

ผลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ
ในช่วงอุณหภูมิเมโสฟิลิก



นางสาวอภิรดี ดวงใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0530-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TEMPERATURE AND ITS CHANGES ON BIOLOGICAL PHOSPHORUS
REMOVAL IN MESOPHILIC RANGE

Miss Apiradee Doungchai

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

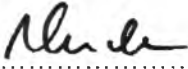
Chulalongkorn University

Academic Year 2000

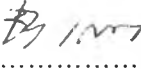
ISBN 974-13-0530-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในช่วงอุณหภูมิเมโสฟิลิก
โดย นางสาวอภิรดี ดวงใจ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์

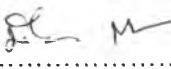
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มันสิน ตันจุลเวศม์)


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

อภิวิทย์ ดวงใจ : ผลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ในช่วงอุณหภูมิเมโสฟิลิก (EFFECTS OF TEMPERATURE AND ITS CHANGES ON BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL IN MESOPHILIC RANGE) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 281 หน้า, ISBN 974-13-0530-3

การศึกษามวลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในช่วงเมโสฟิลิกด้วยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิกนี้ ประกอบด้วยการศึกษาทดลอง 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิคงที่ที่ 20, 25, 30, 32.5 และ 35°C. ส่วนที่สองเป็นการศึกษามวลของการเพิ่มและลดอุณหภูมิทั้งแบบค่อยเป็นค่อยไปและแบบเฉียบพลันที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีไอดี 300 มก./ล. และค่าฟอสฟอรัส 15 มก./ล. ในโตรเจนที่เติมเข้าระบบมีปริมาณสูงกว่าความต้องการของเซลล์ประมาณ 2-4 มก./ล. ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเอสปีอาร์ขนาด 16.8 ลิตรซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดยอัตโนมัติโดยมีอัตราส่วนน้ำที่เติม (V_d) ต่อ น้ำค้างถัง (V_0) เท่ากับ 2:1 วัฏจักรการทำงานที่ใช้เท่ากับ 12 ชม. ประกอบด้วยขั้นตอนแอนแอโรบิก 4 ชม. 50 นาที ขั้นตอนแอโรบิก 6 ชม. ตกตะกอน 1 ชม. และระบายน้ำใสออก 10 นาที เติมน้ำที่ค่าอายุสลัดจ์ประมาณ 10 วันโดยระบายสลัดจ์ออกที่ปลายขั้นตอนแอโรบิก

การทดลองส่วนแรกพบว่าที่อุณหภูมิต่ำระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่า และมีค่าสัดส่วนฟอสฟอรัสในสลัดจ์สูงกว่าที่อุณหภูมิสูง กล่าวคือที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 32.5 และ 35°C. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 97, 58, 40, 28 และ 20 ตามลำดับ และค่าสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์เท่ากับร้อยละ 14.8, 10.4, 8.2, 6.2 และ 3.4 ของน้ำหนักเซลล์แห้งตามลำดับ สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ที่อุณหภูมิต่ำมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิสูงแสดงว่าฟิเอโอ (phosphorus accumulating organisms, PAOs) สามารถทำงานได้ดีและจับให้ฟอสฟอรัสสะสมไว้ในเซลล์ได้มาก ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองของระบบเท่ากับร้อยละ 98, 97, 99, 93 และ 91 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 20-30°C. การกำจัดซีไอดีกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขั้นตอนแอนแอโรบิก ส่วนที่อุณหภูมิ 35°C. เกิดขึ้นในขั้นตอนแอโรบิก ปริมาณเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 2003, 1658, 1210, 1043 และ 783 มก./ล. และ 1281, 1266, 957, 853 และ 640 มก./ล. ตามลำดับ ที่อุณหภูมิสูงสลัดจ์ตกตะกอนได้ไม่ดีโดยค่าเอสวีไอที่สถานะคงตัวมีค่าเท่ากับ 50, 36, 52, 166 และ 260 มล./ก. ตามลำดับ

การทดลองส่วนที่สองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบแบบเฉียบพลัน (ช่วง 20-35°C.) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบลดลง โดยระบบยังสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นรวมไม่เกิน 10°C. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 35°C. ระบบไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อีกต่อไป การเพิ่มอุณหภูมิของระบบแบบค่อยเป็นค่อยไปในช่วง 25-35 °C. พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบลดลงเช่นกัน แต่ฟิเอโอสามารถปรับตัวกับการเพิ่มอุณหภูมิแบบนี้ได้โดยที่ 35°C. ระบบยังคงกำจัดฟอสฟอรัสได้อยู่อย่างน้อยก็ในช่วงสั้น ๆ ในการลดอุณหภูมิของระบบแบบค่อยเป็นค่อยไป (ช่วง 30-20°C.) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก ส่วนการลดอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน(ช่วง 35-20°C.) พบว่าฟิเอโอสามารถปรับตัวกับการลดอุณหภูมิแบบเฉียบพลันได้โดยมีการปลดปล่อยและจับให้ฟอสฟอรัสสูงขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่อนิสิต..... อภิวิทย์ ดวงใจ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อภิวิทย์ ดวงใจ

ปีการศึกษา 2543.....

##4070502321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORDS : BPR/PAOs/PHOSPHORUS/TEMPERATURE/TEMPERATURE CHANGE/
MESOPHILIC RANGE

APIRADEE DOUNGCHAI: EFFECTS OF TEMPERATURE AND ITS CHANGES ON
BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL IN MESOPHILIC RANGE.

THESIS ADVISOR: PROF. THONGCHAI PANSWAD, Ph.D., 281 pp.

ISBN 974-13-0530-3

Two experimental set-ups were investigated to study the effects of temperature and its changes in the mesophilic range on biological phosphorus removal. Two automatic temperature-controlled SBR reactors of 16.8 l capacity with $V_r:V_o$ ratio of 2:1 were run as the anaerobic/aerobic process. The 12 hours cycle time consisted of 290 minutes anaerobic phase, 360 minutes aerobic phase, 60 minutes sedimentation and 10 minute withdrawal phase. A 11.2 l synthetic wastewater which had 300 mg/l COD and 15 mg/l P was fed to the system in the first 5 minutes of anaerobic phase. Excess sludge was withdrawn at the end of aerobic condition to get an approximate 10 days SRT.

The first experiment, consisting of 5 runs, revealed that phosphorus removal efficiency decreased at higher temperature. At the 20, 25, 30, 32.5 and 35°C steady state conditions, the 97, 58, 40, 28 and 20 % of P removal efficiency and 14.8, 10.4, 8.2, 6.2 and 3.4 % of P content in MLVSS were found, respectively. This showed that PAOs proliferated better at lower temperature. The COD removal efficiencies were 98, 97, 99, 93 and 91 %, respectively. At 20-30°C, COD was mainly removed in anaerobic phase, whereas at 35°C large portion of COD was removed in aerobic phase. MLSS and MLVSS at the said temperatures were 2003, 1658, 1210, 1040 and 783 mg/l. and 1281, 1266, 957, 853 and 640 mg/l, respectively. It was also observed that the temperature affected the sludge settleability as well, which can be shown by the SVI of 50, 36, 52, 166 and 260 ml/g, respectively.

After the first experiment or the steady state study at the said temperatures, four subsequent experiments, i.e. sudden(shock) increase, gradual increase, gradual decrease and sudden(shock) decrease of temperature, were studied. In the temperature-shock experiments (in the range of 20-35°C), the temperature was changed by 5°C at a time and maintained at such value for 10 cycles before moving to the next 5°C higher/lower level. For the gradually temperature-changing pattern, the temperature was changed 1°C a day. It was found that the P removal efficiency decreased when the temperature increased, and P removal was not found when the temperature was suddenly raised from 30°C to 35°C. The removal efficiency of P slightly increased when the temperature decreased by 1°C a day. It was also found that PAOs could acclimatize to sudden drop of temperature, resulting in higher P-release and P-uptake, especially at 20°C.

Department Environmental Engineering
Field of study Environmental Engineering
Academic year 2000.....

Student's signature.....*Apinadee Doungchai*
Advisor's signature.....*T. Panswad*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ บุคคลสำคัญยิ่งที่ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคือ ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านได้ให้โอกาสอันดีในการทำงานวิจัยนี้ ให้ความรู้และคำแนะนำทางด้านวิชาการและการทำงาน และให้มุมมองในการดำเนินชีวิต

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

ขอขอบพระคุณคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้วิชาความรู้ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือฯ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือมาโดยตลอด และทีมงานเมธีวิจัยทุกคนที่ช่วยกันแก้ไขปัญหา ให้คำแนะนำปรึกษาและให้ความรู้ใหม่ ๆ

ขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ห่วงใยและให้กำลังใจเสมอ

ความรักและกำลังใจอย่างสูงสุดที่ได้รับจากพ่อ แม่ และพี่น้องของผู้วิจัยเป็นสิ่งสำคัญยิ่งที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้

อภิรดี ดวงใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร	
2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส.....	4
2.2 วิธีการกำจัดฟอสฟอรัส.....	6
2.2.1 วิธีการทางเคมี.....	6
2.2.2 วิธีการทางชีวภาพ.....	7
2.3 หลักการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	7
2.4 ปฏิกริยาชีวเคมี.....	10
2.4.1 ปฏิกริยาชีวเคมีตามหลักการของ Comeau.....	10
2.4.2 ปฏิกริยาชีวเคมีตามหลักการของ Mino.....	13
2.5 ดังปฏิกริยาแบบเอสปีอาร์.....	15
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส.....	16
2.6.1 ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์และฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ.....	16
2.6.2 ซีโอดีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
2.6.3 เวลาพักเซลล์เฉื่อยหรือเอ็มซีอาร์ที.....	18
2.6.4 เวลาพักพักชลศาสตร์หรือเอชอาร์ที.....	20
2.6.5 ไนเตรต.....	21
2.6.6 ปริมาณแคทไอออน.....	22

2.6.7	อุณหภูมิ.....	23
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย		
3.1	แผนการทดลอง.....	27
3.2	การดำเนินการทดลอง.....	30
3.3	น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.5	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์.....	37
3.6	การควบคุมค่าอายุสถิติ.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์		
4.1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิคงที่และวิเคราะห์ผล.....	41
4.1.1	อุณหภูมิ.....	41
4.1.2	ออกซิเจนละลายน้ำ.....	61
4.1.3	ไออาร์พี.....	62
4.1.4	พีเอช.....	64
4.1.5	สภาพต่าง.....	64
4.1.6	เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอส.....	66
4.1.7	ค่าของแข็งแขวนลอย เอสวี 30 และเอสวีไอ.....	67
4.1.8	กรดไขมันระเหยง่าย.....	69
4.1.9	ซีไอดี.....	72
4.1.10	ทีเคเอ็น.....	73
4.1.11	ไนโตรต์และไนเตรต.....	75
4.1.12	ฟอสฟอรัส.....	77
4.1.13	อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะและอัตราการจับใช้ ฟอสฟอรัสจำเพาะ.....	82
4.2	ผลการทดลองการเปลี่ยนอุณหภูมิและวิเคราะห์ผล.....	83
4.2.1	การเพิ่มอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน.....	84
4.2.2	การเพิ่มอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป.....	91

4.2.3	การลดอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน.....	98
4.2.4	การลดอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	111
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	113
	รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก	ข้อมูลชุดการทดลองที่อุณหภูมิคงที่.....	119
ภาคผนวก ข	ข้อมูลชุดการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	210
ภาคผนวก ค	ข้อมูลการหาอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะและ อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ.....	251
ภาคผนวก ง	การหาสัดส่วนต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว.....	263
ภาคผนวก จ	การตุลมวลฟอสฟอรัส.....	267
ภาคผนวก ฉ	การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	270
ภาคผนวก ช	การคำนวณค่าอายุสลัดจ์.....	276
	ประวัติผู้เขียน.....	281

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากชุมชน.....	5
ตารางที่ 2.2	การออกแบบกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	20
ตารางที่ 2.3	ปริมาณแคทไอออนที่เกี่ยวข้องกับการจับใช้และการปลดปล่อย ฟอสฟอรัส.....	22
ตารางที่ 3.1	วัฏจักรการทำงานของระบบ.....	29
ตารางที่ 3.2	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์.....	32
ตารางที่ 3.3	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างและความถี่ของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ....	39
ตารางที่ 3.4	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	40
ตารางที่ 4.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1.....	55
ตารางที่ 4.2	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 2.....	56
ตารางที่ 4.3	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 3.....	57
ตารางที่ 4.4	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 4.....	58
ตารางที่ 4.5	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 5.....	59
ตารางที่ 4.6	อุณหภูมิของระบบช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	61
ตารางที่ 4.7	ค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5	61
ตารางที่ 4.8	ค่าไออาร์พีเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5	63
ตารางที่ 4.9	ค่าพีเอชเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5	65
ตารางที่ 4.10	ค่าสภาพต่างเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5	65
ตารางที่ 4.11	ค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	67
ตารางที่ 4.12	ค่าของแข็งแขวนลอย เอสวี30 และเอสวีไอเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	68
ตารางที่ 4.13	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	70
ตารางที่ 4.14	ค่าซีโอดีเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	72
ตารางที่ 4.15	ค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	74
ตารางที่ 4.16	ค่าไนเตรตเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	76
ตารางที่ 4.17	ค่าไนไตรต์เฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	76
ตารางที่ 4.18	ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	79

ตารางที่ 4.19	ค่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	79
ตารางที่ 4.20	ผลการดูปริมาณฟอสฟอรัสในระบบที่สถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	79
ตารางที่ 4.21	อัตราการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	83
ตารางที่ 4.22	ผลการทดลองเพิ่มอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (20 – 35 °ซ.).....	85
ตารางที่ 4.23	ผลการทดลองเพิ่มอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป (25-35 °ซ.).....	92
ตารางที่ 4.24	ผลการทดลองลดอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (35-20 °ซ.).....	99
ตารางที่ 4.25	ผลการทดลองลดอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป (30-20 °ซ.).....	106

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	วัฏจักรฟอสฟอรัส.....	4
รูปที่ 2.2	ตำแหน่งการเติมสารเคมีเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส.....	8
รูปที่ 2.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ตามหลักการของ Comeau.....	11
รูปที่ 2.4	วิถีทางชีวเคมีในการสร้างพีเอชบี.....	12
รูปที่ 2.5	สัดส่วนการใช้อะซิเตตในการสร้างพีเอชบีและในวัฏจักรที่ซีเอ.....	12
รูปที่ 2.6	ส่วนประกอบในเอ็มแอลเอสเอส.....	14
รูปที่ 2.7	กลไกการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีตามหลักการของ Mino.....	14
รูปที่ 2.8	ลักษณะการทำงานของเอสบีอาร์.....	16
รูปที่ 2.9	บีโอดีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยต่าง ๆ.....	19
รูปที่ 3.1	แผนผังขอบเขตการทดลอง.....	28
รูปที่ 3.2	ผังแสดงการทำงานของกระบวนการเอสบีอาร์แบบ แอนแอโรบิก/แอโรบิก.....	34
รูปที่ 3.3	ตั้งปฏิกิริยาแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ.....	36
รูปที่ 4.1	อุณหภูมิของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	42
รูปที่ 4.2	ค่าออกซิเจนละลายน้ำของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	43
รูปที่ 4.3	ค่าไออาร์พีของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	44
รูปที่ 4.4	ค่าพีเอชของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	45
รูปที่ 4.5	ค่าสภาพต่างของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	46
รูปที่ 4.6	ค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วง สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	47
รูปที่ 4.7	ค่าของแข็งแขวนลอย เอสวี30 และเอสวีไอของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วง สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	48
รูปที่ 4.8	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัว ของชุดการทดลองที่ 1-5.....	49

รูปที่ 4.9	ค่าซีไอดีของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	50
รูปที่ 4.10	ค่าที่เคเอ็นของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	51
รูปที่ 4.11	ค่าไนเทรตของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	52
รูปที่ 4.12	ค่าไนไตรต์ของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	53
รูปที่ 4.13	ค่าฟอสฟอรัสของระบบช่วงเริ่มต้นและช่วงสถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	54
รูปที่ 4.14	อุณหภูมิในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	60
รูปที่ 4.15	ค่าออกซิเจนละลายน้ำในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	62
รูปที่ 4.16	ค่าไออาร์พีที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	63
รูปที่ 4.17	ค่าพีเอชในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	65
รูปที่ 4.18	ค่าสภาพต่างในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	66
รูปที่ 4.19	ค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	67
รูปที่ 4.20	ค่าของแข็งแขวนลอย เอสวี30 และเอสวีไอในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่1-5	69
รูปที่ 4.21	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5 (วัดค่าโดยวิธี GC)	71
รูปที่ 4.22	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5 (วัดค่าโดยวิธีไทเทรต)	71
รูปที่ 4.23	ค่าซีไอดีเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	73
รูปที่ 4.24	ค่าซีไอดีในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	73
รูปที่ 4.25	ค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	75
รูปที่ 4.26	ค่าที่เคเอ็นในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	75
รูปที่ 4.27	ค่าไนเทรตในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	77
รูปที่ 4.28	ค่าไนไตรต์ในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	77
รูปที่ 4.29	ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5.....	79
รูปที่ 4.30	ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบที่อุณหภูมิต่าง ๆ	80

		หน้า
รูปที่ 4.31	ค่าฟอสฟอรัสในระบบที่สถานะคงตัวของชุดการทดลองที่ 1-5	81
รูปที่ 4.32	อัตราการปลดปล่อยและจับให้ฟอสฟอรัสจำเพาะของ ชุดการทดลองที่ 1-5.....	83
รูปที่ 4.33	ผลการทดลองเพิ่มอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (20-35 °ซ.).....	86
รูปที่ 4.34	ผลการทดลองเพิ่มอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป (25-35 °ซ.).....	93
รูปที่ 4.35	ผลการทดลองลดอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (35-20 °ซ.).....	100
รูปที่ 4.36	ผลการทดลองลดอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไป (30-20 °ซ.).....	107

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 3.1	เครื่องมือในการทดลองสำหรับกระบวนการเอสบีอาร์	
	แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก.....	33
ภาพที่ 3.2	การทดลองแบบแบตช์เพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส	
	จำเพาะและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ.....	35