

การตอบสนองของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเฮสปีอาร์  
ต่อการเติมออร์โทฟอสเฟตบางส่วนที่ชั้นคอนแอโรบิก

นางสาว นุชกร อมรวิทย์



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-462-4

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**RESPONSE OF AN EBPR/SBR PROCESS TO THE PARTIAL ADDITION OF  
ORTHOPHOSPHATE AT THE AEROBIC STAGE**



**Ms. Busakorn Amornwit**

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

**Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University**

**Academic Year 1999**

**ISBN 974-334-462-4**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตอบสนองของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเฮสปีอาร์ต่อการเติมออร์โธฟอสเฟตบางส่วนที่ชั้นคอนแอโรบิก


โดย นางสาว นุชกร อมรวิทย์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

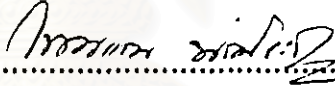
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปิัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ พรประภา)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ธงชัย พรรณสวัสดิ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ธีระ เกรอด)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

บุญกร อมรวิทย์ : การตอบสนองของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเอสปีอาร์ต่อการเติมออร์โธฟอสเฟตบางส่วนที่ขั้นตอนแอโรบิก (Response of an EBPR/SBR Process to the Partial Addition of Orthophosphate at the Aerobic Stage) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ธงชัย พรหมสวัสดิ์ ; 217 หน้า. ISBN 974-334-462-4

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมออร์โธฟอสเฟตภายหลังการดูดซึมกรดไขมันของจุลินทรีย์ในขั้นตอนแอนแอโรบิกของกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก-แอนออกซิกแบบเอสปีอาร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดใหญ่ๆ คือ ชุดควบคุมและชุดทดสอบ ในชุดควบคุมมุ่งจะได้ศึกษาผลของการแปรค่าอัตราส่วนระหว่างอาร์บีซีโอดีต่อฟอสฟอรัส โดยควบคุมให้ค่าฟอสฟอรัสในน้ำเข้าคังที่เป็น 15 มก./ล.และแปรค่าซีโอดีเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการคือ 6:1, 12:1, 24:1 และ 48:1 ส่วนในชุดทดสอบมีการเติมฟอสฟอรัส 2 ตำแหน่งคือที่น้ำเข้าและที่ปลายขั้นตอนแอนแอโรบิกตำแหน่งละ 7.5 มก./ล. รวมกันเป็น 15 มก./ล. เช่นเดิม และทำการทดลองที่อัตราส่วนอาร์บีซีโอดีคือฟอสฟอรัส 6:1, 24:1 และ 48:1 โดยในการทดลองนี้ได้นำเม็ดสังเคราะห์ที่มีแหล่งซีโอดีจากโซเดียมอะซิเตตและนิวทริยอนคัมบรอส โดยใช้นิวทริยอนคัมบรอสเพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์ ส่วนซีโอดีที่ต้องการเพิ่มได้เตรียมจากโซเดียมอะซิเตต ชุดทดลองทั้งสองชุดนี้ใช้ถังปฏิกริยานขนาด 10 ลิตร ทำการเดินระบบที่ค่าอายุตะกั่ว 8 วัน วัฏจักรการทำงาน 8 ชั่วโมงประกอบด้วยขั้นตอนการเติมน้ำเสีย 5 นาทีซึ่งเริ่มพร้อมกับสภาวะแอนแอโรบิก 2 ชม. ช่วงแอโรบิก 4 ชม. ช่วงตกตะกอน 40 นาที ระบายน้ำ 5 นาทีและแอนออกซิก 1 ชม.15 นาที นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองชุดแบคทีเรียซึ่งนำตะกั่วจากปลายขั้นตอนแอนแอโรบิกของชุดควบคุมทั้ง 4 ชุดที่เข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว 1.25 ลิตรมาทำการทดลองเดิมอากาศโดยเติมฟอสฟอรัสเพิ่มเติม 3 ค่า คือ 15+0 (เดิมเพิ่ม 0 มก./ล.) 15+22.5 (เดิมเพิ่ม 22.5 มก./ล.) และ 15+67.5 (เดิมเพิ่ม 67.5 มก./ล.) รวมทำการทดลองแบบแบคทีเรียทั้งหมด 12 การทดลอง

จากผลการทดลองชุดควบคุมและชุดทดสอบพบว่าอัตราส่วนของอาร์บีซีโอดีต่อฟอสฟอรัสมีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส คือ 4 แรกชุด (ควบคุม) และ 3 ชุดหลัง (ทดสอบ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเป็นร้อยละ 21, 42, 75, 100, 25, 87 และ 99 ตามลำดับและมีร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์เป็น 13.5, 9.3, 6.4, 4.9, 13.8, 8.0 และ 5.3 ตามลำดับ ส่วนการกำจัดซีโอดีพบว่าประสิทธิภาพที่ทุกชุดการทดลอง คือ ร้อยละ 100, 100, 100, 99, 97, 99 และ 99 ตามลำดับ และการกำจัดที่เคเอ็นก็มีประสิทธิภาพดีเช่นกัน คือ ร้อยละ 100, 96, 99, 96, 96, 93, 94 ตามลำดับ

ส่วนในการทดลองชุดแบคทีเรียว่าในชุดการทดลองที่นำตะกั่วมาจากชุดควบคุมเดียวกัน ถ้าเติมฟอสฟอรัสในปริมาณที่มากขึ้นระบบจะสามารถจับฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ส่วนชุดแบคทีเรียที่นำตะกั่วมาจากการทดลองต่างชุดแต่นำมาเติมฟอสฟอรัสเท่ากันจะเห็นว่าชุดที่มีการเติมสารอาหารมากจะสามารถจับฟอสฟอรัสได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าชุดที่เติมสารอาหารน้อยกว่า ทั้งนี้สอดคล้องกับปริมาณที่เอชเอที่ทำการทดลองควบคู่กันไปด้วย

ดังนั้นสรุปได้ว่าไม่ว่าจะมีการเติมฟอสฟอรัสในน้ำเข้าก่อนจะมีการใช้สารอาหารและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิกหรือแบ่งเติมทั้ง 2 ตำแหน่งทั้งที่น้ำเข้าและที่ปลายขั้นตอนแอนแอโรบิกก็ไม่มีผลต่อการจับฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอโรบิก

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต บุญกร อมรวิทย์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ธงชัย พรหมสวัสดิ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

## 3970913121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL / COD:P RATIO /SBR / PAOs

BUSAKORN AMORNWIT : RESPONSE OF AN EBPR/SBR PROCESS TO THE PARTIAL ADDITION OF ORTHOPHOSPHATE AT THE AEROBIC STAGE. THESIS ADVISOR : PROF.THONGCHAI PANSWAD, Ph.D. 217 pp. ISBN 974-334-462-4

The purpose of this research was to study the effect of the orthophosphate addition after the anaerobic stage on the efficiency of biological phosphorus removal by an Anaerobic-Aerobic-Anoxic SBR process. The study was separated to 2 groups, i.e., the 'Control' group and 'Test' group. In the Control group, the system was operated under different influent RBCOD:P ratio of 6:1, 12:1, 24:1 and 48:1 and with fixed P dose of 15 mg/l. In the Test group, phosphorus was fed at 2 locations, first at the influent and later at the end of anaerobic stage with 7.5 mg P/l each and at the RBCOD:P ratio of 6:1, 24:1 and 48:1. This synthetic wastewater used sodium acetate and nutrient broth as COD source; nutrient broth was used to supply nitrogen merely for cell synthesis. Sodium acetate was used for making up the remaining COD. The experiment setup was bench scale with 10 l SBR reactor. The sludge age was controlled at 8 days and the cycle time was 8 hrs, with 5 min. influent feed which started at the same time with 2 hrs. anaerobic, 4 hrs. aerobic, 40 min. settling, 5 min. effluent drain and 1 hr. 15 min. anoxic. Moreover, aerobic batch test was also run with 1.25 l sludge taken from the end of anaerobic sludge of the steady-state Control group, and orthophosphate of 0, 22.5 and 67.5 mgP/l was additionally added to the system.

The RBCOD:P ratio in the Control and Test groups directly affected the phosphorus removal efficiency, i.e., the P removal efficiencies are 21, 42, 75, 100, 25, 87 and 99 percent, for the 4 Control and 3 Test runs, respectively. The P content in mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) was 13.5, 9.3, 6.4, 4.9, 13.8, 8.0 and 5.3 percent, respectively. The RBCOD:P ratio had less impact on the filtered COD removal efficiency; it was apparently 100, 100, 100, 99, 97, 99 and 99 percent, respectively and for the TKN removal efficiencies at the said ratio were 100, 96, 99, 96, 96, 93, 94 percent, respectively.

In the batch test, if the sludge that had been taken from the same RBCOD:P Control case was added to the 'batch' beaker, the system could uptake more phosphorus if more phosphorus was added to the aerobic stage. For the sludge from different RBCOD:P Control conditions but with the same amount of P added, it was found that if more RBCOD were added to the influent, more phosphorus were uptaken.

In conclusion, whether the phosphorus was fed only in the influent or at 2 locations did not affect the P removal efficiencies. But the P removal efficiency depended on the amount of substrate. If more substrate were fed, more phosphorus were uptaken.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนักศึกษา ยุพิน อมรวิท  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Thongchai Panswad  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของศาสตราจารย์ธงชัย พรหมสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้การดูแลเอาใจใส่ เสียสละเวลา รวมทั้งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อผู้วิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้ และอาจารย์ในโครงการทุกท่านที่ได้คำปรึกษาและแนะนำในงานวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณคุณสุธี ติมปน์ชัยพรกุล ที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

และท้ายสุด ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนทุกๆ ด้าน และขอมอบคุณความดีและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่ครอบครัวผู้วิจัย

สถาบันวิทย์บริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การกำจัดฟอสฟอรัส.....	7
2.2.1 วิธีทางเคมี.....	7
2.2.2 วิธีทางชีวภาพ.....	8
2.3 หลักการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	11
2.5 โมเดลทางชีวเคมีในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์.....	31
2.7.1 ความเป็นมาของระบบเอสปีอาร์.....	31
2.7.2 หลักการทำงานของระบบเอสปีอาร์.....	31
2.7.3 ระบบเอสปีอาร์ในการกำจัดฟอสฟอรัส.....	33
2.7.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสปีอาร์.....	34
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 แผนการทดลอง.....	36
3.1.1 ตัวแปรคงที่.....	36
3.1.2 ตัวแปรอิสระ.....	36



3.1.1	ตัวแปรตาม.....	40
3.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	40
3.3	วัฏจักรการทำงานของระบบ.....	41
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.5	การติดตั้งเครื่องมือและการทำงานของระบบ.....	44
3.6	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	46
3.6.1	การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	46
3.6.2	การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	48
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	49
4.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของชุดการทดลองควบคุมและทดสอบ.....	49
4.1.1	อุณหภูมิ.....	50
4.1.2	ออกซิเจนละลาย.....	50
4.1.3	ไออาร์พี.....	50
4.1.4	สภาพค่าง.....	55
4.1.5	พีเอช.....	58
4.1.6	เอ็มแอลเอสและเอ็มแอลวีสเอส.....	60
4.1.7	ค่าของแฉ่งแฉวนลอย เอสวี 30 และเอสวีไอ.....	62
4.1.8	กรด ไขระเหยง่ายหรือวีเอฟเอ.....	64
4.1.9	ซีไอดี.....	66
4.1.10	ทีเคเอ็น.....	68
4.1.11	ไนเตรดและไน ไทรด์.....	71
4.1.12	ฟอสฟอรัสและพีเอชเอ.....	75
4.1.13	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ.....	85
4.2	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของชุดการทดลองแบบแบคซ์.....	88
4.3	อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ.....	93
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	97
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	97
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	98
เอกสารอ้างอิง.....		100
ภาคผนวก.....		104
ภาคผนวก ก. บันทึกการทดลอง.....		105



ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลองการอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส อัตราการ- ปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส และอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ.....	189
ภาคผนวก ง. การควบคุมฟอสฟอรัส.....	206
ภาคผนวก จ. การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเติมน้ำเสียสังเคราะห์.....	208
ภาคผนวก ฉ. การเพาะเชื้อพีเอไอ.....	212
ภาคผนวก ช. รายการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ.....	214
ประวัติผู้เขียน.....	217



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน.....	4
ตารางที่ 2.2	การออกแบบโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	15
ตารางที่ 3.1	เหตุผลที่เลือกใช้น้ำเสียที่มีอัตราส่วนระหว่างอาร์บีซีไอคือต่อ ฟอสฟอรัสต่างๆ.....	37
ตารางที่ 3.2	รูปแบบแนวคิดการเปรียบเทียบที่ขบกรณีศึกษาของแต่ละการทดลอง.....	40
ตารางที่ 3.3	ส่วนประกอบของน้ำเสี้ยงเคราะห์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง.....	41
ตารางที่ 3.4	รายละเอียดการทำงานของระบบในแต่ละวัฏจักร.....	41
ตารางที่ 3.5	พารามิเตอร์และความถี่ที่จะวิเคราะห์ในแต่ละชุดเก็บตัวอย่าง.....	47
ตารางที่ 3.6	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	48
ตารางที่ 4.1	สภาพค่าเฉลี่ยของทุกชุดการทดลองที่สถานะคงตัว.....	56
ตารางที่ 4.2	พิเอชเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	58
ตารางที่ 4.3	เอ็มแอลเอสเอส, เอ็มแอลวีเอสเอส และค่าเอ็มแอลวีเอสเอสต่อเอ็มแอลเอสเอส (๓).....	62
ตารางที่ 4.4	ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าเอสวี 30 และเอสวีไอเฉลี่ย ที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	64
ตารางที่ 4.5	กรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยที่ช่วงสถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	65
ตารางที่ 4.6	ซีไอเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	66
ตารางที่ 4.7	ทีเคเอ็นที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	71
ตารางที่ 4.8	ไนเตรดและไนไตรต์ที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	72
ตารางที่ 4.9	ฟอสฟอรัสและประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่สถานะคงตัว ของทุกชุดการทดลอง.....	75
ตารางที่ 4.10	อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ ของทุกชุดการทดลองต่างๆ.....	93
ตารางที่ 4.11	อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ของทุกชุดการทดลองต่างๆ.....	95

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แนวคิดของงานวิจัย.....	3
รูปที่ 2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส.....	5
รูปที่ 2.2 ภาพรวมของรูปแบบกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส.....	7
รูปที่ 2.3 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแเอโรบิก.....	10
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของปีโอคิไลดและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้น ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	11
รูปที่ 2.5 ผลของอัตราส่วน TBOD <sub>5</sub> :TP ต่อปริมาณฟอสฟอรัสละลายในน้ำออก ของระบบบิฟิอาร์.....	13
รูปที่ 2.6 ความต้องการปีโอคิไลด์เพื่อกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก. ที่มวลถักเซลล์เฉลี่ยต่างๆ.....	14
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณฟอสเฟตในระบบเมื่อมีการเติมไนเตรด ที่ขั้นตอนแอนแอโรบิก.....	17
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของพีเอชกับอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อการจับใช้อะซิเตด.....	18
รูปที่ 2.9 ค่าฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	19
รูปที่ 2.10 โมเดลของการเมแทบอลิซึมภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแเอโรบิก.....	20
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อย การจับใช้ฟอสฟอรัสและ ปริมาณสารอาหารที่ค่าต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ ภายใต้การทดลองที่ค่าอายุเซลล์ต่างๆ คือ (a) 8, (b) 10, (c) 15 และ (d) 20 วัน.....	22
รูปที่ 2.13 ค่าดัชนีของการเดินระบบที่มีดังปฏิกรณ์ขนาด 1.5 ลิตร/ถัง; เวลากักพัก 0.89 ชั่วโมง/ถัง; อัตราการเวียนกลับ 0.75; เอ็มแอลเอสเอส 1900-2800 มก./ลิตร.....	23
รูปที่ 2.14 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ ภายใต้ปริมาณไนเตรดอะซิเตดต่างๆที่ใช้ .....	23
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเดินระบบของ Westbank Plant.....	24
รูปที่ 2.16 โพรไฟล์ฟอสฟอรัสที่ตำแหน่งต่างๆของระบบ.....	24
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหาร และเวลาในการติมอากาศที่ผ่านไป.....	25
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟอสฟอรัสและคาร์บอน และปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของการทดลองต่างๆ.....	25

รูปที่ 2.19 ขั้นตอนของการเดินระบบยูซีที .....27

รูปที่ 2.20 ปริมาณฟอสฟอรัสที่จับใช้และปลดปล่อยเฉลี่ย  
ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสต่างๆ.....27

รูปที่ 2.21 อัตราส่วนเฉลี่ยของซีโอดีที่ใช้และฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อย  
ในขั้นตอนแชนแอโรบิกที่อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสต่างๆ.....27

รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของผลการทดลองที่ได้กับความเข้มข้นสัปสเทรตที่ใช้.....28

รูปที่ 2.23 (a) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องของการยึดเวลาเติมอากาศ  
ในระบบแบบตรึงของการทดลองชุดแรก, (b) ค่าพลวัตของอัตราส่วน fphb, fpp  
และอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะระหว่างการทดลอง.....29

รูปที่ 2.24 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องระหว่างการยึดเวลาการเติมอากาศ  
ของระบบแบบตรึงในการทดลองที่ 2.....30

รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบิโออาร์.....33

รูปที่ 2.26 ระบบเอสบิโออาร์ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส.....35

รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของชุดควบคุม.....38

รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของชุดทดสอบ.....38

รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของชุดแบคทีเรีย.....39

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่เจาะรูข้างถังปฏิกรณ์.....42

ภาพที่ 3.5 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....43

รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องมือในการทดลอง.....45

รูปที่ 4.1 อุณหภูมิในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....51

รูปที่ 4.2 ออกซิเจนละลายน้ำในระบบของชุดควบคุม (1-4) ที่สถานะคงตัว .....52

รูปที่ 4.3 ออกซิเจนละลายน้ำในระบบของชุดทดสอบ (5-7) ที่สถานะคงตัว. ....52

รูปที่ 4.4 ออกซิเจนละลายในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....53

รูปที่ 4.5 ไออาร์พีในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....54

รูปที่ 4.6 ไออาร์พีในระบบของชุดควบคุม (1-4) ที่สถานะคงตัว.....55

รูปที่ 4.7 ไออาร์พีในระบบของชุดทดสอบ (5-7)ที่สถานะคงตัว.....55

รูปที่ 4.8 สภาพค่างในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....57

รูปที่ 4.9 พีเอชในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....59

รูปที่ 4.10 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในช่วงเดินระบบ  
ของชุดการทดลองควบคุม.....61

รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ของของแข็งแขวนลอย เอสวี 30 และเอสวีไอที่การทดลองชุดต่างๆ.....	64
รูปที่ 4.13	โพรไฟล์กรดไขมันระเหยง่ายของการทดลองชุดควบคุม (โดยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี).....	66
รูปที่ 4.14	กรดระเหยง่ายในช่วงเดินระบบของชุดควบคุม (วิธีโทเทรต).....	67
รูปที่ 4.15	ซีไอคิรอนที่สถานะคงตัวของชุดควบคุม (ชุดการทดลองที่ 1-4).....	68
รูปที่ 4.16	ซีไอคิในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....	69
รูปที่ 4.17	ทีเคเอ็นในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....	70
รูปที่ 4.18	ไนเทรตในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....	73
รูปที่ 4.19	ไนไทรต์ในช่วงเดินระบบของชุดการทดลองควบคุม.....	74
รูปที่ 4.20	ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส ค่าร้อยละของฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอส และฟอสฟอรัสละลายในน้ำออกของการทดลองชุดต่างๆ.....	76
รูปที่ 4.21	ปริมาณพีเอชเอในเอ็มแอลเอสตามระยะเวลาที่สถานะคงตัวของทุกชุดการทดลอง.....	77
รูปที่ 4.22	ปริมาณพีเอชเอต่อลิตรที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองควบคุม.....	78
รูปที่ 4.23	ฟอสฟอรัสละลายตามระยะเวลาที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองควบคุม (ชุด 1-4).....	78
รูปที่ 4.24	โพรไฟล์ฟอสฟอรัสของชุดควบคุมและทดสอบที่มี อัตราส่วนอาร์บีซีไอคิต่อฟอสฟอรัสเดียวกัน.....	80
รูปที่ 4.25	โพรไฟล์พีเอชเอของชุดควบคุมและทดสอบที่มี อัตราส่วนอาร์บีซีไอคิต่อฟอสฟอรัสเดียวกัน.....	81
รูปที่ 4.26	โพรไฟล์ฟอสฟอรัสและพีเอชเอของชุดควบคุม.....	82
รูปที่ 4.27	โพรไฟล์ฟอสฟอรัสและพีเอชเอของชุดทดสอบ.....	83
รูปที่ 4.28	ฟอสฟอรัสในช่วงเดินระบบของชุดควบคุม.....	84
รูปที่ 4.29	ค่าฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยต่อซีไอคิและวีเอฟเอที่ใช้พร้อมค่าพีเอช และฟอสฟอรัสละลาย ในขั้นคอนแอนแอโรบิก.....	86
รูปที่ 4.30	อัตราส่วนของพีเอชเอที่ผลิตได้และซีไอคิที่ใช้ไปของชุดการทดลองควบคุม.....	87
รูปที่ 4.31	อัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสที่ถูกจับใช้กับการใช้สารอาหาร และพีเอชเอที่ใช้ไปของชุดควบคุม.....	88
รูปที่ 4.32(ก)	ฟอสฟอรัสและพีเอชเอของชุดการทดลองแบบเบคซ์ (แยกตามชุดการทดลอง).....	90
รูปที่ 4.32(ข)	ฟอสฟอรัสและพีเอชเอของชุดการทดลองแบบเบคซ์ (แยกตามชุดการทดลอง).....	91
รูปที่ 4.33	ฟอสฟอรัสและพีเอชเอของชุดการทดลองแบบเบคซ์ (แยกตามปริมาณฟอสฟอรัสที่เติม).....	92
รูปที่ 4.34	อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ	

(แยกตามปริมาณฟอสฟอรัสที่เติม).....	92
รูปที่ 4.34 อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ ของชุดควบคุม.....	94
รูปที่ 4.35 อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะของชุดควบคุม.....	94
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสของชุดควบคุม.....	96
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการเดินระบบ.....	99



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย