.246	1.60	447.744	2.50
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.12	70.953	2.15	502.377	1.68
0.032	0.00	0.224	0.00	1.599	0.00	11.247	0.15	79.621	2.82	553.677	0.92
0.038	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.19	88.337	3.60	632.455	0.24
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.23	100.237	4.42	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.28	112.468	5.25	795.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.32	128.191	6.01	893.357	0.00
0.055	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.36	141.589	6.66	1002.374	0.00
0.058	0.00	0.446	0.00	3.170	0.01	22.440	0.40	158.866	7.12	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.03	25.179	0.42	178.250	7.37	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.06	28.251	0.44	200.000	7.36	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.07	31.688	0.46	224.404	7.11	1598.655	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.07	35.685	0.49	251.785	6.63	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.795	0.00	5.637	0.07	39.905	0.55	282.508	5.96	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.883	0.00	6.325	0.07	44.774	0.67	316.979	5.15		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.035	0.07	50.238	0.67	355.656	5.15		

Malvern Instruments Ltd.  
 Malvern, UK  
 Tel : +[44] (0) 1684-892486 Fax : +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00  
 Serial Number : 34403-94

File name: MeasurementSet  
 Record Number: 4  
 15 Nov 2002 09:57:01 AM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ฎ  
การล้างแผ่นเชื้อด้วยสารเคมี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฎ การล้างแผ่นเยื่อด้วยสารเคมี

### หลักการ

การควบคุมค่าฟลักซ์ของแผ่นเยื่อให้คงที่ตลอดการทดลอง จำเป็นจะต้องล้างแผ่นเยื่อเป็นครั้งคราวทั้งการล้างด้วยน้ำเปล่า และการล้างด้วยสารเคมี เพื่อลดการอุดตันที่เกิดขึ้น

สารเคมีที่ใช้ในการล้างแผ่นเยื่อได้แก่สารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 2% โดยปริมาตร และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) เข้มข้น 1.2% โดยปริมาตร ซึ่งผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร

### ขั้นตอนการล้างแผ่นเยื่อ

1. นำโครงแผ่นเยื่อออกจากถังปฏิกรณ์
2. ถอดแผ่นเยื่อออกจากโครงชุดแผ่นเยื่อไมโครฟิลเตรชัน
3. ล้างทำความสะอาดที่เยื่อด้วยน้ำประปา และใช้มือขัดถูเบา ๆ
4. นำแผ่นเยื่อที่ล้างน้ำประปาแล้ว แช่ลงในถังสารเคมีที่เตรียมไว้โดยต้องให้สารเคมีท่วมชุดแผ่นเยื่อทั้งหมด
5. แช่แผ่นเยื่อในถังสารเคมีเป็นเวลา 4 – 24 ชม.
6. นำแผ่นเยื่อออกมาล้างน้ำประปาอีกครั้ง
7. ประกอบเข้ากับโครงของแผ่นเยื่อ แล้วใส่ลงในถังปฏิกรณ์ตามเดิม



รูปที่ ฎ-1 การล้างแผ่นเยื่อด้วยสารเคมีผสม

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพันธ์ กลิ่นเกษร เกิดเมื่อวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย