ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่างกัน

นางสาวปริยดา เหล่ารุจิจินดา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-488-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18703306

THE EFFICIENCY OF A BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL PROCESS AT DIFFERENT TEMPERATURES

Miss Pariyada Laorujijinda

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

Department of Environmental Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University

Acadamic Year 1998
ISBN 974 – 331 – 488 – 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่างกัน
โดย	นางสาวปริยดา เหล่ารุจิจินดา
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์)

....กรรมการ

(อาจารย์บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ปริยดา เหล่ารุจิจินดา : ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่างกัน (The Efficiency of a Biological Phosphorus Removal Process at Different Temperatures) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์; 283 หน้า. ISBN 974 – 331 – 488 – 1 .

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของกระบวนการแอนแอโรบิก - แอโรบิก ซึ่งในที่นี้เลือกให้เป็นแบบเอสบีอาร์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 5, 15, 25, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดี 300 มก./ล. ทีเคเอ็น 15 มก./ล. และฟอสฟอรัส 15 มก./ ล.(100:5:5) เพื่อกระตุ้นให้เกิดจุลชีพที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้มาก (Phosphorus Accumulating Organisms-PAOs) แต่ไม่มีผลต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) ชุดการทดลองประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบเอสบีอาร์ที่ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติขนาด 16.8 ลิตรสองชุด เดินระบบที่ค่าอายุสลัดจ์ 12 วัน วัฏจักรการทำงาน 12 ชั่วโมง ประกอบด้วยช่วงแอนแอโรบิก 4 ช.ม. 50 นาที ช่วงแอโรบิก 6 ช.ม. ช่วงตกตะกอน 1 ช.ม. ช่วงเติมและระบายน้ำเสีย 10 นาที เชื้อที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อผสมจากสลัดจ์ของโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาเติมด้วยเชื้อ *Pseudomonus fluorescens* และ *Actnetobacter calcoaceticus* ที่ถูกเพาะเป็นเวลานาน 7 เดือน จนมีจุลชีพกลุ่มพีเอโอมากพอ แล้วจึงนำมาเลี้ยงให้ชินกับอุณหภูมินั้นๆ เป็นเวลาประมาณ 1-1.5 เดือนก่อนการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบ

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส โดยที่อุณหภูมิ 5, 15, 25, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะลดลงจากร้อยละ 100, 100, 100 และ 72 เป็น 61 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์หรือในเอ็มแอลวีเอสเอส (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS)ก็ลดลงจากร้อยละ 10.8 เป็น 10.4, 5.5, 3.1 และ 3.5 ตามลำดับ เช่นเดียวกัน ส่วนการกำจัดซีโอดีกลับพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะมีค่าอายุสลัดจ์ยาวพอ กล่าวคือ 12 วัน สำหรับทั้งระบบ หรือ 5.5 และ 6.5 วัน สำหรับช่วงแอนแอโรบิกและแอโรบิกตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดเป็นร้อยละ 99, 99, 97, 99 และ 93 ณ อุณหภูมิดังกล่าวตามลำดับ ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสถือว่าสูงเกินไปสำหรับจุลชีพ ประสิทธิภาพจึงลดลงเล็กน้อย

นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นเป็นร้อยละ 67, 89, 95, 94 และ 57 ตามลำดับ เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป (40 องศาเซลเซียส) ประสิทธิภาพการกำจัดกลับลดลงมาก ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดเป็นร้อยละ 63, 62, 73, 60 และ 49 ตามลำดับ (อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด จึงไม่ได้ปรับให้มีขั้นตอนแอน็อกซิกให้เหมาะสมกับการเกิดดีไนตริฟิเคชัน) นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระบบมีปริมาณเอ็มแอลเอสเอสมากกว่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสมาก (2,688 มก./ล. และ 1,199 มก./ ล.ตามลำดับ) แต่ระบบกลับมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำกว่า คาดว่าเป็นเพราะเชื้อที่เติบโตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนของจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (Glycogen Accmulating Organisms-GAOs) และโอเอชโอ(OHOs)ในมวลจุลชีพทั้งหมดเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำ (5, 15, 25 องศาเซลเซียส) ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมากกว่าที่อุณหภูมิสูง (35 และ 40 องศาเซลเซียส) ซึ่งหมายความว่าการกำจัดฟอสฟอรัสในประเทศเราจะทำได้ไม่ดีเท่าในประเทศเขตหนาว

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต ปริยดา เหล่ารุจิจินดา
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [signature]
ปีการศึกษา 2541	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C817962 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL / TEMPERATURE EFFECT / BPR
PARIYADA LAORUJIJINDA : THE EFFICIENCY OF A BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL PROCESS AT DIFFERENT TEMPERATURES. THESIS ADVISOR : PROF. THONGCHAI PANSWAD, Ph.D. 283 pp. ISBN 974 – 331 – 488 – 1.

The purpose of this research was to study the effect of temperature at 5, 15, 25, 35 and 40°C on the efficiency of biological phosphorus removal (BPR) by an Anaerobic/Aerobic SBR process. The synthetic wastewater with COD, TKN and P of 300, 15 and 15 mg/l (100:5:5), respectively, was used to promote the proliferation of Phosphorus Accumulating Organisms (PAOs) but not nitrifiers. The experimental setup included two 16.8 l automatic temperature-controlled SBR reactors. The sludge age was controlled at 12 days and the cycle time was 12 hrs (4:50 hrs anaerobic, 6 hrs aerobic, 1 hr settling and 10 minutes influent feed and effluent withdrawal). The activated sludge from the Si Phraya sewage treatment plant and the pure culture of *Pseudomonas fluorescens* and *Acinetobacter calcoaceticus* were cultivated for approximately 7 months after which PAOs were in abundance. The said mixed culture was then acclimatized for 1-1.5 months with the synthetic wastewater and operated at the designated temperatures before the process performance was investigated.

Apparently, the temperature directly affected the phosphorus removal efficiency, i.e., at 5, 15, 25, 35 and 40°C, the P removal efficiencies dropped from 100, 100, 100 and 72 to 61 percent, respectively. The P content in mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) was 10.8, 10.4, 5.5, 3.1 and 3.5 percent for the same cases, respectively. This clearly showed that the PAOs proliferated better at lower temperatures. The temperature had, however, less impact on the filtered COD removal efficiency; it was apparently 99, 99, 97, 99 and 93 percent, respectively. This is due to the sufficiently long HRT and SRT (12 days overall and 5.5, 6.5 days for the anaerobic and aerobic stage, respectively) of the systems. The excessive temperature of 40°C was, however, unfavorable for the process.

The TKN removal efficiencies at the said temperatures were 67, 89, 95, 94 and 57 percent, respectively, i.e., it increased with temperature until a certain level after which (40°C) the efficiency drastically dropped. The TN removal efficiencies were 63, 62, 73, 60 and 49 percent, respectively (the TN removal was not the main objective of this study, and the system was not set to have a proper anoxic-denitrification process). In addition, the MLVSS at the 35°C scenario was more than that at 15°C (2688 VS 1199 mg/l) eventhough the P removal efficiency was lower at the higher temperature, probably because at this 35°C, the proportion of the Glycogen Accumulating Organisms (GAOs) and Ordinary Heterotroph Organisms (OHOs) in the bacteria mass increased. In conclusion, the BPR efficiency at low temperatures (5, 15, 25°C) was better than at high temperatures (35 and 40°C). This means that the EBPR process will work better in the temperate climate than the tropical ones like ours (Thailand).

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ปริยดา เหล่ารุจิจินดา
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องมาจากบุคคลสำคัญยิ่งท่านหนึ่ง คือศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้มอบโอกาสอันดีในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งไม่เพียงแต่จะได้รับความรู้ทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินชีวิต แต่ยังเป็นการยกระดับชีวิตของดิฉัน สร้างความรับผิดชอบ ความมั่นใจ และวินัยในการทำงานอีกด้วย ขอขอบพระคุณที่ท่านได้เสียสละแรงกาย แรงใจและเวลาอันมีค่าอย่างไม่เห็นแก่เหนื่อยยากเพื่อศิษย์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)โดยทุนเมธีวิจัยอาวุโส ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนจนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ คลิฟฟอร์ด แรนดอล แห่งสถาบันเวอร์จิเนียโพลีเทคนิคและมหาวิทยาลัยรัฐเวอร์จิเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ได้ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาทางด้านวิชาการ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ และคุณวิโรจน์ จากภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ ที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือมาโดยตลอด ทีมงานเมธีวิจัยที่ให้คำแนะนำ ความรู้ใหม่ๆ และร่วมแก้ไขปัญหา คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก

ขอขอบคุณพี่หมีน้อย พี่กุ้ง พี่ผึ้ง พัช สร้อย อร พู่ เมจิ หลิง จ๋าย และต๊อบ ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจ พี่อรรถ ที่ช่วยซ่อมแซมและให้คำแนะนำด้านงานช่างทุกอย่าง พี่นก พี่ตุ๊ก พี่อ๊อ พี่หนู และพี่เชอร์รี่ ที่ถ่ายทอดวิชาปฏิบัติการ พี่ติ๋ง พี่วิทย์และอาร์ท สำหรับการทำงานเป็นทีม รวมทั้งพี่ๆ C7 C8 น้องๆ C9 และ C10 ที่เป็นเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการที่น่ารักเสมอมา

ขอขอบคุณคุณสราวุฒิ พยุงธรรมที่ช่วยเหลือและอยู่เคียงข้างเสมอทั้งในยามสุขและทุกข์

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อประดิษฐ์และคุณแม่จรัสศรีที่ได้มอบความรัก ความห่วงใย และทุกสิ่งทุกอย่างจนลูกมีวันนี้ได้ และพี่น้องทุกคน เจี๊ยบ โจ้ แจน ไก่เอ๊ก และกอบัวที่เป็นแรงใจเสมอ คุณความดีและประโยชน์ทั้งปวงอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ครอบครัวของผู้วิจัยทุกประการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ซ
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญรูป		ฎ
บทที่ 1.	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2.	ทบทวนเอกสาร	3
	2.1 กระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ	3
	2.2 การกำจัดไนโตรเจน	4
	2.3 กระบวนการไนตริฟิเคชัน	7
	2.3.1 หลักการพื้นฐาน	7
	2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน	9
	2.4 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	16
	2.4.1 หลักการพื้นฐาน	16
	2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	19
	2.5 การกำจัดฟอสฟอรัส	24
	2.5.1 หลักการพื้นฐาน	25
	2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ	30
	2.6 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการบีเอนอาร์	41
	2.6.1 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราไนตริฟิเคชัน	41
	2.6.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน	43
	2.6.3 ผลของอุณหภูมิต่อการกำจัดฟอสฟอรัส	45

หน้า

	2.7 กระบวนการกำจัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์..	51
	2.7.1 หลักการทำงานของระบบเอสบีอาร์........................	52
	2.7.2 ระบบเอสบีอาร์ในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.	53
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย..	58
	3.1 แผนการทดลอง...	58
	3.2 การดำเนินการทดลอง...	59
	3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์...	60
	3.4 วัฏจักรการทำงานของระบบ..	61
	3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..................................	62
	3.6 การติดตั้งเครื่องมือและการทำงานของระบบ..............................	65
	3.7 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์......................................	66
	3.7.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ..	66
	3.7.2 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์............................	66
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล..	69
	4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล..	69
	4.1.1 อุณหภูมิ..	69
	4.1.2 ออกซิเจนละลายน้ำ..	72
	4.1.3 โออาร์พี..	74
	4.1.4 สภาพด่าง...	77
	4.1.5 พีเอช...	79
	4.1.6 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอส........................	83
	4.1.7 ค่าของแข็งละลาย เอสวี30 และเอสวีไอ......................	92
	4.1.8 กรดระเหยง่าย...	94
	4.1.9 ซีโอดี...	97
	4.1.10 ทีเคเอ็น..	100
	4.1.11 ไนโตรเจนทั้งหมด...	103
	4.1.12 ไนไทรต์และไนเทรต..	104
	4.1.13 ฟอสฟอรัสและพีเอชเอ..	109

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.1.14 อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ...................... 115
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ... 119
5.1 สรุปผลการทดลอง... 119
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 120
รายการอ้างอิง.. 121
ภาคผนวก... 131
ภาคผนวก ก. บันทึกการทดลอง.. 132
ภาคผนวก ข. ข้อมูลชุดการทดลองที่ 1 – 5 140
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการทดลองหาอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ............ 241
ภาคผนวก ง. การดูดซึมวดฟอสฟอรัสและไนโตรเจน........................ 262
ภาคผนวก จ. การประเมินลักษณะจุลินทรีย์จากสลัดจ์ในถังบำบัดควบคุมอุณหภูมิ.. 270
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.. 273
ภาคผนวก ช. การหาค่ากรดระเหยง่ายโดยวิธีไทรเทรชันและวิธีก๊าซโครมาโตกราฟฟี.. 279
ประวัติผู้เขียน.. 283

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ช่วงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไทรต์ที่เป็นพิษต่อไนโตรแบกเทอร์ที่ค่าพีเอชต่างๆ ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส........... 12

ตารางที่ 2.2 ผลของเอสอาร์ทีต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน(1)................................. 23

ตารางที่ 2.3 ผลของเอสอาร์ทีต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน(2)................................. 23

ตารางที่ 2.4 ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน................................. 25

ตารางที่ 2.5 อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ.......................... 44

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับระบบเอสบีอาร์................................. 54

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์................................. 61

ตารางที่ 3.2 การทำงานของระบบเอสบีอาร์................................. 61

ตารางที่ 3.3 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์................................. 67

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์................................. 68

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......................... 70

ตารางที่ 4.2 ออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว............. 72

ตารางที่ 4.3 โออาร์พีเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......................... 75

ตารางที่ 4.4 สภาพด่างเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......................... 77

ตารางที่ 4.5 พีเอชเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......................... 81

ตารางที่ 4.6 ผลการย้อมแกรม................................. 84

ตารางที่ 4.7 ผลการย้อมโพลีฟอตเฟตแกรนูล................................. 85

ตารางที่ 4.8 ผลการย้อมพีเอชบีแกรนูล................................. 86

ตารางที่ 4.9 ปริมาณ strictly anaerobic organisms................................. 87

ตารางที่ 4.10 ปริมาณ aerobic organisms................................. 88

ตารางที่ 4.11ก เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว................................. 89

ตารางที่ 4.11ข ค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย เอสวี 30 เฉลี่ย และเอสวีไอเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว................................. 92

ตารางที่ 4.12 กรดระเหยง่ายเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.................... 95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ตารางที่ 4.13 ซีโอดีเฉลี่ยและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.. 99
ตารางที่ 4.14 ทีเคเอ็นเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว........................ 101
ตารางที่ 4.15 ไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 103
ตารางที่ 4.16 ไนไทรต์เฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว...................... 104
ตารางที่ 4.17 ไนเทรตเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว....................... 105
ตารางที่ 4.18 ฟอสฟอรัสและประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.................................. 109
ตารางที่ 4.19 อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ.. 116
ตารางที่ 4.20 อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ.. 118

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วัฏจักรของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในระบบนิเวศน์........................ 3
รูปที่ 2.2 วัฏจักรไนโตรเจนและผลกระทบที่เกิดขึ้น.. 6
รูปที่ 2.3 กระบวนการในการเปลี่ยนรูปไนโตรเจน.. 7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนรูปต่างๆกับระยะเวลาที่เปลี่ยนไป............ 7
รูปที่ 2.5 ผลของค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน.................. 10
รูปที่ 2.6 ผลของพีเอชต่อการเกิดไนตริฟิเคชัน.. 11
รูปที่ 2.7 ผลของเอสอาร์ทีต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน.................................. 13
รูปที่ 2.8 ลักษณะของจุลชีพในระบบที่มีค่าเอสอาร์ทีและอัตราส่วนอาหารต่อมวลจุลชีพต่างกัน.. 13
รูปที่ 2.9 ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในระบบที่จุลชีพถูกเลี้ยงให้คุ้นกับความเค็มและไม่คุ้นกับความเค็มมาก่อน........... 15
รูปที่ 2.10 ผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน........................ 15
รูปที่ 2.11 ผลของซีโอดีต่อการออกซิไดส์แอมโมเนีย.. 16
รูปที่ 2.12 ผลของพีเอชต่ออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน.................................. 19
รูปที่ 2.13 ผลของออกซิเจนละลายน้ำต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน(1)........................ 20
รูปที่ 2.14 ผลของออกซิเจนละลายน้ำต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน(2)........................ 20
รูปที่ 2.15 ผลของเอสอาร์ทีในถังแอน็อกซิกที่มีต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน............... 22
รูปที่ 2.16 ผลของสังกะสีต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน................................... 24
รูปที่ 2.17 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก........ 28
รูปที่ 2.18 ผลของบีโอดีละลายและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบ........................ 29
รูปที่ 2.19 ผลของอัตราส่วน TBOD5 : TP ต่อปริมาณฟอสฟอรัสละลายในน้ำออกของระบบบีพีอาร์.. 31
รูปที่ 2.20 การจับใช้อะซิเทตที่พีเอชต่างๆ.. 32
รูปที่ 2.21 การจับใช้อะซิเทตและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่พีเอชต่างๆ............... 33
รูปที่ 2.22 ผลของเวลากักน้ำต่อระบบบีพีอาร์ที่อัตราส่วนซีโอดีทั้งหมดต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 42-68 และ 20-43.. 35

หน้า

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของพีเอชกับอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อการจับใช้อะซิเทต.......... 37
รูปที่ 2.24 การปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ค่าพีเอชต่างๆ.......... 38
รูปที่ 2.25 ผลของพีเอชต่อการจับใช้อะซิเทตและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส.......... 39
รูปที่ 2.26 ประสิทธิภาพของระบบที่สถานะคงตัวที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0.03%.. 40
รูปที่ 2.27 ประสิทธิภาพของระบบที่สถานะคงตัวที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0.5%.. 41
รูปที่ 2.28 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราไนตริฟิเคชัน.......... 42
รูปที่ 2.29 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของไนตริฟายอิงแบกทีเรีย.......... 43
รูปที่ 2.30 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน(1).......... 44
รูปที่ 2.31 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน(2).......... 45
รูปที่ 2.32 ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์.......... 53
รูปที่ 2.33 ระบบเอสบีอาร์ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส.......... 57
ภาพที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ.......... 63
รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องมือในการทดลอง.......... 65
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 70
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง...... 71
รูปที่ 4.3 ออกซิเจนละลายน้ำในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.......... 73
รูปที่ 4.4 ออกซิเจนละลายน้ำในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 74
รูปที่ 4.5 โออาร์พีในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 75
รูปที่ 4.6 โออาร์พีในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง...... 76
รูปที่ 4.7 สภาพด่างกรองในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 77
รูปที่ 4.8 สภาพด่างในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง..... 78
รูปที่ 4.9 พีเอชในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.......... 80
รูปที่ 4.10 พีเอชในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.......... 81
รูปที่ 4.11 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสของระบบที่อุณหภูมิต่างๆ.......... 89
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณจุลชีพ.......... 90

หน้า

รูปที่ 4.13 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.. 91
รูปที่ 4.14 ของแข็งแขวนลอย เอสวี30 และเอสวีไอในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.. 93
รูปที่ 4.15 ของแข็งแขวนลอย เอสวี30 และเอสวีไอในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.. 94
รูปที่ 4.16 กรดระเหยง่ายในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง 96
รูปที่ 4.17 กรดระเหยง่ายตามเวลาของทุกชุดการทดลองโดยการวัดด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟฟี.. 97
รูปที่ 4.18 ซีโอดีในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.......... 98
รูปที่ 4.19 ซีโอดีในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว........................... 99
รูปที่ 4.20 ทีเคเอ็นในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว......................... 101
รูปที่ 4.21 ทีเคเอ็นในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง....... 102
รูปที่ 4.22 ไนไตรต์ในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว........................ 105
รูปที่ 4.23 ไนไตรต์ในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง...... 106
รูปที่ 4.24 ไนเตรตในระบบของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว...................... 107
รูปที่ 4.25 ไนเตรตในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง... 108
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ในเอ็มแอลวีเอสเอสและในน้ำออกที่อุณหภูมิต่างๆ.. 110
รูปที่ 4.27 ปริมาณฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์และในน้ำออกที่อุณหภูมิต่างๆ............ 111
รูปที่ 4.28 ปริมาณพีเอชเอในเอ็มแอลเอสเอสตามระยะเวลา ณ สถานะคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.. 111
รูปที่ 4.29 ฟอสฟอรัสในช่วงเดินระบบและช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง... 112
รูปที่ 4.30 ฟอสฟอรัสละลายตามระยะเวลา ณ สถานะคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆ......... 113
รูปที่ 4.31 อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ.. 116
รูปที่ 4.32 อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ.. 117