

ผลของสับสเตรทที่มีต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟและฟอสฟอรัส
โดยระบบเอสบีบีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก

นาย ปิยะชน สันดุษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

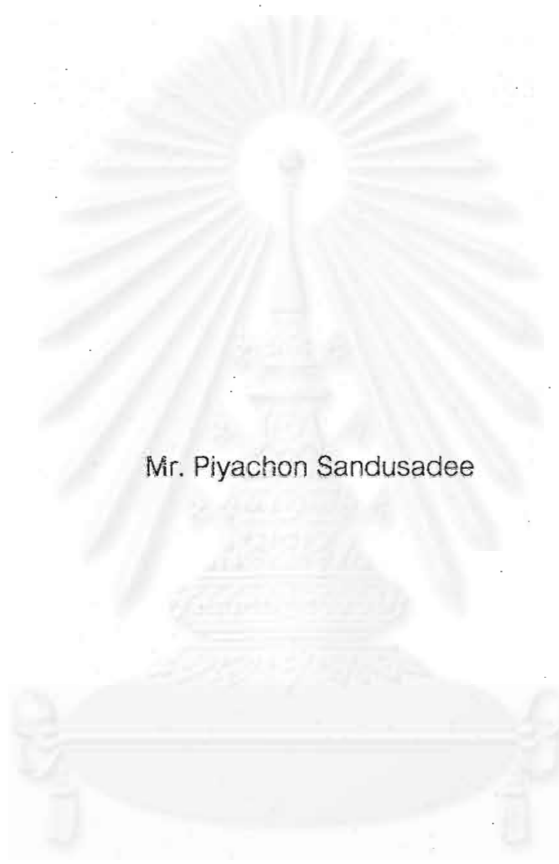
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-0842-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF SUBSTRATES ON DECOLORIZATION OF REACTIVE DYES AND PHOSPHORUS
REMOVAL BY ANAEROBIC/AEROBIC SBBR



Mr. Piyachon Sandusadee

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 974-17-0842-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสับสเตรทที่มีต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟและฟอสฟอรัสโดยระบบ
เอสบีปีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก

โดย

ปิยะชน สันดุษฐี

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



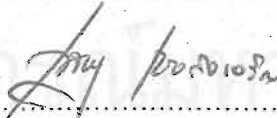
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตันฑุลเวศม์)



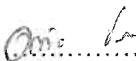
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกตเจริญ)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

ปิยะชน สันตัญญี : ผลของสับสเตรทที่มีต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟและฟอสฟอรัสโดยระบบเฮสบีบีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก. (EFFECT OF SUBSTRATES ON DECOLORIZATION OF REACTIVE DYES AND PHOSPHORUS REMOVAL BY ANAEROBIC/AEROBIC SBBR.)
 อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 222หน้า. ISBN 974-17-0842-4

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของชนิดสับสเตรท(แหล่งคาร์บอนและพลังงาน)ต่อการลดสีรีแอกทีฟทั้งโครงสร้างโมโนอะโซและไดอะโซรวมถึงฟอสฟอรัสปริมาณสูงที่มีผลต่อการลดสี โดยระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก เฮสบีบีอาร์ โดยมีระยะเวลา 1 รอบการทำงาน(วัฏจักร) 24 ชั่วโมงเท่ากันทุกการทดลอง ประกอบด้วย ระยะเวลาเติมน้ำเสียและถ่ายน้ำทิ้ง 1 ชั่วโมง แอนแอโรบิก 18 ชั่วโมง และแอโรบิก 5 ชั่วโมง ระบบเฮสบีบีอาร์ทำงานเหมือนระบบเฮสบีบีอาร์ แต่มีการเติมวัสดุตัวกลางลงไป ซึ่งเป็นพลาสติกโพลีโพรไพลีนลักษณะกระบอกกลวง จำนวน 1.5 ลิตร น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 5 ลิตรต่อ 1 ถึงปฏิกิริยา สับสเตรทที่ใช้ มี 3 ชนิด คือ น้ำตาล,นม และ โซเดียมอะซิเตท โดยเติมเป็นอัตราส่วนต่อสีในรูป มก/ล*ซีไอดี เท่ากับ 30:1 และเติมผงสี 100 มก/ล เท่ากันทุกชุดการทดลอง ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง รวม 9 การทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของสับสเตรทต่อการลดสีโครงสร้างโมโนอะโซ โดยน้ำตาล,นม และ โซเดียมอะซิเตท มีประสิทธิภาพการลดสีเฉลี่ยเท่ากับ 85.64%,89.46% และ 89.33% ในหน่วยเอสยู และ 94.60%,92.74% และ 96.39% ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ประสิทธิภาพกำจัดซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 96.33%,94.40% และ 96.55% ประสิทธิภาพกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยเท่ากับ 92.08%,24.03% และ 61.36% ประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสละลายเฉลี่ยเท่ากับ 35.94%,46.65% และ52.56% ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้สับสเตรทเหมือนการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนสีเป็นโครงสร้างไดอะโซ โดยน้ำตาล,นม และ โซเดียมอะซิเตท มีประสิทธิภาพลดสีเฉลี่ยเท่ากับ 81.50%,83.76% และ 84.00% ในหน่วยเอสยู และ 82.74%,89.56% และ 89.83% ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ประสิทธิภาพกำจัดซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 94.83%,94.31% และ 82.29% ประสิทธิภาพกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยเท่ากับ 92.00%,44.39% และ 86.45% ประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสละลายเฉลี่ยเท่ากับ 93.93%,75.21% และ 93.53% ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 3 ใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นสับสเตรทและใช้สีโครงสร้างไดอะโซ โดยแปรค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 150:4,150:8 และ 150:10 ประสิทธิภาพการลดสีที่ขึ้นสูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 ที่ใช้โซเดียมอะซิเตท เล็กน้อย โดยประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 84.93%,86.45% และ 90.44%(เทียบกับ 84.00%) ในหน่วยเอสยู และ 89.98%,90.70% และ 95.50% (เทียบกับ 89.83%) ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสละลายเฉลี่ยเท่ากับ 51.01%,35.63% และ 36.35% ตามลำดับ ประสิทธิภาพกำจัดซีไอดีและที่เคเอ็นเฉลี่ยใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 2 ที่ใช้โซเดียมอะซิเตท ซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 83.68%,83.59% และ 83.27% (เทียบกับ 82.29%) และ ประสิทธิภาพกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยเท่ากับ 86.17%,86.10% และ 86.42% (เทียบกับ 86.45%)ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพกำจัดซีไอดีและที่เคเอ็น

สรุปได้ว่า ระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก เฮสบีบีอาร์ สามารถลดสีย้อมในน้ำเสียได้ โดยการใช้สับสเตรททั้ง 3 ชนิดพบว่าประสิทธิภาพการลดสีของโครงสร้างสีและหน่วยวัดสีเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างในทางวิศวกรรมหรือการนำไปใช้งาน และฟอสฟอรัสปริมาณสูงมีผลให้การลดสีดีขึ้นเล็กน้อย จากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าในการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมรวมกับการกำจัดธาตุอาหาร ควรให้ความสำคัญในผลของสับสเตรทที่มีต่อการกำจัดธาตุอาหารมากกว่าการลดสี

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต ปิยะชน สันตัญญี
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

##4270425921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : DECOLORIZATION/SBBR/MONOAZO DYES/DIAZODYES/SUBSTRATES/PHOSPHORUS

PIYACHON SANDUSADEE : EFFECT OF SUBSTRATES ON DECOLORIZATION OF REACTIVE DYES AND PHOSPHORUS REMOVAL BY ANAEROBIC/AEROBIC SBBR. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 222pp. ISBN 974-17-0842-4

This research study about the effect of substrates(carbon and energy sources) on decolorization of monoazo and diazo dyes including high phosphorus concentration that effect on decolorization by Anaerobic/Aerobic SBBR system. The cycle time was 24 hrs in every experiment , fill and draw 1 hr, anaerobic 18 hrs and aerobic 5 hrs. The process of SBBR is the same as that of except that SBR SBBR was filled with media in the reactor . Study used hollow pellet polypropyrene media, 1.5 L per one reactor and fed with synthetic wastewater 5 L per one reactor. Three types of substrates were sugar,milk,sodium acetate(NaAc) and filling ratio to dyes in mg/l COD equal to 30:1 adding dyes powder 100 mg/l. This research had 3 experimental sets to the total 9 experiments.

The first experimental set studied the effect of substrates on decolorization of monoazo dyes. And sugar,milk,NaAc have the average decolorization efficiency of 85.64%,89.46% and 89.33% in SU unit and 94.60% 92.74% and 96.39% in ADMI unit. The average COD removal efficiency were 96.33%,94.40% and 96.55% and the average TKN removal efficiency were 92.08%,24.03% and 61.36%. Also, the average soluble phosphorus efficiency were 35.94%,46.65% and 52.56% respectively.

The second experimental set used the same substrates as first experiments but change the color to structure diazo dyes. Sugar,milk,NaAc have the average decolorization efficiency of 81.50%,83.76% and 84.00% in SU unit and 82.74% 89.56% and 89.83% in ADMI unit. The average COD removal efficiency were 94.83%,94.31% and 82.29% and the average TKN efficiency were 92.00%,44.39% and 86.45%. In addition, the average soluble phosphorus efficiency were 93.93%,75.21% and 93.53% respectively.

The third experimental set used NaAc and diazo dye but vary the COD/Phosphorus ratio to 150:4,150:8 and 150:10. The decolorization efficiency had improved more than that of experimental set 2 (NaAc) And the average decolorization efficiency were 84.93%,86.45% and 90.44% in SU unit and 89.98%,90.70% and 95.50% in ADMI unit. The average soluble phosphorus efficiency were 51.01%,35.63% and 36.35% respectively. The average removal efficiencies of COD and TKN are the same value as in experimental set 2 (NaAc) which equal to 83.68%83.59% and 83.27% and 86.17%,86.10% and 86.42% respectively. So high phosphorus concentration had no effect on COD and TKN removal.

In conclusion, the Anaerobic/Aerobic SBBR system is able to adequately achieve color removal. By using such 3 substrates the decolorization efficiency of the same color structure and same color unit were the same values which insignificant in engineering. Furthermore, high phosphorus concentration had improved decolorization efficiency. From experimental set 1,2 , the result show that in the joint treatment of dyes wastewater and nutrients , the result of substrates that effect on nutrient is more important than decolorization.

Department of Environmental Engineering
Field of Environmental Engineering
Academic Year 2002

Student's signature

Advisor's signature

Piyachon Sandusadee
Chavalit Ratanatamskul

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล เป็นอย่างสูง ในฐานะที่ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ให้จุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้กับผู้เขียน และได้ให้คำชี้แนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องน้อยลง รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์แก่ผู้เขียน ตลอดจนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่วรา และ พี่โสภา ที่ให้คำแนะนำและสอนวิธีการทดลองต่างๆ แก่ผู้เขียนจนเกิดความชำนาญ เสมือนอาจารย์อีกท่านในชีวิตผู้เขียน

ขอขอบคุณ ตุ๊กตา ที่คอยให้กำลังใจ และอยู่เคียงข้างผู้เขียนจนสามารถผ่านอุปสรรคต่างๆ ได้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโททุกท่าน ที่ทำให้แต่ละวันของการทำวิทยานิพนธ์ผ่านไปอย่างไม่ยากลำบากเกินไปนัก รวมถึงประสบการณ์ชีวิตใหม่ๆ จากรัฐจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ของผู้เขียน ที่เป็นกำลังใจและให้ความรัก ความช่วยเหลือในทุกด้าน แม้ครั้งหนึ่งผู้เขียนคิดจะลาออกจากการเรียนก็ตาม ผู้เขียนระลึกถึงคำพูดที่มีค่าของท่านทั้งสองในวันที่ท้อแท้มากที่สุด ความดีที่ทำทั้งหมดขอยกให้แด่ท่านทั้งสอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 แนวความคิดในการศึกษาการเติมแหล่งคาร์บอนต่างชนิดกันเพื่อ กำจัดสีขุ่นและฟอสฟอรัสโดยกระบวนการเอสบีบีอาร์.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	6
2.1 สีขุ่น.....	6
2.1.1 การมองเห็นสี.....	6
2.1.2 การจำแนกสีขุ่น.....	7
2.1.3 สีรีแอกทีฟ.....	10
2.2 การบำบัดน้ำเสียสีขุ่นด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.....	21
2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีขุ่นทางชีวภาพแบบแอโรบิก.....	22
2.2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีขุ่นทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก.....	24
2.2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีขุ่นทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก ร่วมกับแอโรบิก.....	27
2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดน้ำเสียสีขุ่น.....	27

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3	กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.....	33
2.3.1	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอโรบิก.....	33
2.3.2	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอนแอโรบิก.....	36
2.4	ฟอสฟอรัส.....	41
2.4.1	รูปแบบของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย.....	42
2.4.2	การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	42
2.4.3	พีเอชเอ.....	46
2.4.4	กลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ.....	49
2.4.5	ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	52
2.5	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการฟิล์มชีวภาพ.....	62
2.5.1	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์และการถ่ายเทมวล.....	63
2.5.2	ความหนาแน่นของจุลินทรีย์.....	64
2.5.3	ลักษณะของฟิล์มชีวภาพ.....	64
2.5.4	วัสดุตัวกลาง.....	65
2.5.5	ข้อดีและข้อเสียของระบบฟิล์มชีวภาพ.....	65
2.5.6	งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการฟิล์มชีวภาพ.....	66
2.6	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเอสบีอาร์.....	67
2.6.1	ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์.....	68
2.6.2	ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสบีอาร์.....	68
2.7	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเอสบีอาร์.....	69
2.7.1	ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์.....	71
2.7.2	ลักษณะการเติมอากาศ.....	72
2.7.3	ข้อดีของระบบเอสบีอาร์.....	74
2.7.4	งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเอสบีอาร์.....	74

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 แผนงานและการดำเนินการวิจัย.....	76
3.1 แผนการทดลอง.....	76
3.2 นำเสียสังเคราะห์.....	81
3.2.1 สีย้อมรีแอกทีฟ.....	81
3.2.2 การเตรียมนำเสียสังเคราะห์.....	82
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	83
3.4 การเดินระบบและการควบคุม.....	85
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์.....	86
3.6 การหามวลชีวภาพบนวัสดุตัวกลาง.....	87
3.7 การหาพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง.....	88
3.8 การวัดสี.....	89
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	90
4.1 พารามิเตอร์ทั่วไป.....	96
4.1.1 อุณหภูมิ.....	96
4.1.2 ออกซิเจนละลายน้ำ.....	96
4.1.3 ไออาร์พี.....	97
4.1.4 พีเอช.....	98
4.1.5 เอ็มแอลเอสเอสและมวลจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง.....	115
4.1.6 ซีโอดี.....	122
4.1.7 ทีเคเอ็น.....	128
4.1.8 ฟอสฟอรัสละลาย.....	134
4.2 สีน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ.....	142
4.2.1 ผลของชนิดสารอาหารต่อประสิทธิภาพการลดสี.....	142
4.2.2 ผลของโครงสร้างสีต่อประสิทธิภาพการลดสี.....	152

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.3 ผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อประสิทธิภาพการลดดี.....	159
4.2.4 อัตราการลดดีและอัตราการลดดีจำเพาะ.....	162
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	167
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	167
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	169
บทที่ 6 ความสำคัญของงานวิจัยและการประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	170
รายการอ้างอิง.....	171
ภาคผนวก.....	181
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียล้างเคราะห์.....	182
ภาคผนวก ข การหาพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง.....	185
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบของการทดลองต่างๆ.....	187
ภาคผนวก ง ข้อมูลโพรไฟล์ของการทดลองต่างๆ.....	206
ภาคผนวก จ มวลจุลินทรีย์ในระบบ อายุสลัดจ์ ภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์ มวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง.....	216
ภาคผนวก ฉ วีเอสเอสและเอสเอสที่เกาะติดบนวัสดุตัวกลางแต่ละการทดลอง.....	220
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	222

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสรีรเอกซิทฟ แบ่งตามโหนดต่างๆ 14
2.2	หน่วยพื้นฐานที่ใช้ผลิตพีเอชเอในสล็อตจีบีพีอาร์..... 49
2.3	จุลินทรีย์บางชนิดที่มีปรากฏการณ์ของโพลีฟอสเฟตและพีเอชเอ..... 51
2.4	ผลของชนิดสารอาหารต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในกระบวนการจีบีพีอาร์..... 60
2.5	แสดง Permeability of various membrane materials at 25 °C..... 72
3.1	แผนการทดลอง..... 80
3.2	ค่าซีไอดีน้ำเสียเข้าและอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์..... 80
3.3	ปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์..... 82
3.4	แสดงค่าซีไอดีของสารเคมีที่ใช้..... 83
3.5	ตำแหน่งและความถี่ที่เก็บตัวอย่าง..... 86
3.6	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ..... 87
4.1	แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด..... 91
4.2	แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลชุดการทดลองที่ 1..... 93
4.3	แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลชุดการทดลองที่ 2..... 94
4.4	แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลชุดการทดลองที่ 3..... 95
4.5	เอ็มแอลวีเอสเอสและเอ็มแอลเอสเอสในน้ำออกและบนวัสดุตัวกลาง ในแต่ละการทดลอง..... 115
4.6	ค่าซีไอดีเฉลี่ย แต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี..... 122
4.7	ค่าทีเคเอ็นเฉลี่ย แต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น..... 128

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ย แต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสละลาย.....	134
4.9 ความเข้มข้นเฉลี่ยและประสิทธิภาพการลดสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ.....	142
4.10 ผลโพรไฟล์การลดสีภายใน 2 และ 3 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิกในการ ทดลองที่ 2.3 เทียบกับชุดการทดลองที่ 3.....	160
4.11 อัตราการลดสีเริ่มต้นและอัตราการลดสีเริ่มต้นจำเพาะ.....	162
4.12 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นของชุดการทดลองที่ 3 กับ การทดลองที่ 2.3.....	166



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised Azo.....	12
2.2 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo.....	12
2.3 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone.....	13
2.4 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine.....	13
2.5 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Azo.....	14
2.6 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution.....	15
2.7 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition.....	16
2.8 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Monofunctional.....	17
2.9 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ในลักษณะสมมาตร.....	18
2.10 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional แต่เป็นกลุ่มรีแอกทีฟที่ต่างกัน.....	19
2.11 แสดงการย่อยสลายสีไดเรกต์สีเหลือง 12 ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก.....	25
2.12 แสดงการย่อยสลายสีแอซิดสีเหลือง 36 ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก.....	25
2.13 แสดงกลไกการรับอิเล็กตรอนของสีย้อมอะโซภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	26
2.14 วิธีอิเล็กตรอน และคาร์บอนในกระบวนการหายใจแบบแอโรบิก.....	34
2.15 วิธีอิเล็กตรอน และคาร์บอนในกระบวนการหายใจแบบแอนแอโรบิก.....	35
2.16 วิธีอิเล็กตรอน และคาร์บอนในกระบวนการหมัก.....	35
2.17 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้อากาศ.....	40
2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส.....	44
2.19 แสดงแบบจำลองทางชีวเคมีของกระบวนการอิมปีฟิอาร์.....	44
2.20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยกับปริมาณฟอสฟอรัส ที่จับใช้ที่อายุสัปดาห์ของระบบต่างๆ กัน.....	45
2.21 แสดงการสร้างพีเอชเอในชั้นแอนแอโรบิก.....	46
2.22 แสดงผลกระทบของพีเอชต่ออัตราการจับใช้ฟอสเฟตจำเพาะ.....	52
2.23 แสดงโพรไฟล์ของการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสเทียบกับแคตอิออนบางชนิด.....	55

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ผลของอัตราส่วนซีไอดีทั้งหมดต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเข้าต่อคุณภาพน้ำออก ในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด.....	56
2.25 ผลของอัตราส่วนซีไอดีต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียเข้าต่อสัดส่วน ของฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอส.....	57
2.26 สัดส่วนของฟอสฟอรัสในมวลของน้ำและมวลจุลินทรีย์เมื่ออัตราส่วน คาร์บอนต่อฟอสฟอรัสต่างกัน (กรณีบีไอดีน้ำเข้าคงที่).....	59
2.27 แสดงการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในฟิล์มชีวภาพ.....	63
2.28 แสดงลักษณะของฟิล์มชีวภาพ.....	64
2.29 แสดงขั้นตอนการทำงานของเอสบีบีอาร์เพื่อใช้กำจัดไนโตรเจน.....	71
2.30 แสดง Profile ของสารอินทรีย์และออกซิเจนผ่าน membrane และฟิล์มชีวภาพ.....	73
3.1 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดของสารอาหารต่อการกำจัด สีรีแอกทีฟโครงสร้างโมโนอะโซ.....	77
3.2 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาชนิดของสารอาหารต่อการกำจัด สีรีแอกทีฟโครงสร้างไดอะโซ.....	78
3.3 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่มี ต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟโครงสร้างไดอะโซ.....	79
3.4 โครงสร้างของสี Remazol Violet 5R.....	81
3.5 โครงสร้างของสี Remazol Black B.....	81
3.6 ส่วนประกอบของถังปฏิกรณ์เอสบีบีอาร์ที่ใช้ทดลอง.....	84
3.7 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	88
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการเอสบีบีอาร์.....	91
4.2 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 1.....	100
4.3 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 2.....	101
4.4 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 3.....	102
4.5 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 1.....	103

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 2.....	104
4.7 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 3.....	105
4.8 โพรไฟล์ออกซิเจนละลายของแต่ละการทดลอง.....	106
4.9 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 1.....	107
4.10 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 2.....	108
4.11 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 3.....	109
4.12 โพรไฟล์ไออาร์พีของแต่ละการทดลอง.....	110
4.13 พีเอชของชุดการทดลองที่ 1.....	111
4.14 พีเอชของชุดการทดลองที่ 2.....	112
4.15 พีเอชของชุดการทดลองที่ 3.....	113
4.16 โพรไฟล์พีเอชของแต่ละการทดลอง.....	114
4.17 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 1.....	117
4.18 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 2.....	118
4.19 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 3.....	119
4.20 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสเฉลี่ยในน้ำออกของแต่ละการทดลอง.....	120
4.21 อัตราส่วนเอ็มแอลวีเอสเอสต่อเอ็มแอลเอสเอสเฉลี่ยในน้ำออกของแต่ละการทดลอง.....	120
4.22 เอสเอสและวีเอสเอสเฉลี่ยบนวัสดุตัวกลางของแต่ละการทดลอง.....	121
4.23 อัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสเฉลี่ยบนวัสดุตัวกลางของแต่ละการทดลอง.....	121
4.24 ซีไอดีของชุดการทดลองที่ 1.....	124
4.25 ซีไอดีของชุดการทดลองที่ 2.....	125
4.26 ซีไอดีของชุดการทดลองที่ 3.....	126
4.27 โพรไฟล์ซีไอดีของแต่ละการทดลอง.....	127
4.28 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1.....	130
4.29 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2.....	131
4.30 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 3.....	132

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	ไฟล์ที่เคเอ็นของแต่ละการทดลอง..... 133
4.32	อัตราส่วน ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดต่อซีโอดีที่ใช้ ตลอดช่วง 1 วัฏจักร ของการทดลองที่ 2.3 เทียบกับชุดการทดลองที่ 3..... 137
4.33	ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 1..... 138
4.34	ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 2..... 139
4.35	ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 3..... 140
4.36	ไฟล์ไฟล์ฟอสฟอรัสละลายของแต่ละการทดลอง..... 141
4.37	สีหน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 1..... 144
4.38	สีหน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 2..... 145
4.39	สีหน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 3..... 146
4.40	ไฟล์ไฟล์สีหน่วยเอสยูของแต่ละการทดลอง..... 147
4.41	สีหน่วยเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 1..... 148
4.42	สีหน่วยเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 2..... 149
4.43	สีหน่วยเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 3..... 150
4.44	ไฟล์ไฟล์สีหน่วยเอดีเอ็มไอของแต่ละการทดลอง..... 151
4.45	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 1..... 153
4.46	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 1..... 153
4.47	กราฟแอบซอร์บแนนต์กับความยาวคลื่นของชุดการทดลองที่ 1..... 154
4.48	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 2..... 155
4.49	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 2..... 155
4.50	กราฟแอบซอร์บแนนต์กับความยาวคลื่นของชุดการทดลองที่ 2..... 156
4.51	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 3..... 157
4.52	เปรียบเทียบสีน้ำเข้ากับน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิก(1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 3..... 157
4.53	กราฟแอบซอร์บแนนต์กับความยาวคลื่นของชุดการทดลองที่ 3..... 158

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 เปรียบเทียบผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อความเข้มข้นหน่วยเอสยูที่ เวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ของผลโพรไฟต์การทดลองที่ 2.3-3.3.....	161
4.55 เปรียบเทียบผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อความเข้มข้นหน่วยเอดีเอ็มไอที่ เวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ของผลโพรไฟต์การทดลองที่ 2.3-3.3.....	161
4.56 กราฟอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอสยูของแต่ละชุดการทดลอง.....	163
4.57 กราฟอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอดีเอ็มไอของแต่ละชุดการทดลอง.....	164
4.58 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอสยูของแต่ละการทดลอง.....	165
4.59 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอดีเอ็มไอของแต่ละการทดลอง.....	165



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้มีการพัฒนาทั้งด้าน อุตสาหกรรม เกษตรกรรม การคมนาคม ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสีย อากาศเสีย การปนเปื้อนน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ชยะ โดยเฉพาะน้ำเสียเป็นปัญหาสำคัญในเมืองใหญ่ ซึ่งมีประชากรอยู่หนาแน่นรวมถึงโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอจัดว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศได้มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โรงงานต่างๆ เหล่านี้มีส่วนก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการฟอกย้อมจะมีน้ำเสียที่มีสีปนเปื้อนออกมา ซึ่งสีที่ใช้ในการย้อมผ้ามีหลายชนิด ทั้งที่สามารถย่อยได้ง่ายและยาก โดยเฉพาะในสีรีแอคทีฟชนิดอะโรมาติกที่มีพันธะที่ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจน และเกิดสารตัวกลางเป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นสารพวกอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amines) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต

เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีสารละลายน้ำปะปนเป็นปริมาณมาก ยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ การใช้สารเคมีร่วมกับการตกตะกอนของสีย้อมประเภทรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ไม่มีประสิทธิภาพในการลดสีมากนัก ทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากสีรีแอคทีฟละลายน้ำได้ดีมาก แม้มีการแนะนำโดยการดูดติดด้วยผงถ่าน แต่ก็ยังไม่แพร่หลาย เพราะมีค่าใช้จ่ายสูงเช่นกัน

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยมากจะมีการบำบัดก่อนทิ้งโดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งพบว่า มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความสามารถในการลดสีต่ำ (Reife และ Freeman, 1996 ; Shah, 1997) ในปัจจุบัน มีระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่สามารถนำมาใช้กำจัดสีย้อมอยู่หลายประเภท เช่น ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) ระบบโปรยกรอง (Thickling Filter) และระบบบ่อธรรมชาติ (Stabilization Pond) ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดี-ข้อเสีย แตกต่างกันไป ขึ้นกับงบประมาณค่าก่อสร้างและเดินระบบ ประสิทธิภาพ และขนาดพื้นที่ แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จในการกำจัดสีย้อมมากนัก

จากงานวิจัยของ Brown และ Laboureur (1983) แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการไร้อากาศมาใช้กำจัดสีย้อมบางชนิด โดยเฉพาะสีย้อมประเภทอะโซ (azo) ซึ่งเป็นชนิดของสีที่นำมาใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง คือประมาณร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในโรงฟอกย้อม ลักษณะสำคัญทางเคมีของสีย้อมอะโซ คือ สารประกอบเชิงซ้อนที่มีพันธะคู่ของไนโตรเจน (=N=) หรือเรียกว่าพันธะอะโซ โดยความสามารถของการแสดงสีของสีย้อมชนิดนี้จะขึ้นกับพันธะอะโซ ร่วมกับกลุ่มอะตอมที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophores) โดยเชื่อว่ากลไกแรกที่สำคัญในการกำจัดสีย้อมคือ การย่อยสลายพันธะอะโซในสีย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Meyer, 1981 อ้างถึงใน Randall และคณะ, 1993) กลไกต่อมาคือการทำลายกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ของสีย้อม เพราะฉะนั้นการนำกระบวนการไร้อากาศมาใช้จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ

แต่สถานการณ์ด้านน้ำเสียในปัจจุบันมีความซับซ้อน โดยประเทศไทยมีการพัฒนาในทุกด้าน ทำให้ชุมชน การเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ขยายตัวออกไปมาก ซึ่งปัญหาน้ำเสียที่มีมากในแหล่งชุมชนและเกษตรกรรม คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นผลจากการใช้สารซักฟอกต่างๆ ปุ๋ยเคมีจากไรนา ซึ่งธาตุอาหารทั้งสองเมื่อทิ้งลงแหล่งน้ำจะเกิดผลเสีย เช่น ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำจากแอมโมเนีย ปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) โรคเด็กตัวเขียว (Blue baby)

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนทั่วไปใช้ทั้ง กระบวนการไร้อากาศรวมกับการกระบวนการเติมอากาศ เพื่อใช้กำจัดธาตุอาหารทั้งสอง ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สามารถแบ่งตามลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือ 1.ประเภทเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยในน้ำ (Suspended growth) 2.ประเภทเชื้อติดตรึงบนผิวตัวกลาง (Attach growth หรือ Biofilm) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงระบบฟิล์มชีวภาพซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ระบบถังปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm Reactor) เช่น ระบบโปรยกรอง (Thickling Filter) จานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียมากขึ้น เนื่องจาก สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มาก รับการเปลี่ยนแปลงภาระสารอินทรีย์กะทันหันได้และการควบคุมระบบไม่ยุ่งยากเหมือนระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ เนื่องจากรับภาระอินทรีย์ได้มาก มวลของจุลินทรีย์จึงมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีและลดขนาดของถังปฏิกรณ์ลง แต่ก็มีข้อเสียคือมีปัญหาการอุดตันของมวลจุลินทรีย์ในช่องว่างของตัวกลาง โดยเฉพาะตรงบริเวณน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และมีการจำกัดอัตราการถ่ายเทมวลทั้งสารอาหารและออกซิเจน (Kaballo, 1997)

แนวทางแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้นำระบบถังปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพมารวมกับการดำเนินการแบบบำบัดน้ำเสียเป็นช่วงๆ คือ ลักษณะเติมเข้าและถ่ายออก (Sequencing Batch) ซึ่งรวมเรียกว่า กระบวนการเอสบีบีอาร์ (Sequencing Batch Biofilm Reactor, SBBR) โดยใช้วัสดุตัวกลางลงในถังปฏิกรณ์เอสบีบีอาร์ เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะติดและสร้างเป็นชั้นฟิล์มชีวภาพบางๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้เอสบีบีอาร์และลดการอุดตันของมวลชีวภาพในถังปฏิกรณ์

กระบวนการเอสบีบีอาร์มีการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายยาก เช่น น้ำเสียจากหลุมฝังกลบขยะ(Leachate) น้ำเสียอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียไซยาไนด์ และน้ำเสียที่มีส่วนผสมของ Chlorinated Hydrocarbon เช่น Perchloroethylene (PCE) Trichloroethylene (TCE) ซึ่งการลดสารอินทรีย์ย่อยยากดังกล่าวใช้หลักการโคเมตาบอลิซึมมาช่วยย่อยสลาย (Gerald และ Robert, 1995)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ โดยเฉพาะระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ไม่สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ดังกล่าวหรือลดได้แต่น้อย จึงถือว่าเป็นข้อดีของกระบวนการเอสบีบีอาร์ แต่ในปัจจุบันมีการนำกระบวนการเอสบีบีอาร์มาใช้ทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชน เช่น น้ำเสียโรงพยาบาล (ปาจารย์ ทองสนิท, 2539) ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ย่อยสลายง่าย ก็ได้ผลเป็นอย่างดี

1.2 แนวความคิดในศึกษาการเติมแหล่งคาร์บอนต่างชนิดกันเพื่อกำจัดสีย้อมและฟอสฟอรัสโดยกระบวนการเอสบีบีอาร์

จากงานวิจัยหลายงานที่ผ่านมาพบว่า การกำจัดสีย้อมที่มีพันธะอะโรมาติกภายใต้สภาวะไร้อากาศ อาศัยกลไกการลดสีโดยใช้ สีย้อมอะโรมาติกเป็นสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย (terminal electron acceptor) ในการย่อยสลายสารอาหาร(สารอินทรีย์) โดยจุลินทรีย์ (Carliell และคณะ, 1995) ทำให้พันธะคู่ของไนโตรเจนแตกตัวออก เพื่อรับอิเล็กตรอนที่มาพร้อมกับไฮโดรเจนอะตอม เกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ($R-NH_2$) ซึ่งกลไกการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพให้สารอินทรีย์ (ของเสียในน้ำที่ต้องการกำจัด) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) และให้พลังงานแก่จุลินทรีย์ในการดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ โดยใช้ออกซิเจนและไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย แต่ในการกำจัดสีย้อม จะใช้แนวทางที่ต่างกันคือ มีการเติมสารอินทรีย์ภายนอกหรือใช้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายในน้ำเสียมาเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและแหล่งพลังงาน ส่วนสีย้อมเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทน ซึ่งในงานวิจัยของ Carliell แสดงให้เห็นว่า การเติมแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีดีขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการที่ใช้สีย้อมเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงชนิดเดียวของจุลินทรีย์

แต่งงานวิจัยนี้ จะมีการเติมแหล่งคาร์บอนต่างๆ กัน 3 ชนิด คือ น้ำตาล , นม , โยเกิร์ต และศึกษาโหนดที่ต่างกันว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอย่างไร และในการทดลองช่วงท้ายจะศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในปริมาณสูง ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟและกำจัดฟอสฟอรัส โดยระบบเฮดบีบีอาร์แบบ แอนแอโรบิก/แอโรบิก
2. เพื่อศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนปฐมภูมิ (สับสเตรท) ที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟทั้งโครงสร้างโมโนอะไซและไดอะไซ รวมทั้งการกำจัดฟอสฟอรัส
3. ศึกษาผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงที่จะมีผลต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยทั้งหมดนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทดลองกำจัดสีรีแอกทีฟและกำจัดฟอสฟอรัสด้วยแบบจำลองกระบวนการเฮดบีบีอาร์ซึ่งเป็นถึงปฏิริยารูปทรงคอลัมน์บรรจุตัวกลางที่ผลิตจากพลาสติกโพรพิลีน โดยการเดินระบบเป็นแบบแบดซ์ ซึ่งมีวัฏจักรดังนี้ เติมน้ำเสีย 30 นาที แอนแอโรบิก 18 ชั่วโมง แอโรบิก 5 ชั่วโมง และระบายน้ำทิ้ง 30 นาที รวมเป็น 1 วัฏจักรเท่ากับ 24 ชั่วโมง และเชื้อจุลินทรีย์นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียการเคหะบางนา การทดลองทั้งหมดมี 3 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสีย้อมรีแอกทีฟ Remazol Violet 5R สีม่วง ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโมโนอะไซ

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้สี Remazol Black B สีนํ้าเงินซึ่งมีโครงสร้างไดอะไซเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้ง 2 ชนิด

ชุดการทดลองที่ 3 มีการเติมฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงเพื่อศึกษาหาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการลดสี

ได้มีการเติมแหล่งคาร์บอน(สารอาหารปฐมภูมิ) คือ น้ำตาล,นม,โซเดียมอะซิเตท เพื่อเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและพลังงานแก่จุลินทรีย์ โดยใช้อัตราส่วนคือ ซีไอดี_{แหล่งคาร์บอน} ต่อ ซีไอดี_{ซี} เท่ากับ 30 : 1 เท่ากันทุกชุดการทดลอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 สีย้อม (Dyes)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ไชลีน แอทราซีน โทลูอีน โดยสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediates) และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของแต่ละบริษัทที่ผลิตสีเพื่อที่จะได้สีย้อมชนิดต่างๆ ที่เหมาะกับเส้นใยแต่ละประเภท เช่น เซลลูโลส ขนสัตว์ เป็นต้น ตลอดจนเหมาะกับการย้อมที่แตกต่างกันไป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสีติดคงทนต่อแสงแดดและการซักล้าง

2.1.1 การมองเห็นสี

Witt (อ้างถึงใน สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) ได้สรุปว่าสีที่ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งในโมเลกุลสีย้อม ซึ่งกลุ่มอะตอมดังกล่าว เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายกลุ่ม คือ

1. กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) $-NO$ หรือ $=N-OH$
2. กลุ่มไนโตร (nitro group) $-NO_2$ หรือ $=NO.OH$
3. กลุ่มอะโซ (azo group) $-N=N-$
4. กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group) $C=C$
5. กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group) $C=O$
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group) $C=NH$ และ $-CH=N-$
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulfur group) $C=S$ และ $-C-S-S-C-$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) โดยการดูดกลืนคลื่นแสงสีขาวยาวบางแถบแสง และปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้เห็นสีย้อมเป็นสีแตกต่างกันไป ดังนั้นหลักการลดสีย้อมด้วยวิธีทั้ง ทางเคมี และ ชีวภาพ คือ การกำจัดกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ซึ่งเป็นตัวแสดงสีนั่นเอง

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ (Chromophores) ซึ่งเป็นส่วนแสดงสีออกมาให้ตาเห็นได้แล้ว ยังต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่ง คือกลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochromes) ได้แก่ OH NH₂ NHR NR₂ SO₃ และCOOH ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลสีใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลจะแสดงสมบัติของสีให้เห็นได้ แต่จะขาดความสามารถในการยึดติดกับเส้นใย ซึ่ง เรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่า โครมาเจน (Chromagens) ยกตัวอย่าง เช่น สีย้อมอะมิโนอะโซเบนซีน (Aminazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4$ กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ N=N กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ NH₂ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ $\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4$ ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครมและโครมาเจนนี้ จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

2.1.2 การจำแนกสีย้อม (อัจฉราพร ไสละสุต, 2527)

2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

1.สีย้อม (Dyes) สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายราคาถูก ดังนั้นผู้ผลิตสีพยายามค้นคว้าหาวิธีทำให้สีละลายน้ำได้มาก เพื่อสะดวกในการย้อม 2.พิกเมนต์ (Pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมจะต้องทำให้สีอยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนเข้าสู่เส้นใยแล้วเกิดการติดกับเส้นใยได้ จะต้องทำการละลายในตัวทำละลายหรือแขวนลอยในเรซิน โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบเชิงกลหรือเชิงเคมี อย่างไรก็ตาม เมื่อสีย้อมอยู่ในรูปสารละลายแล้ว ก็ยากที่จะบอกว่าสีย้อมนั้นละลายอยู่ในน้ำหรือในตัวทำละลาย จึงเป็นการยากแก่การจำแนกว่าตัวไหนเป็นสีย้อมหรือเป็นพิกเมนต์ ทำให้การแบ่งแยกทางกายภาพเกิดการสับสนได้

2.1.2.2 จำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี

การจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี มีความยุ่งยากเพราะต้องอาศัยความรู้ทางเคมีขั้นสูง นอกจากนี้สีในกลุ่มเคมีเดียวกันอาจมีวิธีการย้อมแตกต่างกัน ใช้กับเส้นใยแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซ บางตัวย้อมได้โดยตรงก็จัดเป็นสีไดเรกต์ บางตัวจะติดได้เมื่อน้ำย้อมมีสถานะเป็นกรดก็จัดเป็น สีแอซิด แม้แต่บางตัวต้องใช้สารบางอย่างมาช่วยในการติดเส้นใยซึ่งก็อยู่ในประเภทส้อมอร์แดนท์ ดังนั้นการแบ่งประเภททางเคมีมีข้อยุ่งยากสำหรับ ผู้ไม่มีความรู้ด้านเคมี อีกประการหนึ่ง สูตรโครงสร้างที่แท้จริงของสีย้อมหลายชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบแน่

ชัด ทำให้มีข้อจำกัดในการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะส่วนประกอบทางเคมีได้ 11 ชนิดคือ

1. Azo Colorants

1.1 Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diazo Compound
- The Coupling Reaction

1.2 Azo Compound

- Basic Dyes
- Acid Dyes
- Mordant and Premetallized Dyes
- Direct Dyes
- Azoic Dyes

2. Phenylmethane Dyes

3. Xanthene Dyes

4. Indigoid Dyes

5. Polycyclicquinone (Anthraquinone, etc.) Dyes

5.1 Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylamino Anthraquinone
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzanthrones
- Anthanthrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles
- Sulfur – Containing Anthraquinone compounds

5.2 Naphthalenic Acid Group – Vat Dyes

5.3 Esters of Anthraquinone – Vat Dyes

5.4 Anthraquinone – Acid Dyes

6. Sulfur Fusion Dyes
7. Amine Oxidation Colorants
8. Phthalocyanine Colorants
9. Onium Dyes
10. Reactive Dyes
11. Pigments

2.1.2.3 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้เป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี รวมถึงสมาคมผู้ผลิตย้อมสี (The Society of Dyers and Colourist) ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน แบ่งเป็น

1. สีเบสิก (Basic dyes)
2. สีแอซิด (Acid dyes)
3. สีมอดแดนท์ และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetalized dyes)
4. สีไดเรกต์ (Direct dyes)
5. สีดีสเพอร์ส (Disperse dyes)
6. สีอะโซอิก (Azoic dyes)
7. สีวัต (Vat dyes)
8. สีกำมันถัน (Sulfur or Sulphide dyes)
9. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorants)
10. สีโอเนียม (Onium dyes)
11. สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)
12. สีโลหะ (Metallic dyes)
13. สีพิกเมนต์ที่ใช้กับเรซิน (Pigment-resin binder system)

2.1.2.4 ปัจจัยในการทำให้สีย้อมติดกับเส้นใย

อิทธิพลทางเคมี

สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาใช้ในกระบวนการย้อมมีหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมชนิดใดมาใช้อย่างไรให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งจะต้องมีมากกว่าการที่สีจะรวมตัว

กับน้ำ ภาวะเช่นนี้เกิดได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อม มีหมู่อะตอมที่เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย (Substantivity) โดยแรงในการดูดติดของสีย้อมกับเส้นใยจะแตกต่างกัน ขึ้นกับอิทธิพลทางเคมี 4 ชนิด คือ

1. พันธะเคมีไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (van de waals forces)
3. แรงไอออนิก (Ionic forces)
4. พันธะเคมีโควาเลนต์ (Covalent bond)

แรงต่างๆเหล่านี้ จะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง จะต้องมียางน้อย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็พร้อมกันทั้ง 4 ชนิด จึงจะทำให้สีกับเส้นใยรวมตัวกันได้ โดยแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะเคมีโควาเลนต์

2.1.2.5 ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสีย้อม

รูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีย้อม จะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของสีย้อมเพื่อเข้าไปในเส้นใยที่ทำการย้อม คือ ถ้าโมเลกุลสีย้อมมีขนาดเล็กและรูปร่างยาว ก็สามารถผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากกว่าโมเลกุลสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การติดสีดีขึ้น

2.1.3 สิริเอกทีฟ (Reactive Dyes)

2.1.3.1 ประวัติของสิริเอกทีฟ

ในปี ค.ศ. 1884 ได้มีการค้นพบสีย้อมที่สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้โดยดี เช่น สีวัต และสีซัลเฟอร์ ต่อมา ได้พยายามทำให้สีที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถละลายน้ำและติดกับเส้นใยได้ นอกจากนี้ยังมีการหาวิธีย้อมให้สีเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส โดยนักค้นคว้าได้พยายามทุกทาง ตั้งแต่การใช้สารเคมีราคาแพง กระบวนการย้อมสีที่สลับซับซ้อน หรือการใช้ตัวทำละลายที่อันตราย แต่ก็ไม่เป็นผลทางด้านเทคนิคเลย ในระยะหลังมีการค้นคว้าด้านเซลลูโลสมากขึ้น จึงทำให้ค้นพบสีที่เหมาะสมสำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยค้นพบครั้งแรกโดย บริษัท อิมพีเรียลเคมีคัลอินคอร์ปอเรชั่น มีชื่อย่อว่า ไอ.ซี.ไอ (I.C.I) และได้วางจำหน่ายสิริเอกทีฟชนิดแรกในปี ค.ศ. 1956 คือ สี Procion

2.1.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของสีรีแอกทีฟ

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีหลายสีมีความคงทนดี ย้อมง่าย ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอม (Halogen atom) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ OH^- ของเซลลูโลสได้เมื่อน้ำย้อมมีสภาพต่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดี และมากกว่าสีที่ติดโดยแรงฟิสิกัลเคมี (Physical – Chemical Force) (อัจฉราพร ไชยะสูต, 2527) เนื่องจากโมเลกุลสีเชื่อมโยงติดกับเซลลูโลสโดยพันธะเคมีโควาเลนต์นั้นทำให้เกิดเป็น Cross link Compound กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้สีมีความคงทนต่อการซักฟอกและการขัดถู (โสภา ชินเวชกิจวานิชย์, 2540)

2.1.3.3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้



S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลไฟนิค ($-\text{SO}_2\text{Na}$) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่น กลุ่ม $-\text{NH}-$, $-\text{NHCO}-$, $-\text{SO}_2-$, $-\text{NHSO}_2-$, และ $-\text{NCH}_3-$ เป็นต้น

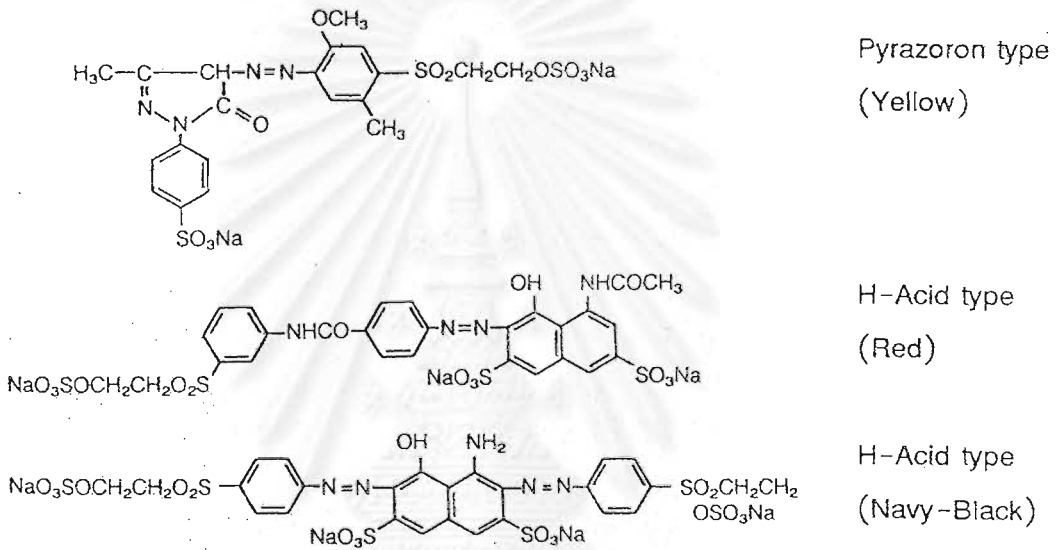
X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟก็จะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่เป็นสาร Heterocyclic ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆของ สี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนสำคัญ คือ กลุ่มที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอกทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

2.1.3.4 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

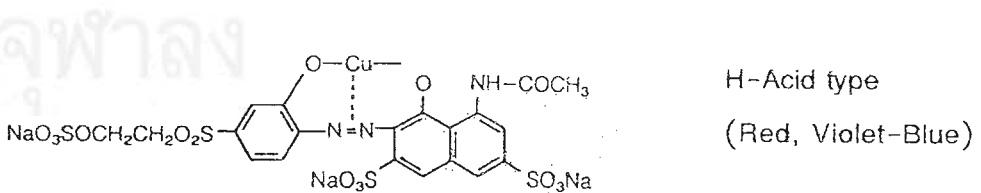
กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอสิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

1. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ซึ่งสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะมีกลุ่มที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก (รูปที่ 2.1)



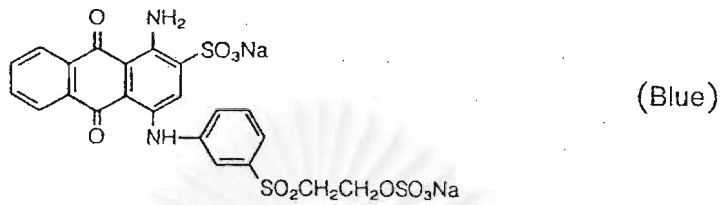
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised Azo (Shore, 1995)

2. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก(รูปที่2.2)



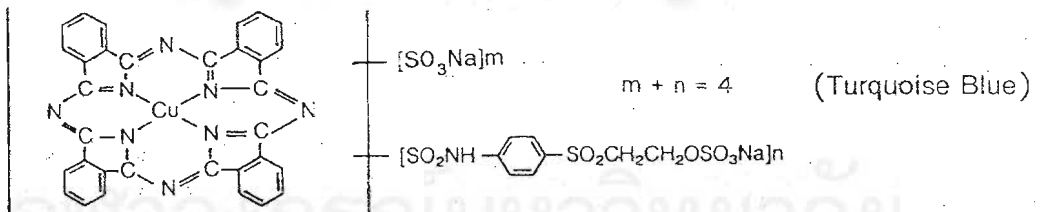
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo (Shore, 1995)

3. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก(รูปที่ 2.3)



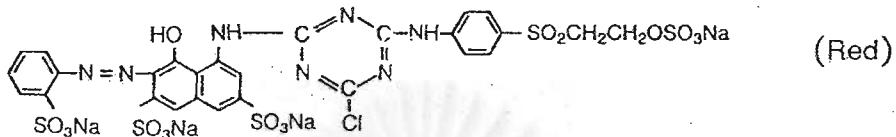
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone
(Shore, 1995)

4. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก(รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine
(Shore, 1995)

5. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional(รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ที่มีกลุ่มโครโมฟอร์เป็นแบบ Azo (Shore, 1995)

กลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอกทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอกทีฟนั้น แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอกทีฟ แบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore, 1990)

Chemical Class	% การกระจายของโทนสี								% ของสีรีแอกทีฟทั้งหมด
	เหลือง	ส้ม	แดง	ม่วง	ฟ้า	เขียว	น้ำตาล	ดำ	
Unmetallised Azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-complex Azo	2	10	10	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1				2				1
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

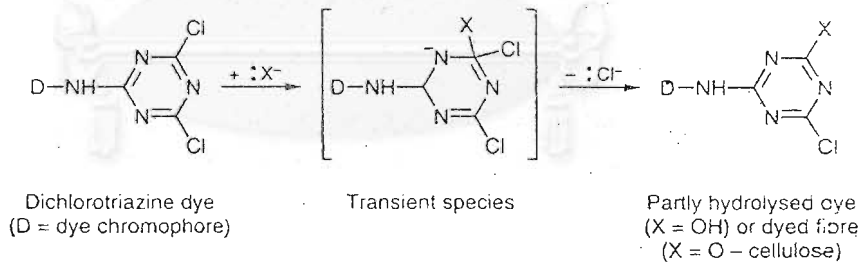
จากตารางจะเห็นได้ว่าสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo และ Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวม

สีรีแอกทีฟที่มีโทเนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีรีแอกทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึง ร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ของสีรีแอกทีฟได้ ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียได้ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟในกลุ่มอะโซ เป็นงานที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

2.1.3.5 กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอกทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถติดกับเส้นใยได้ โดยมีชนิดที่สำคัญๆ คือ Procion, Cibacron, Remazol ส่วนการสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

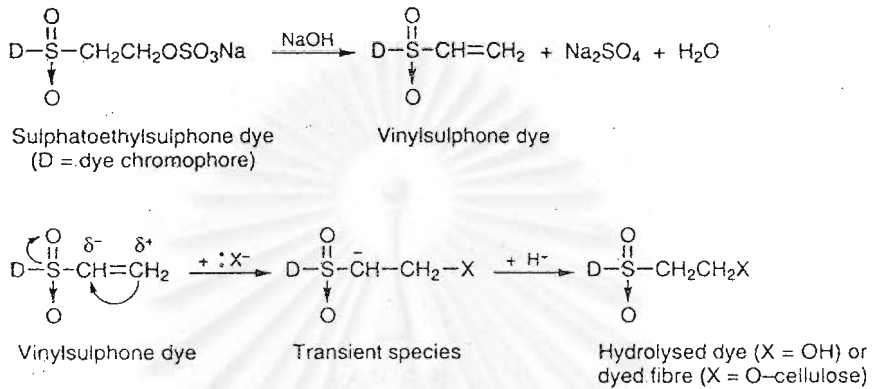
1. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าแทนที่อะตอมฮาโลเจน (Halogen) ในโมเลกุลสี (Nucleophilic Substitution) เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ลักษณะของปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (Shore, 1995)

2. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน สร้างพันธะกับโมเลกุลของสีโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน (Vinylsulphone) แล้วเชื่อมตัวมันเข้าไปกับ

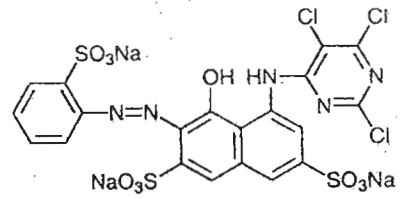
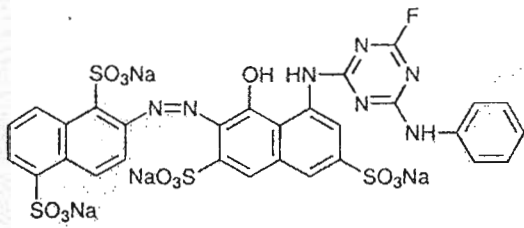
คาร์บอนตัวสุดท้ายของกลุ่มไวนิลซัลไฟนด์ดังกล่าว (Nucleophilic Addition) ลักษณะของปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition (Shore, 1995)

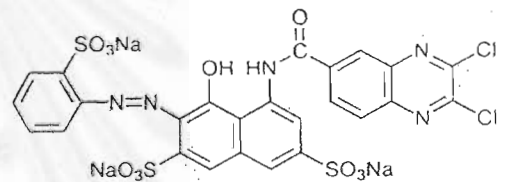
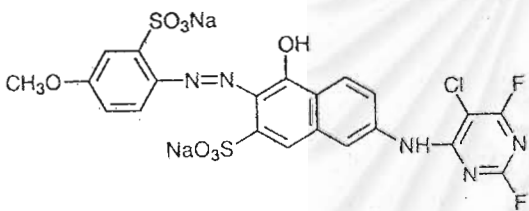
การสร้างพันธะกับโมเลกุลสีสามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน สีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์ แล้วไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีก จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน นอกจากนี้กลุ่มรีแอกทีฟที่มีการพัฒนาคิดค้นขึ้นมามาก การพิจารณาจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับกลไกในการสร้างพันธะและความคงทนของพันธะนี้ในขั้นตอนต่างๆ หลังการย้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.พวก Monofunctional ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุล เช่น กลุ่มรีแอกทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีพวก Aminohalotriazine หรือ กลุ่มรีแอกทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลไฟนด์ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวแต่มีอะตอมฮาโลเจนมากกว่า 1 อะตอม เช่น กลุ่มรีแอกทีฟพวก Dichlorotriazine , Difluoropyrimidine จะมีอะตอมฮาโลเจน 2 ตัวในกลุ่มรีแอกทีฟ แต่เมื่อตัวใดตัวหนึ่งถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนแล้ว อะตอมฮาโลเจนที่เหลือจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากการแทนที่ดังที่กล่าวไปแล้ว ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ monofunctional แสดงในรูปที่ 2.8



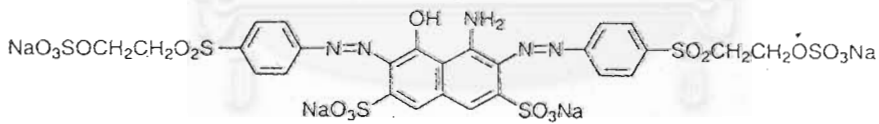
(ก) Aminofluorotriazine (Cibacron F)

(ข) Trichloropyrimidine (Procion MX)



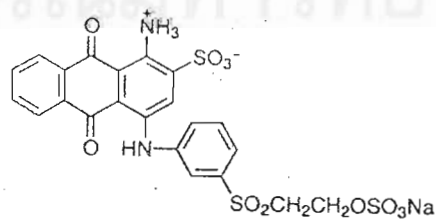
(ค) Chlorodifluoropyrimidine (Drimarine K)

(ง) Dichloroquinoxaline (Levafix E)



CI Reactive Black 5

(จ) Sulphatoethylsulphone (Remazol)



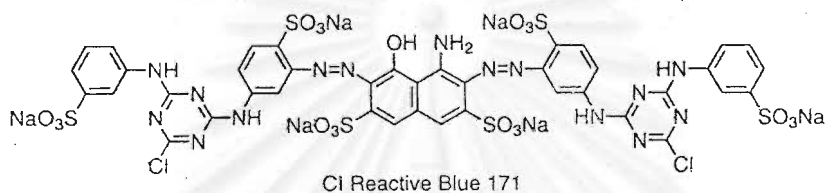
CI Reactive Blue 19

(ฉ) Sulphatoethylsulphonamide (Remazol D)

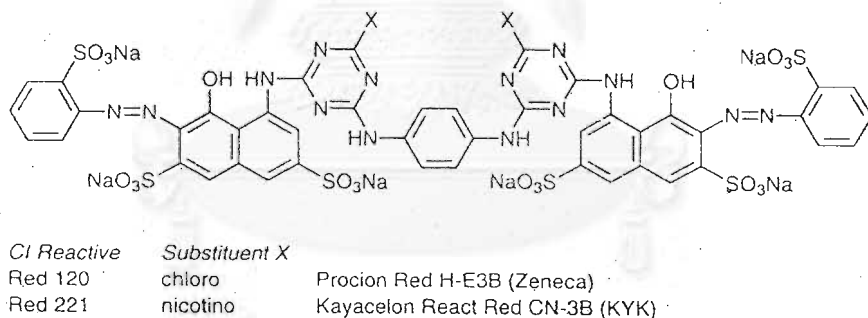
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ Monofunctional (Shore, 1995)

2.พวก Bifunctional จะมีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 กลุ่ม ใน 1 โมเลกุลซึ่งทำให้ความสามารถในการติดกับเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเท่ากับมีกลุ่มรีแอกทีฟให้เส้นใยเข้าสร้างพันธะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าและเมื่อกลุ่มหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มก็ยังสามารถในการสร้างพันธะได้คืออยู่ ทำให้พบว่ามี การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วย ลักษณะของกลุ่มรีแอกทีฟ แบบBifunctional ยังแบ่งย่อยได้ 2 ประเภท คือ

ก. กลุ่มรีแอกทีฟ ทั้ง 2 กลุ่มในโมเลกุลเป็นชนิดเดียวกัน ซึ่งการสร้างสีย้อมรีแอกทีฟเหล่านี้ จะมีตำแหน่งของกลุ่มรีแอกทีฟทั้ง 2 กลุ่มในโมเลกุลสีสมมาตรกัน ดังรูปที่ 2.9



(ก) Bis(aminochlorotriazine) (Procion H-E)

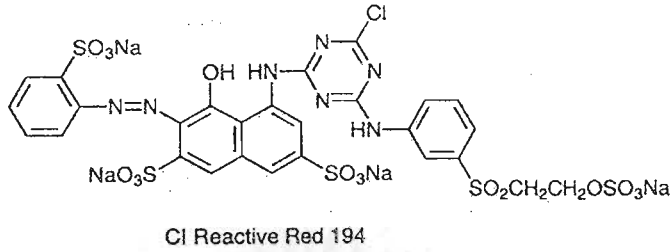


(ข) Bis(aminonicotilotriazine) (Kayacelon React)

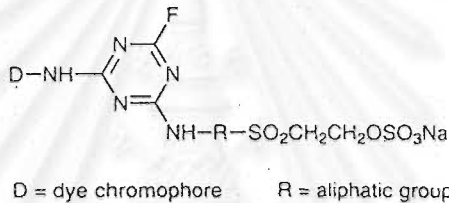
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ในลักษณะสมมาตร (Shore, 1995)

ข. กลุ่มรีแอกทีฟทั้ง 2 กลุ่มเป็นคนละชนิดกัน เช่น สีในกลุ่ม Sumifix Supra ซึ่งมีกลุ่มรีแอกทีฟพวก aminochlorotriazine และพวก sulphatoethylsulphone กลุ่มรีแอกทีฟทั้ง 2 กลุ่มสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้แต่ส่วนใหญ่จะทำปฏิกิริยากับพวก sulphatoethylsulphone มากกว่า นอกจากนี้ กลุ่ม aminochlorotriazine ยังทำหน้าที่เป็นกลุ่มตัวเชื่อมระหว่าง กลุ่ม sulphatoethylsulphone กับกลุ่มโครโมฟอร์ได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถผลิตสีประเภทนี้โดยมีโคร

สร้างของกลุ่มโครโมฟอร์แตกต่างกันไปอย่างหลากหลายได้และการที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแตกต่างกัน ทำให้สามารถใช้สีเหล่านี้ได้ในช่วงกว้างของอุณหภูมิ



(ก) Amino-chlorotriazine-sulphatoethylsulphone (Sumifix Supra)



(ข) Amino-fluorotriazine-sulphatoethylsulphone (Cibacron C)

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional แต่เป็นกลุ่มรีแอกทีฟที่ต่างกัน (Shore, 1995)

2.1.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสีรีแอกทีฟ

ในกระบวนการฟอกย้อมสีรีแอกทีฟ มีจุดประสงค์คือ การทำให้สีสามารถแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยให้มากที่สุด และเกิดการไฮโดรไลซิสในน้ำน้อยที่สุด ไม่เพียงเพื่อเป็นการประหยัดเท่านั้น ยังทำให้เส้นใยไม่ดูดสีที่ไฮโดรไลซ์แล้วเข้าไปในเส้นใย ซึ่งทำให้ไม่คงทนเมื่อผ่านกระบวนการใช้น้ำ เพราะถ้าให้สีไฮโดรไลซ์มาก การซักในขั้นสุดท้ายก็ทำให้สะอาดหมดจดได้ยาก จึงจำเป็นต้องซักเอาสีพวกนี้ออกให้หมด เพื่อจะทำให้สีไม่ตกเวลาใช้ ดังนั้นต้องควบคุมปัจจัยในการย้อมให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสมากที่สุด

การไฮโดรไลซิสของสี คือ การทำปฏิกิริยาของสีกับไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ ซึ่งจะ เป็นปฏิกิริยาที่แข่งกับการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย ปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสามารถ

เกิดได้ต่อเมื่อสีสามารถดูดซึมเข้าไปในเส้นใย ดังนั้นความเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยจึงขึ้นกับความเร็วในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใยของสี อัตราส่วนของความเร็วในการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย และระหว่างสีกับน้ำจะมีค่าคงที่สำหรับสีหนึ่ง แม้ในช่วงค่อนข้างกว้างของพีเอชที่เป็นต่าง

ดังนั้น ระดับการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย ขึ้นกับปัจจัย 5 ประการคือ

1. อัตราส่วนของความเร็วปฏิกิริยา ระหว่างสีกับเส้นใยเซลลูโลสต่อความเร็วปฏิกิริยาระหว่างสีกับน้ำ โดยส่วนมากแล้วสีจะทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีกว่าน้ำ จึงทำให้สียึดอมติดเส้นใยได้ก่อน
2. ความเข้มข้นสัมพัทธ์ระหว่างสีที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใยและสีที่หลงเหลือในน้ำ
3. ปริมาณน้ำ ถ้าปริมาณน้ำน้อยจะเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
4. สัมประสิทธิ์การแพร่ของสีเข้าไปในเส้นใย
5. พื้นที่ผิวของเส้นใยเซลลูโลสสำหรับให้สีได้ถูกดูดซึม

สรุปว่า คุณสมบัติพื้นฐานของสีมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสีกับเส้นใย ดังนั้นวิธีการย้อมสำหรับสีรีแอคทีฟแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน และปัจจัยควบคุมก็จะต่างกันด้วย จึงสามารถแบ่งสีรีแอคทีฟได้เป็น 3 ประเภทตามปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการฟอกย้อม

ประเภทที่ 1 สีรีแอคทีฟที่ใช้ต่างเป็นตัวควบคุม(Alkali-controllable reactive dyes)

สีย้อมประเภทนี้มีลักษณะที่สำคัญ คือจะมีสีหลงเหลือน้อยในน้ำหลังการย้อมซึ่งมีสารละลายเกลือที่เป็นกลางอยู่ และไม่ได้เติมด่าง แต่สีย้อมจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อมีการเติมด่าง แต่ถ้าเติมด่างจน พีเอชสูงกว่า 11 จะทำให้การดูดซึมของสีลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อ พีเอชสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกค่าพีเอชที่ต่ำที่สุด แต่สูงพอที่จะทำให้ตัวสีทำปฏิกิริยาได้หมดพอดีเมื่อกระบวนการฟอกย้อมสิ้นสุด ตัวอย่างสีประเภทนี้ ได้แก่ สีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟ dichlorotriazine chlorodifluoropyrimidine dichloroquinooxaline และ vinylsulphone

ประเภทที่ 2 สีย้อมที่ฟที่ใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุม (Temperature-controllable reactive dyes)

สีย้อมประเภทนี้มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด ในสภาวะที่ไม่มีด่าง สีย้อมประเภทนี้มีระดับการทำปฏิกิริยาของแต่ละสีเอง สารช่วยย้อมอื่นไม่มีความจำเป็นเท่าใดนัก การย้อมให้ได้ผลดีเพียงแต่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่านั้นก็พอ โดยควรย้อมสีย้อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าก่อนแล้วทำให้น้ำย้อมร้อนขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้สีถูกดูดซึมเข้าไปมากขึ้น ตัวอย่างสีย้อมประเภทนี้ได้แก่ สีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟ bis(aminonicotinotriazine)

ประเภทที่ 3 สีย้อมที่ฟที่ใช้เกลือเป็นตัวควบคุม (Salt-controllable reactive dyes)

สีย้อมประเภทนี้ต้องใช้อุณหภูมิในการย้อมประมาณ 80 องศาเซลเซียส จนถึงน้ำเดือด สีย้อมกลุ่มนี้จะมีหลงเหลือมากในน้ำหลังการย้อมที่ฟที่เอชเป็นกลาง ดังนั้นระดับเกลือที่เติมให้จึงมีความสำคัญมากต่อระดับการทำปฏิกิริยาของสีในการย้อมสีย้อมประเภทนี้มักมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาต่ำ เช่น สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอกทีฟ trichloropyrimidine aminochlorotriazine หรือ bis(aminochlorotriazine) ส่วนสีย้อม aminofluorotriazine (Cibacron F) มีลักษณะที่จัดอยู่ในประเภทนี้ แต่การฟอกย้อมสีประเภทนี้ กลับมีประสิทธิภาพดีเมื่อย้อมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า โดยใช้กระบวนการย้อมแบบเท (Batchwise)

2.2 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ปัจจุบัน การส่งออกเป็นรายได้หลักของประเทศ อุตสาหกรรมสิ่งทอ ก็เช่นกันมีการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งในกระบวนการฟอกย้อมนั้น หลีกเลียงไม่ได้ที่จะต้องใช้สีมาเกี่ยวข้องตลอดจนมีการใช้สารเคมีต่างๆมากกว่า 8000 ชนิด ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย้อมที่มีการระบุไว้ในดัชนีสี (Colour Index) น้ำเสียสีย้อมจากอุตสาหกรรมจึงเพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยเฉพาะน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟ ที่บำบัดยากกว่าน้ำเสียชนิดอื่น เพราะ สีย้อมที่ฟมีโครงสร้างสลับซับซ้อนเนื่องจากสีย้อมที่ฟมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นพวกสารประกอบอะโรมาติกอะมีน ยกแก่การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และทนทานต่อการถูกออกซิเดชันด้วยกระบวนการทางเคมีและแสง (Dubrow และคณะ, 1996) และสีย้อมที่ฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีทำให้ยากแก่การทำให้ตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่ใช้อยู่หลายวิธี แต่ยังมีประสิทธิภาพในการลดสีไม่สูงมากนัก อาจเนื่องมาจากในการผลิตมีการเติมสารช่วยย้อมหลายชนิดและมี

การคิดหาสารที่ช่วยในสีสามารถย่อยติดผ้าให้ดีขึ้น เพื่อป้องกันสีหลุดออก ที่ผ่านมามีวิธีการแก้ปัญหาจะใช้กระบวนการทางกายภาพและเคมีเป็นส่วนใหญ่ เช่น การแยกสีออกจากน้ำด้วยเมมเบรน กระบวนการฟล็อกคูเลชัน-โคแอกคูเลชัน โดยใช้สารเคมี(สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) กระบวนการดูดติดผิวด้วยผงถ่านกัมมันต์(Reife และ Freeman, 1996) การใช้ คลอรีน โอโซน หรือเรซิน ตลอดจนการใช้สารเคมีเพนตัน(วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540) แต่กระบวนการข้างต้นมีค่าใช้จ่ายที่สูง รวมถึงอันตรายจากสารเคมี แนวทางที่น่าสนใจคือการนำกระบวนการทางชีวภาพมาใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีทางกายภาพและเคมี ดังจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมทางชีวภาพแบบแอโรบิก

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกเป็นวิธีที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ซึ่งในอดีตน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมจะปล่อยรวมกับน้ำเสียชุมชนและส่งต่อไปบำบัดรวมโดยใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แต่จะพบปัญหาที่ไม่สามารถลดสีได้เนื่องจากการผลิตสีย้อมมาเพื่อต้านทานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนและมีการเติมสารเคมีลงไปในสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง สีบางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และระบบบำบัดที่ใช้จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาพอสมควรที่จุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้ชินกับน้ำเสียชนิดนั้นๆได้ อีกทั้งน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดจากกระบวนการผลิตเพราะ สีย้อมแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับเส้นใยแตกต่างกันรวมถึงการใช้สารช่วยย้อมต่างกัน ก็ยังทำให้จุลินทรีย์ปรับตัวได้ลำบากยิ่งขึ้น

Beszedits (1980) อ้างโดย Hussain (1994) สรุปไว้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกมี กระบวนการโปรยกรอง(Trickling Filter) บ่อเติมอากาศ(Aerated Lagoon) และกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่และนิยมใช้มากที่สุด การใช้วิธีทางชีวภาพสามารถลดบีโอดี ซีโอดี และเอสเอสได้มาก แต่ประสิทธิภาพในการลดสีย้อมในน้ำเสียมักต่ำเพราะเนื่องจากสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาใช้มีความสามารถทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

Grau (1991) อ้างโดย Hussain (1994) ได้อธิบายถึงกระบวนการแอโรบิกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมมี 2 ลักษณะ คือ

1. ใช้กระบวนการกายภาพ-เคมี ก่อนแล้วตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพ คือ มีการเติมเพอร์ริสซัลเฟตเพื่อทำการลดสี และตามด้วยกระบวนการแยกทิวเด็ดสลัดจ์โดยที่มีการเติมผงถ่านกัมมันต์
2. ใช้กระบวนการทางชีวภาพตามด้วยกระบวนการกายภาพ-เคมี ในวิธีนี้อาจจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นเพราะในน้ำเสียอาจมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อระบบ หรือมีการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับระบบ แล้วส่งบำบัดต่อ โดยใช้กระบวนการถังกรองชีวภาพ(Biofilter) อาร์บีซี หรือแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ และเติมเพอร์ริสซัลเฟต สารส้ม หรือเกลือเพอร์ริก

Porter และ Snider (1976) อ้างถึงใน Dubrow และคณะ (1996) พบว่าเมื่อทดสอบค่าบีโอดี 30 วันโมเลกุลสีจะถูกย่อยสลายมากกว่าที่ทดสอบที่ค่าบีโอดี 5 วัน โดยการศึกษาใช้กลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่ชินกับน้ำเสียที่มีสีขุ่นปนเปื้อน ซึ่งสรุปได้ว่าน้ำเสียที่มีสีขุ่นต้องการระยะเวลาในการปรับตัวของกลุ่มจุลินทรีย์นานและย่อยสลายได้ช้าซึ่งก็ตรงกับงานวิจัยของ Shriver และ Daque(1978) อ้างโดย Reife และ Freeman (1996) ได้กล่าวว่าน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมจะย่อยสลายได้ช้ากว่าน้ำเสียจากชุมชนโดยทำการทดลองวัดค่าบีโอดีเมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน พบว่าน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมถูกย่อยสลาย 31% ในขณะที่น้ำเสียชุมชนจะถูกย่อยสลาย 92%

Shaul และคณะ (1986) ได้อธิบายไว้ว่ากลไกแรกที่สำคัญสำหรับการกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิก คือการดูดติดผิวสลัดจ์ ความสามารถในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ สมบัติ โครงสร้าง และโมเลกุลของสี จำนวนและตำแหน่งของกลุ่มย่อย (substituents) ในโมเลกุลสี ความสามารถในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นหากว่ามีกลุ่มไฮดรอกซิล(OH) ไนโตร(nitro) อะโซ(azo) อยู่ในโมเลกุลสี และการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของโมเลกุลสี แต่ถ้าในโมเลกุลของสีมีกลุ่มซัลไฟ(sulfo) อยู่จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีโดยกระบวนการแยกทิวเด็ดสลัดจ์ลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟล็อก ขนาดพื้นที่ผิวของฟล็อก และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrokinetic potential) โดยพบว่าถ้าเพิ่มพื้นที่ผิวและค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

Shaul และคณะ (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีขุ่นแอสิด 7 ชนิด และสีทั้ง 7 ชนิดมีโครงสร้างอะโซ โดยศึกษาการดูดติดผิว (Adsorption) ของสีขุ่นกับฟล็อกของจุลินทรีย์ พบ

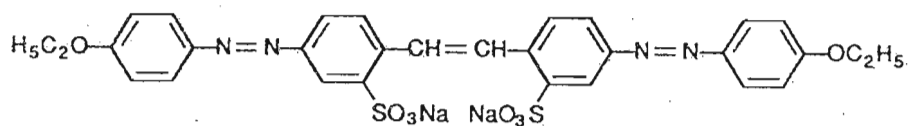
ว่าสีย้อม 5 ใน 7 ชนิด สามารถลดลงได้มากกว่า 70 % โดยส่วนใหญ่มีกลไกมีกลไกของการดูดติด
มีส่วนร่วมการย่อยสลายทางชีวภาพ

Goronszy และ Tomas (1992) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยระบบ Cyclic Activated Sludge System (CASS) พบว่าสีย้อมที่หลงเหลือจากการบำบัดสามารถถูกกำจัดได้ง่ายเมื่อเติมคลอรีนความเข้มข้น 25-100 มก/ล ที่เวลาสัมผัส 5-20 นาที

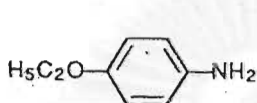
2.2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก

ภายใต้กระบวนการแอนแอโรบิกที่พันธะอะโซจะถูกรีดิวซ์ทำให้พันธะอะโซแตกออก (ซึ่งสามารถแตกได้ทางเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ) ในกระบวนการแอนแอโรบิกเมื่อพันธะอะโซแตกออกจะเกิดสารอะโรมาติกเอมีนที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ในสภาพตามธรรมชาติจะเกิดสภาพไร้อากาศได้เช่น ที่ก้นลำธาร หรือในหลุมฝังกลบ ทำให้มีสารอะโรมาติกเอมีนปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมด้วยสาเหตุนี้ต้องมีกระบวนการมาบำบัดสารเหล่านี้ต่อ จากงานวิจัยโดย The Ecological and Toxicological Association of the Dyestuffs Manufacturing Industry ได้ศึกษาการย่อยสลายสีภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกโดยใช้สีอะโซ ชนิด สีแอซิด, ไคเรกต์ และ มอแดนต์ ถูกย่อยสลายได้มากกว่า 90% และได้มีการวิเคราะห์พบว่า มีสารประกอบจำพวกอะโรมาติกเอมีน รูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของสีชนิด ไคเรกต์สีเหลือง 12 และ แอซิดสีเหลือง 36 ซึ่งถูกย่อยสลายในส่วนที่มีโครงสร้างพันธะอะโซภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน

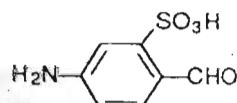
Chung และคณะ (1992) อ้างถึงใน Munruk Tuntoolavest (1997) ได้รวบรวมผลการศึกษากับแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเป็นแบคทีเรียในลำไส้ที่ต่างก็สามารถลดสีชนิดอะโซได้ และมักพบเอนไซม์ azoreductase ในแบคทีเรียเหล่านี้ และ Chung ยังได้ระบุว่า เอนไซม์ azoreductase ไม่สามารถพบในภาวะที่มีออกซิเจนได้และต้องการสารประกอบ ฟลาวิน(flavin) เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงานของเอนไซม์ นั่นคือ สาร FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร NADH กลายเป็น FADH₂ (reduced flavin nucleotides) และ FADH₂ ก็ถ่ายอิเล็กตรอนให้พันธะอะโซของสีย้อม แล้วพันธะอะโซก็แตกตัวออก ดังนั้นการลดสีในน้ำเสียจึงไม่ใช่การย่อยสลายโดยตัวสีเป็นสารให้อิเล็กตรอน เหมือนกับสารอินทรีย์ทั่วไป แต่ทำหน้าที่เป็น ออกซิโดซิงเกเจนต์สำหรับ FADH₂ ในการเปลี่ยนกลับเป็นรูปโคเอนไซม์ FAD ในระบบขนส่งอิเล็กตรอนต่อไป Gingell และ Walker(1971) อ้างถึงใน Carliell และคณะ(1995)



Direct Yellow 12



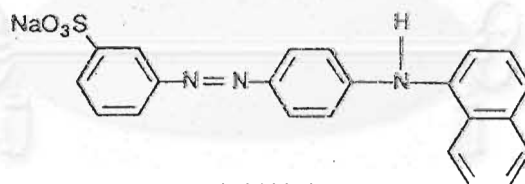
1-Amino-4-ethoxybenzene



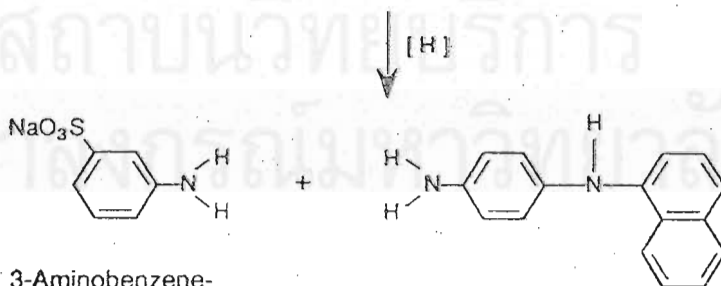
4-Amino-2-sulphobenzaldehyde

รูปที่ 2.11 แสดงการย่อยสลายสีไดเรกต์สีเหลือง 12 ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก

(Reife และ Freeman, 1996)



Acid Yellow 36

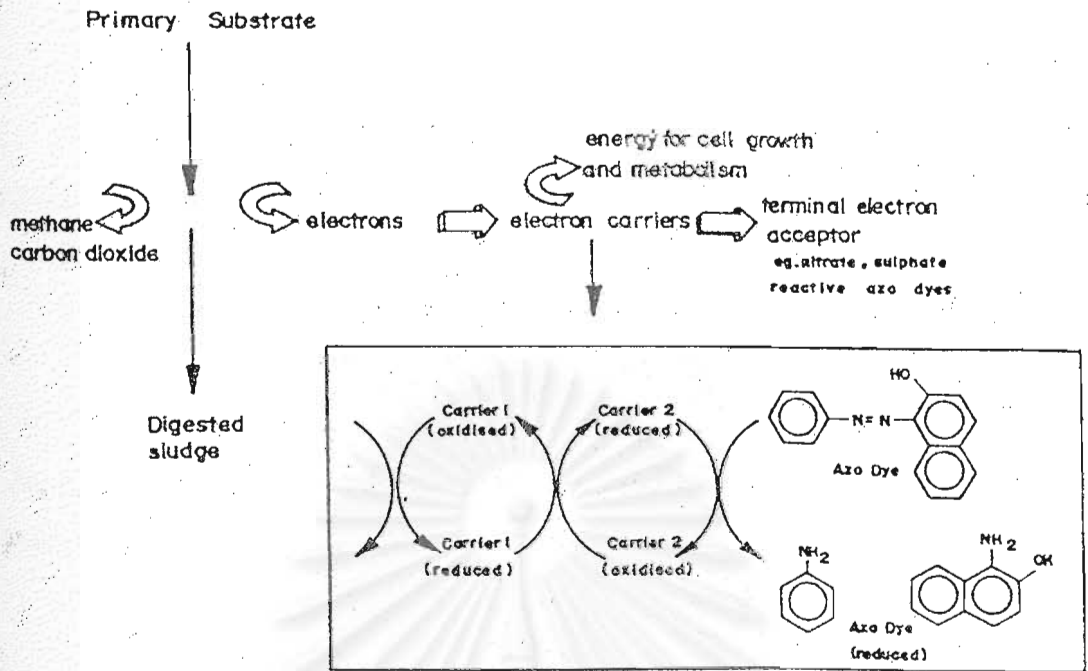


3-Aminobenzenesulphonic acid

N-Phenyl-1,4-diaminobenzene

รูปที่ 2.12 แสดงการย่อยสลายสีแอซิดสีเหลือง 36 ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก

(Reife และ Freeman, 1996)



รูปที่ 2.13 แสดงกลไกการรับอิเล็กตรอนของสีอะโซภายใต้สภาวะไร้อากาศ
(Carliell และคณะ, 1996)

Kremer (1987) อ้างโดย Reife และ Freeman (1996) ที่ทดลองกำจัดสีแอซิดสีแดง 88 ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกผลการทดลองพบว่าสีถูกกำจัดได้ 90% ภายใน 8 ชั่วโมง โดยประมาณเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 6 ชั่วโมง และผลจากการรีดิวซ์สีมีสาร naphthionic acid และ 1-amino-2-naphthol ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการย่อยสลายพันธะอะโซและจากผลการทดลองพบว่าแหล่งคาร์บอนอื่นนอกเหนือจากสีมีความจำเป็นต่อการย่อยสลายสี ซึ่งพบว่าอัตราการลดสีและกระบวนการเมตาบอลิซึมเกิดได้เร็วมากขึ้นเมื่อมีการเติมอะซิเตท และโพรฟิออนเท สำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน

Carliell และคณะ(1996) ได้เสนอกลไกการรับอิเล็กตรอนของสีอะโซภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก ดังรูปที่ 2.13 และยังมีการศึกษาการลดสีด้วยแบคทีเรียชนิดต่างๆ มากมาย และแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่ลดสีได้ มักจะมีเอนไซม์ azoreductase ที่เป็นตัวการทำให้พันธะอะโซแตกออก เช่นเดียวกับแบคทีเรียในลำไส้

การย่อยสลายสีภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะเกิดสารอะโรมาติกเอมีนที่เป็นพิษเกิดขึ้น ซึ่งต้องใช้กระบวนการแอโรบิกไปย่อยสลายต่อเพื่อให้สามารถกำจัดสีได้สมบูรณ์ แต่การแตกพันธะอะโซมีผลทำให้

1. ลดสีในน้ำเสีย

2. เป็นการเตรียมน้ำเสียสำหรับส่งต่อไปยังกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอโรบิกต่อ (Reife และ Freeman, 1996)

2.2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมทางชีวภาพแบบแอโรบิกร่วมกับแอโรบิก

จากการย่อยสลายสีด้วยกระบวนการแอโรบิกจะเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนเกิดขึ้น(เป็นสารพิษที่ก่อมะเร็งได้) ซึ่งจำเป็นต้องใช้กระบวนการแอโรบิกมาย่อยสลายสารที่เกิดขึ้นเพื่อให้ น้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดไม่มีสารที่เป็นอันตราย

Haug และคณะ (1991) ได้เสนอว่าการย่อยสลายสีย้อมจนสมบูรณ์ได้ควรมีขั้นตอนแอโรบิกและขั้นตอนแอโรบิก และจำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์หลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามการทำลายพันธะอะโซจำเป็นต้องมีเอนไซม์ azoreductase ซึ่งต้องทำงานภายใต้สภาวะแอโรบิกเท่านั้น

การบำบัดด้วยกระบวนการแอโรบิก-แอโรบิกจะสามารถกำจัดสีได้สูงกว่ากระบวนการแอโรบิก คือที่ 88% กับ 28% (Reife และ Freeman, 1996) ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการลดสีด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดน้ำเสียสีย้อม

Harmer และ Bishop(1992) พบว่าสีย้อมอะโซ Acid Orange 7 สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่เกิดสารพิษที่เกิดหลังผ่านการย่อยสลายแบบแอโรบิก การย่อยสลายสีย้อมอะโซประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 การทำลายพันธะอะโซ ขั้นที่ 2 คือการเปลี่ยนเป็นสารขั้นกลาง (intermediates) ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน และโดยส่วนใหญ่เป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งความเป็นพิษไม่ได้เกิดจากตัวสีโดยตรง แต่มาจากสารประกอบอะโรมาติกเอมีนมากกว่า ทั้งนี้ เพราะเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารที่ไม่สมบูรณ์ของระบบแอโรบิก จึงเลือกใช้ระบบฟิล์มชีวภาพที่มีทั้งส่วนแอโรบิกกับแอโรบิกเกิดขึ้นได้ในระบบเดียว ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสี Acid Orange 7 ได้ถึง 18-97 % โดยการกำจัดสีเกิดขึ้นได้มากที่สุด 2 กรณี 1.) มี

ค่าออกซิเจนละลายใน Bulk-phase สูง และค่า ฟลักซ์ซีไอดีต่ำๆ 2.) มีค่าออกซิเจนละลายต่ำ แต่ค่า ฟลักซ์ซีไอดีสูง และยังตรวจพบสาร 1-amino 2-naphthol ด้วย

Brown และ Laboureur(1983) สังเกตว่าสีย้อมที่มักจะถูกดูดซึม(adsorb) ไปในสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย หรือตะกอนตามก้นแม่น้ำ ซึ่งเป็นสภาพแอนแอโรบิก จึงมีแนวคิดว่า การดูดซึมหายไปของสี อาจเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก โดยทดลองกับสีย้อม 22 ชนิด ส่วนเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้มาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นหลัก แล้วทำการทดลองในขวดแก้วที่ปิดสนิท และมีวาล์วระบายก๊าซที่เกิดขึ้น ประกอบเข้ากับเครื่องกวนแม่เหล็ก และควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 1 องศาเซลเซียส แล้ววิเคราะห์ตัวอย่าง ณ. วันที่ 14, 28 และ 42 วัน เทียบกับวันแรก พบว่าสีประเภท monoazo 4 ชนิด และ diazo 6 ชนิด สามารถลดสีลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนสี poly-azo anthraquinone และอื่นๆ ที่เลือกมาทำการทดลองก็สามารถกำจัดสีลงได้พอสมควร ยกเว้นสี Acid Blue 80 ที่ลดลงได้น้อยมาก จึงสรุปได้ว่าการสลายสีย้อมในสภาวะแอนแอโรบิกมีความเป็นไปได้สูง

Marquez และ Costa(1996) ศึกษาการใช้ระบบ PACT (Powder Activated Carbon Treatment) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก โดยการเติมผงถ่านกัมมันต์ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์จำลองในห้องปฏิบัติการ แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพ (biomass) กับการกำจัดสี พบว่าที่ความเข้มข้นมวลชีวภาพประมาณ 1000 มก/ล มีการกำจัดสีได้ดีที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพียงพอในการดูดติดสีและให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและเจริญเติบโต แต่เมื่อความเข้มข้นมวลชีวภาพมากกว่า 2500 มก/ล พื้นที่ผิวของผงถ่านมีน้อยลงเนื่องจากมีมวลชีวภาพยึดเกาะมากไป จนขาดพื้นที่ผิวเหลือสำหรับการดูดติดสีกับสีย้อม

Razo-Flores และคณะ(1997) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสีย้อมอะโซ 2 ชนิด คือ Mordant Orange 1 (MO1) และ Azodisalicylate (ADS) ด้วยระบบยูเอเอสพีที่มีปริมาตร 160 มล. โดยใช้เชื้อลักษณะเป็นเม็ดจากระบบยูเอเอสพีที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ในการทดลองกับสี MO1 มีสาร 5-aminosalicylic acid (5-ASA) และ 1,4 phenylenediamine เกิดขึ้น Razo ได้ระบุว่าเป็นสารที่เกิดจากการสลายพันธะอะโซ หลังจากทดลองเป็นเวลานาน ปรากฏว่าสาร 5-ASA ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีนกลับตรวจพบได้ปริมาณน้อยมาก แสดงว่ามีการย่อยสลายจนสมบูรณ์ได้ ส่วนสี ADS เป็นสีที่ใช้ผลิตยา มีส่วนประกอบของสาร 5-ASA อยู่ 2 หน่วยต่อโมเลกุลสี สามารถสลายตัวอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าไม่มีการเติมอาหารให้ Razo-Flores จึงกล่าวว่าการย่อยสลายสาร 5-ASA สามารถเป็นสารให้อิเล็กตรอนกับการสลายพันธะอะโซ การ

ทดลองแบบแบตช์ (Batch) สนับสนุนว่าสี ADS สามารถย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ได้ ผลการทดลองนี้แสดงว่าสี อะโซบางชนิดสามารถเป็นแหล่งคาร์บอน แหล่งพลังงานและแหล่งไนโตรเจนให้กับจุลินทรีย์ได้ แต่การเติมกลูโคสเป็นการเพิ่มการรีดิวซ์สาร FAD ทำให้การรีดิวซ์พันธะอะโซเกิดได้มากกว่าการไม่เติม และการเติมมากเกินไปก็เพียงพอแต่เป็นการเพิ่มการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนเท่านั้น ไม่ได้เพิ่มการลดสีให้มากขึ้นเท่าไร

Zaoyan และคณะ(1992) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีด้วยกระบวนการอาร์บีซี ประกอบด้วยแอนแอโรบิกอาร์บีซี แอโรบิกอาร์บีซี และมีสลัดจ์แขวนลอยในถังปฏิกรณ์ พบว่าประสิทธิภาพการลดสีเป็น 71.6% และเมื่อทดลองโดยใช้ แอโรบิกอาร์บีซีเพียงอย่างเดียวจะลดสีได้น้อยกว่า ในกระบวนการแอนแอโรบิก สีและสารย่อยสลายยากจะถูกเปลี่ยนเป็นสารที่ย่อยง่ายและต้องมีกระบวนการแอโรบิกมาย่อยสลายต่อ การย่อยสสารประกอบที่มีพันธะอะโซสามารถย่อยได้ในสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกแต่สามารถเกิดได้ดีใน แอนแอโรบิก และในขั้นที่สองเป็นสภาวะแอโรบิกที่เป็นการย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีน ที่เป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง

Ganesh และคณะ(1994) ศึกษาพฤติกรรมของสีย้อมอะโซ ในสลัดจ์โดยใช้สีย้อม Reactive Black 5 และน้ำล้างสีย้อม Navy 106 ซึ่งเกิดจากสีรีแอกทีฟชนิดอะโซ 3 ตัว ทั้งนี้มีที่มาจากความต้องการจะศึกษาการย่อยสลายสีในสลัดจ์ซึ่งมีมวลชีวภาพเข้มข้นกว่าในน้ำเสีย จึงใช้การย่อยสลัดจ์แบบแบตช์ ทั้งแบบแอนแอโรบิกและแอโรบิก โดย 1.) ทำการศึกษาถึงบทบาทของหมู่ vinylsulfone และ hydroxyl ในการกำจัดสี Reactive Black 5 2.) ศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของมวลชีวภาพที่มีต่อการกำจัดสี Navy 106 จากนั้นทำการเปรียบเทียบการกำจัดสีและสารอินทรีย์ภายใต้สภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิก ผลการทดลองพบว่าหมู่ vinylsulfone ของสีย้อม Reactive Black 5 ทำให้สีย้อมถูกกำจัดได้ดีกว่ากลุ่ม hydrolyzed ในสภาพแอโรบิก ส่วนการดูดซับและการกำจัดสีแบบแอโรบิกของน้ำล้างสี Navy 106 นั้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของมวลชีวภาพมากขึ้น การยับยั้งการกำจัดสีจากน้ำล้างสีย้อมภายใต้สภาพแอโรบิกเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนสีต่อมวลชีวภาพสูง และในขณะที่เกิดการยับยั้งก็มีการปล่อยปริมาณ ไนเตรทและซัลเฟตออกมาลดลง ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) และ ค่าซีไอดีของสีย้อม hydrolyzed reactive Black 5 และน้ำล้างสี Navy 106 ลดลงภายใต้สภาวะแอโรบิก ส่วนสภาพแอนแอโรบิกนั้น การกำจัดสีเกิดขึ้นภายใน 1 วัน โดยสีของ hydrolyzed reactive Black 5 และน้ำล้างสี Navy 106 ซึ่งมีสีทึบมัวง ได้เปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง แสดงถึงการสลายตัวของสารประกอบอะโซ แต่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และค่าซีไอดีของสีทั้ง 2 ชนิดไม่ลดลง

Carliell และคณะ(1994) ศึกษาการลดสีรีแอกทีฟในสภาวะแอนแอโรบิกโดยเติม กลูโคสเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน ใช้สีเข้มข้น 100 มก/ล พบว่าสีรีแอกทีฟจะถูกกำจัดโดย กระบวนการรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีการเติมแหล่งคาร์บอนให้ระบบ และจะเกิดการลดสี หลังจากที่ไม่ตรงถูกกำจัดไปแล้ว เมื่อศึกษากระบวนการเมตาบอลิซึมของสี C.I. Reactive Red 141 จะพบสาร 4 ชนิด คือ 2-aminonaphthalene-1,5-disulphonic acid 1,7-diamino-8-naphtho-3,6-dissulphonic acid และ p-diamino-benzene และส่วนที่ 4 ที่ไม่สามารถชี้ชัดลงไป ได้แต่คาดว่าเป็น cyanuric acid จากผลนี้ชี้ให้เห็นว่าภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกพันธะอะซิโนโมเลกุลสีจะแตกออกทำให้สีลดลง และตามด้วยการแตกพันธะเอมีนระหว่างโครโมฟอร์และกลุ่มรีแอกทีฟและภายในกลุ่มรีแอกทีฟเอง

Nigam และ Marchant(1995) ศึกษาการลดสีในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยถัง ปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพแบบไหลขึ้นด้วยแบคทีเรียที่แยกเชื้อได้จากดินบริเวณที่ทางน้ำออกของโรงงานด้วยวัสดุตัวกลางที่แตกต่างกัน 9 ชนิด แล้วเปรียบเทียบอัตราการลดสี และเซลล์แบคทีเรียที่ปนออกมาในน้ำออก พบว่า foam, vermiculite และ nylon-web สามารถลดสีได้เร็วแต่ฟิล์มแบคทีเรียไม่สามารถใช้งานได้นานอย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ใช้ mineral kissiris , biofixation และกรวด เป็นตัวกลางจะไม่มีเซลล์ปนออกมาในน้ำออก

Nigam และคณะ(1996) ได้ศึกษานำกลุ่มแบคทีเรียและที่คัดแยกเชื้อมาลดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศทดลองกับสีย้อม 9 ชนิด แบคทีเรียที่แยกออกจากกลุ่มแบคทีเรียคือ Alcaligenes faecalis และ Commamonas acidovorans ซึ่งพบว่า กลุ่มจุลินทรีย์สามารถลดสีได้สูงกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์เดียว และการลดสีจะขึ้นกับสารอาหารที่เติมลงเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยถ้าไม่มีสารอาหารจะไม่เกิดการลดสี และเมื่อเทียบประสิทธิภาพการลดสีเมื่อเติมสารอาหารที่ต่างกันมีประสิทธิภาพคือ กลูโคส กลีเซอรอล แลคโตส แป้งมัน และโมลาส เป็น 82% , 71% , 71% , 52% และ 39% ตามลำดับ

Oxspring และคณะ(1996) ศึกษาการลดสีและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสีรีแอกทีฟด้วยถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น ด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มี Alcaligenes faecalis และ Commamonas acidovorans เป็นสายพันธุ์เด่น ทำการเลี้ยงเชื้อให้ยึดติดกับตัวกลางกรวดทดลองกับสี Remazol Black B ถังกรองนี้สามารถลดสีได้เกือบหมดภายในเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งการลดสีสามารถลดสีได้เร็วกว่าการลดสีในกลุ่มจุลินทรีย์ที่เลี้ยงในตัวกลางเหลว (Nigam และคณะ,

1996) จากการทดลองแสดงว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถเพิ่มความสามารถของกลุ่มจุลินทรีย์ในการลดสีได้

กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์(2539) ศึกษาถึงอิทธิพลของผงถ่านกัมมันต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยให้น้ำเสียจริงในการทดลองที่มีสีรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ซึ่งน้ำเสียมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 229-280 มก/ล มีค่าสีในช่วง 89-122 SU พบว่าผงถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ได้ดีขึ้น คือเมื่อเติมผงถ่านมากขึ้นทำให้สามารถกำจัดสีได้มากขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบสลัดจ์ที่เกิดในระบบแพคท์จะมีปริมาณมากกว่าสลัดจ์ที่เกิดในระบบเอเอสประมาณ 4.5 เท่า

จินตนา แป้นสุวรรณ(2539) ศึกษาการกำจัดสีจากโรงฟอกย้อมด้วยกระบวนการเอสบีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนออกซิก-แอนแอโรบิก/ออกซิก (A_2O -SBR) โดยมีการเติมแหล่งคาร์บอน 2 ชนิด คือน้ำตาลและกรดอะซิติก เมื่อศึกษาสีที่ต่างชนิดกัน คือ สีดิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีซัลเฟอร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเรียงจากมากไปน้อย สีดิสเพอร์สและสีซัลเฟอร์มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงในช่วงออกซิกเนื่องจากสีทั้งสองละลายน้ำได้ไม่ดีจึงถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดติดผิวของฟล็อกแบคทีเรีย ส่วนการกำจัดสีรีแอกทีฟจะมีประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงแอนนออกซิก-แอนแอโรบิกสูงอาจเนื่องจากสีรีแอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงจึงถูกดูดติดที่ผิวฟล็อกได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในช่วงแอนนออกซิก-แอนแอโรบิกที่ระยะเวลายาวนานจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบระบบเอสบีอาร์แบบธรรมดากับ A_2O -SBR ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ A_2O -SBR มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย การกำจัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนรูปที่เคเอ็น และฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียงกัน

โสภา ชินเวชกิจวานิชย์(2540) ศึกษาการลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบยูเอเอสบีพบว่า เมื่อมีการเติมแป้งมันเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่เติม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแป้งมันสูงมากขึ้นพบว่าไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการลดสีอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบโหนดสีที่มีผลต่อการลดสีสีดำมีการลดมากกว่าโหนดสีแดงและสีน้ำเงิน เมื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพในการลดสีไม่แตกต่างกัน แสดงว่า สารช่วยย้อมต่างๆ ไม่มีผลต่อกระบวนการลดสีโดยแบคทีเรียในถังสร้างมีเทน แต่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี

วรวิทย์ เหลืองดิลก(2541) ศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแลกทีฟต่อการลดสีโดยกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกโดยทำการทดลองบำบัดน้ำเสียรีแลกทีฟโทนสีน้ำเงินที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันด้วยระบบเอสบีอาร์ เดิมกลูโคสและกรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นสี 20 และ 100 มก/ล พบว่าการลดสีของแต่ละโครงสร้างมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันคือ โครงสร้างสีอะโซจะถูกลดสีโดยการแตกพันธะอะโซ สีโครงสร้างแอนทราควิโนนจะใช้กระบวนการดูดซับบนฟล็อก สีโครงสร้างออกซาซีนไม่สามารถสรุปกลไกได้เนื่องจากสมบัติทางเคมีที่แปลก และความสามารถในการลดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น

อำพล เตโชวานิชย์(2541) ศึกษาการกำจัดสีรีแลกทีฟด้วยระบบเอเอสกับระบบบีเอ็นอาร์เนื่องจากผลของระยะเวลาแอนแอโรบิกและความเข้มข้นของสีที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีคาร์บอนอินทรีย์และฟอสฟอรัส พบว่าปริมาณสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์, ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสเล็กน้อย ระบบเอเอสกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีไม่เท่าระบบบีเอ็นอาร์ ในระบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกกำจัดสีได้ดีกว่าระบบเอเอสธรรมดา โดยที่ช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้มากขึ้น ความเข้มข้นสีที่มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง และพบว่ากลุ่มแบคทีเรีย PAOs ไม่ใช่กลุ่มจุลินทรีย์หลักในการกำจัดสีในน้ำเสีย

โกมล เขียมเสมอ(2541) ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแลกทีฟโครงสร้างอะโซ ด้วยสารอาหารและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งสารอาหารที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดสีแตกต่างกัน โดยพบว่าการใช้นิวเทรียนบรอก+โซเดียมอะซิเตท จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้กลูโคสเป็นสารอาหาร และช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานจะมีประสิทธิภาพการลดสีสูงกว่าในขณะที่การกำจัดสารอินทรีย์ ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

วรญา ประทุมแก้ว(2543) ศึกษาการลดสีย้อมรีแลกทีฟโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยเติมน้ำตาลทรายเป็นสารอาหารปฐมภูมิ พบว่าที่เวลาเก็บกักแอนแอโรบิกที่สูง (18 ชั่วโมง) จะให้ประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด ในทางตรงกันข้ามเวลากักแอโรบิกที่มากกว่าจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นดีกว่า และประสิทธิภาพการกำจัดสีขึ้นกับอัตราส่วนของสีต่อน้ำตาลทราย ในหน่วย มก*ซีไอดี/ล โดยที่อัตราส่วน สี ต่อ น้ำตาลทราย เท่ากับ 1 ต่อ 30 จะให้ประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอสยู ถึง 74.29% ส่วนอัตราสารหมุนเวียนน้ำที่ต่างกันไม่พบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลดสี ซีไอดี และทีเคเอ็น

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธีทั้งทางด้าน กายภาพ,เคมี,ชีวภาพ แต่น้ำเสียที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์โดยมากใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เพราะง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย กระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะอาศัยสิ่งมีชีวิตพวกจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาทางชีวเคมี ซึ่งเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นมวลชีวภาพและผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.3.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอโรบิก

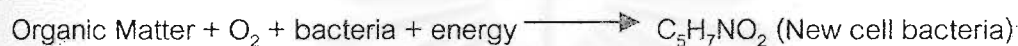
ในการบำบัดน้ำเสีย มีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้และรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นพร้อมๆกันในกระบวนการ เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันคือปฏิกิริยาที่มีการสูญเสียอิเล็กตรอน(e^-) การสูญเสียไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือการได้มาซึ่งออกซิเจน และในปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องมีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นควบคู่เสมอ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดตรงข้ามกับคือ มีการรับอิเล็กตรอน การรับไฮโดรเจนไอออน หรือการสูญเสียออกซิเจนด้วย ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสีย สารอินทรีย์ในน้ำ(ความสกปรกในน้ำ) มีหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน (electron donor) และแหล่งพลังงานในกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ ส่วนสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (terminal electron acceptor) จะเป็นสารใดก็ขึ้นกับภาวะของระบบ คือ ถ้ามีออกซิเจนอิสระ (O_2) การหายใจเป็นแบบแอโรบิก ตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย คือ ออกซิเจน(O_2) แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนอิสระ แต่มี ไนเตรท (NO_3) ก็เรียกว่าการหายใจแบบแอนน็อกซิก ซึ่งใช้ไนเตรท เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย แต่ถ้าไม่มีทั้งไนเตรทและออกซิเจนอิสระ จะเป็นการหายใจไร้อากาศ(แอนแอโรบิก) ซึ่งจะใช้ไบคาร์บอเนต หรือ ซัลเฟต เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายได้ นอกจากกระบวนการหายใจทั้ง 3 แบบข้างต้น ยังมีปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารอินทรีย์และให้พลังงานแก่จุลินทรีย์อีกแบบหนึ่ง คือการหมัก ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์แบบหนึ่ง โดยแตกต่างกับ 3 แบบแรกคือ เป็นภาวะที่ไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย แต่จุลินทรีย์จะออกซิไดซ์สารอินทรีย์เริ่มต้นบางส่วน จากนั้นสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์จะกลายเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในขั้นตอนของการรีดักชันที่ตามมา และกลายเป็นสารอินทรีย์ชนิดใหม่ กระบวนการหมักได้พลังงานจากสารอินทรีย์เพียงเล็กน้อย แต่ก็มีบทบาทสำคัญในการสร้างกรดของแบคทีเรียในกระบวนการแอนแอโรบิก

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอโรบิก ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญในกระบวนการคือ ออกซิเจนอิสระ ดังจะแสดงสมการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอโรบิกคือ

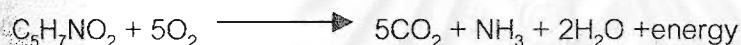
Organic Oxidation



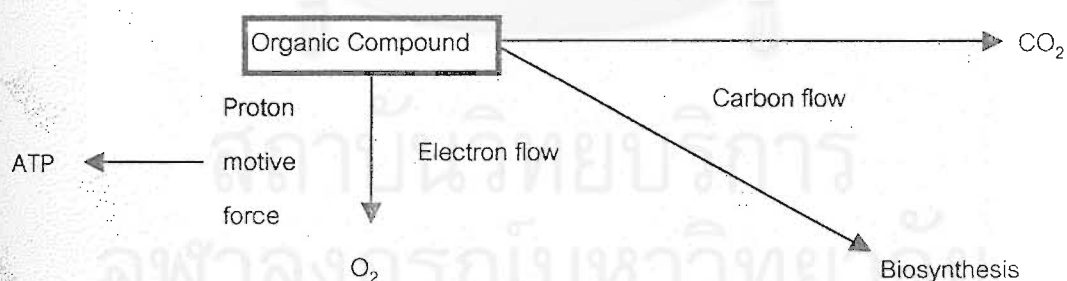
Cell Synthesis



Endogeneous respiration



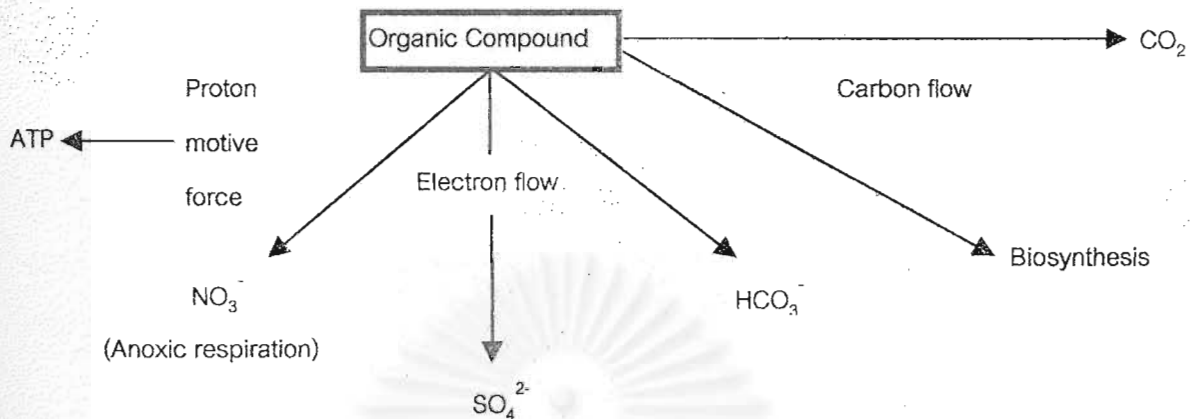
Aerobic respiration



รูปที่ 2.14 วิธีอิเล็กตรอนและคาร์บอนในกระบวนการหายใจแบบแอโรบิก

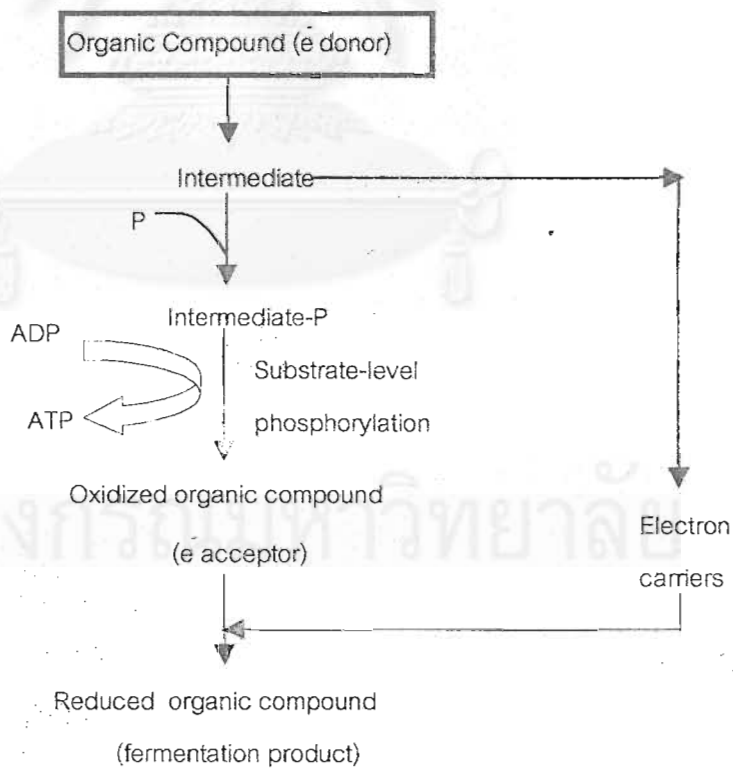
(Madigan และคณะ, 1997)

Anaerobic respiration



รูปที่ 2.15 วิธีอิเล็กตรอนและคาร์บอนในกระบวนการหายใจแบบแอนแอโรบิก (Madigan และคณะ, 1997)

Fermentation



รูปที่ 2.16 วิธีอิเล็กตรอนและคาร์บอนในกระบวนการหมัก (Madigan และคณะ, 1997)

2.3.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอนแอโรบิก

พื้นฐานการย่อยสลายด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก คือการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างหลากหลาย ขึ้นกับลักษณะน้ำเสียและชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ กระบวนการแอนแอโรบิกจะใช้จุลินทรีย์หลักคือ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวกับ กระบวนการไฮโดรไลซิส การหมัก และการหายใจ สมการอย่างง่ายของกระบวนการแอนแอโรบิก คือ



แต่ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอนแอโรบิก มีความสลับซับซ้อนมาก โดยประกอบด้วยกระบวนการอยู่ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

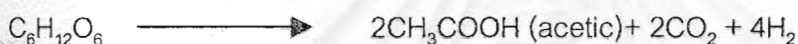
จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้ จะต้องมีการขนส่งสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ก่อน แล้วจึงเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นภายในเซลล์ แต่สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนมากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ และซับซ้อน ยากแก่การขนส่งเข้าสู่เซลล์ ดังนั้นจึงต้องผ่านขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีขนาดเล็กลงก่อน

ในน้ำเสียสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะอยู่ในรูปของ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งจะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยเอนไซม์ที่แบคทีเรียสร้างกรด(Acidogens) ผลิตขึ้นและปล่อยออกมานอกเซลล์ (Extracellular enzyme) โดยเอนไซม์ที่ออกมาจะลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ซึ่งเอนไซม์ที่ปล่อยต้องมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับสารอินทรีย์ที่จะย่อยด้วย เช่น คาร์โบไฮเดรตและไกลโคเจน ต้องใช้เอนไซม์อะไมเลส(amylase) ย่อยให้เป็นน้ำตาล , โปรตีนใช้เอนไซม์โปรตีเอส(protease) ย่อยให้เป็นกรดอะมิโน, ไขมันและไลปิดใช้เอนไซม์ไลเปส(lipase) และเอสเตอเรส ย่อยให้เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างช้า จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาของกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นกับ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ตั้งต้น พีเอช อุณหภูมิ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์

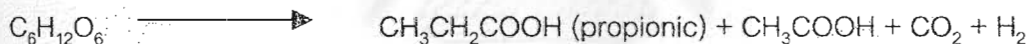
ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

ผลผลิตจากไฮโดรไลซิส ได้แก่ กรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมัน จะถูกจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด (Acidogenic Organisms) ดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) จะได้ผลผลิตคือ กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid, VFAs) เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทิริก และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ผลผลิตที่ได้จะเป็นชนิดใด หรือมีสัดส่วนเป็นเท่าใดขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น และประเภทของแบคทีเรียและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนในขณะนั้น ตัวอย่างเช่น

เมื่อความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ



เมื่อความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนสูง

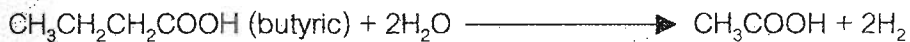
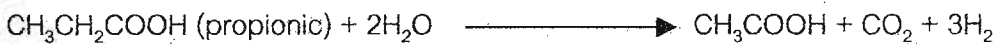


แต่กรดไขมันโมเลกุลยาว (Long chain fatty acid) จะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ และเมื่ออยู่ภายใต้ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนสูงจะถูกย่อยสลายเป็นกรดไพรูวอิก และกรดบิวทิริก

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยโมเลกุลสั้นสามารถเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนได้ แต่กรดไขมันที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดไพรูวอิก จุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ จึงอาศัยจุลินทรีย์อะซิโดเจเนซิส (acetogen) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สร้างไฮโดรเจนได้ ทำการย่อยกรดไขมันที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติกก่อนนำไปสร้างมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มนี้ เช่น พวก *Syntrobacter wolonii* และ *Syntrophomonas wolfei* จะเปลี่ยนกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้เป็น กรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะที่สำคัญสำหรับกระบวนการนี้คือ ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ เพราะความดันพาร์เชียล

ไฮโดรเจนสูง จะเกิดปฏิกิริยาตรงข้ามคือ กรดอะซิติก สามารถรวมตัวกับก๊าซไฮโดรเจนกลับไปเป็นกรดไพรูวอิก กรดบิวทิริก หรือเอทานอลได้ สมการแสดงกระบวนการอะซิโตเจนเนซิส ได้แก่



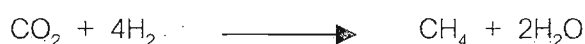
ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนเป็นชนิดไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Strictly Anaerobic Bacteria) Fenchel และ Finlay(1995) ได้แบ่งชนิดของสารอาหารของจุลินทรีย์ที่ใช้สร้างมีเทนได้ 3 กลุ่ม

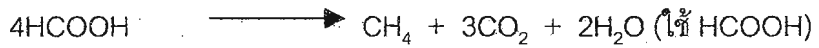
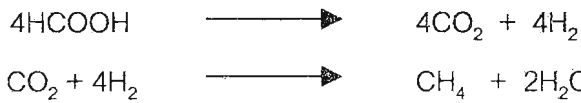
1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมถึง กรดฟอร์มิก (HCOOH) และ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) โดยมีก๊าซไฮโดรเจน(H_2) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน
2. สารประกอบที่มีกลุ่ม เมทิล ($-\text{CH}_3$) เป็นองค์ประกอบ และเป็นเพียงคาร์บอนอะตอมเดียวในโมเลกุล เช่น เมทานอล (CH_3OH) เมทิลลามีน (CH_3NH_3^+) เป็นต้น
3. กรดอะซิติก(CH_3COOH)

Gottschalk (1988) แบ่งจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนตามลักษณะการใช้สารอาหารดังนี้

1. Obligate chemotrophic methanogens คือกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในการสร้างมีเทน ซึ่งได้พลังงานจากการออกซิเดชันของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการดำรงชีวิตเป็นแบบออโตโทรฟิก(autotrophic) ดังนั้น ยิลด์ (Yield) จึงต่ำ และใช้ CO_2 เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย สมการการสร้างมีเทนคือ



ในบางครั้งสามารถใช้สารอาหารอื่นได้เช่น กรดฟอร์มิกและคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทั้งนี้ เพราะจุลินทรีย์ชนิดนี้ สามารถเปลี่ยนสารทั้ง 2 ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้ง่าย ตามสมการ

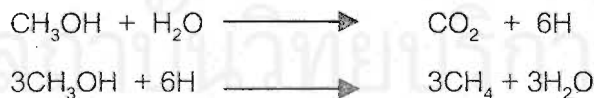


จุลินทรีย์ชนิดนี้ใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในการสร้างมีเทน จึงช่วยลดความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนให้ลดต่ำได้จึงอาจเรียกจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่า Hydrogenotrophic methanogens

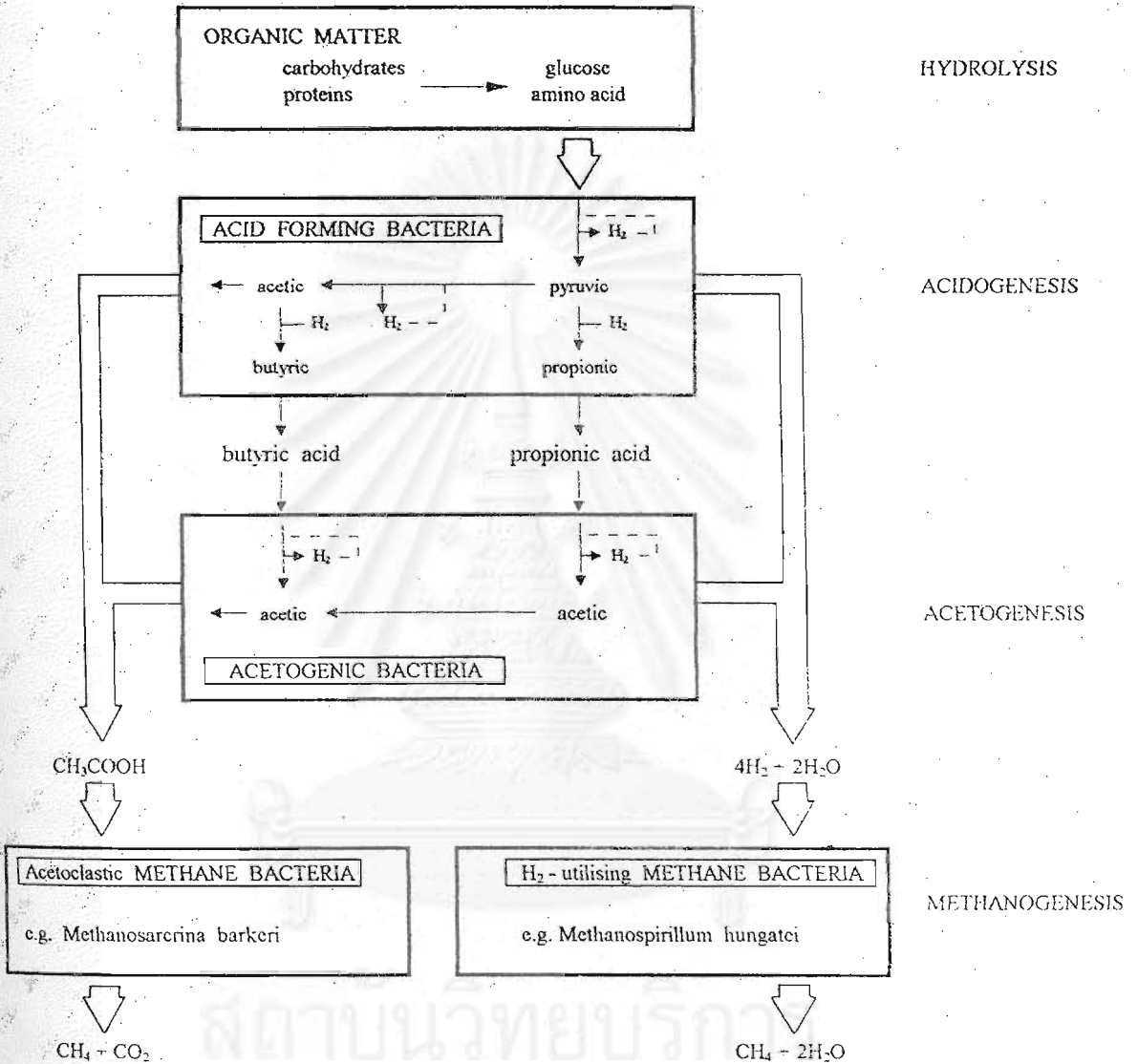
2. Methylotrophic methanogens คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนโดยใช้สารอาหารที่มีเมทิลเป็นองค์ประกอบ เช่น เมทานอล กรดอะซิติก เมทิลลามีน สำหรับการใช้อิกรดอะซิติก มีสมการคือ



ในขณะที่จุลินทรีย์พวก *Methanosarcina barkeri* ใช้สารอาหารพวก เมทานอล หรือเมทิลลามีน โดยจะเปลี่ยนสารอาหาร 1 ใน 4 ส่วนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ อีก 3 ส่วน จะเปลี่ยนเป็นมีเทน ตามสมการ



ไม่ว่ากลไกในการสร้างมีเทนเป็นเช่นไร สารอาหารหลักที่ใช้ผลิตยังคงเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอะซิติก



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้อากาศ (Mosey, 1982)

2.4 ฟอสฟอรัส (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ในน้ำเสียชุมชนนอกจากประกอบด้วยสารอินทรีย์แล้วยังมี ธาตุอาหารที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ธาตุอาหารทั้งสองจำเป็นในการดำรงชีวิตและการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปน้ำเสียชุมชนจะมีปริมาณธาตุอาหารดังกล่าวเพียงพอต่อการดำรงชีวิตแล้ว แต่ในกรณีถ้ามีปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการของจุลินทรีย์ ธาตุอาหารทั้งสองก็ถูกปล่อยสู่แหล่งรับน้ำ ซึ่งพืชน้ำสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ถ้าพืชน้ำเจริญเติบโตเร็วมากเนื่องจากธาตุทั้งสองจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Eutrophication เมื่อพืชน้ำตายลงก็ต้องใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายซากพืชน้ำดังกล่าว ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะขาดออกซิเจน ฉะนั้นจำเป็นต้องลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้ได้มากที่สุดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในการเติบโตของจุลินทรีย์เพราะต้องใช้ถ่ายเทพลังงานและใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของฟอสโฟลิปิด นิวคลีโอไทด์ และกรดนิวคลีอิก ในน้ำเสียฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของซากพืชซากสัตว์ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียมีแหล่งกำเนิดจากหลายที่ เช่น ฟอสเฟตที่เติมลงในน้ำประปาเพื่อป้องกันการตกตะกอนภายหลังของ CaCO_3 ฟอสฟอรัสทั้งหมดซึ่งรวมทั้งในรูปอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6 – 20 มก*ฟอสฟอรัส/ล แต่ในประเทศไทยมีค่าประมาณ 3-10 มก*ฟอสฟอรัส/ล ซึ่งได้จากการสลายตัวของโปรตีน การขับฟอสเฟตออกมากับปัสสาวะ นอกจากนี้ยังมาจากน้ำที่ใช้ในการซักฟอกหรือล้างขาม ซึ่งใช้ผงซักฟอก (ในรูปของฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต) จากปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตร(ในรูปของอโรฟอสเฟต) ซึ่งถูกชะล้างมาในน้ำฝน ฟอสเฟตที่พบในสัลดิจมีทั้งรูปของตะกอนอนินทรีย์ฟอสเฟตและรูปอินทรีย์ฟอสเฟต ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ไอน้ำจากหม้อต้มน้ำ ได้เติม complex phosphate ลงไป เพื่อไม่ให้เกิดตะกอนที่อาจทำให้หม้อน้ำระเบิดได้ แต่สารเหล่านี้ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงไปเป็นอโรฟอสเฟต

ปกติฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนอยู่ในรูปของอโรฟอสเฟตประมาณร้อยละ 50-70 ส่วนที่เหลืออยู่ในรูปโพลีฟอสเฟตและอินทรีย์ฟอสฟอรัส แต่เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้วฟอสฟอรัสถูกเปลี่ยนรูปเป็นอโรฟอสเฟตถึงร้อยละกว่า 90 (Meganck และ Faup, 1988 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.1 รูปแบบของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย สามารถแบ่งรูปของฟอสฟอรัสในน้ำได้ดังนี้

1. ออโรฟอสเฟต ที่พบมากได้แก่ Na_3PO_4 (Trisodium Phosphate) , Na_2HPO_4 (Disodium Phosphate) , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (Diammonium Phosphate) , Monosodium phosphate (NaH_2PO_4)
2. โพลีฟอสเฟต เช่น $\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$ (Sodium Hexametaphosphate) , $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ (Sodium Tripolyphosphate) สารพวกนี้เป็น Dehydrated phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลซิสในน้ำกลับไปเป็น Orthophosphate ตามเดิมซึ่งอัตราเร็วปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิและพีเอช และปฏิกิริยาจะเกิดในน้ำเสียได้เร็วกว่าน้ำบริสุทธิ์
3. อินทรีย์ฟอสฟอรัส เช่น Nucleic acid , Phospholipids , Sugar phosphate เป็นต้น

2.4.2 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียมี 2 แนวทางหลัก คือ 1.) วิธีทางเคมี 2.) วิธีทางชีวภาพ ซึ่งวิธีทางเคมีจะใช้สารเคมี พวกเกลือของโลหะเช่น Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) , Sodium aluminate (NaAlO_2) , Ferric chloride (FeCl_3) , Ferric sulfate ($\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_3$) , lime (CaOH_2) เพื่อให้จับออโรฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนทิ้งไปในรูปของ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็นต้น แต่ในปัจจุบันการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีข้อดีกว่าทางเคมีเพราะ

1. ปริมาณสลัดจ์จากระบบทางชีวภาพมีน้อยกว่า
2. การนำสลัดจ์ทางชีวภาพซึ่งสามารถย่อยสลายได้ไปใช้ทำปุ๋ย
3. น้ำเสียที่ถูกกำจัดฟอสฟอรัสก็มีสารอินทรีย์(แหล่งคาร์บอน+แหล่งพลังงาน) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการกำจัดทางชีวภาพอยู่แล้ว

หลักการสำคัญของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ คือ ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียโดยจุลินทรีย์นำฟอสฟอรัสไปสร้างเซลล์แล้วจึงนำมวลชีวภาพที่เกิดขึ้นไปทิ้งโดยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไป จะมีฟอสฟอรัสประมาณ 1.5-2.5% โดยน้ำหนักแห้ง

ซึ่งยังขึ้นกับอัตราส่วนของ ซีไอดีต่อฟอสฟอรัส ด้วย แต่ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสแบบเพิ่มพูนหรือเรียกว่า อีบีพีอาร์ (Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR) กระบวนการนี้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าระบบทั่วไป โดยมีฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพประมาณ 4-12 % โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในระบบคือ โพลีแบคทีเรีย (Poly-P Bacteria) ซึ่งมีชื่อเรียกหลายอย่างเช่น พีเอบี (Polyphosphate Accumulating Bacteria, PAB) หรือ พีเอโอ (Polyphosphate Accumulating Organisms, PAOs)

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการอีบีพีอาร์ มี 2 ช่วง คือ

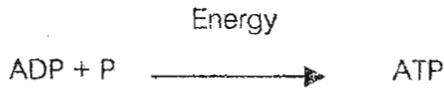
ขั้นที่ 1 ในสภาวะแอนแอโรบิก facultative organism (พวก Aeromonas) เกิดกระบวนการหมัก สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ให้เป็น VFAs และแบคทีเรียพวก Acinetobacter (Polyphosphate Accumulating Organisms) จะไฮโดรไลซ์โพลีฟอสเฟตซึ่งเก็บในรูป ATP ในเซลล์เพื่อให้ได้พลังงานสร้างเซลล์และการขนส่งสาร (Active Transport) และปล่อยออร์โธฟอสเฟตละลายน้ำออกมา พีเอโอจะให้พลังงานข้างต้นดึง VFAs เข้าเซลล์และเปลี่ยนเป็น PHA (Polyhydroxyalkanoates) เก็บไว้ในเซลล์ ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะลดลง แต่ออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น

สมการการสลายตัวของพันธะโพลีฟอสเฟตของเอทีพีในขั้นแอนแอโรบิก

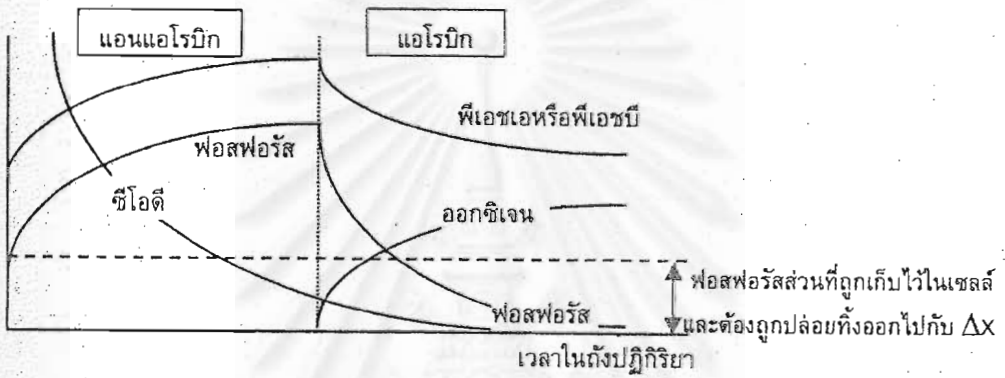
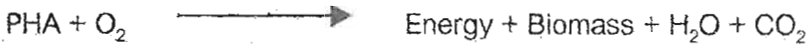


ขั้นที่ 2 ในสภาวะแอโรบิก แบคทีเรียมีความสามารถดูดกลืนฟอสฟอรัสเข้าไปในเซลล์มากกว่าความต้องการปกติ (Luxury Uptake) โดยแบคทีเรีย (พวก Pseudomonas) จะออกซิไดซ์ PHA ในเซลล์โดยใช้ออกซิเจนอิสระเป็นตัวรับอิเล็กตรอน การออกซิไดซ์ PHA จะได้พลังงานนำไปสร้างเซลล์และการขนส่งสารเพื่อดึงออร์โธฟอสเฟตดูดกลับเข้าเซลล์และเก็บอยู่ในรูปพันธะโพลีฟอสเฟต(ATP)เพื่อใช้เป็นพลังงานในการดำรงชีวิต สภาวะเช่นนี้ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำจะลดลง ฟอสฟอรัสจะถูกสะสมอยู่ภายในเซลล์และถูกกำจัดออกจากระบบพร้อมกับการทิ้งตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน (Excess Biomass) ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

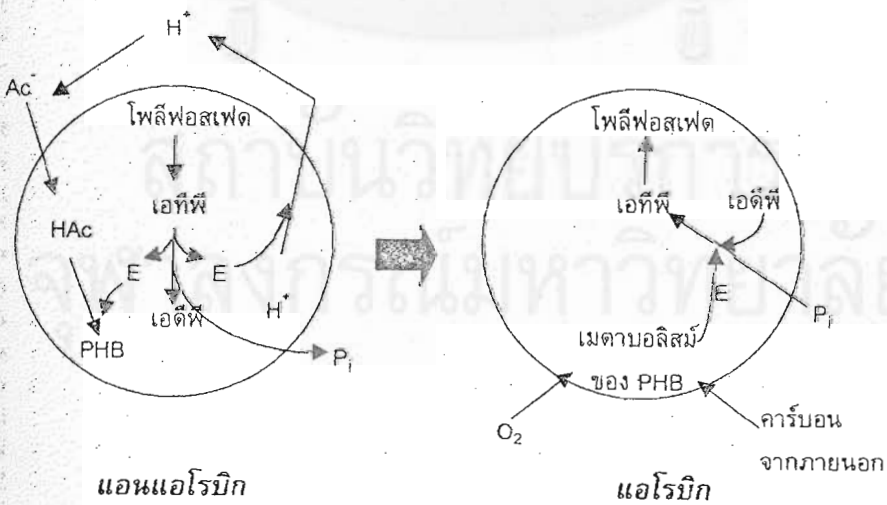
สมการแสดงการดึงออร์โธฟอสเฟตกลับเข้าไปสร้าง ATP ในขั้นแอโรบิก คือ



สมการแสดงการออกซิไดซ์ของพีเอชเอในขั้นตอนแอโรบิก คือ

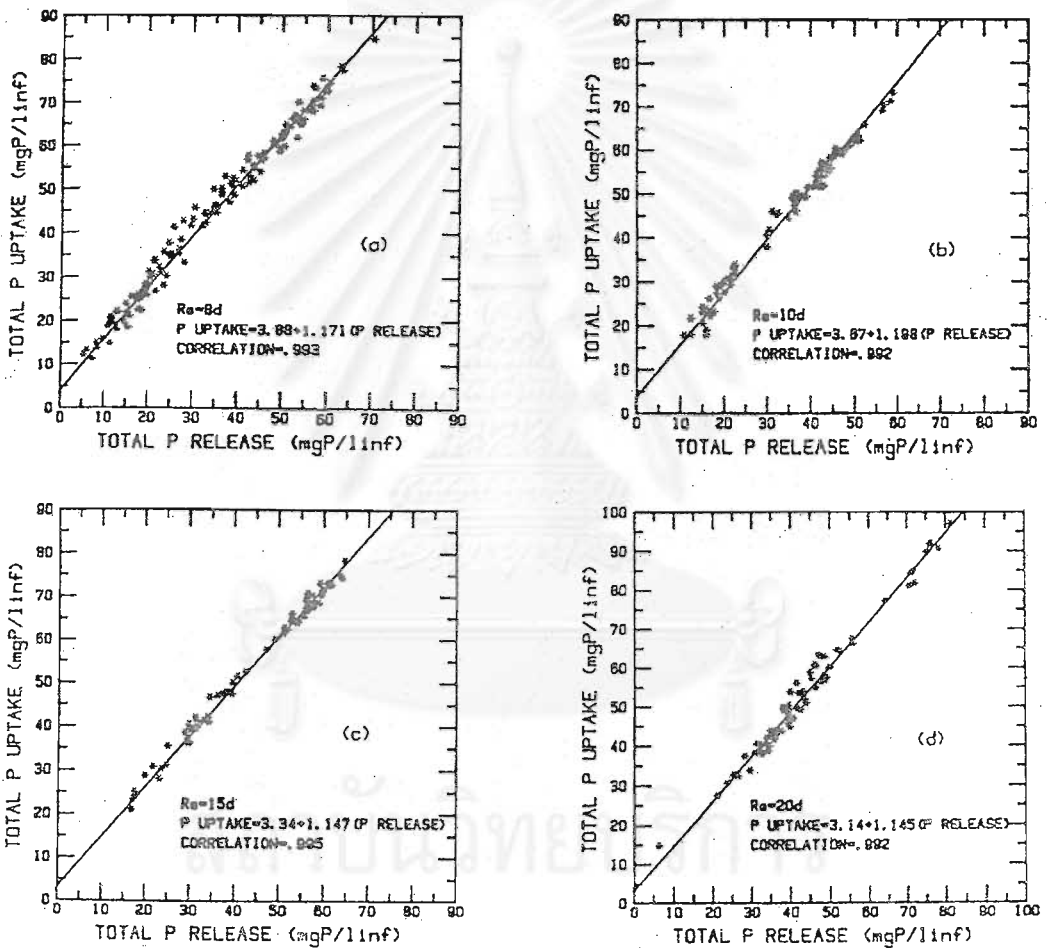


รูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



รูปที่ 2.19 แสดงแบบจำลองทางชีวเคมีของกระบวนการดักจับฟอสฟอรัส (ดัดแปลงจาก Comeau และคณะ, 1986)

จากรูปที่ 2.18 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกจับใช้ในภาวะแอโรบิกมีค่ามากกว่า ฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกมาในภาวะแอนแอโรบิก ผลลัพธ์สุทธิก็เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียซึ่งอัตราการจับใช้ฟอสเฟตในภาวะแอโรบิกขึ้นกับความเข้มข้นของพีเอชเอในมวลชีวภาพ โดยการย่อยสลายของพีเอชเอเป็นสมการอันดับหนึ่ง รวมทั้งมีสัดส่วนแปรผันตรงกับปริมาณฟอสเฟตในน้ำ ณ.ขณะนั้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.20

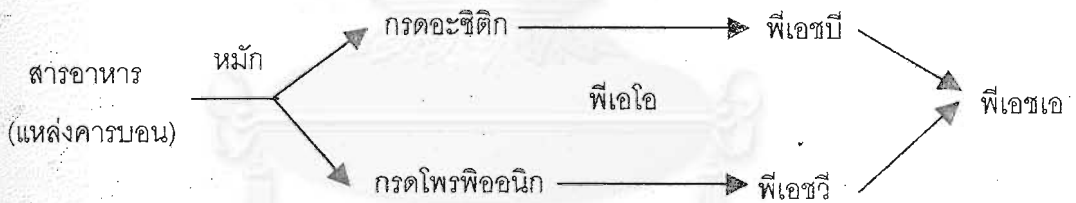


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกกับปริมาณฟอสฟอรัสที่จับใช้ ที่อายุสัลดจ์ ของระบบ ต่างๆ กัน a.) 8 วัน b.) 10 วัน c.) 15 วัน d.) 20 วัน

(Wentzel และคณะ, 1985)

2.4.3 ฟิเอซเอ

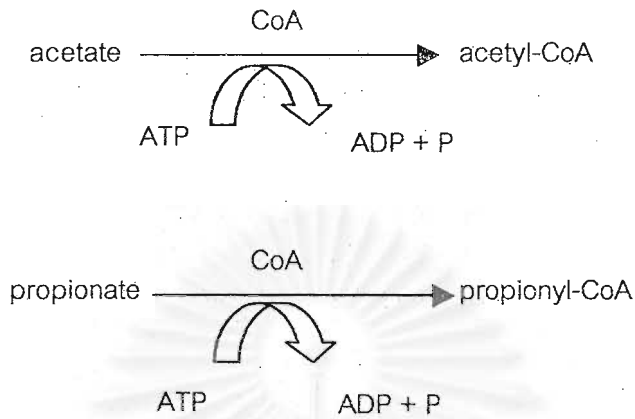
กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส ฟิเอโอต้องสามารถจับใช้สารอินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิกได้ และต้องนำคาร์บอนไปเก็บสะสมในเซลล์ในรูปของฟิเอซเอ(รูปสารรีดิวซ์) โดยใช้พลังงานที่ได้มาจากการไฮโดรไลซิสของโพลีฟอสเฟตจาก เอทีพีที่ปล่อยไว้ในเซลล์ ในตอนแรกระบบอีพีพีอาร์จะกล่าวถึงเพียง ฟิเอซบี ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่สะสมได้ในขั้นตอนแอนแอโรบิกและรู้ปริมาณคร่าวๆ จากเทคนิคการย้อมสีกับการสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์ (Buchnan, 1983) ต่อมา Comeau และคณะ(1986) ใช้การวิเคราะห์ระดับโมเลกุลพบว่าโพลีเมอร์ที่คล้ายกับฟิเอซบีนั้นมี 3-hydroxybutyrate (3HB) และ 3-hydroxyvalerate (3HV) เป็นหน่วยองค์ประกอบพื้นฐาน ต่อมา Satoh และคณะ(1992) ได้เพิ่มเติมว่าโพลีเมอร์ดังกล่าวน่าจะประกอบด้วย 4 หน่วยองค์ประกอบ ดูตาราง ที่ 2.2 Inoue และคณะ(1996) อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์(2544) ทดสอบและยืนยันว่าฟิเอซเอในสไลด์จ์(ที่มีฟิเอโอปริมาณมาก) เป็น โค-โพลีเมอร์ ที่ประกอบด้วย 4 หน่วยพื้นฐาน ปัจจุบันจึงเรียกโพลีเมอร์นี้รวมกันว่า ฟิเอซเอ แทนฟิเอซบีที่ใช้กันในตอนแรก ในกรณีที่ใช้ อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนอย่างเดียวในสภาวะแอนแอโรบิก 3HB จะเป็นองค์ประกอบหลักของการผลิตฟิเอซเอ ซึ่งในกรณีนี้ก็คือฟิเอซบี



รูปที่ 2.21 แสดงการสร้าง ฟิเอซเอในชั้นแอนแอโรบิก

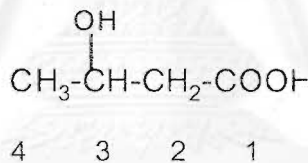
จากรูปที่ 2.21 ฟิเอโอจะเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็น ฟิเอซบี ถ้าวีเอโอเป็นกรดอะซิติกหรือเกลืออะซิเตท แต่จะผลิตฟิเอซวี ถ้าวีเอโอเป็นกรดไพรูวอิกหรือเกลือไพรูวอเนต ทั้งนี้ จะผลิตเป็นสัดส่วนเท่าใดก็ขึ้นกับปริมาณของวีเอโอข้างต้น

อะซิเตทและไพรูวอเนตเมื่อถูกจับใช้เข้าเซลล์จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นอะซิติล-โคเอ และไพรูวอนิล-โคเอ โดยใช้โคเอนไซม์เอ (coenzyme A หรือ CoA) ดังนี้



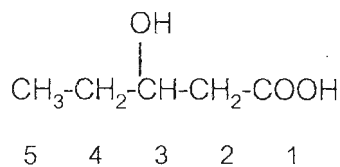
โดย บิวทีเรตมี คาร์บอน 4 อะตอม วาเลอเรตมี คาร์บอน 5 อะตอม

กรณีมีอะซิติล-โคเอ 2 ตัว รวมกัน จะได้เป็น : (กรดอะซิติลมีสูตรเป็น CH_3COOH)



ซึ่งมี คาร์บอน 4 อะตอมจึงเป็น บิวทีเรต และเมื่อ OH อยู่ตำแหน่งที่ 3 ของ C จึงเรียกว่า 3-hydroxybutyrate หรือ 3HB ถ้า HB หลายตัวต่อกันเป็นโพลีเมอร์ ก็เรียกว่า พีเอชบี หรือโพลีไฮดรอกซีบิวทีเรต

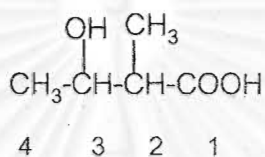
กรณีมีไพรูวอนิล-โคเอ 2 ตัว รวมกันจะได้เป็น: (กรดไพรูวอนิกมีสูตรเป็น $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-COOH}$)



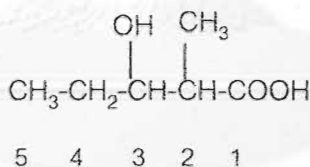
ซึ่งมี คาร์บอน 5 อะตอมที่สายหลัก จึงเป็นวาเลอเรต และเมื่อ OH อยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 ของ C จึงเรียกว่า 3-hydroxyvalerate หรือ 3HV ถ้า HV ต่อกันหลายตัวเป็นโพลีเมอร์ก็เรียกว่า พีเอชวี หรือ โพลีไฮดรอกซีวาเลอเรต

ถ้าอะซิติก-โคเอ กับ โพรพิออนิล-โคเอ รวมกันอย่างละ 1 ตัว จะได้ผลผลิต 2 รูปแบบ คือ

แบบที่ 1 เรียกว่า 3H2MB ถ้าต่อกันหลายตัวเป็นโพลีเมอร์เรียกว่า PHB



แบบที่ 2 เรียกว่า 3H2MV ถ้าต่อกันหลายตัวเป็นโพลีเมอร์เรียกว่า PHV



สรุป PHA = PHB+PHV

โดย PHA = Poly-β-hydroxyalkanoate

PHB = Poly-β-hydroxybutyrate

PHV = Poly-β-hydroxyvalerate

ตารางที่ 2.2 หน่วยพื้นฐานที่ใช้ผลิตฟิโอสในสลัดจ์อีบีพีอาร์ (Sato และคณะ, 1992)

	3-ไฮดรอกซี- บิวทีเรต (3HB)	3-ไฮดรอกซี- วาเลอเรต (3HV)	3-ไฮดรอกซี- 2-เมทิลบิวทีเรต (3H2MB)	3-ไฮดรอกซี- 2-เมทิลวาเลอเรต (3H2MV)
จำนวน คาร์บอน ที่สายหลัก	4	5	4	5
กรดอิสระ	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3\text{-CH-CH}_2\text{-COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{OH} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3\text{-CH-CH-COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{OH} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH-CH-COOH} \end{array}$
ในฟิโอส	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{(-O-CH-CH}_2\text{-CO-)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{(-O-CH-CH}_2\text{-CO-)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{(-O-CH-CH-CO-)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{(-O-CH-CH-CO-)} \end{array}$
สารเริ่มต้น	2 อะซิทิล-โคเอ	1 อะซิทิล-โคเอ 1 โพรไพโอนิล-โคเอ	1 อะซิทิล-โคเอ 1 โพรไพโอนิล-โคเอ	2 โพรไพโอนิล-โคเอ

2.4.4 กลุ่มจุลินทรีย์ฟิโอส

กลุ่มจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ จะถูกกำหนด โดยสภาวะแวดล้อมและวิธีการเดินระบบ เช่น ฟิโอส ดีโอ อุณหภูมิ สภาพแอนแอโรบิก สภาพแอโรบิก รวมถึงชนิดและองค์ประกอบของสารอาหาร(แหล่งคาร์บอน) ที่มีส่วนสำคัญต่อการคัดพันธุ์

กลุ่มจุลินทรีย์หลักของฟิโอสเมื่อก่อนเชื่อว่าเป็นจุลินทรีย์อะซิเนโทแบคเตอร์ (Acinetobacter) แต่ต่อมาเมื่อมีการนำเชื้อบริสุทธิ์ของ อะซิเนโทแบคเตอร์ มาทดลอง กลับไม่สามารถผลิตสลัดจ์อีบีพีอาร์ได้ (สลัดจ์ที่มีสัดส่วนของฟิโอสสูง) Cloete and Steyn(1987) อ้างถึงใน ธงชัย พรภณสวัสดิ์(2544) ได้ใช้เทคนิคการย้อมสีแอนติบอดีแบบเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์กับอะซิเนโทแบคเตอร์ พบว่าจำนวนอะซิเนโทแบคเตอร์ในสลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการอีบีพีอาร์มีอยู่เพียงไม่ถึงร้อยละ 10 ของแบคทีเรียทั้งหมด และไม่ควรเป็นตัวหลักที่ทำให้กลไกอีบีพีอาร์เกิดขึ้น

ในปัจจุบันพบว่ามียีสต์กลุ่มสายพันธุ์อื่นร่วมด้วย Bitton(1994) อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์(2544) สรุปว่ากลุ่มฟิเอโอเอน่าจะประกอบด้วย Acinetobacter Pseudomonas Aerobacter Monaxella E.Coli Krebsiella Enterobacter Mycabacterium และBeggiatoa แต่งานวิจัยอื่นก็พบสายพันธุ์ที่แตกต่างกันอีก เช่น Shoda และคณะ(1980) พบ Anthrobacter Nakamura และคณะ (1991) พบ Micrococcus Brodisch และ Joyner(1983) พบ Aerosomonas ในขณะที่ Wagner และคณะ(1994) กล่าวว่าพันธุ์เด่นของฟิเอโอเอน่าจะไม่ได้แน่นอน อย่างไรก็ตามแม้ไม่สามารถบ่งชี้อย่างเด่นชัดว่าจุลินทรีย์ใดเป็นกลุ่มเด่นในกระบวนการอิมปีฟิอาร์ ข้อมูลที่เกี่ยวกับความสามารถของจุลินทรีย์ที่สะสมโพลีฟอสเฟตหรือฟิเออเอไว้ในเซลล์ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ Liu (1995) ได้รวบรวมข้อมูลเหล่านี้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

จุลินทรีย์ในระบบอิมปีฟิอาร์ไม่ได้แตกต่างจากในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์เพียงแต่ถูกฝึกให้สามารถดึงหรือจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษ และจุลินทรีย์ต้องอยู่ในสภาพแอนแอโรบิกสลัดกับแอโรบิกได้ ดังนั้นกลุ่มจุลินทรีย์จะเป็นแอนแอโรบิกแท้ (Strictly Anaerobes) ไม่ได้ ต้องเป็นชนิด Facultative bacteria เท่านั้น

งานวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามคัดแยกเชื้อบริสุทธิ์หรือออกจากสลัดจ์อิมปีฟิอาร์ แต่เมื่อคัดแยกออกมาได้และนำมาทดลองต่อ กลับพบว่าไม่มีเชื้อใดที่แสดงพฤติกรรมทุกๆ อย่างของฟิเอโอเอน่า และหลายกรณีพบว่าเชื้อพวกนี้ไม่แสดงว่ามีการทำงานหรือเมตาบอลิซึม ของอะซิเตท เช่น การจับใช้อะซิเตท การเปลี่ยนเป็นฟิเออเอ การสะสมฟิเออเอในเซลล์ การไฮโดรไลซิสและการปล่อยฟอสฟอรัส ในขั้นตอนแอนแอโรบิกด้วยซ้ำ Nakamura และคณะ (1991,1995) อ้างโดย Mino และคณะ(1998) ได้คัดแยกฟิเอโอเอน่าสายพันธุ์หนึ่งที่ได้จากจากทดลองระบบอิมปีฟิอาร์ และให้ชื่อว่า Microlunatus phophovoorus สายพันธุ์ NM-1 ซึ่งสามารถสะสมฟอสฟอรัสเข้าเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกได้ และใช้ฟอสฟอรัสเป็นแหล่งพลังงาน สำหรับการจับใช้คาร์บอนในขั้นตอนแอนแอโรบิกที่ตามมาได้ ทั้งนี้ใช้กลูโคสและกรดคาซามิโน (casamino) เป็นแหล่งคาร์บอน แต่ถ้าใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนระบบกลับทำงานเป็นอิมปีฟิอาร์ไม่ได้ ต่อมา Ubukata และ Takii(1994) ก็ได้คัดแบบฟิเอโอเอน่าเป็นสายพันธุ์เดียวกับที่ Nakamura และคณะ ได้พบ และได้ทดลองพบว่าจุลินทรีย์นี้สามารถใช้โพลีฟอสเฟตได้ในสภาวะแอนแอโรบิกและสะสมฟอสเฟตได้ในสภาวะแอนแอโรบิก ก็ต่อเมื่อมีการสลัดการทำงานแบบแอนแอโรบิกและแอโรบิกไปมา ซึ่งพอสรุปได้ว่าระบบเอนไซม์สำหรับเมตาบอลิซึมของโพลีฟอสเฟตไม่ได้เป็นแบบที่เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบเซลล์อยู่ก่อนแล้ว แต่เป็นแบบที่ต้องซัก

ทำให้เกิดขึ้น เหมือนการฝึกให้จุลินทรีย์ปรับตัวเข้ากับสภาวะนั้นแล้วจึงมีความสามารถที่สะสม โพลีฟอสเฟต

พอสฟอรัสจะถูกเก็บสะสมในเซลล์ใน แกรนูลของโพลีฟอสเฟต เช่น แกรนูลโวลูทีน(volutin granule) ซึ่งสามารถตรวจพบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบเฟสคอนทราสต์ (Phase-Contrast) หรือใช้เครื่องเอ็นเอ็มอาร์ (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) สำหรับตรวจวัดแกรนูลของโพลีฟอสเฟตในจุลินทรีย์ที่พบในระบบบำบัดน้ำเสีย (Florentz และ Granger, 1983 ; Suresh และคณะ, 1985)

ตารางที่ 2.3 จุลินทรีย์บางชนิดที่มีปรากฏการณ์ของโพลีฟอสเฟตและพีเอชเอ (Dawes และ Senior, 1973 ; Anderson และ Dawes, 1990 ; อ้างโดย Liu, 1995)

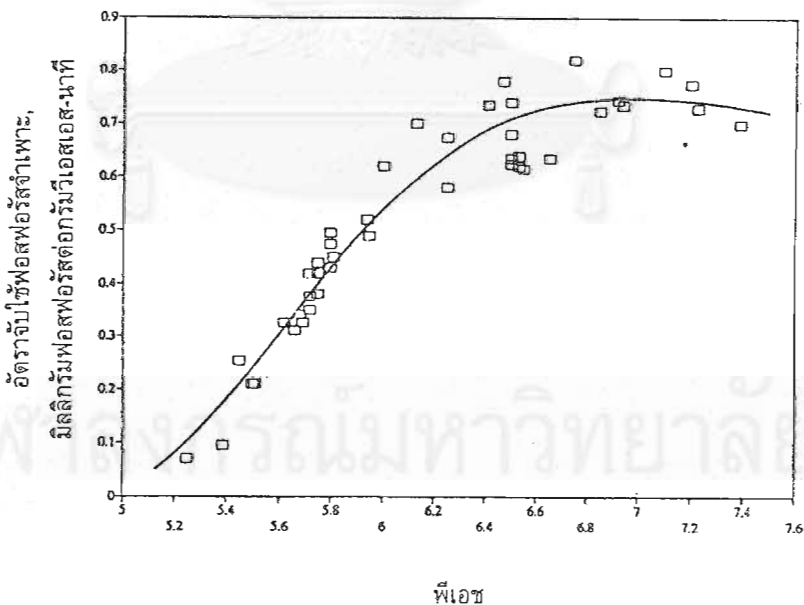
polyphosphate	polyhydroxyalkanoate
<i>Aerobacter aerogenes</i>	<i>Actinomycetes</i>
<i>Anabaena variabilis</i>	<i>Azotobacter</i>
<i>Azotobacter agilis</i>	<i>Bacillus</i>
<i>Azotobacter vinelandii</i>	<i>Beijerinckia</i>
<i>Chlorella spp</i>	<i>Chlorogloea</i>
<i>Corynebacterium zerosis</i>	<i>Chromatium</i>
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	<i>Chromobacterium</i>
<i>Chlorobium thiosulfatophilum</i>	<i>Derxia</i>
<i>Euglena gracilis</i>	<i>Ferrobacillus</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Hydrogenomonas</i>
<i>Hydrogenomonas eutropha</i>	<i>Hyphomicrobium</i>
<i>Micrococcus lysodeikticus</i>	<i>Lampropaedia</i>
<i>Mycobacterium chelonae</i>	<i>Micrococcus</i>
<i>Mycobacterium phlei</i>	<i>Nocardia</i>
<i>Mycobacterium smegmatis</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Mycobacterium thamnophaeos</i>	<i>Rhizobium</i>
<i>Myxococcus xanthus</i>	<i>Rhodopseudomonas</i>
<i>Nitrosomonas europaea</i>	<i>Rhodospirillum</i>
<i>Physarum polycephalum</i>	<i>Sphaerotilus</i>
<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>	<i>Spirillum</i>
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Salmonella minnesota</i>	<i>Tetrahymena</i>
<i>Streptococcus SL-1</i>	<i>Zoogloea</i>
	<i>Alcaligene eutrophus</i>
	<i>Halobacterium mediterranei</i>
	<i>Methylosinus trichosporium</i>

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ผลกระทบจากภายนอก ต่อการทำงานของกระบวนการอิมปีฟิอารซึ่งต้องอาศัย จุลินทรีย์พวกฟิเอโอในการกำจัดฟอสฟอรัสมีดังนี้

2.4.5.1 ฟิเอช

กลไกทางชีวเคมีพบว่าฟิเอโอต้องใช้พลังงานมากขึ้น ถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนอิออน(H^+)น้อยลง(ฟิเอชสูง) ในขั้นตอนแอนแอโรบิก เพราะต้องการพลังงานเพื่อไปรักษาดุลของไฮโดรเจนอิออนในกระบวนการและเพื่อดึงเอาวีเอฟเอเข้าเซลล์ ดังนั้นถ้าฟิเอชในถังปฏิกิริยาลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมจะลดลง กรณีถ้าน้ำเสียมีสภาพต่างต่ำและระบบมีอายุสลับคี่ที่สูงจนเกิดไนตริฟิเคชันมาก สภาพต่างก็จะถูกใช้มากจนฟิเอชลดลงเหลือต่ำกว่า 6.5 ซึ่งอาจทำให้ระบบอิมปีฟิอารล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องเติมต่างเพื่อให้ฟิเอชเหมาะสม อิทธิพลของฟิเอชจะมีผลกระทบต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิก ซึ่งฟิเอโอจะจับใช้ฟอสฟอรัสได้ดีที่สุดในฟิเอชช่วง 6.6-7.4 และลดลงอย่างรวดเร็วถ้าฟิเอชต่ำกว่า 6.2 และระบบอาจล้มเหลวได้ถ้าฟิเอชต่ำกว่า 5.4 ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงผลกระทบของฟิเอชต่ออัตราการจับใช้ฟอสเฟตจำเพาะ (Tracy and Flammino, 1985 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

Smolders และคณะ(1994) พบว่าในพีเอชช่วง 5.8-8.2 การจับใช้อะซิเตทที่ ความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสคงที่ ไม่แปรผันตามพีเอชนัก แต่พีเอชกลับมีผลต่อการปล่อย ฟอสฟอรัสมาก คือ ที่พีเอชสูงขึ้นการจับใช้อะซิเตทต้องใช้พลังงานมากขึ้น จึงมีการปล่อย ฟอสฟอรัสออกมามากขึ้นด้วย และเกี่ยวข้องกันคือที่ พีเอชสูง พีเอไอต้องมีดีฟอสเฟตเก็บไว้ใน เซลล์สูง มิฉะนั้น จะไม่มีฟอสเฟตมาปล่อยคายในชั้นแอนแอโรบิก รอบต่อไป ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมา กระบวนการอิมปีฟิอาร์สามารถทำงานที่พีเอชสูงได้ดีกว่าพีเอชต่ำ ยกเว้น พีเอชสูงเกินไปจนเกิด สภาพเป็นพิษ

2.4.5.2 อุณหภูมิ

ระบบอิมปีฟิอาร์สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เพราะที่อุณหภูมิต่ำการทำงานของ จุลินทรีย์ไม่ดี และจำเป็นต้องการพลังงานในการดำรงชีวิตมากกว่า จึงต้องดึงเอาพลังงานจาก โพลีฟอสเฟตมากขึ้น และมีการปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้น และถ้าพลังงานที่ผลิตได้มากขึ้นถูกนำไป ใช้ดึงวีเอพีเอเข้าเซลล์และนำไปสร้างพีเอชเอมากขึ้น ก็จะมีพลังงานสำรองเก็บไว้ในเซลล์ไปใช้ในการ ดึงฟอสเฟตเข้าเซลล์มาก ในชั้นตอนแอโรบิก ดังนั้นการกำจัดฟอสฟอรัสที่ อุณหภูมิต่ำ (ไม่ต่ำ เกินไป) จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยของ ปริยะดา เหล่ารุจิจินดา(2541) แสดง ประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้แบบจำลองแบบตซ์ แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ที่ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ และควบคุมอายุสัปดาห์ที่ 12 วัน ใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่า ซีโอดีต่อที่เค เอ็นต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 300 : 15 : 15 พบว่าระบบสามารถกำจัดได้ 100% 100% 100% 72% และ 61 % ที่อุณหภูมิ 5 15 25 35 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับและค่าพีเอชเอที่ผลิต ในสภาวะแอนแอโรบิก ก็จะมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำสุด คือเท่ากับ 165,140,111,58 และ 58 มก/ กรัมวีเอสเอส ตามลำดับ มีการปล่อยฟอสฟอรัสในชั้นแอนแอโรบิก ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส น้อยมาก และไม่มีการปล่อยเลยที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

2.4.5.3 ออกซิเจน

ถ้ามีออกซิเจนเข้ามาในถังแอนแอโรบิกพีเอไอจะใช้ ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (ไม่เกิดการหมักสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหย) เพราะการออกซิไดซ์ ด้วยออกซิเจนได้พลังงานมากกว่าการสลายตัวของโพลีฟอสเฟต หรือการหมัก เมื่อออกซิเจนถูก ไล่ไปจนหมด จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนที่จะเปลี่ยนเป็นวีเอพีเอน้อยลงและการสลายตัวของโพลี ฟอสเฟตก็ลดน้อยตาม การกำจัดฟอสฟอรัสแบบเพิ่มพูนลดลง (Panswad และคณะ, 1998 อ้าง

ถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) แต่ในถังแอโรบิก(กรณีเป็นอิมปีฟิอาร์) ต้องมีดีไอที่สูงพอ เพราะ
 1.) เพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ของพีเอชเอได้เต็มที่ ออกซิเจนจะต้องไม่เป็นตัวจำกัดในปฏิกิริยา
 (Oxygen limiting) 2.) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังแอโรบิกจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนชั้นที่ 2 ซึ่ง
 ต้องมีดีไอเพียงพอ มิฉะนั้นเกิดการปล่อยฟอสฟอรัสชั้นที่ 2 ได้ ทำให้น้ำทิ้งมีฟอสฟอรัสออกไป
 มาก

2.4.5.4 ไออาร์พี

ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดดีไอ(ออกซิเจนละลายน้ำ) ให้ต่ำและแม่นยำในระดับ
 0.1-0.2 มก/ล ได้ หรือ ศูนย์ในถังแอนแอโรบิก จึงต้องใช้พารามิเตอร์ ไออาร์พี มาเป็นตัวตัดสินว่า
 ระบบอยู่ในสภาวะแอนแอโรบิก, แอโรบิก หรือ แอนนอกซิก ค่าไออาร์พีสามารถนำไปควบคุม
 เครื่องเติมอากาศให้ทำงานได้เหมาะสมกับสภาวะนั้น โดยแอนแอโรบิก ควรค่าไออาร์พี -300 ถึง
 -200 มิลลิโวลท์ แอโรบิกมีค่า +50 ถึง +100 มิลลิโวลท์ และแอนนอกซิกมีค่า -150 ถึง -50 มิลลิ
 โวลท์

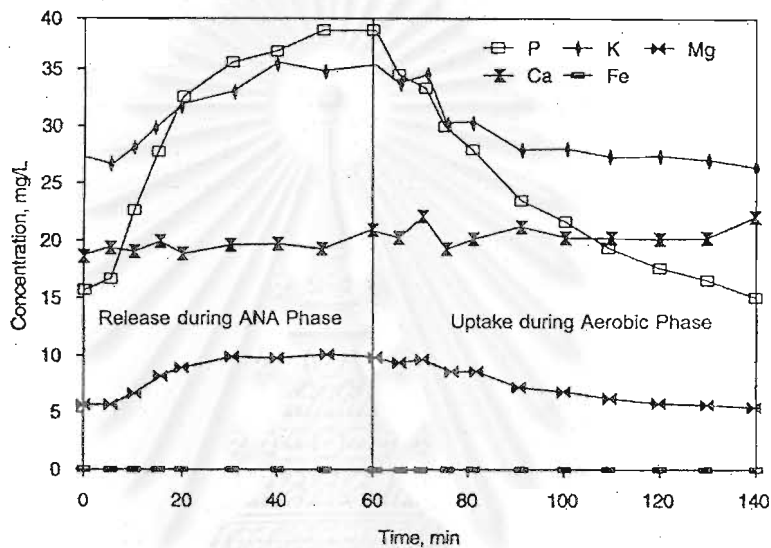
2.4.5.5 ไนเตรท

ไนเตรทมีผลเสียต่อกระบวนการอิมปีฟิอาร์ โดยเฉพาะในสภาวะแอนแอโรบิกเพราะ
 ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้เช่นเดียวกับออกซิเจน ไนเตรทจึงแย่งใช้สารอินทรีย์หรือวีโอเอฟเอ
 ในน้ำเสีย โดยผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากไนเตรท 1 โมลสามารถดึงกรดอะซิติก 1.26
 โมล HAc ไปใช้ จึงมีคาร์บอนเหลือน้อยให้พีเอไอใช้เก็บสะสมในรูปของพีเอชเอ พลังงานที่จะจับ
 ใช้ฟอสฟอรัสในชั้นแอโรบิกจึงลดลงตาม และกรณีที่มีไนเตรทมากไป ถึงแอนแอโรบิก อาจกลายเป็น
 ถึงแอนนอกซิกได้ ค่าไนเตรทและไนไตรต์ในชั้นแอนแอโรบิกไม่ควรเกิน 2.5 และ 0.1 มก*
 ไนโตรเจน/ล ตามลำดับ มิฉะนั้นการจับใช้สารอาหารจะลดลง (Cech และ Hartman, 1990 อ้าง
 โดย ปรียะดา เหล่ารุจิจินดา, 2541)

2.4.5.6 แคตอิออนที่จำเป็น

ในระบบอิมปีฟิอาร์ แคตอิออนเช่น แมกนีเซียมและโพแทสเซียมมีความจำเป็นใน
 การทำงานของพีเอไอ (Pattarkine, 1991 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) จากรูปที่ 2.23 จะ
 เห็นว่า โพรไฟล์ของแคลเซียมและเหล็กค่อนข้างคงที่ตลอดการทำงานทั้งแอนแอโรบิก และแอโรบิก

แสดงว่าจุลินทรีย์ไม่มีการปล่อยและจับใช้แคลเซียมและเหล็กในกระบวนการนี้ แคลเซียมและเหล็กจึงไม่ใช่ธาตุสำคัญ แต่ถ้าเทียบโพรไฟล์ฟอสฟอรัส กับแมกนีเซียมและโพแทสเซียม พบว่า จะมีการปล่อยและการจับใช้ที่สอดคล้องกันมาก แสดงว่าพีเอโอต้องการใช้โพแทสเซียมและแมกนีเซียมในกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสด้วย Sedlak และคณะ(1991) อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์(2544) แนะนำว่าอัตราส่วนของแคตไอออนต่อการปล่อยฟอสฟอรัสในรูปแบบลิควอร์เท่ากับ 0.28, 0.26 และ 0.09 สำหรับแมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียมตามลำดับ

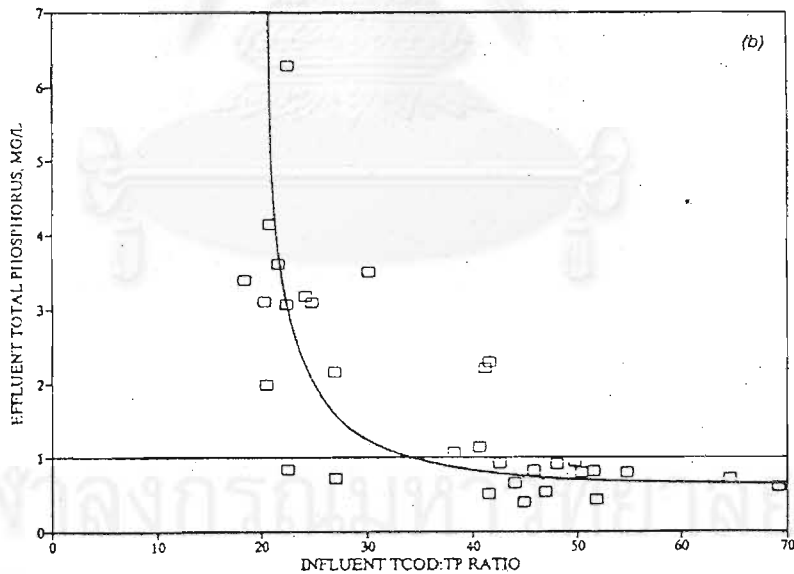


รูปที่ 2.23 แสดงโพรไฟล์ของการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสเทียบกับแคตไอออนบางชนิด (Pattarkine, 1991 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.5.7 ซีไอดี และ บีไอดี

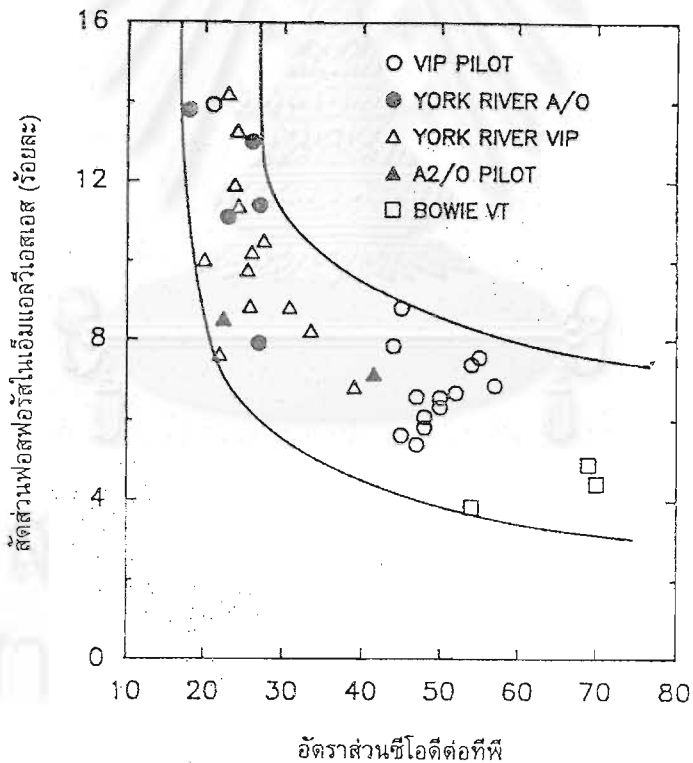
ในการกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก*ฟอสฟอรัส/ล พีเอโอต้องการสารอินทรีย์ในปริมาณที่แน่นอนจำนวนหนึ่ง หากสารอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณมากและช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานพอจนการปล่อยฟอสฟอรัสเกิดได้สมบูรณ์ การจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าเซลล์ในช่วงแอโรบิกก็ทำได้เร็วและมาก สมมติยิลด์ของพีเอโอเท่ากับ 0.4 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมกรดอะซิติก และพีเอโอมีฟอสฟอรัสในเซลล์เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 0.04 กรัมต่อกรัมกรดอะซิติกที่ใช้ไป (1 กรัมฟอสฟอรัสของกรดอะซิติก 25 กรัม) ซึ่งเทียบเป็นบีไอดีเท่ากับ 17 กรัม คือหากต้องการน้ำทิ้งให้มีฟอสฟอรัสต่ำมาก ต้องมีอัตราส่วนบีไอดีต่อฟอสฟอรัสมากกว่าหรือเท่ากับ 17 : 1 Wentzel(1985) รายงานว่า การกำจัดฟอสฟอรัส 1 กรัมจะใช้ กรดอะซิติกเพียง 8.9 กรัมเท่านั้น

ซึ่งแสดงว่ากลุ่ม พีเอไอของ Wentzel มีฟอสฟอรัสในเซลล์ถึงร้อยละ 28 ซึ่งก็มีความเป็นไปได้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างข้างต้น ดังนั้น สำหรับบีโอดีในน้ำเสียที่เท่ากันและเดินระบบที่อายุสัปดาห์เท่ากัน ซึ่งควรมีการผลิตเซลล์และมีการทิ้งสลัดจ์ต่อวันเท่ากัน ถ้าสามารถเลี้ยงพีเอไอให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์มากๆ กระบวนการอีบีพีอาร์ก็สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพิ่มขึ้น ส่วนมากการควบคุมระบบจะใช้ ค่าอัตราส่วนของซีโอดีต่อฟอสฟอรัส เพราะการวัดซีโอดีทำได้เร็วและถูกต้องกว่า ทั้งนี้ ค่าซีโอดียังมีค่าใกล้เคียงกับค่าบีโอดีสูงสุด (Ultimate BOD) อัตราส่วนของซีโอดีต่อฟอสฟอรัส ในกระบวนการอีบีพีอาร์ มีค่า 40-50 มก*ซีโอดีต่อมก*ฟอสฟอรัส ซึ่งค่าอัตราส่วนจะแตกต่างกันไป ตามอุณหภูมิ ลักษณะและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แต่อัตราส่วนข้างต้นก็เป็นค่าออกแบบ(เผื่อ)สำหรับให้น้ำทิ้งมีฟอสฟอรัสทั้งหมด ต่ำกว่า 1 มก/ล (Randall และคณะ, 1992 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนซีโอดีทั้งหมดต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดกับ ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำออกดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนต้องมีค่ามากกว่า 45 น้ำทิ้งจึงมีฟอสฟอรัสทั้งหมดต่ำกว่า 1 มก*ฟอสฟอรัส/ล



รูปที่ 2.24 ผลของอัตราส่วนซีโอดีทั้งหมดต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเข้าต่อคุณภาพน้ำออกในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด (Randall และคณะ, 1992 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ถ้าสัดส่วนของฟอสฟอรัสในเซลล์คงที่ แต่เพิ่มอัตราส่วนของ ซีโอดีต่อฟอสฟอรัส ก็จะทำให้สร้างเซลล์และนำสัลดิจ์ไปทิ้งต่อวันมากขึ้น เพราะเรามีสารอาหารให้พีเอไอเติบโตมากขึ้น น้ำทิ้งก็จะมีฟอสฟอรัสละลายลดลง แต่ถ้าสามารถเพิ่มได้ทั้งปริมาณอัตราส่วนของซีโอดีต่อฟอสฟอรัส และเลี้ยงให้พีเอไอมีสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์มากได้ การกำจัดฟอสฟอรัสจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังรูปที่ 2.25 แสดงผลการทดลองที่หาสัดส่วนของฟอสฟอรัสในสัลดิจ์ที่ทิ้ง ที่อัตราส่วนของซีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้งหมด ต่างๆกัน ซึ่งเห็นได้ ถ้าอัตราส่วนสูงขึ้นสัดส่วนของฟอสฟอรัสในเซลล์ลดลง ซึ่งมีความหมายคือ สัดส่วนของพีเอไอในสัลดิจ์ลดลงแต่มีเฮเทอโรทรอปชนิดอื่นมากขึ้น ดูเหมือนว่าระบบจะกำจัดฟอสฟอรัสลดลง แต่ถ้าพิจารณาอย่างละเอียดระบบก็มีการผลิตสัลดิจ์ที่ต้องระบายทิ้งมากขึ้น เพราะมีสารอาหารเข้ามามาก ก็ต้องมีปริมาณพีเอไอ(ไม่พิจารณาเรื่องสัดส่วนพีเอไอในสัลดิจ์) ในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น การกำจัดฟอสฟอรัสก็มากขึ้น



รูปที่ 2.25 ผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียเข้าสู่สัดส่วนของฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอส (Randall และคณะ, 1992 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ขอบเขตของอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสมี 2 กรณี โดย

กรณีที่ 1 ภาวะฟอสฟอรัสจำกัด (P limiting condition) หรือมีคาร์บอนเกินพอ (Excessive carbon) หมายถึงมีอัตราส่วน บีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 50-60 ฟอสฟอรัสมีไม่เพียงพอที่จะให้พลังงานมากๆ ที่พีเอไอใช้ดึงสารอินทรีย์เข้าเซลล์ได้ ดังนั้น ชั้นแอนแอโรบิกจะมี บีโอดีเหลือไปเข้าถังแอโรบิก การกำจัดฟอสฟอรัส จะไม่ใช้อีพีอาร์เพราะไม่มีการจับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ เพราะไม่มีฟอสฟอรัสหลงเหลือให้จับในชั้นแอโรบิกหรือแม้แต่ไม่มีพลังงานเพียงพอในการดึงฟอสฟอรัสเข้าไปในเซลล์ ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้สร้างเซลล์เป็นส่วนใหญ่

กรณีที่ 2 ภาวะสารคาร์บอนจำกัด (Carbon limiting condition) หรือมีฟอสฟอรัสเกินพอ (Excessive P) หมายถึงมีอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสต่ำๆ เช่น 5 : 1 จะมีฟอสฟอรัสให้พีเอไอ ใช้งานได้มาก พีเอไอจึงเติบโตดี จึงมีโพลีฟอสเฟตสะสมในเซลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้ในรูปของสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์หรือสแลตจ์ ถึงแม้สัดส่วนของพีเอไอในสแลตจ์สูง แต่น้ำทิ้งจะมีฟอสฟอรัสสูงอยู่ ดังรูปที่ 2.26 แสดงสัดส่วนของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง เมื่อใช้อัตราส่วนของบีโอดีกับฟอสฟอรัสที่ต่างกัน

Reddy(1991) ถ้าภาวะสารอินทรีย์ในน้ำเสีย(อัตราส่วนของบีโอดีต่อฟอสฟอรัส) มีค่าคงที่ รวมถึงการเดินระบบที่สภาวะเดียวกัน กระบวนการอีพีอาร์จะมีขีดความสามารถในการเก็บฟอสฟอรัสสูงสุดที่ ค่าคงที่หนึ่ง (มีนัยคือระบบควรมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งเฮเทอโรทรอปและพีเอไอ รวมทั้งค่าฟอสฟอรัสในเซลล์ที่คงที่ค่าหนึ่ง) จึงควรกำจัดฟอสฟอรัสได้ปริมาณค่อนข้างคงที่ ถ้ามีภาวะช็อกเช่น ระบบมีฟอสฟอรัสเข้ามามาก (อัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสลดลง) ถ้าเหตุการณ์แบบนี้เกิดอย่างต่อเนื่องจนเป็นเรื่องปกติแล้ว พีเอไอจะสามารถปรับตัวให้เข้ากับเหตุการณ์นี้ได้ โดยระยะแรกน้ำทิ้งจะมีฟอสฟอรัสออกไปมาก จนพีเอไอเพาะตัวให้มีปริมาณมากขึ้นแม้ปริมาณสแลตจ์(เวเอสเอส)จะคงที่ ก็ทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสก็จะมากขึ้น เมื่อถึงภาวะสมดุลประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสก็กลับเท่าเดิม (หมายเหตุภาวะช็อกจะต้องไม่เกินขอบเขตของอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัส เช่น เกิดการจำกัดโดยคาร์บอน)

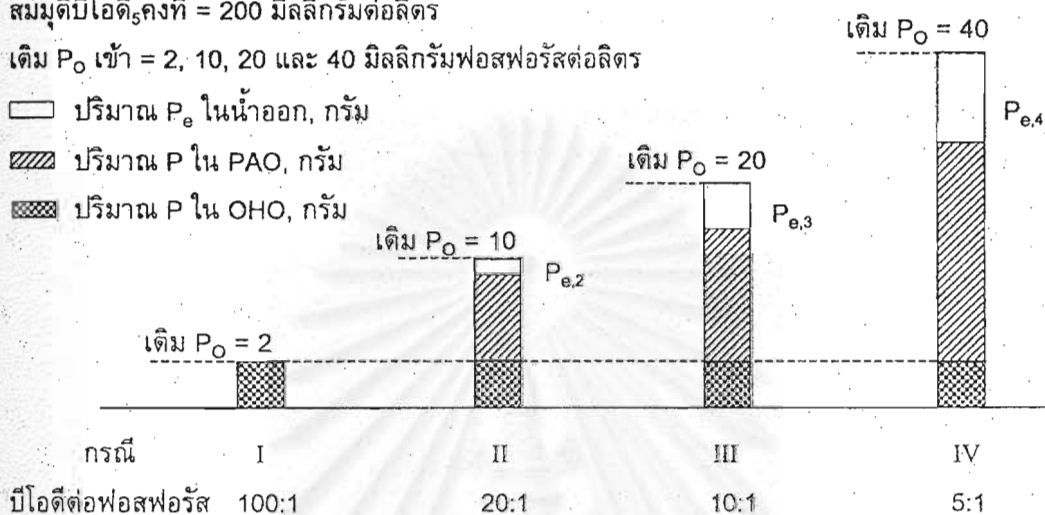
สมมติบีโอดี₅คงที่ = 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เติม P_0 เข้า = 2, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร

□ ปริมาณ P_e ในน้ำออก, กรัม

▨ ปริมาณ P ใน PAO, กรัม

▩ ปริมาณ P ใน OHO, กรัม



รูปที่ 2.26 สัดส่วนของฟอสฟอรัสในมวลของน้ำและมวลของจุลินทรีย์เมื่ออัตราส่วนคาร์บอนต่อฟอสฟอรัสต่างกัน (กรณีบีโอดีน้ำเข้าคงที่) (จงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.5.8 ชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ระบบอีพีอาร์ ฟิเอโอจะทำงานดีเมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่มีโมเลกุลไม่ยาวมาก เช่น กรดอะซิติก หรือกรดโพรพิอิก ไปจนถึงกรดวาเลอริก Abughararah และ Randall(1991) ทำการทดลองกับกรดไขมันระเหยง่ายหลายชนิดผลการศึกษาดังในตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดอะซิติกเป็นสารอาหารที่ดีที่สุดให้อีพีอาร์ และพบว่ากรดฟอร์มิกฟิเอโอไม่สามารถนำไปใช้ได้ เพราะมีคาร์บอนเพียงอะตอมเดียวไม่สามารถนำไปสร้างฟิเอโอได้

ตารางที่ 2.4 ผลของชนิดสารอาหารต่อการกำจัดฟอสฟอรัสในกระบวนการอึปี้ฟิอาร์

(Abu-ghararah และ Randall, 1991)

สารอาหาร	จำนวน คาร์บอน (อะตอม)	สูตร	มก.Pที่ถูกจับใช้/ลิตร*	มก.ซีไอดีที่ใช้ไป**
			มก.ซีไอดีที่ถูกใช้ไป/ลิตร**	มก.P ที่กำจัดได้
กรดฟอร์มิก	1	HCOOH	0	∞
กรดอะซิติก	2	CH ₃ COOH	0.37	16.8
กรดโพรไพโอนิก	3	C ₂ H ₅ COOH	0.10	24.4
กรดบิวทีริก	4	C ₃ H ₇ COOH	0.12	27.5
กรดไอโซบิวทีริก	4	C ₃ H ₇ COOH	0.14	29.1
กรดวาเลอริก	5	C ₄ H ₉ COOH	0.15	66.1
กรดไอโซวาเลอริก	5	C ₄ H ₉ COOH	0.24	18.8
น้ำเสียชุมชน	-	-	0.05	102***

* ฟอสฟอรัสทั้งหมดที่จับใช้ไปเฉพาะในขั้นตอนแอโรบิก

** คิดจากทั้งระบบฯ

*** น้ำเสียผ่านการเติมอากาศมาก่อน

หมายเหตุ: อายุสลัดจ์เท่ากับ 13 วัน ในทุกการทดลอง

Wentzel และคณะ(1985,1988) กล่าวว่าอัตราจริงของการใช้วีเอเฟและ การปล่อยฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิกเมื่อให้น้ำเสียชุมชนเป็นแหล่งอาหาร เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order reaction) เมื่อเทียบกับวีเอเฟที่ใช้ไป ดังนั้นประสิทธิภาพของอึปี้ฟิอาร์จึงขึ้นกับสัดส่วนของวีเอเฟในซีไอดี ซึ่งจะถูกรวมจากอัตราการเปลี่ยนรูปซีไอดีที่ย่อยสลายได้ไปเป็นวีเอเฟ ดังนั้นปฏิกิริยาการหมักหรือไฮโดรไลซิสของสารอินทรีย์ในขั้นตอนแอนแอโรบิกจึงมีบทบาทสำคัญต่ออึปี้ฟิอาร์ ในกรณีที่น้ำเสียมีอะซิเตทน้อย การเติมอะซิเตทเพิ่มเข้าไป ในขั้นตอนแอนแอโรบิก ทำให้เร่งอัตราการคายฟอสฟอรัสให้เร็วจนเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับอะซิเตทได้

2.4.5.9 สารพิษ

หากมีปริมาณไนตริกออกไซด์(NO) ในสถานะของเหลว 0.3 มิลลิโมลาร์แล้ว การจับใช้อะซิเตท การสร้างพีเอชเอ ถูกยับยั้งอย่างมาก (ที่กล่าวว่าไม่ควรมีไนเตรทในถังแอนแอโรบิก เพราะทำให้เกิดดีไนตริฟิเคชัน และได้ผลผลิตขั้นกลาง(intermediate)เป็น ก๊าซ NO ซึ่งก็สามารถละลายน้ำได้) ถ้านำสัลลัดจ์มาสกัดเอาเซลล์แล้วนำไปทดลองต่อ พบว่าเอนไซม์อะดีโนเลตไคเลส (ซึ่งจำเป็นในการผลิตเอทีพี) และเอนไซม์โพลีฟอสเฟตกลัยโคคีนเนส(จำเป็นในการสลายโพลีฟอสเฟต) จะถูกยับยั้งอย่างสิ้นเชิงถ้ามี NO สูงเพียง 0.15 มิลลิโมลาร์ หรือ 2.1 มก*ไนโตรเจน/ล (Van Niel และคณะ, 1998)

2.4.5.10 เวลาพักน้ำแอนแอโรบิก

เวลาพักแอนแอโรบิกจำเป็นต่อการจับใช้สารอาหารและการปล่อยฟอสฟอรัส ของพีเอโอ ถ้าเวลาพักน้อย การเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยจะผลิตไม่ทัน และการสะสมเข้าไปในเซลล์ทำได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะลดลงได้ แต่ถ้าเวลาพักที่นานเกินไป สารอินทรีย์จะถูกจับใช้หมดก่อน และอาจเกิดการปล่อยฟอสฟอรัสในลักษณะที่ Barnard (1984) เรียกว่า "การปล่อยฟอสฟอรัสขั้นที่ 2" ซึ่งไม่ช่วยให้การกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น เพราะไม่เกี่ยวกับการสะสมสารอินทรีย์เข้าไปในพีเอโอ อย่างไรก็ตามเวลาพักที่เหมาะสม ขึ้นกับพีเอชและปริมาณความเข้มข้นตลอดจนชนิดของวีเอฟเอที่เข้าไปในถังแอนแอโรบิก แต่โดยทั่วไปใช้เวลาพักประมาณ 1-2 ชั่วโมง โดยใน 2 ชั่วโมงแรกจะเกิดการหมักกรดขึ้นพร้อมกับกำรปล่อยฟอสฟอรัส

2.4.5.11 เวลาพักน้ำแอนโรบิก

เวลาพักแอนโรบิกต้องนานพอที่พีเอโอจะจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าเซลล์ได้เต็มที่ รวมทั้งต้องนานพอที่จะทำให้มีอายุสัลลัดจ์แอนโรบิกนานพอ ที่จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้สมบูรณ์ด้วย(ถ้าต้องการ) แต่ถ้าเวลาพักแอนโรบิกนานเกินไป อาจเกิดการปล่อยฟอสฟอรัสขั้นที่ 2 ได้ (Henze, 1999 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถกำหนดเวลาที่แน่นอนได้เพราะขึ้นกับปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเสีย

2.5 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) (ธีระ เกรอด, 2539)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิล์มชีวภาพ มีชื่อเรียกหลายอย่างเช่น Biofilm reactor Fixed film reactor หรือ Attached growth ซึ่งระบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ ระบบโปรยกรอง (Thickling filter) ระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) โดยจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเป็นแผ่นบางๆ คล้ายฟิล์มบนวัสดุตัวกลางที่เป็นของแข็ง(Media) เช่น หิน พลาสติก ดังเคราะห์ และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในของเหลวที่ไหลผ่านในระบบฟิล์มชีวภาพ สารอินทรีย์ในของเหลวต้องถ่ายเทเข้าไปในฟิล์มจุลินทรีย์ก่อนที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ได้ ทำให้การตอบสนองของระบบแตกต่างจากระบบบำบัดที่เลี้ยงจุลินทรีย์แบบกระจายตัวในน้ำเสีย (Suspended Growth) ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) เช่น ระบบ Activated Sludge (AS) ซึ่งจุลินทรีย์กระจายตัวสม่ำเสมอจนอาจสมมติว่าเกิดในวัฏภาค (Phase) เดียวด้วยความความต้านทานการถ่ายเทมวลที่น้อยมาก (ประมาณได้ว่าความเข้มข้นของสารอาหารที่อยู่รอบ ๆ จุลินทรีย์เท่ากับในเนื้อของเหลว) แต่ในระบบฟิล์มชีวภาพต้องมีการถ่ายเทสารอินทรีย์จากวัฏภาคของเหลวเข้าสู่ฟิล์มชีวภาพ ทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารรอบ ๆ จุลินทรีย์ต่ำกว่าความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลว

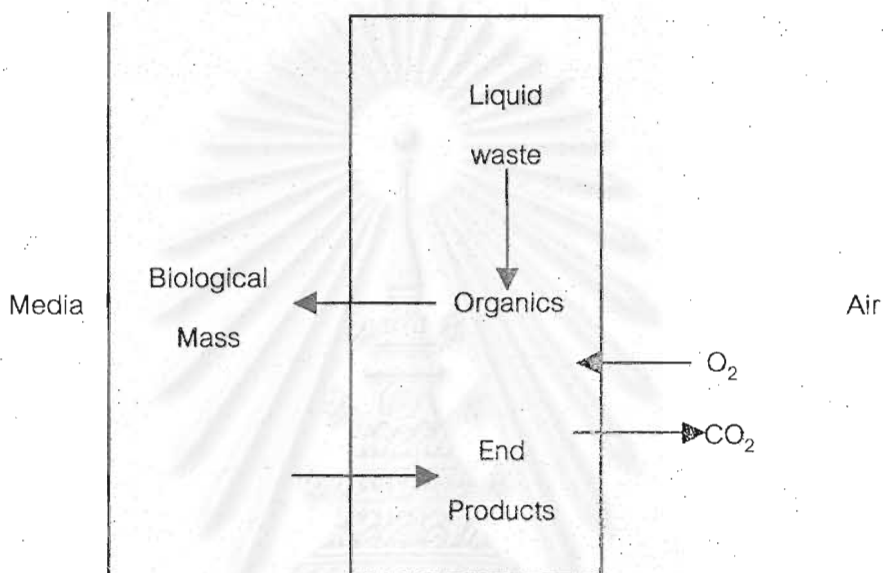
เมื่อฟิล์มชีวภาพเจริญเต็มโตหนาขึ้นมาก ๆ ฟิล์มชีวภาพจะหลุดออกเนื่องจากสาเหตุ 3 ประการ

1. สารอินทรีย์ไม่สามารถผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปถึงผิวด้านในสุดได้ ดังนั้น จุลินทรีย์จึงขาดสารอาหารและตายจนหลุดออกมา
2. ออกซิเจนละลายน้ำไม่สามารถถ่ายเทไปถึงฟิล์มชั้นในสุดได้ จึงเกิดสภาวะแอนแอโรบิก เกิดการย่อยไร้อากาศทำให้เกิดแก๊สมีเทน ซึ่งดันฟิล์มให้หลุดออกมา
3. ฟิล์มที่หนามากจะมีน้ำหนักมากและประกออบกับแรงเฉือนที่เกิดในทิศเดียวกับการไหลของน้ำเสีย(กรณีน้ำเสียไหลลง)ทำให้ฟิล์มหลุดลอกออกมา

ฟิล์มชีวภาพที่หลุดปะปนกับน้ำทิ้งนี้ เรียกว่า Humus Sludge องค์ประกอบของจุลินทรีย์ที่เกาะกับตัวกลางนี้มีความหลากหลายเหมือนระบบ Activated Sludge คือมีทั้งพวกไปคาริโอต ยูคาริโอต และยังพบสิ่งมีชีวิตชั้นสูงกว่าเช่น Nematode Amelida ตัวอ่อนของแมลงบางชนิด Saprophyte แบคทีเรีย โปรโตซัว (มาสติโกพอร่า, ซิลิเอต) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในระบบฟิล์มชีวภาพมีห่วงโซ่อาหารที่ค่อนข้างสมบูรณ์ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก และเกิดมวลชีวภาพใหม่ (Biomass) น้อย

2.5.1 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์และการถ่ายเทมวล

การดำเนินการของฟิล์มชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มีทั้งการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) และปฏิกิริยาชีวเคมี เกิดขึ้นพร้อมกันระหว่างชั้นฟิล์มชีวภาพกับของเหลวโดยรอบ (Liquid Bulk) ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในฟิล์มชีวภาพ (Metcalf and Eddy, 1991)

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาชีวเคมี

ขั้นที่ 1 เกิดการถ่ายเทมวลของสารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำจากน้ำเสียเข้าสู่ช่วงต่อระหว่างของเหลวกับฟิล์มชีวภาพ

ขั้นที่ 2 สารอินทรีย์และออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าสู่ฟิล์มชีวภาพ

ขั้นที่ 3 เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนโดยใช้จุลินทรีย์

ขั้นที่ 4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย (น้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์) ถ่ายเทจากฟิล์มชีวภาพออกสู่ช่วงรอยต่อระหว่างของเหลวกับฟิล์มชีวภาพ

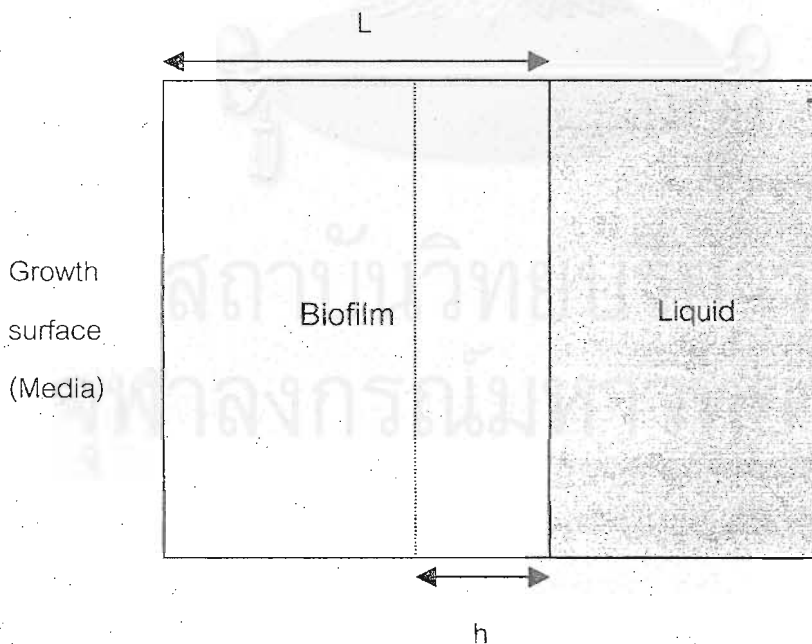
ขั้นที่ 5 เกิดการถ่ายเทน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ จากช่วงรอยต่อระหว่างของเหลวกับฟิล์มชีวภาพ ออกสู่ของเหลวด้านนอก

2.5.2 ความหนาแน่นของจุลินทรีย์

ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วน้ำเสียที่ไหลผ่าน อุณหภูมิ สารพิษ อัตราการรับสารอินทรีย์ Green และคณะ(1981) อ้างถึงในวรรณยา ประทุมแก้ว(2543) รายงานว่าเมื่อความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านฟิล์มชีวภาพมีความเร็วสูงขึ้นและอัตรารับสารอินทรีย์สูงขึ้น จะทำให้ฟิล์มชีวภาพมีความหนาแน่นของจุลินทรีย์สูงขึ้น และถ้าอุณหภูมิมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นจะมากขึ้นตามอุณหภูมิ Characklis(1981) รายงานว่าจำนวนจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ มีจำนวนมากถึง $10^4 - 10^8$ ตัวต่อ 1 มิลลิเมตรของฟิล์มชีวภาพ

2.5.3 ลักษณะของฟิล์มชีวภาพ

Konegay และ Andrews(1970) แสดงแบบจำลองลักษณะฟิล์มชีวภาพว่า การกำจัดสารอินทรีย์อาศัยความหนาแน่นของชั้นฟิล์มบางส่วนเท่านั้น คือ ความหนาแน่นของฟิล์มที่สัมผัสกับน้ำเสียจนลึกลงไปในชั้นฟิล์มเท่ากับ h ซึ่งชั้นดังกล่าวปฏิบัติการการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นแบบใช้ออกซิเจน ส่วนชั้นที่อยู่ลึกลงไปเป็นสภาพแอนแอโรบิก ซึ่งความหนา h เรียกว่า ความหนาประสิทธิผล (Effective depth) แสดงในรูปที่ 2.28



โดย h = Effective Depth และ L = Total Depth of biofilm

รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของฟิล์มชีวภาพ (Konegay และ Andrews, 1970)

2.5.4 วัสดุตัวกลาง (Media)

ตัวกลางมีหน้าที่ให้จุลินทรีย์เกาะติดและสร้างฟิล์มชีวภาพเคลือบไว้ ตัวกลางมีหลายชนิดเช่น หิน กรวด พลาสติกแบบโมดูล ในอดีตใช้ตัวกลางหินซึ่งมีช่องว่างและพื้นที่ผิวต่ำที่สำคัญมีน้ำหนักมากทำให้ไม่สามารถสร้างถึงปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ได้ และยังเกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย แต่ปัจจุบันมีการนำวัสดุสังเคราะห์และพลาสติกมาใช้ มีข้อดีคือ เบา ทนทาน อีกทั้งมีช่องว่างและพื้นที่ผิวมาก Pearson(1965) และ Chipperfield(1967) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของตัวกลางแบบอุดมคติดังนี้

1. มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพ
2. ยอมให้ของเหลวไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอ เป็นแผ่นบาง ๆ บนฟิล์มชีวภาพ
3. มีช่องว่างเพียงพอสำหรับการไหลอย่างอิสระของอากาศ
4. มีช่องว่างเพียงพอให้จุลินทรีย์ที่ลอกตัวออกจากฟิล์มถูกนำออกไปสะดวก
5. มีความแข็งแรง ทนตัวอยู่ได้
6. ราคาถูก
7. ต้องเป็นสารเฉื่อยทางชีวภาพไม่มีการย่อยสลายทางชีวภาพหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2.5.5 ข้อดีและข้อเสียของระบบฟิล์มชีวภาพ

ข้อดี

1. ง่ายในการเดินระบบและการดำเนินการ จึงเหมาะกับสถานที่ห่างไกล
2. เนื่องจากมวลจุลินทรีย์มีมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดมาก และยังทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำเสียเข้า เช่น อัตราการไหล, ความเข้มข้นของสารอินทรีย์
3. ความสามารถในการรับสารพิษได้ เพราะ ฟิล์มจุลินทรีย์ส่วนบนที่รับสารพิษจนตายหลุดออกไปแต่ยังมีฟิล์มส่วนล่างที่ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไปได้
4. ธรรมชาติของฟิล์มจุลินทรีย์มีความหนาแน่นสูงเมื่อหลุดลอกปะปนกับน้ำทิ้งก็สามารถแยกตกตะกอนได้ง่าย ต่างจากการเลี้ยงแบบแขวนลอย(กระจายตัว) ซึ่งจะมีปัญหาเรื่องตะกอนลอย (Sludge Bulking)

ข้อเสีย

1. การที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่บนตัวกลาง จึงไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงมวลจุลินทรีย์ได้ตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป จึงไม่มีวิธีที่จะควบคุมประสิทธิภาพการบำบัดและคุณภาพน้ำทิ้งได้ จึงต้องออกแบบเผื่อไว้มาก (over design) สำหรับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความเข้มข้นสารอินทรีย์ อัตราการไหล และอุณหภูมิ
2. มีปัญหาเรื่องการอุดตันภายในตัวกลางโดยเฉพาะบริเวณทางน้ำเข้าซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเร็วจนชั้นฟิล์มหนาเกิดการอุดตัน และการกระจายความหนาของฟิล์มยังไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณทางน้ำเข้าจะมีฟิล์มหนา (ส่วนบนของถังปฏิกรณ์) และฟิล์มจะบางในชั้นตัวกลางล่าง ๆ (กรณีน้ำเสียไหลเข้าด้านบนถังปฏิกรณ์)
3. ในฤดูร้อนระบบไปรยกรองชีวภาพจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงวัน

2.5.6 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการฟิล์มชีวภาพ (Biofilm)

Huag และ McCarty(1972) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในระบบ submerged filter และพบว่าระยะเวลาเก็บกักมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในระบบ โดยระยะเวลาเก็บกักที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นกับปริมาณจุลินทรีย์จะเกิดมากที่บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามความสูงของตัวกลาง

Lida และ Teranishi(1984) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำทิ้งชุมชนโดยใช้ระบบตัวกลางจมน้ำแบบชั้นตอนเดียว (Single submerged filter) โดยศึกษาทั้งแบบไม่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้งกับแบบมีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง โดยมีลักษณะการเติมอากาศเป็นแบบสลับคือเติมอากาศ 2 ชั่วโมง สลับการหยุดเติมอากาศ 2 ชั่วโมง ตลอด 24 ชั่วโมง สภาวะที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้งจะมีประสิทธิภาพในการลดค่า ไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 40.5-65.0% ส่วนในสภาวะที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและบีโอดีให้สูงขึ้น และสามารถลดไนโตรเจนทั้งหมดได้ 79.2 %

Simon และ Peter(1991) ศึกษาการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการเติมอากาศในวัฏจักรซึ่งประกอบด้วย แอนแอโรบิกและแอโรบิกโดยกำหนดระยะเวลาของ แอนแอโรบิกเท่ากับ 25,45,63 % ของเวลาใน 1 วัฏจักร พบว่า การกำจัด ซีโอดีมีค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วนของ แอนแอโรบิกเท่ากับ 25 % ในวัฏจักร 8 ชั่วโมง และมีการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดที่อัตราส่วนของ แอนแอโรบิกเท่ากับ 63 % ในวัฏจักร 32 ชั่วโมง

นุกูล อินทระสังขา(2530) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดอินทรีย์สาร และศักยภาพในการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยระบบ fixed bed aeration พบว่า ตัวกลางแผ่นตาข่ายบรจุท่อ PVC มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีมากที่สุดเท่ากับ 93.6 %

ปัญญาวัฒน์ โฉลานนท์(2537) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ aerobic packed bed ของการบำบัดน้ำเสียจาก โรงอาหารโดยมีปริมาณ COD อยู่ในช่วง 800-3500 มก/ล พบว่า การทดลองที่ระยะเวลาเติมอากาศ 4 ชั่วโมงและมีค่าภาระชีวศาสตร์เท่ากับ 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน สามารถลดปริมาณ บีโอดี และ ซีโอดีได้เท่ากับ 98.7 และ 93.7 % ตามลำดับ

2.6 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเอสบีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) นับว่าเป็นระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ประเภทหนึ่ง แต่มีการดำเนินการระบบที่ต่างออกไป คือ มีการทำงานแบบแบตช์ (แบบเติมเข้าและถ่ายออก) ซึ่งในระบบจะมีทั้งถังเติมอากาศ และถังตกตะกอนเป็นถังเดียวกัน ในขณะที่ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์แบบอื่น ๆ จะมีการทำงานแยกถังกัน

ระบบเอสบีอาร์จะมีการเติมอากาศเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นระบบเอสบีอาร์ไปอาจเป็นระบบเอสบีอาร์ได้ถ้าสามารถควบคุมเครื่องเติมอากาศให้หยุดเติมอากาศและทำงานแบบแบตช์ได้(มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2525) กระบวนการเติมเข้าและถ่ายออก จะใช้ถังเติมอากาศเป็นทั้งถังปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์และถังตกตะกอน โดยทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้ได้ความเข้มข้นที่กำหนดไว้ แล้วเติมน้ำเสียเข้าระบบเพื่อย่อยสลายอินทรีย์

2.6.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์

ขั้นตอนการดำเนินระบบในหนึ่งรอบการทำงาน หรือเรียกว่า วัฏจักร (Cycle Time) มีดังนี้

1. ช่วงรับน้ำเสีย (Fill) โดยรับน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ปกติในถังจะมีปริมาตรน้ำตะกอน (จุลินทรีย์) ประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงถัง ถังปฏิกรณ์จะรับน้ำเสียจนถึงระดับสูงสุดที่ออกแบบไว้ ระหว่างการเติมน้ำเสียจะมีการเติมอากาศหรือไม่ก็ได้
2. ช่วงกำจัดสารอินทรีย์ (React) มีการเติมอากาศและการกวนผสมเพื่อให้สารอาหารและออกซิเจนผสมเข้ากันอย่างดีกับจุลินทรีย์ ในช่วงนี้สามารถปรับเปลี่ยนเวลาให้ยาวนานขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน หรือหยุดเติมอากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน
3. ช่วงตกตะกอน (Settle) ช่วงนี้จะหยุดเติมอากาศและการกวนผสม ปล่อยให้จุลินทรีย์แขวนลอยตกตะกอนสู่ก้นถัง และได้น้ำใสส่วนบนที่ผ่านการบำบัดแล้ว
4. ช่วงถ่ายน้ำทิ้ง (Draw) เป็นช่วงที่ระบายน้ำใสส่วนบนของถังปฏิกรณ์ออกไป น้ำทิ้งอาจนำไปเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคต่อไป
5. ช่วงพัก (Idle) เป็นช่วงเวลาหลังจากปล่อยน้ำออกจนถึงก่อนช่วงเติมน้ำเสียเข้า ถังในรอบการทำงานต่อไป ช่วงนี้ไม่มีการเติมน้ำเสีย อาจมีเติมอากาศหรือการกวนหรือไม่ก็ได้

2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสบีอาร์

ข้อดี

1. การเดินระบบและการควบคุมง่าย
2. ระบบเอสบีอาร์ใช้ถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียวไม่ต้องใช้ถังตกตะกอนเพิ่ม และไม่มีระบบหมุนเวียนกลับสลัดจ์ ทำให้ประหยัดพื้นที่และค่าก่อสร้างต่ำ
3. สามารถดัดแปลงให้กำจัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้พร้อมกันโดยควบคุมการเติมอากาศ ให้เกิดสภาวะ แอนแอโรบิก แอนนออกซิก หรือ แอโรบิกก็ได้
4. ระบบเอสบีอาร์สามารถรับน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านขนาดและปริมาณและความเข้มข้นสารอินทรีย์ โดยไม่ต้องใช้ถังปรับสภาพ (Equalizing Tank)
5. โดยทั่วไปประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบเบตซ์ดีกว่าแบบต่อเนื่องและสามารถรับน้ำเสียในกรณีที่มีอัตราไหลสูงในช่วงเวลาสั้นๆได้

6. ระบบเอสบีอาร์สามารถปรับระยะเวลาการเติมอากาศ (เวลาทำปฏิกิริยา) ทำให้ระบบเอสบีอาร์ มีความยืดหยุ่นและสามารถรับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เข้มข้นสูงได้

ข้อเสีย

1. ถ้าต้องการควบคุมระบบเอสบีอาร์ให้ง่าย ต้องมีถังพักขนาดใหญ่ก่อนเข้าระบบเอสบีอาร์
2. เหมาะกับน้ำเสียปริมาณไม่มาก (ไม่เกิน 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
3. ถ้าต้องการเดินระบบให้สม่ำเสมอและต่อเนื่อง ต้องมีถังปฏิกรณ์หลายใบเพื่อ สลับการทำงานในแต่ละถังและยังต้องการระบบควบคุมอัตโนมัติด้วย

2.7 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเอสบีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิล์มชีวภาพมีการใช้แพร่หลายในปัจจุบัน เพราะมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น สามารถรับภาระบรรทุกได้สูง ระบบมีเสถียรภาพ ขนาดถึงปฏิกิริยากะทัดรัด ความเข้มข้นของจุลินทรีย์สูงจึงมีอัตราการรับสารอินทรีย์ได้สูง จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตสามารถเกาะและสะสมบนตัวกลางได้เพราะอายุตะกอนไม่ขึ้นกับเวลาเก็บกักน้ำเสีย (Kaballo, 1997) เหมาะกับน้ำเสียที่ย่อยสลายทางชีวภาพยากเช่น น้ำชะล้างขยะ (Leachate) น้ำเสียอุตสาหกรรมได้แก่ น้ำเสียไซยาไนด์ (Daniel และ William, 1998) น้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ TOC ต่ำ น้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน (Wilderer, 1995) และน้ำเสียที่ย่อยสลายยากที่ทำให้เกิดปัญหาตะกอนลอยในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (Wilderer และคณะ, 1996)

ระบบฟิล์มชีวภาพ จุลินทรีย์สามารถเกาะติดกับตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ เพราะฉะนั้นตัวกลางในแต่ละตำแหน่งจะมีกลุ่มสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน คือ บริเวณทางเข้าซึ่งน้ำเสียจะมีสารอินทรีย์มาก จึงมีจุลินทรีย์ชนิดเฮเทอโรโทรฟิก เป็นลักษณะเด่น ในส่วนล่างของตัวกลางจะพบ ไนตริฟายเออร์แบคทีเรียเป็นลักษณะเด่นซึ่งมีหน้าที่กำจัดไนโตรเจน ทำให้ระบบฟิล์มชีวภาพประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำให้มีประสิทธิภาพบำบัดดี (Wilderer และคณะ, 1996)

ข้อเสียของระบบฟิล์มชีวภาพ คือ ข้อจำกัดการถ่ายเทสารอาหารและออกซิเจนผ่านชั้นฟิล์มชีวภาพ การอุดตันของฟิล์มชีวภาพที่เจริญเติบโตเร็วในบริเวณทางน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์

(Kaballo และคณะ, 1995) และความไม่สม่ำเสมอของความเข้มข้นฟิล์มชีวภาพในทิศทางการไหลของน้ำเสียตลอดความยาวของถังปฏิกรณ์ (Kaballo, 1997)

ภายใต้สภาวะการทำงานจริงจะมีการเปลี่ยนแปลงภาระบรรทุกและค่าพารามิเตอร์(อุณหภูมิ, พีเอช, ออกซิเจน) ถ้าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการกระจายตัวของฟิล์มชีวภาพไม่สม่ำเสมอ ทำให้สารอาหารเข้าสู่ชั้นฟิล์มได้น้อยลงหรืออาจไม่สามารถถ่ายเทได้ ระบบจะมีประสิทธิภาพลดลง Boller and Gujer(1985) อ้างถึงใน Kaballo และคณะ(1995) สังเกตพบว่ามีสารอินทรีย์หลุดออกไปกับน้ำทิ้งในระบบไปยกรองและพบปัญหาเดียวกันในระบบ fixed film reactor ซึ่งบำบัดน้ำเสียที่เป็นพิษ แนวทางในการแก้ปัญหาเรื่องการกระจายตัวของฟิล์มชีวภาพไม่สม่ำเสมอ จะใช้การดำเนินการระบบแบบแบตช์ Kaballo and Wilderer(1993) อ้างถึงใน Kaballo และคณะ(1995)

ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Biofilm Reactor, SBBR) เป็นการนำระบบเอสบีอาร์ที่พัฒนาโดย Irvine(1979) มาทำงานร่วมกับถังปฏิกรณ์ฟิล์มชีวภาพที่มีชั้นตัวกลางอยู่กับที่ การดำเนินการระบบเป็นแบบแบตช์(เทเข้า-ถ่ายออก) ซึ่งสามารถกำจัด สารอินทรีย์ รวมถึงไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยปรับปรุงการเติมอากาศให้มีทั้งสภาวะ แอนแอโรบิก แอนนออกซิก และแอโรบิก

ระบบเอสบีอาร์ถูกเสนอโดย Wilderer(1992) อ้างถึงใน วรรณุ ประทุมแก้ว (2543) เป็นการรวมข้อดีของระบบฟิล์มชีวภาพและระบบการทำงานแบบแบตช์ ทำให้มีมวลจุลินทรีย์สูง แต่มีอัตราเจริญเติบโตต่ำ และที่สำคัญสามารถปรับปรุงการดำเนินการระบบเพื่อให้กำจัดได้ทั้งสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและรับภาระบรรทุกทั้งทางขดศาสตร์และสารอินทรีย์ได้สูง (Wilderer และคณะ, 1996)

ระบบเอสบีอาร์เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าอัตราส่วน บีโอดี:ซีโอดี ต่ำ หรือน้ำเสียที่ย่อยสลายทางชีวภาพยาก ข้อได้เปรียบคือ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าสามารถเกาะติดและสร้างฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางได้ ทำให้มีมวลจุลินทรีย์สูงและมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเสียมาก จึงมีประสิทธิภาพบำบัดสูง (Wilderer, 1995)

2.7.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์

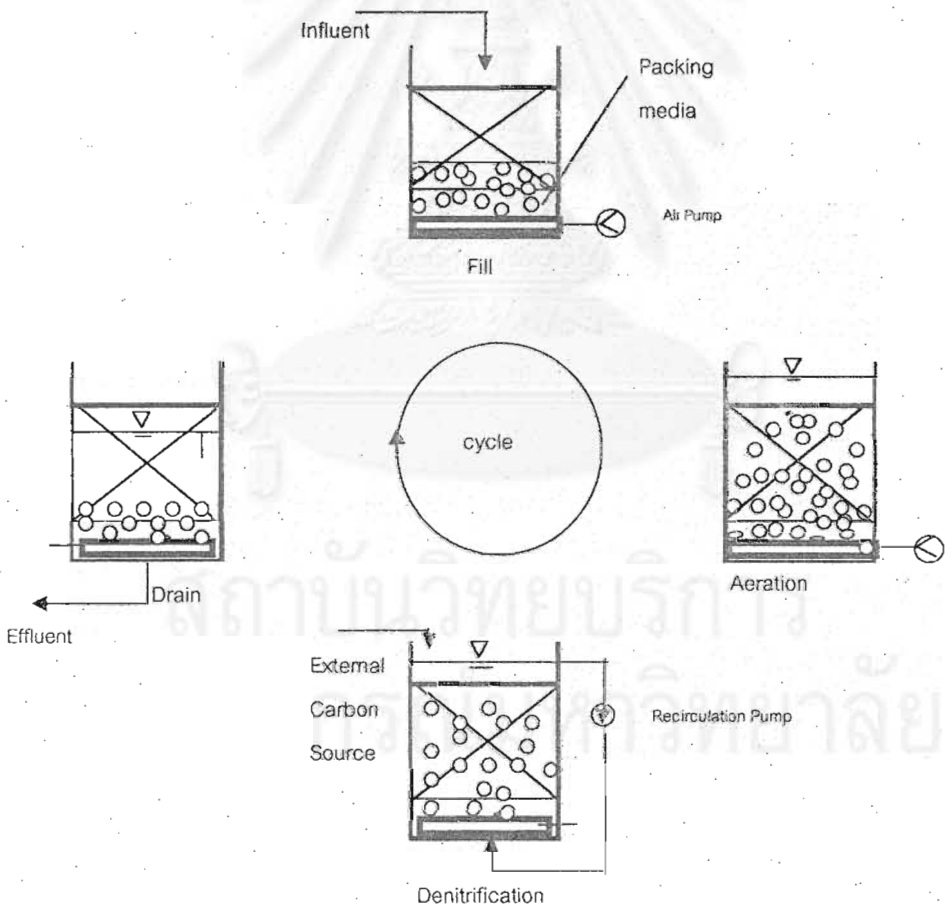
การทำงานของระบบเอสบีอาร์เหมือนกับระบบเอสบีอาร์ทั่วไปโดยจะมีการทำงานเป็นช่วงเวลาใน 1 วัฏจักรดังนี้

ขั้นที่ 1 ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) ซึ่งอาจใช้หลายถังปฏิบัติการต่อขนานกัน

ขั้นที่ 2 ช่วงเติมอากาศและทำปฏิกิริยา (React)

ขั้นที่ 3 ช่วงหยุดเติมอากาศและเติมแหล่งคาร์บอน เช่น เมทานอล กลูโคสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน(สภาวะแอนน็อกซิก) ในกรณีที่ต้องการกำจัดไนโตรเจน

ขั้นที่ 4 ถ่ายน้ำทิ้งโดยไม่ต้องมีการตกตะกอนในบางครั้งต้องมีการล้างย้อน (Back Wash) เพื่อกำจัดมวลจุลินทรีย์ส่วนเกินออก (Wilderer, 1995)



รูปที่ 2.29 แสดงขั้นตอนการทำงานของเอสบีอาร์เพื่อใช้กำจัดไนโตรเจน

(Dollerer and Wilderer, 1996)

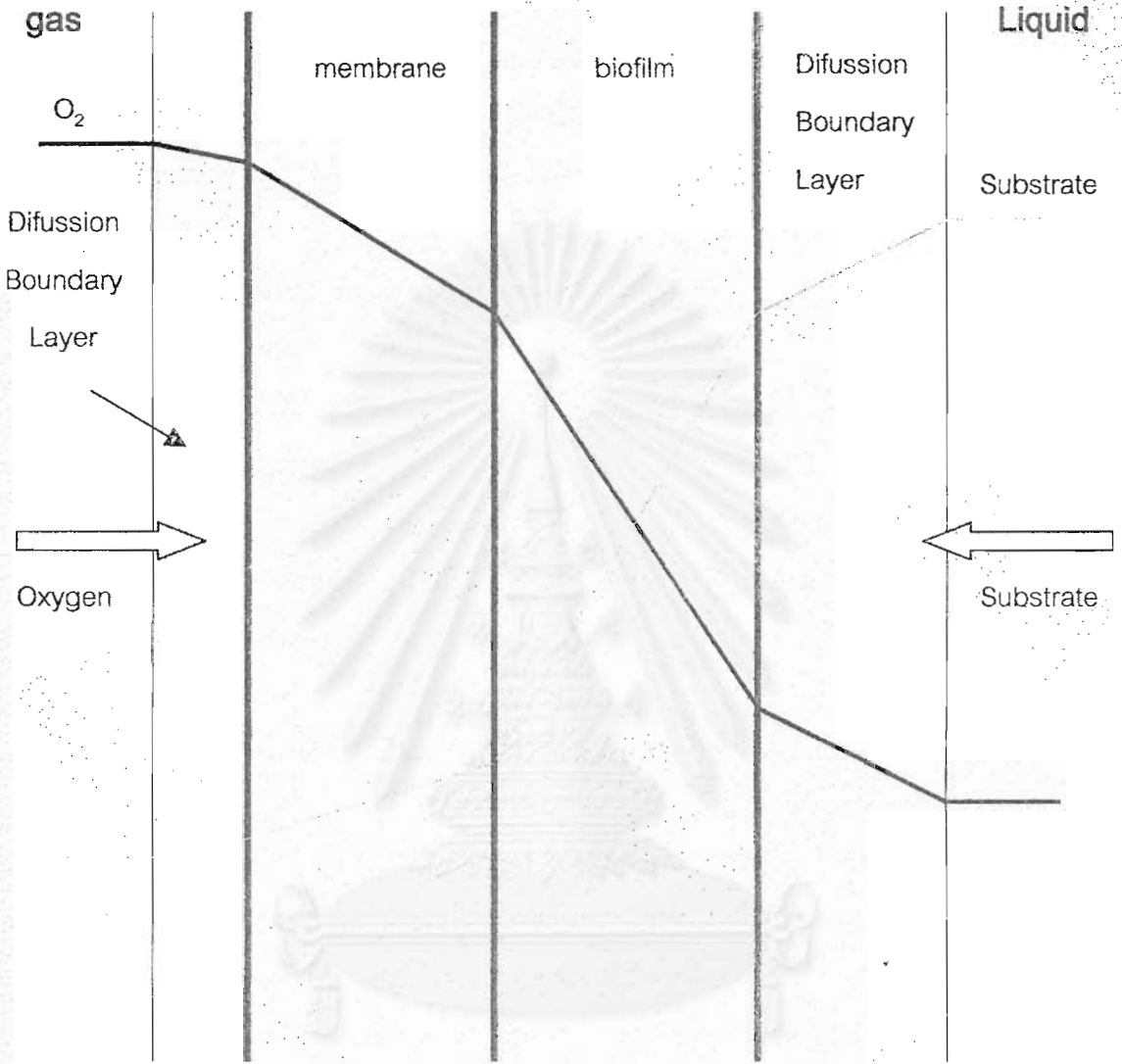
2.7.2 ลักษณะการเติมอากาศ

ลักษณะการเติมอากาศของระบบเฮลบีบี่อาร์ สามารถทำได้ 2 แบบ

1. การเติมอากาศเป็นฟองเล็กๆ จากกันถังปฏิกิริยาโดยใช้ หัวเป่าอากาศ(Diffuser) ซึ่งจะมีปัญหาในการเดินระบบ 2 ประการ
 - ปัญหาเรื่องเวลาที่ฟองอากาศจะอยู่ในถังปฏิกิริยาดังนั้นทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอในการถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศสู่ของเหลว(น้ำเสีย) ภายนอก
 - ฟองอากาศจะนำพาสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Pollutant) ไปพร้อมๆ กับฟองอากาศออกสู่บรรยากาศเหนือถังปฏิกิริยาทำให้มีปัญหาเรื่องกลิ่น(Wilderer, 1995)
2. การเติมอากาศโดยใช้ Gas permeable membrane ถูกเสนอโดย Brauttigam(1984) อ้างถึงใน Wilderer(1995) โดยการใช้ Tubes of silicone rubber ซึ่งเป็น เมมเบรนชนิดหนึ่งวางได้น้ำและปล่อยอากาศให้ไหลผ่านเข้าไปที่อดังกล่าว และฟิล์มชีวภาพจะเกาะบน silicone rubber อากาศจะแทรกผ่าน membrane สู่ชั้นฟิล์มชีวภาพและออกสู่ของเหลว(น้ำเสีย) ภายนอก (Wilderer, 1995) วัสดุที่นำมาใช้ทำ Gas permeable membrane ได้แก่ Polydimethyl siloxane (Silicone rubber) และ Polyetherimide (PI) เป็นต้น ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่า permeable coefficient แตกต่างกันดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดง Permeability of various membrane materials at 25 °C (Wilderer, 1995)

Membrane material	Permeability ($\text{g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$)
Teflon (PTFE)	0.016
Natural rubber	0.092
PVC	0.093
Demethylsilicone (Silicone rubber, General Electric)	1.929
Silastic 500-1 (Dow Corning)	2.226



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.30 แสดง Profile ของสารอินทรีย์และออกซิเจนผ่าน membrane และ ฟิล์มชีวภาพ (Wilderer, 1995)

2.7.3 ข้อดีของระบบเอสบีบีอาร์

1. ระบบประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าเป็นปริมาณมาก และมีความเข้มข้นของฟิล์มชีวภาพสูง เพราะมีตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะจึงมีประสิทธิภาพบำบัดได้ดี
2. เหมาะสำหรับน้ำเสียที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก เช่น น้ำเสียอุตสาหกรรม , น้ำชะล้างขยะ, น้ำที่เสียที่มีสารพิษ และยังควบคุมการเติมอากาศให้ระบบสามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้
3. ดังปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก ทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างและพื้นที่
4. ระบบมีเสถียรภาพสูง
5. สามารถรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียทั้งด้านรสชาติและค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ได้โดยไม่ต้องมีถังปรับสภาพ
6. เนื่องจากไม่ต้องมีการตกตะกอนจึงลดเวลาการทำงานใน 1 วัฏจักรได้ หรือใช้เวลาที่จำเป็นต้องตกตะกอน(เมื่อเทียบกับเอสบีอาร์ทั่วไป) ให้กลายเป็นเวลาที่ไม่เติมอากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเอสบีบีอาร์

Martinez และ Wilderer(1991) ศึกษากระบวนการเอสบีบีอาร์ในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยดำเนินระบบ 2 สภาวะ คือ แอนแอโรบิกและแอโรบิกเรียงตามเวลา ในดังปฏิกรณ์รูปทรงคอลัมน์บรรจุตัวกลางพลาสติกสังเคราะห์ที่มีการหมุนเวียนน้ำ พบว่าระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี และถ้าเพิ่มระยะเวลาใน 1 รอบการทำงานมากขึ้นระบบจะมีความเสถียรมากขึ้น

Kaballo และคณะ(1995) ศึกษาการกำจัดสารคลอโรฟีนอลด้วยระบบเอสบีบีอาร์ โดยทำการศึกษเปรียบเทียบระบบต่อเนื่อง (CFBR) และระบบแบตช์ (SBBR) พบว่าที่ภาระบรรทุกสูงๆ ระบบ SBBR จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าระบบ CFBR ในระบบ SBBR ที่มีการหมุนเวียนน้ำจะมีมวลจุลินทรีย์กระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งคอลัมน์ จึงไม่มีการอุดตันและไม่จำเป็นต้องล้างย้อน แต่มวลจุลินทรีย์น้อยกว่าแต่อัตราการกำจัดจะสูงกว่า ในขณะที่ระบบ CFBR จะมีมวลจุลินทรีย์มากบริเวณทางน้ำเข้าจึงเกิดปัญหาการอุดตันและยังมีผลทำให้การถ่ายออกซิเจนไม่ดี จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศเพื่อรักษาค่าออกซิเจนละลายน้ำให้คงที่

Woolard และ Irvine(1995) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของเกลือในช่วงกว้าง (1-15 % Salt) และเติมอากาศโดยใช้ Gas permeable silicone tubing และจุลินทรีย์ที่ใช้ศึกษานำจาก Great Salt Lake(UT,USA) ซึ่งเป็น Halophilic Bacteria ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นเกลือ 0,1,2,5 % ไม่สามารถกำจัดฟีนอลได้สมบูรณ์ โดยอัตราการเจริญเติบโตแปรตามความเข้มข้นของเกลือ และอัตราการเจริญเติบโตจะเพิ่มเร็วที่ความเข้มข้นเกลือตั้งแต่ 5 % การย่อยสลายฟีนอลจะเกิดได้สมบูรณ์ที่ความเข้มข้นเกลือตั้งแต่ 5 % และพบว่าไม่มีการกำจัดฟีนอลเลยที่ความเข้มข้นเกลือ เท่ากับ 0 % และในช่วงความเข้มข้นเกลือ 5-15 % ระบบสามารถกำจัดฟีนอลได้ 99 %

Kolb และ Wilderer(1997) ทำการวิจัยโดยนำระบบเอสปีอาร์มาบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุตัวกลางที่สามารถดูดติด สารเบนซิน คลอโรฟีนอล และฟีนอล ในน้ำเสีย และมีการเลี้ยงจุลินทรีย์เป็นฟิล์มบนถ่านเพื่อช่วยในการรีเจนเนอเรทถ่านแทนการนำถ่านออกมารีเจนเนอเรทภายนอก พบว่าสามารถเพิ่มอายุถ่านได้มากขึ้น และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ดี

Daniel และ William(1998) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำชะล้างขยะสังเคราะห์ที่มีไซยาไนด์ โดยใช้จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบน silicone tubing โดย 1 รอบการทำงานเท่ากับ 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถลดความเข้มข้นไซยาไนด์จาก 20 มก/ล ของ CN^- เหลือ 0.5 มก/ล ของ CN^- ซึ่ง ไซยาไนด์ที่ถูกกำจัดแบบที่เรียกว่าจะผลิตแอมโมเนียในอัตราส่วนโมล $CN^- : NH_3$ เท่ากับ 1:1 และพบว่าถ้าเติมกลูโคส แบบที่เรียกว่าจะสามารถกำจัดแอมโมเนียส่วนเกินได้

ปาจารย์ ทองสนิท(2539) ศึกษาหาประสิทธิภาพระบบเอสปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียโรงอาหาร พบว่าเวลาเก็บกักน้ำเสียจะมีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีสูงกว่าแต่ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียงกัน สัดส่วนของระยะเวลาเติมอากาศสูงระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูง เมื่อศึกษาผลของอัตราการหมุนเวียนน้ำที่ 0% 200% 400% พบว่าถ้ามีการหมุนเวียนน้ำสูงจะมีผลทำให้มีน้ำหนักจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวตัวกลางเพิ่มมาก และมีผลต่อค่าเอสเอสที่ออกจากระบบสูงขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีและฟอสฟอรัสใกล้เคียงกัน

บทที่ 3

แผนงานและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

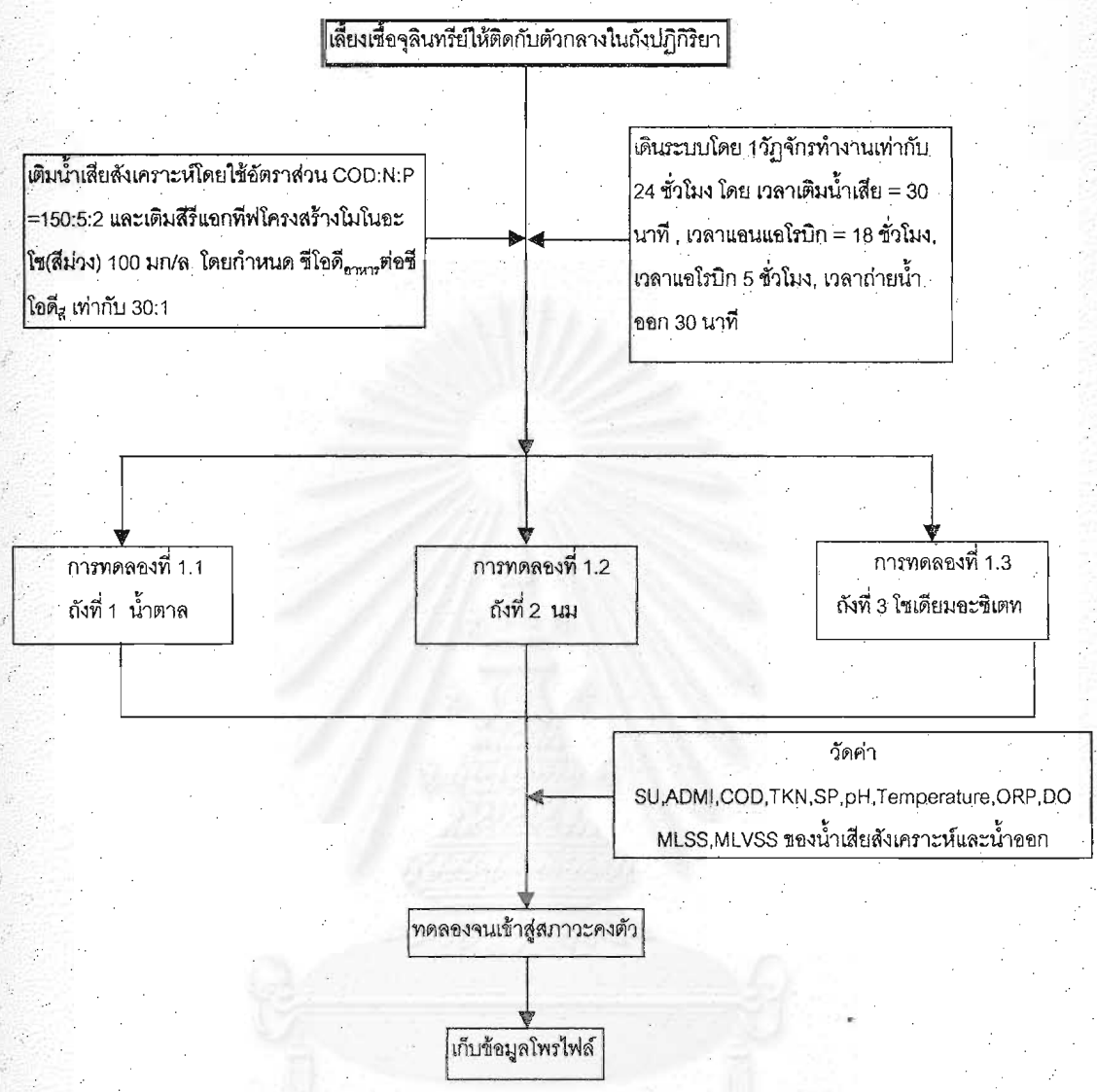
การดำเนินการทดลอง ทำที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองใช้ระบบเอสบีอาร์เป็นถึงปฏิกิริยา จำนวน 3 ถังที่เหมือนกัน ซึ่งมีระยะเวลาเดินระบบ 1 วัฏจักร เท่ากับ 24 ชั่วโมง เท่ากัน โดยแบ่งการทดลอง เป็น 3 ชุดการทดลอง (รวม 9 การทดลอง) ทำการศึกษาการลดสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอะไซ รวมถึงการกำจัดฟอสฟอรัส โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมสีรีแอกทีฟต่างกัน 2 โครงสร้าง (ชุดการทดลอง ที่ 1 กับ 2) และเติมสารอาหาร(แหล่งคาร์บอน)ที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำตาล นม และไซเดียมอะซิเตท เพื่อทดลองหาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการลดสี ทั้งนี้ได้เติมธาตุอาหารที่จำเป็นในการเติบโตของจุลินทรีย์ แผนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1-3.3 ส่วนในชุดการทดลองที่ 3 จะหาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสปริมาณสูงรวมถึง ผลกระทบของฟอสฟอรัสที่มีต่อการลดสี

พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

1. สีรีแอกทีฟ 2 โครงสร้างได้แก่ โครงสร้างโมโนอะไซ(สีม่วง) และโครงสร้างไดอะไซ (สีน้ำเงิน)
2. ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่ใช้ลดสีในน้ำเสียสีย้อม คือ น้ำตาล นม และไซเดียมอะซิเตท
3. ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่ต่างกัน 3 ค่า สำหรับชุดการทดลองที่ 3

พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรตามที่ต้องวิเคราะห์

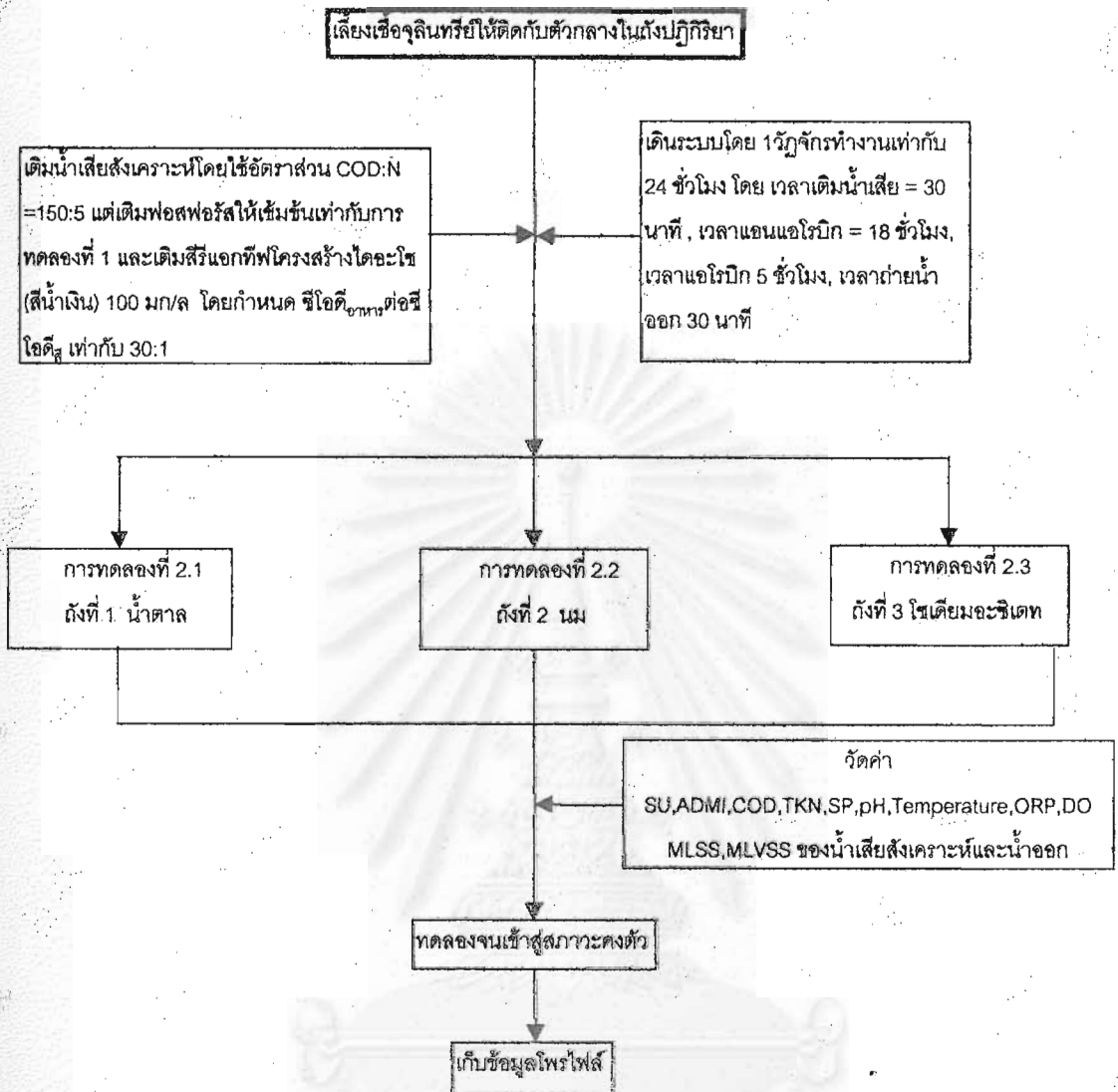
1. ความเข้มข้นในหน่วย SU และ ADMI
2. ซีโอดี (COD)
3. ทีเคเอ็น (TKN)
4. ฟอสฟอรัสละลาย (Soluble Phosphorus, SP)
5. พีเอชและอุณหภูมิ (pH, Temperature)
6. ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และ โอรพี (ORP)
7. ของแข็งแขวนลอยในน้ำทั้ง (MLSS, MLVSS) และ มวลชีวภาพบนวัสดุตัวกลาง



หมายเหตุ การทดลองที่ 1.2 ใช้นมเป็นสารอาหาร ทำให้อัตราส่วน COD:N:P = 150:9:3 เพราะมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสบางส่วนได้จากนม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

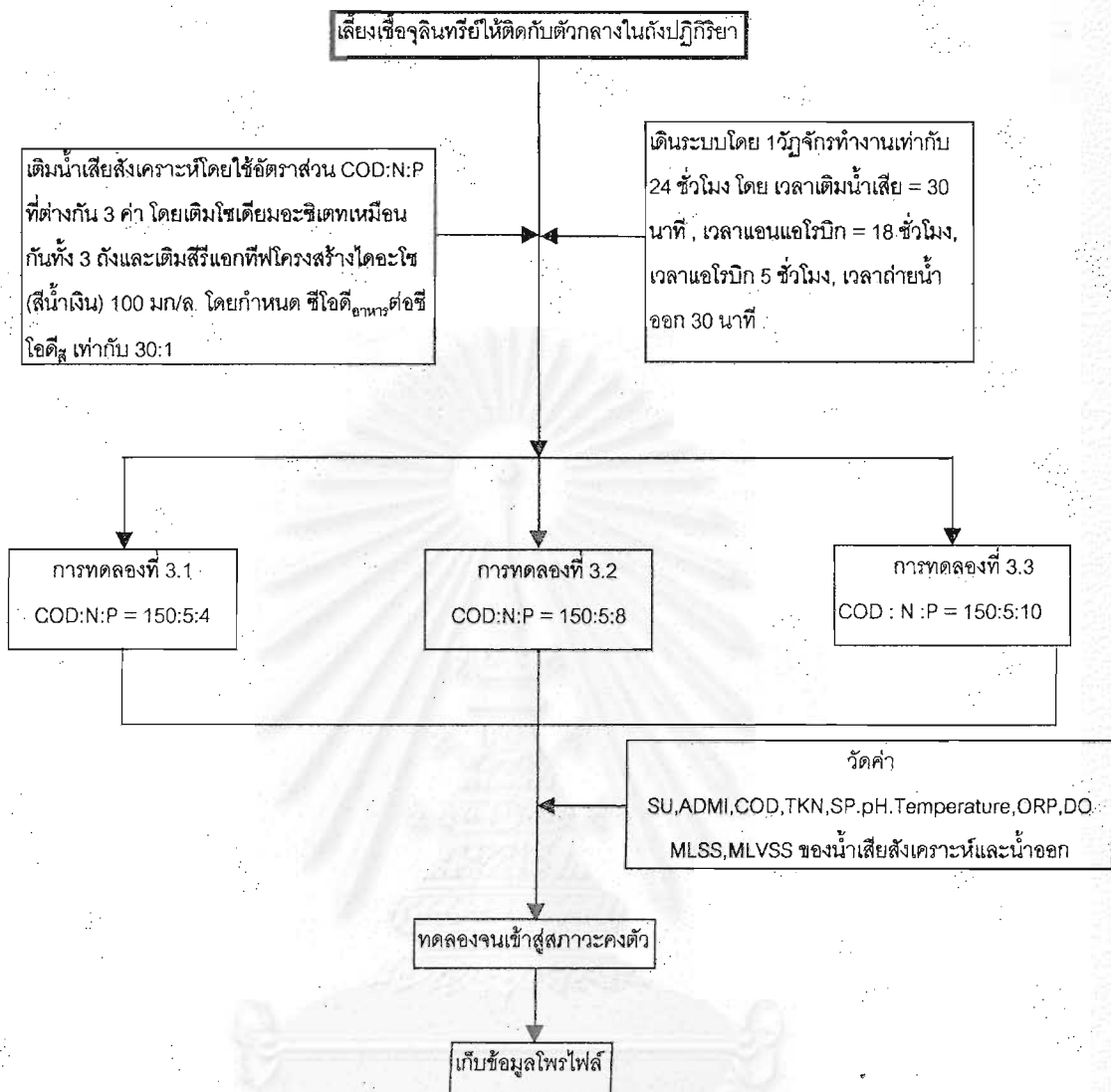
รูปที่ 3.1 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาชนิดของสารอาหารต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟโครงสร้างโมโนอะโซ



หมายเหตุ การทดลองที่ 2.2 ใช้นมเป็นสารอาหาร ทำให้อัตราส่วน COD:N = 150:10 เพราะมีไนโตรเจนบางส่วนได้จากนม ส่วนค่าฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2 ทั้งชุด กำหนดให้เท่ากับชุดการทดลองที่ 1 เพราะต้องการเปรียบเทียบ ค่าซีไอดี_๕ ที่เพิ่มขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาชนิดของสารอาหารต่อการกำจัดสารอาหารที่ฟโครงสร้างโคอะโซ



หมายเหตุ เลือกลำโพงเดี่ยวมอะซิเตทเป็นสารอาหารที่ใช้ทดลอง เพราะ จากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 โซเดียมอะซิเตทให้ประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด จึงนำมาใช้ศึกษาต่อร่วมกับผลของฟอสฟอรัส ปริมาณสูง(แปรผันค่า COD:P) ต่อประสิทธิภาพการลดสี

รูปที่ 3.3 แผนการทำงานของชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่มีต่อการกำจัดสรีรเอกที่ฟโครงสร้างไดอะไซ

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง

การทดลอง ที่	สื่อออกฤทธิ์ (โชนสี)	ถังปฏิกิริยา (ถังที่)	สับสเตรท ที่เติม	อัตราส่วนสับสเตรท ต่อซีโอดี(ซีไอดี)	อัตราส่วนฟอสฟอรัสใน น้ำเสีย (COD:N:P)	ปริมาณน้ำเสีย (ลิตร/วัฏจักร)	เวลาทำงาน 1 วัฏจักร (ชั่วโมง)
1.1	Remazol	1	น้ำตาล	30 : 1	150 : 5 : 2*	5	24
1.2	Violet 5R	2	นม				
1.3	สีม่วง	3	โซเดียมอะซิเตท				
2.1	Remazol	1	น้ำตาล	30 : 1	COD:N = 150 : 5 แต่คงความเข้มข้นฟอสฟอรัส ให้เท่ากับชุดการทดลองที่ 1	5	24
2.2	Black B	2	นม				
2.3	สีน้ำเงิน	3	โซเดียมอะซิเตท				
3.1	Remazol	1	โซเดียมอะซิเตท	30 : 1	150 : 5 : 4	5	24
3.2	Black B	2			150 : 5 : 8		
3.3	สีน้ำเงิน	3			150 : 5 : 10		

*ไม่ใช้ 150:5:1 เพื่อให้มีฟอสฟอรัสละลายเหลือในน้ำทิ้งหลังการบำบัด จะได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของสับสเตรททั้ง 3 ชนิดได้

ตารางที่ 3.2 ค่าซีไอดีน้ำเสียเข้าและอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์

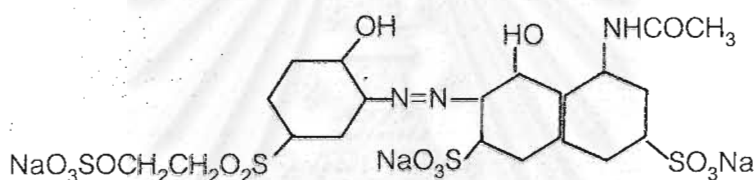
การทดลอง ที่	สับสเตรท ที่เติม	ซีไอดีเข้า เฉลี่ย (mg/l)	อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ เชิงพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง Kg-COD/(d*m ²)	อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ เชิงปริมาตรน้ำเสีย Kg-COD/(d*m ³)
1.1	น้ำตาล	1449	8.77E-07	1.45E-03
1.2	นม	1449	8.77E-07	1.45E-03
1.3	โซเดียมอะซิเตท	1440	8.72E-07	1.44E-03
2.1	น้ำตาล	2565	1.55E-06	2.57E-03
2.2	นม	2542	1.54E-06	2.54E-03
2.3	โซเดียมอะซิเตท	2553	1.55E-06	2.55E-03
3.1	โซเดียมอะซิเตท	2581	1.56E-06	2.58E-03
3.2		2581	1.56E-06	2.58E-03
3.3		2581	1.56E-06	2.58E-03

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์

3.2.1 สีย้อมรีแอกทีฟ

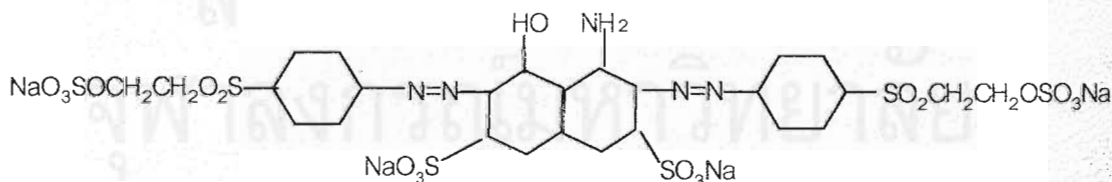
สีย้อมที่ใช้ทดลองเป็นสีย้อมรีแอกทีฟซึ่งสามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ ละลายน้ำได้ดี และสีย้อมรีแอกทีฟนี้ส่วนใหญ่มีโครงสร้างพันธะอะโซ (กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์) การศึกษาและทดลองมุ่งไปที่พันธะทางเคมีของสี โดยพิจารณาพันธะอะโซซึ่งเลือกใช้สี 2 ชนิด

ชนิดที่ 1 มีพันธะอะโซ 1 พันธะในโมเลกุลสี(monoazo) มีชื่อการค้าว่า Remazol Violet 5R (สีม่วง) มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสี Remazol Violet 5R (Shore, 1995)

ชนิดที่ 2 มีพันธะอะโซ 2 พันธะในโมเลกุลสี(diazo) มีชื่อการค้าว่า Remazol Black B (สีน้ำเงิน) มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสี Remazol Black B (Shore, 1995)

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ย้อมจากโรงงานฟอกย้อมมีของแข็งละลายเป็นจำนวนมาก รวมถึงการใช้สารเคมีต่างๆ เต็มระหว่างกระบวนการ เช่น สารเคมีช่วยย้อม ทำให้น้ำเสียมีความสลับซับซ้อนมาก เพื่อลดผลกระทบของสารเคมีดังกล่าวที่มีต่อผลการทดลอง จึงเลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์แทน เพราะสามารถควบคุมความเข้มข้นและค่าซีไอได้ดีได้แน่นอนกว่า โดยใช้สิรีแอกทีฟ เป็นผงมาละลายน้ำ ส่วนประกอบปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ปริมาณที่เติมในน้ำเสีย 1 ลิตร (ก/ล) หรือ (มล/ล)								
การทดลอง ที่	สารอาหาร	NaHCO ₃	(NH ₂) ₂ CO	KH ₂ PO ₄	CaCl ₂ *2H ₂ O	MgSO ₄ *7H ₂ O	FeCl ₃ Solution	สี
1.1	1.227 g	0.71 g	0.101 g	0.083 g	0.0869 g	0.0971 g	3.8 ml	Remazol
1.2	11.6 ml	0.71 g	0.101 g	0.083 g	0.0869 g	0.0971 g	3.8 ml	Violet
1.3	3.0 g	0.71 g	0.101 g	0.083 g	0.0869 g	0.0971 g	3.8 ml	5R
2.1	2.204 g	1.28 g	0.182 g	0.083 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	Remazol
2.2	20.9 ml	1.28 g	0.182 g	0.046 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	Black
2.3	5.391 g	1.28 g	0.182 g	0.083 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	B
3.1	5.391 g	1.28 g	0.182 g	0.2984 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	Remazol
3.2	5.391 g	1.28 g	0.182 g	0.5968 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	Black
3.3	5.391 g	1.28 g	0.182 g	0.7461 g	0.1562 g	0.1743 g	6.8 ml	B

หมายเหตุ

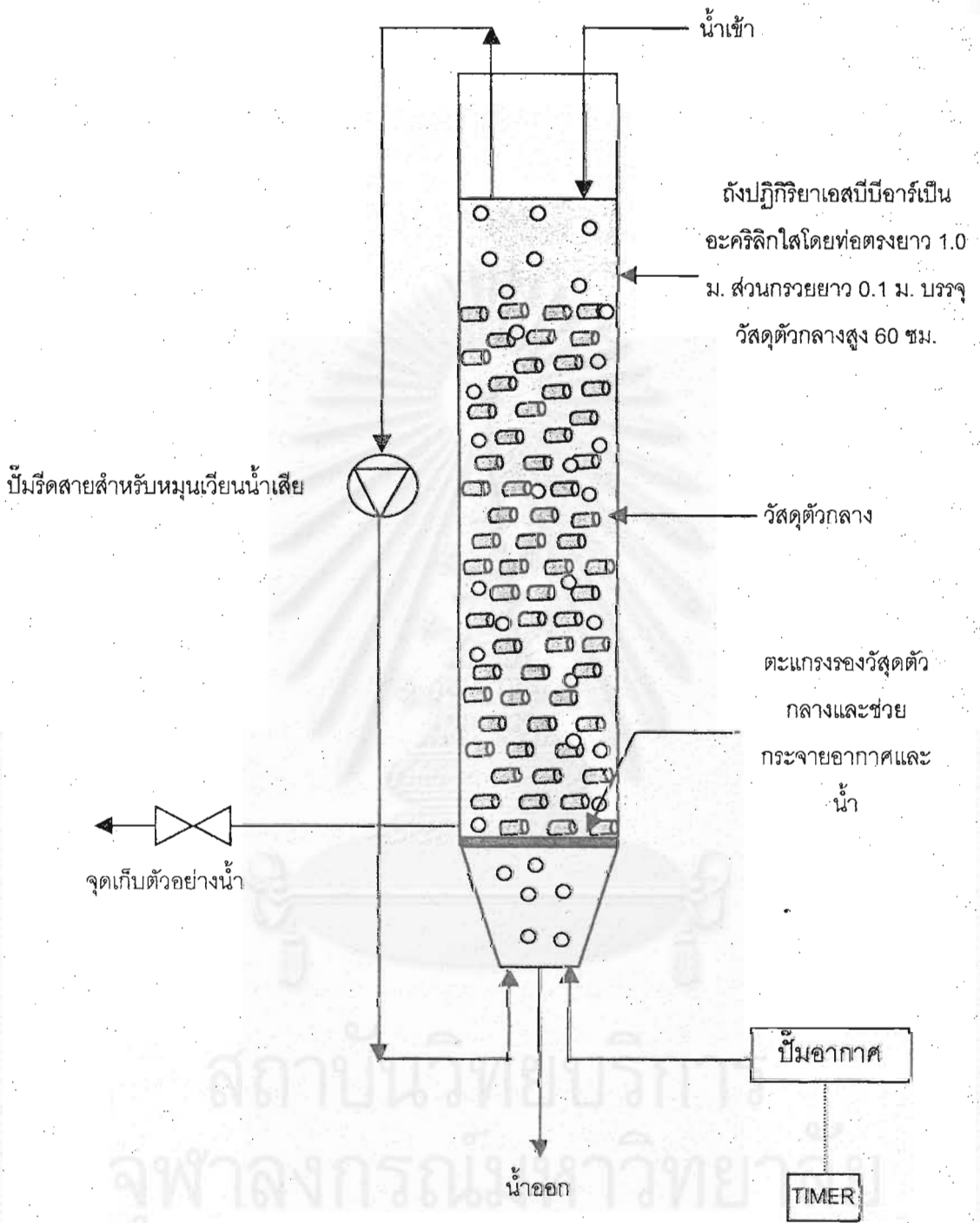
1. เติมสิรีแอกทีฟ 100 มก/ล เท่ากันทุกการทดลอง
2. FeCl₃ เติมในรูปสารละลายเพราะสะดวกต่อการใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าซีไอดีของสารเคมีที่ใช้

ค่า	ชนิดของสารเคมี				
	น้ำตาล	นม	ไซเดียมอะซิเตท	Remazol Violet 5 R	Remazol Black B
ปริมาณ สาร ในน้ำ 1 ลิตร	1 มก	1 มล	1 มก	100 มก	100 มก
ซีไอดี (มก/ล)	1.12	118	0.458	45.8	82.3

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังปฏิกิริยาเอสปีอาร์ มีรูปแบบเป็นทรงกระบอกสูงทำจากพลาสติกอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม. สูง 110 ซม. โดยเป็นระยะท่อตรง 100 ซม. และส่วนกรวย 10 ซม. ระหว่างกรวยกับท่อตรงจะติดตั้งตะแกรงเพื่อรองรับวัสดุตัวกลางและช่วยกระจายน้ำและอากาศ และบรรจุวัสดุตัวกลางผลิตจากพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่มีลักษณะ Hollow pellet เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 4 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางใน 3 มม. ยาว 5 มม. ความหนาแน่น 1.003 กรัม/ลบ.ซม. สูงประมาณ 60 ซม. มีการต่อเครื่องสูบน้ำรีดสายสำหรับหมุนเวียนน้ำเพื่อช่วยให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียได้ทั่วถึง โดยกำหนดอัตราการหมุนเวียนน้ำคงที่ 100 ลิตร/วัน ดังแสดงรายละเอียดถึงปฏิกิริยาเอสปีอาร์ในรูปที่ 3.6
2. เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย(Peristaltic pump) ยี่ห้อ Watson-Marlow ใช้สายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. จำนวน 2 เครื่องสำหรับหมุนเวียนน้ำเพื่อช่วยการกวนผสมน้ำในถังปฏิกิริยา
3. เครื่องเติมอากาศ ใช้แบบที่เติมอากาศในตู้ปลา
4. ถังบรรจุน้ำเสียสำหรับน้ำเสียเข้าและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบเป็นถังพลาสติกจำนวน 6 ใบ
5. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของถังปฏิกริยาเอสบีอาร์ที่ใช้ทดลอง

3.4 การเดินระบบและการควบคุม

ระบบเอสบีอาร์ทีที่ใช้ทดลองนี้ มีการทำงาน 1 วัฏจักรเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการเดินระบบดังนี้ (วรรณ ประทุมแก้ว, 2543)

ขั้นตอน เติมน้ำเสีย ใช้เวลา 30 นาที

ขั้นตอน แอนแอโรบิก ใช้เวลา 18 ชั่วโมง

ขั้นตอน แอโรบิก ใช้เวลา 5 ชั่วโมง

ขั้นตอน ถ่ายน้ำทิ้ง ใช้เวลา 30 นาที

โดยระหว่างการทำงาน จะใช้เครื่องสูบน้ำรีดสาย หมุนเวียนน้ำเสียด้วยอัตรา 100 ลิตร/วัน โดยใช้ 2 เครื่อง ซึ่งเครื่องที่ 1 ต่อกับถังปฏิกริยาที่ 1 ส่วนเครื่องที่ 2 ต่อกับถังปฏิกริยาที่ 2 และ 3 ที่ต้องใช้เครื่องสูบน้ำ 1 ตัวต่อถังปฏิกริยา 2 ถัง เพราะไม่สามารถเบิกใช้เครื่องสูบน้ำได้เกิน 2 ตัว เครื่องสูบน้ำรีดสายจะใช้สายยางซิลิโคนรีดผ่านภายในตัวเครื่อง เพราะมีความยืดหยุ่นมากกว่าสายยางตู้ปลา แต่สายยางส่วนที่ออกจากเครื่องเพื่อนำน้ำเสียไปหมุนเวียน จะใช้สายยางตู้ปลาแทน เพราะราคาถูกกว่า และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าทำให้ไม่อุดตันได้ง่าย ส่วนการเติมอากาศจะใช้เครื่องเติมอากาศแบบที่ใช้ในตู้ปลา จำนวน 3 เครื่อง โดยต่อแยกไว้สำหรับแต่ละถังปฏิกริยา การควบคุมการทำงานของเครื่องเติมอากาศจะใช้ตัวควบคุมเวลา(Electronic Timer)

การควบคุมอัตราการหมุนเวียนน้ำเสียเป็นเรื่องสำคัญที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นจึงมีการปรับแก้ (Calibration) อัตราการสูบที่เครื่องสูบน้ำรีดสาย ทุก 1 เดือน โดยใส่น้ำเสียในถัง แล้วเดินเครื่องสูบน้ำให้น้ำเสียไหลไปบีกเกอร์ที่มีปริมาตรแน่นอน โดยจับเวลาที่ใช้ในการสูบน้ำด้วยปริมาตรที่กำหนด การปรับแก้นี้ ถ้าใช้ปริมาตรน้ำที่มากพอ เช่น 1 ลิตร ก็จะมี ความถูกต้องมากกว่าการให้บีกเกอร์แค่ 100 มล.

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเดินระบบ คือ สายยางซิลิโคนที่ถูกรีดสาย เมื่อใช้ไปนานๆ ก็ จะเสื่อมและแตกได้ ทำให้น้ำเสียไหลออกจากถังปฏิกริยาได้ รวมถึงปัญหาอุดตันของสายยางตู้ปลาที่ใช้ เพราะมีตะไคร่น้ำเกิดขึ้นในสายทำให้น้ำเสียไหลผ่านลำบาก โดยเฉพาะน้ำเสียที่เป็นนม จะมีเมือกเหนียวของนมมาเกาะมาก ดังนั้นจึงเปลี่ยนสายยางทั้ง 2 ประเภทพร้อมกับการปรับแก้ อัตราการสูบของเครื่องสูบน้ำรีดสาย หรือขึ้นกับสภาพของสายยางขณะใช้ด้วย

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

จุดเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บที่ท่อทางปลาด้านล่างของถังปฏิบัติการ โดยความถี่, พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ และช่วงที่ทำการเก็บแสดงใน ตารางที่ 3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำช่วงแอนแอโรบิก และแอโรบิกจะเก็บช่วงปลายของการทำงานสภาวะนั้น โดยวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำใช้วิธีตามหนังสือ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ทั้งนี้การเก็บตัวอย่างน้ำออก จะต้องวิเคราะห์หาเอสเอส ดังนั้นน้ำออกที่ปล่อยลงถึงน้ำออกจะต้องกวนให้ของแข็งแขวนลอยกระจายตัวเข้ากัน ส่วนการหามวลชีวภาพบวสดูดักกลาง จะสุ่มเก็บวัสดุตัวกลางหลังจากที่ทำการเก็บโพรไฟล์แต่ละการทดลองเสร็จแล้ว

ตารางที่ 3.5 ตำแหน่งและความถี่ที่เก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	ตำแหน่งและความถี่การเก็บตัวอย่าง			
	น้ำเสียเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก	น้ำออก
พีเอช	3/WK	3/WK	3/WK	-
ไออาร์พี	-	3/WK	3/WK	-
ออกซิเจนละลาย	-	3/WK	3/WK	-
อุณหภูมิ	-	3/WK	3/WK	-
ซีไอดี	3/WK	3/WK	-	3/WK
ทีเคเอ็น	3/WK	3/WK	-	3/WK
ฟอสฟอรัสละลาย	3/WK	3/WK	-	3/WK
ความเข้มข้นหน่วยเอสยู และเอดีเอ็มไอ	3/WK	3/WK	-	3/WK
เอ็มแอลเอสเอส และ เอ็มแอลวีเอสเอส	-	-	-	3/WK
มวลชีวภาพบวสดูดักกลาง	วิเคราะห์หลังจากที่เก็บโพรไฟล์ในแต่ละการทดลองเสร็จ			

หมายเหตุ 3/WK หมายถึง ทำการเก็บตัวแปร 3 ครั้งต่อสัปดาห์

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือ
พีเอช	Electronic pH meter with glass electrode method	pH meter Horiba F-13
โออาร์พี	Electronic ORP meter with Platinum electrode	Radiometer PHM 80
ออกซิเจนละลาย	Membrane electrode method	DO Meter YSI model 52
อุณหภูมิ	Thermometer method	DO Meter YSI model 52
ซีโอดี	Dichromate Close Reflux method	Memmert (150 °C)
ทีเคเอ็น	Digestion and Titration	-
ฟอสฟอรัสละลาย	Vanadomolybdophosphoric Acid	UV-VIS Shimadzu UV-1201
ความเข้มข้นหน่วยเอสยู และเอตีเอ็มไอ	Spectrophotometer	UV-VIS Shimadzu UV-1201
เอ็มแอลเอสเอส และ เอ็มแอลวีเอสเอส	GF/C drying at 103 °C	Heraew (103 °C)
มวลชีวภาพบนวัสดุตัวกลาง	Sonification +drying at 103 °C and 550 °C	Ultrasonic probe

3.6 การหามวลชีวภาพบนวัสดุตัวกลาง

1. นำวัสดุตัวกลางประมาณ 20 ชิ้น มาล้างด้วยน้ำกลั่น
2. เติมน้ำกลั่น 20 มล แล้วนำหัวโพรบอัลตราโซนิกจุ่มลงไป 10 นาที
3. กรองแยกวัสดุตัวกลางออกจากน้ำที่มีเซลล์จุลินทรีย์ปนอยู่ด้วยตะแกรง
4. ทำตามข้อที่ 2-3 จนกว่าน้ำที่มีหัวโพรบจุ่มอยู่จะใส
5. นำน้ำที่ปะปนกับจุลินทรีย์ไปกรองผ่าน GF/C แล้วไปอบที่ 103 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักของแห้งบนกระดาษกรอง
6. นำ GF/C ไปอบต่อที่ 550 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่เหลือ

$$\text{มวลจุลินทรีย์ (กรัม)} = a - b$$

โดย a = น้ำหนักกระดาษกรองหลังผ่านการอบที่ 103 องศาเซลเซียส

b = น้ำหนักกระดาษกรองหลังผ่านการอบที่ 550 องศาเซลเซียส

c = น้ำหนักวัสดุตัวกลางที่อบแห้ง ที่ 120 องศาเซลเซียส

$$\text{ดังนั้น มวลจุลินทรีย์บนตัวกลาง} = (a-b)/c \quad \text{กรัม วัสดุ/กรัม วัสดุตัวกลาง}$$

3.7 การหาพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง

งานวิจัยนี้ เป็นการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ด้วยกระบวนการฟิล์มชีวภาพ ดังนั้นจึงใช้วัสดุตัวกลาง โดยผลิตจากพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็น hollow pellet (กระบอกกลวง) ตามผิวตัวกลางจะมีรูพรุนขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น จึงมีจุลินทรีย์มาเกาะและสัมผัสกับน้ำเสียมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7

การหาพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง โดยใช้เครื่อง Micromeritics ASAP 2000 (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี ด้วยวิธี BET Surface โดยนำวัสดุตัวกลางแผ่นน้ำหนักประมาณ 0.5 กรัม ไปอบที่ 120 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง ก่อนนำเข้าเครื่อง ASAP 2000 ซึ่งอาศัยหลักการไล่น้ำและก๊าซชนิดอื่นออกให้หมด แล้วจึงเติมก๊าซไนโตรเจนเพื่อเกาะติดที่ผิววัสดุตัวกลางแล้วชั่งน้ำหนักวัสดุตัวกลางอีกครั้งหลังออกจากเครื่อง ASAP 2000 และวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่เกาะผิววัสดุตัวกลางนั้น มาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลางโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรม Micromeritics ASAP 2000



รูปที่ 3.7 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

3.8 การวัดสี

นำน้ำตัวอย่างที่ต้องการวัดสีมากรองด้วยกระดาษกรอง GF/C จากนั้นนำเข้าเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สแกนวัดสีออกมาเป็นค่าแอมซอบแบนด์และค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิทแทนซ์ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร พื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าแอมซอบแบนซ์กับความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตรจะเป็นค่าสีหน่วยเอสยู ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิทแทนซ์ที่ความยาวคลื่นทุกๆ 10 นาโนเมตร ตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร จะนำมาคำนวณเป็นค่าสีหน่วยเอดีเอ็มไอ (วรญา ประทุมแก้ว, 2543)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ใช้ถังปฏิกริยาเอสบีบีอาร์ จำนวน 3 ถัง ต่อจากงานวิจัยของวรรณิ ประทุมแก้ว(2543) ลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอกตั้งได้อธิบายในแผนงานวิจัย เชื้อจุลินทรีย์นำ มาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนการเคหะบางนา ซึ่งเป็นระบบคลองวนเวียน(Oxidation Ditch) ในแต่ ละถังปฏิกริยามีรอบเวลาการทำงาน 1 วัฏจักรเท่ากับ 24 ชั่วโมง แบ่งเป็น เติมน้ำเสีย 30 นาที แอนแอรอบิก 18 ชั่วโมง แอโรบิก 5 ชั่วโมง และถ่ายน้ำทิ้ง 30 นาที เมื่อเริ่มต้นเดินระบบได้ใส่วัสดุ ตัวกลางในแต่ละถังสูง 60 เซนติเมตร และใส่เชื้อจุลินทรีย์ 1 ลิตรต่อถังปฏิกริยา โดยเติมสารอาหาร (น้ำตาล) มีซีไอดีเริ่มต้น 500 มก/ล ช่วงแรกต้องการให้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนมากขึ้นและเกาะติดกับ ตัวกลาง จึงเลี้ยงเป็นแอรอบิกทั้งหมด โดยเวลาเติมน้ำเสีย-ถ่ายน้ำทิ้ง 1 ชั่วโมง และแอรอบิกเท่ากับ 23 ชั่วโมง เมื่อสังเกตว่าจุลินทรีย์เริ่มเกาะติด (ประมาณ 2 สัปดาห์) จึงเปลี่ยนสารอาหารเป็นนม และโซเดียมอะซิเตท (ถังที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) รวมถึงปรับเวลาการเติมอากาศเหลือ 5 ชั่วโมง ตามแผนการทดลอง และเพิ่มซีไอดีจนได้ตามที่วางแผนไว้ของชุดการทดลองที่ 1 แล้วจึงเริ่มใส่สิรี แอทธิฟโมโนอะโซ(สีม่วง) โดยเริ่มที่ความเข้มข้น 10 มก/ล และค่อยๆเพิ่มสีไปเรื่อยๆ เมื่อระบบ สามารถลดสีลงได้

อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่ 1 มีปัญหาเกิดขึ้นหลายอย่างโดยเฉพาะการรั่วซึม ของน้ำบริเวณข้อต่อ และ วาล์ว เนื่องจากถังปฏิกริยาถูกใช้มาเป็นเวลานาน และได้แก้ปัญหาโดย ใช้กาว (Epoxy) อุดรอยรั่ว รวมถึงสายยางซิลิโคนของเครื่องสูบน้ำรีดสายแตกทำให้น้ำรั่วออกมา จึงต้องเปลี่ยนทุกๆ 1 เดือน พร้อมกับการปรับแก้อัตราการสูบน้ำเสียหมุนเวียนของเครื่องสูบน้ำรีด สาย

ในงานวิจัยนี้มีการทดลองทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง (รวมเป็น 9 การทดลอง) โดย ชุดการทดลองที่ 1 (1.1,1.2,1.3) ศึกษาผลของชนิดสารอาหารต่อประสิทธิภาพการลดสีรีแอทธิฟชนิดโม โนอะโซ(สีม่วง) ชุดการทดลองที่ 2 (2.1,2.2,2.3) ศึกษาผลของชนิดสารอาหารต่อประสิทธิภาพการลดสี รีแอทธิฟชนิดไดอะโซ(สีน้ำเงิน) ชุดการทดลองที่ 3 (3.1,3.2,3.3) ศึกษาผลความเข้มข้น ฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อประสิทธิภาพการลดสีไดอะโซ (โดยเลือกชนิดสารอาหารที่ให้ประสิทธิภาพ การลดสีที่ดีที่สุดซึ่งพิจารณาจากชุดการทดลองที่ 1และ2) โดยใช้ความเข้มข้นสิรีแอทธิฟเท่ากับ 100 มก/ล และใช้อัตราส่วนสารอาหารต่อสี(ในรูปซีไอดี) เท่ากับ 30 : 1 เท่ากันทุกชุดการทดลอง

ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด ประมาณ 10 เดือน โดยเริ่มการทดลองตั้งแต่เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2544 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 โดยให้เวลากับชุดการทดลองที่ 1 มากเพราะใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบให้จุลินทรีย์ได้เกาะติดตัวกลาง รวมถึงการปรับตัวให้ชินกับสรีระเอกทีฟและสารอาหารแต่ละชนิด ตลอดจนได้แก้ปัญหาการรั่วซึมของถังปฏิกิริยา ส่วนชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้ระยะเวลาทดลองสั้นลง เนื่องจากผู้วิจัยทำการทดลองได้ชำนาญมากขึ้น และจุลินทรีย์คุ้นเคยกับสารอาหารได้ดี ระบบจึงเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State) เร็วขึ้น เมื่อดำเนินการทดลองจนระบบเข้าสู่สถานะคงตัวแล้วทำการเก็บข้อมูลต่อ เพื่อหาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบและจึงทำการเก็บโพर्फิลตามเวลา หลังจากเก็บโพर्फิลเรียบร้อยแล้วได้ทดลองหามวลจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนตัวกลางโดยใช้ Ultrasonic probe และวัดพื้นที่ผิวตัวกลางโดยเครื่อง Micromeritics ASAP 2000 ด้วยวิธี BET Surface โดยต้องจองเวลาการใช้เครื่องจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเมื่อใช้ครั้งแรก (ปลายธันวาคม พ.ศ. 2544) เครื่องเสียระหว่างการวิเคราะห์ ทำให้ต้องจองการใช้เครื่องอีกครั้ง ในต้นเดือนมีนาคม พ.ศ. 2545

ตารางที่ 4.1 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

งานที่ดำเนินการ	พ.ศ. 2544							พ.ศ. 2545		
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
เริ่มเดินระบบ/เลี้ยงฟิล์มชีวภาพ	←→									
การทดลองที่ 1.1		←→								
การทดลองที่ 1.2		←→								
การทดลองที่ 1.3		←→								
การทดลองที่ 2.1					←→					
การทดลองที่ 2.2					←→					
การทดลองที่ 2.3					←→					
การทดลองที่ 3.1							←→			→
การทดลองที่ 3.2							←→			→
การทดลองที่ 3.3							←→			→



รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการเซลล์มีเดีย

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลชุดการทดลองที่ 1* (สี Remazol Violet 5R)

พารามิเตอร์	การทดลองที่ 1.1 (น้ำตาล)			การทดลองที่ 1.2 (นม)			การทดลองที่ 1.3 (โซเดียมอะซิเตท)			
	AOLR*** = 8.77E-07 Kg-COD/(d*m ²)			AOLR*** = 8.77E-07 Kg-COD/(d*m ²)			AOLR*** = 8.72E-07 Kg-COD/(d*m ²)			
	น้ำเข้า	แอมแอมโรบิก	แอมโรบิก	น้ำเข้า	แอมแอมโรบิก	แอมโรบิก	น้ำเข้า	แอมแอมโรบิก	แอมโรบิก	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Average	-	28.0	29.3	-	28.0	29.3	-	28.0	29.4
n = 10	SD.		0.3	0.4		0.3	0.4		0.3	0.4
ดีไอ(มก/ล)	Average	-	0.14	5.36	-	0.13	4.02	-	0.14	5.82
n = 10	SD.		0.04	0.15		0.03	0.13		0.04	0.11
ไออาร์พี(มิลลิโวลท์)	Average	-	-246	54	-	-323	12	-	-300	51
n = 10	SD.		14	9		16	3		26	5
พีเอช	Average	7.75	6.77	8.36	7.62	7.17	8.10	7.66	8.42	8.74
n = 10	SD.	0.14	0.18	0.08	0.10	0.04	0.10	0.13	0.08	0.06
ซีไอดีกรอง (มก/ล)	Average	1449**	180	53	1449**	237	81	1440**	639	50
n = 10	SD.	21	6	3	20	16	2	11	31	2
ทีเคเอ็นกรอง (มก/ล)	Average	47.8**	21.3	3.8	87.5**	77.0	66.5	47.1**	36.3	18.2
n = 10	SD.	1.0	0.8	0.2	1.0	1.2	0.9	0.9	0.8	0.4
ฟอสฟอรัสกรอง (มก/ล)	Average	18.0**	15.3	11.5	26.8**	24.4	14.3	18.0**	11.5	8.5
n = 10	SD.	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ดี(เฮลยู)	Average	130.70	30.24	18.77	192.07	32.21	20.25	132.11	30.91	14.10
n = 10	SD.	1.32	0.83	0.36	2.49	1.31	0.62	0.88	0.74	0.47
ดี (เอดีเอ็มไอ)	Average	4521.92	350.47	244.19	4290.86	436.40	311.38	4519.82	350.09	162.95
n = 10	SD.	48.07	12.48	15.24	51.31	19.01	13.35	51.38	20.55	10.47

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว

** ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

*** AOLR = Area Organic Loading Rate

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลการทดลองที่ 2* (สี Remazol Black B)

พารามิเตอร์		การทดลองที่ 2.1 (น้ำตาล)			การทดลองที่ 2.2 (นม)			การทดลองที่ 2.3 (โซเดียมอะซิเตท)		
		AOLR*** = 1.55E-06 Kg-COD/(d·m ²)			AOLR*** = 1.54E-06 Kg-COD/(d·m ²)			AOLR*** = 1.55E-06 Kg-COD/(d·m ²)		
		น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก	น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก	น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Average	-	28.5	29.7	-	28.5	29.7	-	28.5	29.7
	n = 10 SD.		0.6	0.6		0.7	0.6		0.6	0.6
ดีไอ(มก/ล)	Average	-	0.15	3.03	-	0.13	2.58	-	0.12	3.45
	n = 10 SD.		0.05	0.08		0.03	0.07		0.03	0.06
ไฮดรอฟิลิก(มิลลิโวลท์)	Average	-	-341	33	-	-377	22	-	-354	26
	n = 10 SD.		3	2		7	2		9	1
พีเอช	Average	7.84	6.50	8.52	7.69	7.16	8.20	7.69	8.39	8.66
	n = 10 SD.	0.06	0.07	0.09	0.08	0.03	0.04	0.11	0.07	0.05
ซีไอดีกรอง (มก/ล)	Average	2565**	852	133	2542**	651	145	2553**	1638	452
	n = 10 SD.	16	12	5	49	28	4	12	40	10
ทีเคเอ็นกรอง (มก/ล)	Average	85.4**	33.6	6.8	174.7**	143.7	97.1	86.2**	45.1	11.7
	n = 10 SD.	2.0	1.0	0.3	2.8	1.7	1.7	1.7	1.3	0.3
ฟอสฟอรัสกรอง (มก/ล)	Average	17.6**	12.8	1.1	26.6**	13.5	6.6	17.6**	4.0	1.1
	n = 10 SD.	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1
ดี(เฮตยู)	Average	465.96	110.07	86.22	482.60	90.33	78.38	467.98	123.59	74.88
	n = 10 SD.	4.92	2.85	1.16	5.09	8.23	0.72	4.30	1.50	1.11
ดี(เฮตเอ็มไอ)	Average	7954.00	1832.58	1372.49	7669.29	1173.62	800.21	8107.42	1746.75	824.46
	n = 10 SD.	148.37	40.49	16.23	143.90	53.09	27.89	20.47	26.35	17.23

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว

** ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

*** AOLR = Area Organic Loading Rate

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยข้อมูลการทดลองที่ 3* (สี Remazol Black B และ โซโซเดียมอะซิเตท เท่ากันทุกการทดลองแต่แปรผันค่า อัตราส่วน COD:P)

พารามิเตอร์		การทดลองที่ 3.1 COD:P = 150:4			การทดลองที่ 3.2 COD:P = 150:8			การทดลองที่ 3.3 COD:P = 150:10		
		AOLR*** = 1.56E-06 Kg-COD/(d*m ³)			AOLR*** = 1.56E-06 Kg-COD/(d*m ³)			AOLR*** = 1.56E-06 Kg-COD/(d*m ³)		
		น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก	น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก	น้ำเข้า	แอนแอโรบิก	แอโรบิก
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Average	-	27.4	28.8	-	27.3	28.8	-	27.3	28.8
	SD.		0.2	0.1		0.2	0.2		0.2	0.2
ดีไอ(มก/ล)	Average	-	0.12	3.31	-	0.11	3.32	-	0.10	3.30
	SD.		0.06	0.11		0.05	0.13		0.05	0.13
ไออาร์พี(มิลลิโวลท์)	Average	-	-356	25	-	-357	25	-	-357	25
	SD.		8	4		7	2		8	3
พีเอช	Average	7.58	8.38	8.63	7.58	8.39	8.63	7.58	8.38	8.64
	SD.	0.10	0.07	0.04	0.10	0.07	0.04	0.10	0.08	0.04
ซีไอดีกรอง (มก/ล)	Average	2581**	1623	421	2581**	1624	423	2581**	1617	432
	SD.	27	17	8	27	17	11	27	19	7
ทีเคเอ็นกรอง (มก/ล)	Average	86.3**	45.4	11.9	86.3**	45.3	12.0	86.3**	44.8	11.7
	SD.	1.2	0.6	0.3	1.2	0.5	0.4	1.2	0.6	0.3
ฟอสฟอรัสกรอง (มก/ล)	Average	69.4**	48.4	34.0	139.9**	104.5	90.1	170.2**	127.5	108.3
	SD.	0.9	0.8	0.5	1.3	1.1	0.9	1.4	1.4	1.2
สี(เฮตยู)	Average	471.28	105.56	71.01	471.28	94.38	63.85	471.28	85.20	45.03
	SD.	6.97	1.28	1.40	6.97	1.20	1.20	6.97	1.86	1.01
สี (เฮดีเอ็มไอ)	Average	8096.10	1566.28	811.31	8096.10	1255.79	752.79	8096.10	1144.87	365.59
	SD.	47.50	10.69	3.84	47.50	28.87	18.47	47.50	35.10	16.18

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว

** ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

*** AOLR = Area Organic Loading Rate

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 พารามิเตอร์ทั่วไป

ตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของแต่ละการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

4.1.1 อุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองในช่วงเดือน พฤษภาคม พ.ศ 2544 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 ซึ่งผลของอุณหภูมิจะแปรผันตามฤดูกาลหรืออากาศภายนอกดังปฏิกิริยาจากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 อุณหภูมิในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 27.4-29.4 องศาเซลเซียส ส่วนช่วงปลายสภาวะแอโรบิกอุณหภูมิจะสูงขึ้นเพราะเป็นช่วงเวลาที่บ่ายมีค่าในช่วง 28.2-30.4 องศาเซลเซียส ในการทดลอง สภาวะแอนแอโรบิก(18ชั่วโมง)จะเริ่มตั้งแต่ 4.00 pm ถึง 10.00 am ของวันรุ่งขึ้น และสภาวะแอโรบิก(5ชั่วโมง) จะเริ่ม ตั้งแต่ 10.00 am-3.00 pm. แต่บางวันที่ฝนตกอุณหภูมิทั้ง 2 สภาวะอาจต่างกันเพียง 0.4 องศาเซลเซียส เท่านั้น ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ดำเนินการในช่วง ธ.ค.-ก.พ. อากาศภายนอกค่อนข้างต่ำ อุณหภูมิช่วงปลายแอนแอโรบิกมีค่าในช่วง 23.0-27.6 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะวัฏจักรที่ 20-27 มีอากาศเย็นติดต่อกันหลายวัน อุณหภูมิอยู่ในช่วง 23.0-24.1 องศาเซลเซียสเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิช่วงปลายสภาวะแอโรบิกมีค่า 25.1-29.1 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงอุณหภูมิของชุดการทดลองต่างๆ

4.1.2 ออกซิเจนละลายน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทำงานของระบบเป็นสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก ค่าออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวบ่งชี้สำคัญว่าระบบอยู่ในสภาวะใด จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 แสดงค่าออกซิเจนละลายน้ำช่วงปลายแอนแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่าระหว่าง 0.05-0.25 มก/ล และพบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าต่ำสุดสุดเพียง 0.05 มก/ล เนื่องจากขีดจำกัดความละลายของเครื่องมือวัด ส่วนช่วงปลายสภาวะแอโรบิกในสถานะคงตัว ค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าระหว่าง 2.45-6.00 มก/ล โดยค่าที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารอาหารและซีโอดีของสารอาหาร โดยสารอาหารชนิดเดียวกันถ้าซีโอดีมากกว่าก็จะใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายมากกว่าทำให้มีค่า

ออกซิเจนละลายน้ำลดลง โดยชุดการทดลองที่ 1 (น้ำตาล,นม,ไซเตียมอะซิเตท) มีค่าออกซิเจนละลายในช่วง 5.15-5.6 3.75-4.25 และ 5.6-6.0 มก/ล ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่า 2.9-3.15 2.45-2.7 และ 3.35-3.55 มก/ล ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ใช้ ไซเตียมอะซิเตทในปริมาณเท่ากับการทดลองที่ 2.3 และมีค่าออกซิเจนละลายช่วงปลายแอโรบิกเท่ากับ 3.1-3.55 มก/ล แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อค่าออกซิเจนละลายน้ำ จากการทดลองเก็บโพร์ไฟล์ตามรูปที่ 4.8 เมื่อเริ่มวัฏจักรการทำงาน ระบบเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิกค่าออกซิเจนละลายจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยภายใน 30 นาทีแรก จะมีค่าลดเหลือ 0.05-0.15 มก/ล และในช่วงเริ่มแอโรบิก ค่าออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 1.5-2.0 มก/ล ภายใน 30 นาที

4.1.3 ไออาร์พี

ไออาร์พีเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก ร่วมกับค่าออกซิเจนละลายน้ำ ได้เช่นกัน โดยไออาร์พีเป็นค่าที่แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างสารรีดอกซ์กับสารให้อิเล็กตรอนในระบบ หรือแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าในระบบ ค่าไออาร์พีเป็นลบแสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะแอนแอโรบิก แต่ถ้าไออาร์พีมีค่าบวกระบบจะอยู่ในสภาวะแอโรบิก จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 แสดงไออาร์พีของแต่ละชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1 แต่ละการทดลองใช้สารอาหารที่ต่างกัน คือ น้ำตาล นม และไซเตียมอะซิเตท ซึ่งจะให้ค่าไออาร์พีที่ต่างกัน โดยช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า -215 ถึง -268 -298 ถึง -351 และ -236 ถึง -336 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในช่วงปลายสภาวะแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า 40 ถึง 69 18 ถึง 26 และ 43 ถึง 61 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 ยังคงใช้สารอาหารเหมือนเดิม แต่เพิ่มค่าซีไอดี โดย ช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า -337 ถึง -348 -365 ถึง -387 และ -330 ถึง -361 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และ ในช่วงปลายสภาวะแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า 29 ถึง 36 8 ถึง 17 และ 24 ถึง 28 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ใช้ไซเตียมอะซิเตทเหมือนกันทั้ง 3 การทดลอง (3.1-3.3) และให้ค่าไออาร์พีใกล้เคียงกัน โดยช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า -341 ถึง -374 มิลลิโวลต์ ในช่วงปลายสภาวะแอโรบิกในสถานะคงตัว มีค่า 19 ถึง 30 มิลลิโวลต์

จากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าชนิดของสารอาหารและซีไอดีสารอาหารมีผลกระทบต่อค่าไออาร์พี (เช่นเดียวกับค่าออกซิเจนละลายน้ำ) โดยสารอาหารที่ให้ค่าไออาร์พีน้อยสุดไปมากสุดในช่วงแอนแอโรบิก คือ นม โซเดียมอะซิเตท และน้ำตาล ตามลำดับ และในช่วงแอโรบิก นมจะมีค่าไออาร์พีน้อยที่สุด ส่วนน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตท มีค่าไออาร์พีใกล้เคียงกันเมื่อค่าซีไอดีสูงขึ้น(ชุดการทดลองที่2) ช่วงแอนแอโรบิกไออาร์พีมีค่าติดลบมากขึ้นทั้ง 3 การทดลอง(2.1-2.3) และช่วงแอโรบิกค่าไออาร์พีมีค่าบวกลดลงเช่นกัน ชุดการทดลองที่ 3 ไออาร์พีมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.3 แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อค่าไออาร์พี รูปที่ 4.12 แสดงโพรไฟล์ของค่าไออาร์พี การเปลี่ยนจากสภาวะแอนแอโรบิกเป็นแอโรบิก พบว่าต้องใช้เวลากว่า 1 ชั่วโมง ค่าไออาร์พีจึงเปลี่ยนจากลบเป็นบวก เนื่องจากในสภาวะแอนแอโรบิกมีค่าไออาร์พีเป็นลบมากๆ

4.1.4 พีเอช

รูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงค่าพีเอชของชุดการทดลองต่างๆ โดยชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีการใช้สารอาหารต่างกัน 3 ชนิดซึ่งมีผลกระทบต่อพีเอชทั้งช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกและปลายสภาวะแอโรบิกต่างกัน โดยช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก ทั้งน้ำตาลและนม ทำให้พีเอชต่ำลง แต่โซเดียมอะซิเตทกลับทำให้พีเอชสูงขึ้นกว่าน้ำเสียเข้า แต่ในช่วงปลายสภาวะแอโรบิก สารอาหารทั้ง 3 ให้ค่าพีเอชที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียเข้าและช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก สาเหตุที่โซเดียมอะซิเตททำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นในช่วงแอนแอโรบิกเพราะโซเดียมอะซิเตทที่เติมลงไปเกิดการแตกตัวดังนี้

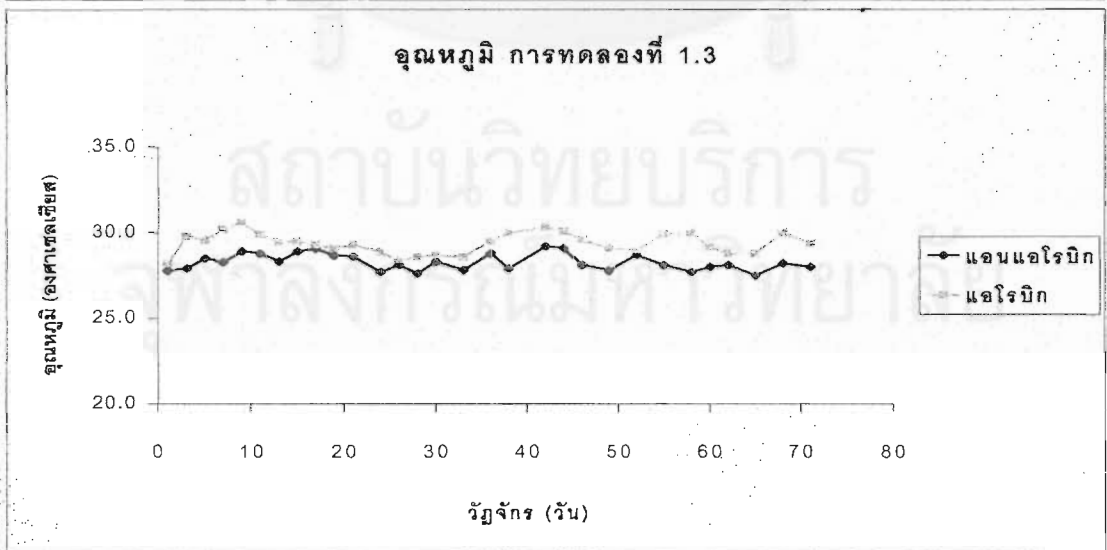
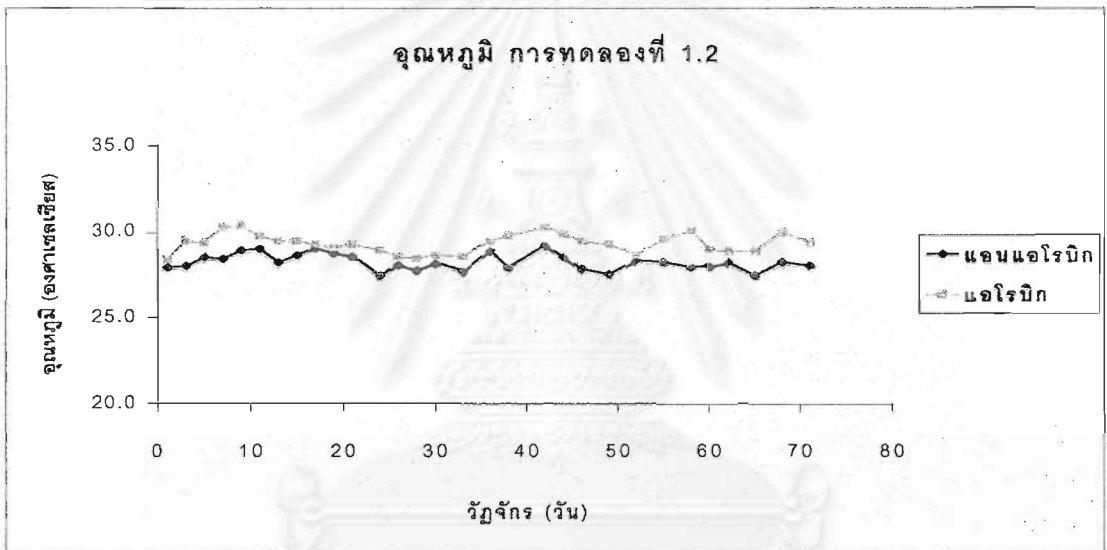
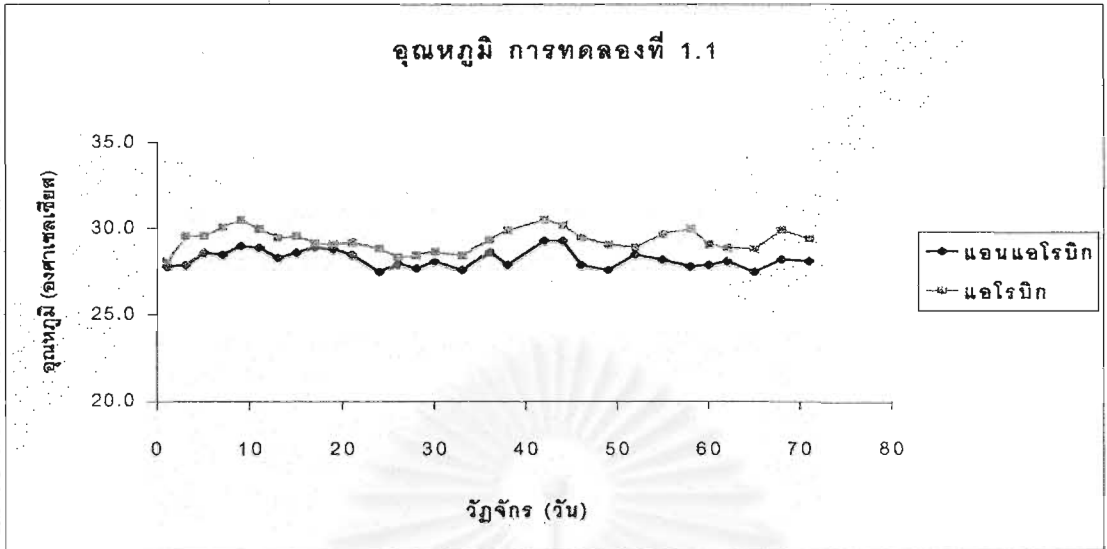


ดังนั้นเมื่อมีจุลินทรีย์ใช้กรดอะซิติกที่เกิดขึ้น ก็ทำให้ปฏิกิริยาเคลื่อนไปทางด้านขวาเพื่อเข้าสู่สมดุล ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนมากขึ้น ยังผลให้พีเอชในระบบสูงขึ้น

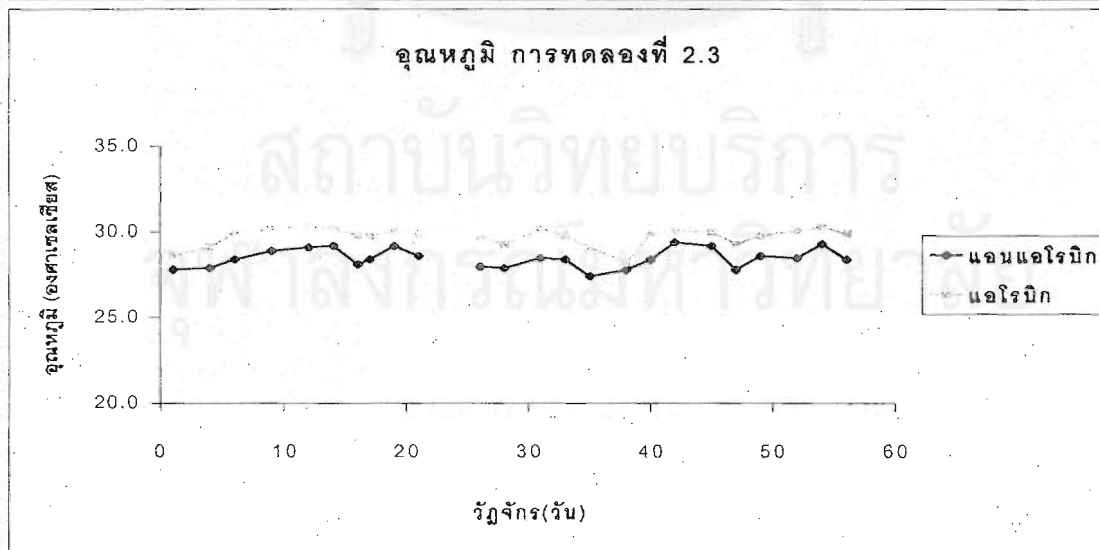
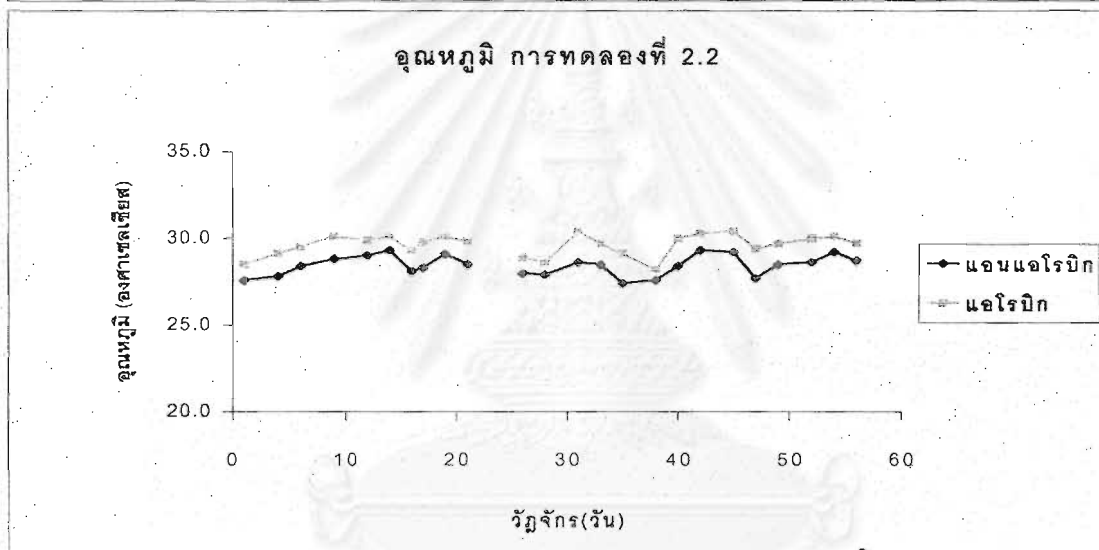
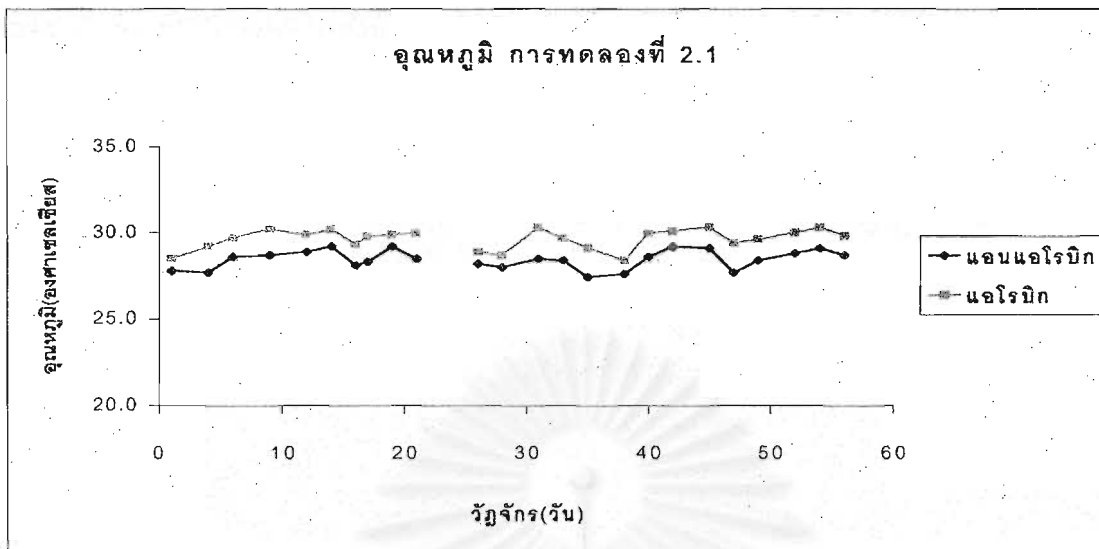
ชุดการทดลองที่ 1 ค่าพีเอชในช่วงปลายแอนแอโรบิกในสถานะคงตัวเรียงจากค่าน้อยสุดไปมากที่สุด คือ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท โดยมีค่า 6.47 ถึง 7.00 7.00 ถึง 7.23 และ 8.30 ถึง 8.55 ตามลำดับ น้ำเสียเข้าของสารอาหารทั้ง 3 ชนิดมีค่าพีเอชระหว่าง 7.45-7.92 สารอาหารน้ำตาลและนม แตกต่างจากโซเดียมอะซิเตท คือต้องผ่านกระบวนการหมักเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids, VFAs) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก ก่อนที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนจะนำไปใช้ได้ ดังนั้นกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พีเอชลดลง รวมถึงสถานะแอนแอโรบิกมีไขมันเกิดขึ้นที่ผิวหน้า ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นละลายอยู่ในน้ำ ทำให้พีเอชลดลง เมื่อระบบเข้าสู่สถานะแอนโรบิก การเติมอากาศทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกไล่จากน้ำสู่บรรยากาศ ทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่าพีเอชช่วงปลายสถานะแอนโรบิกในสถานะคงตัว สำหรับน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท มีค่า 8.27 ถึง 8.53 7.86 ถึง 8.23 และ 8.66 ถึง 8.85 ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 2 ซีโอดีของสารอาหารมีค่ามากขึ้นทำให้การผลิตกรดไขมันระเหยมากขึ้น แต่ค่าพีเอชในช่วงปลายสถานะแอนแอโรบิกมีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 1 เพราะมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต(สภาพต่าง) มากขึ้นตามสัดส่วนซีโอดีที่เพิ่ม จึงช่วยควบคุมพีเอชไม่ให้ลดต่ำลงมาก ส่วนช่วงปลายสถานะแอนโรบิกพีเอชมีค่าไม่ต่างจากชุดการทดลองที่ 1 มากนัก

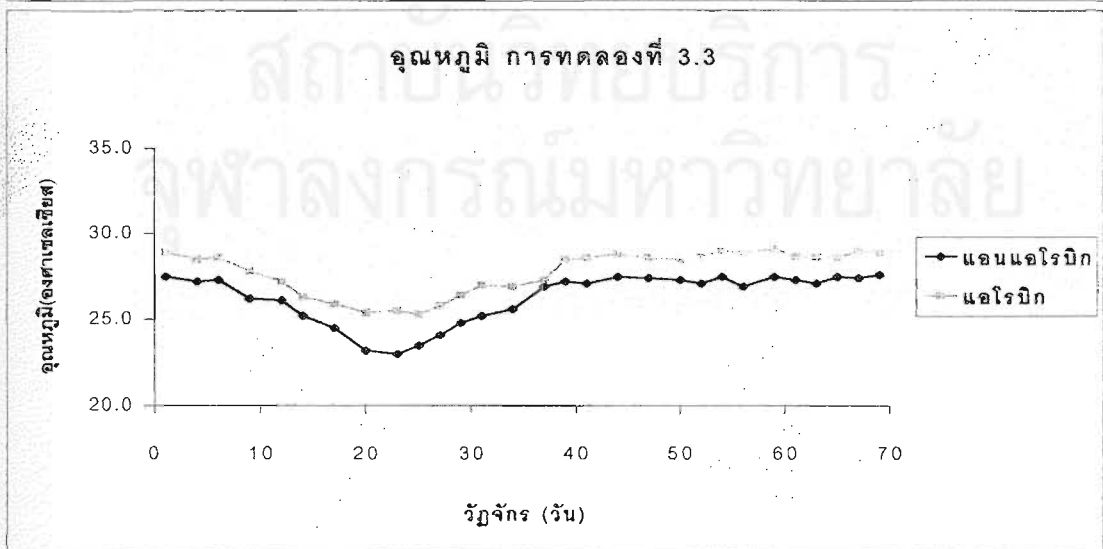
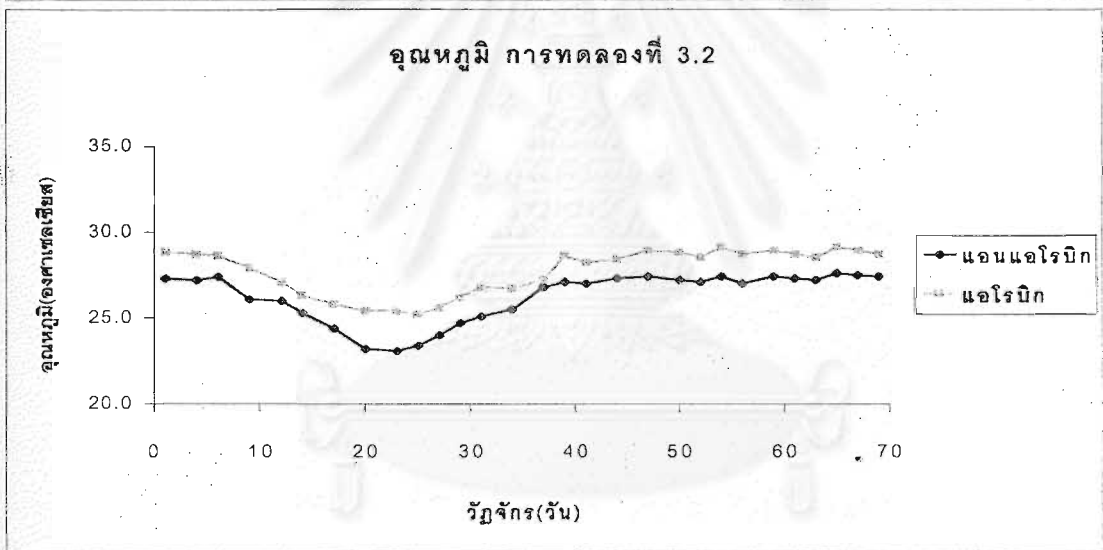
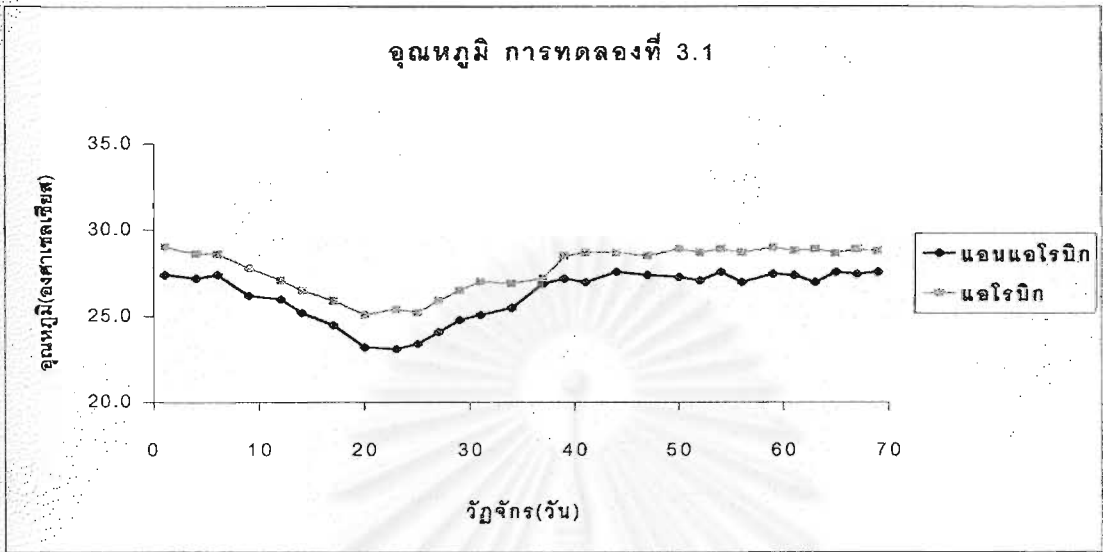
ส่วนชุดการทดลองที่ 3 มีแนวโน้มพีเอชคล้ายกับการทดลองที่ 2.3 แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อค่าพีเอช จากรูปที่ 4.16 แสดงโพรไฟล์ของพีเอชทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าในช่วงแอนแอโรบิกพีเอชลดลง(น้ำตาลกับนม) อย่างรวดเร็วจนมีค่าค่อนข้างคงที่ภายในเวลา 3 ชั่วโมง ส่วนโซเดียมอะซิเตททำให้พีเอชเพิ่มขึ้นเร็วและมีค่าค่อนข้างคงที่ภายในเวลา 2 ชั่วโมง และช่วงแอโรบิกของทุกชุดการทดลองมีการเติมอากาศทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นจนเกิน 8 ในเวลาไม่ถึง 30 นาที



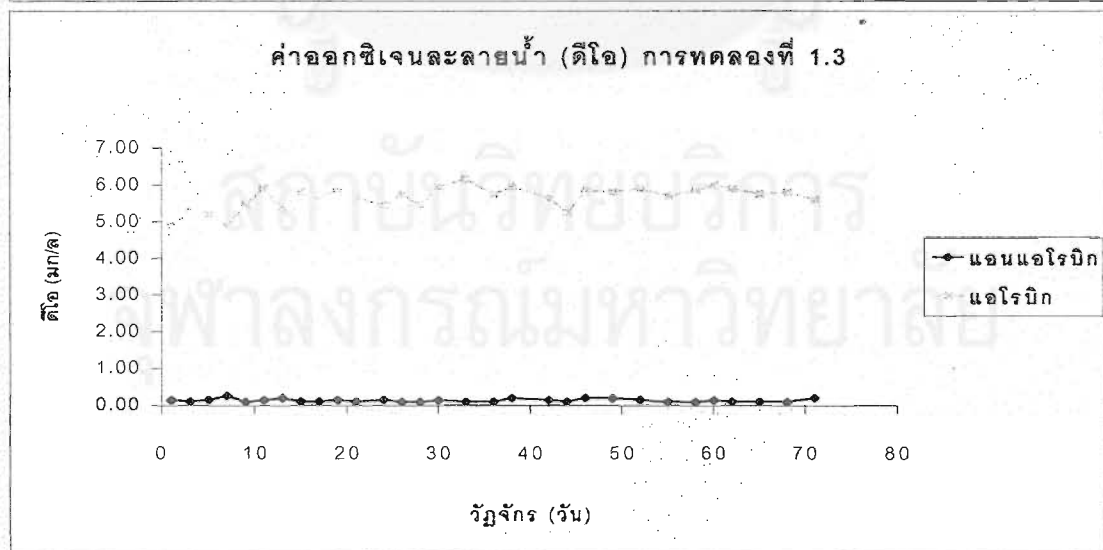
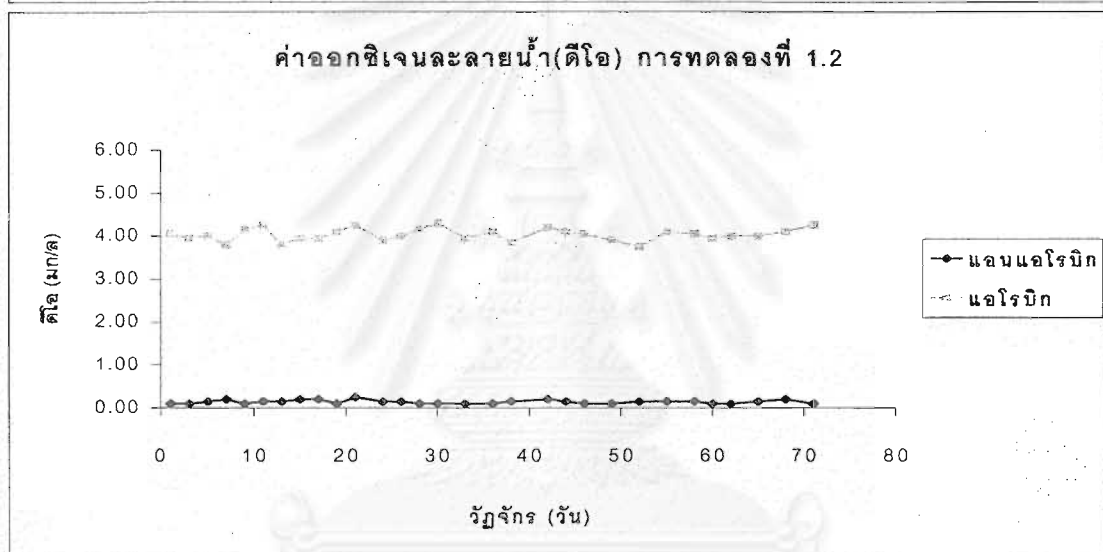
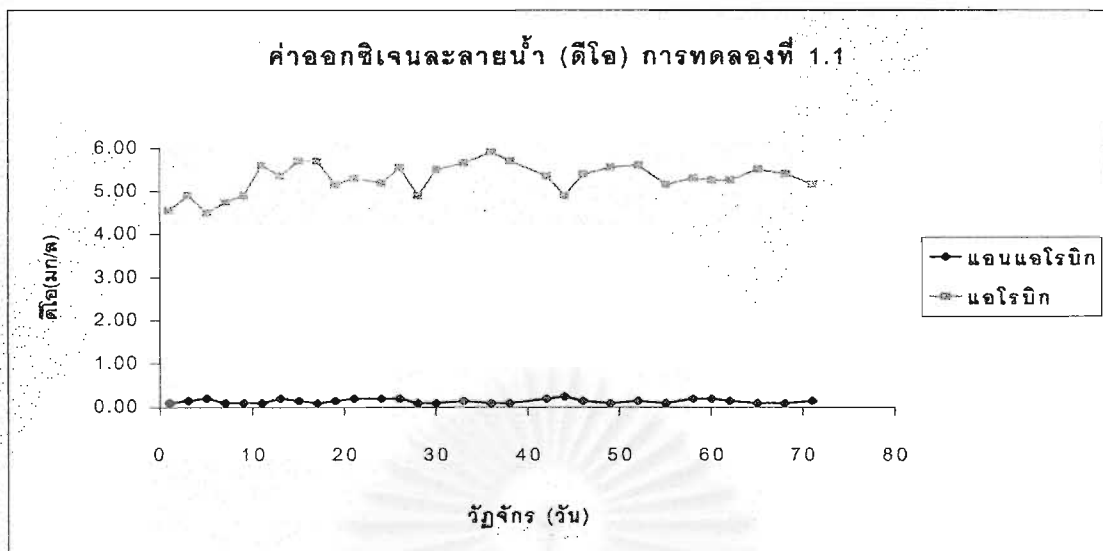
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 1



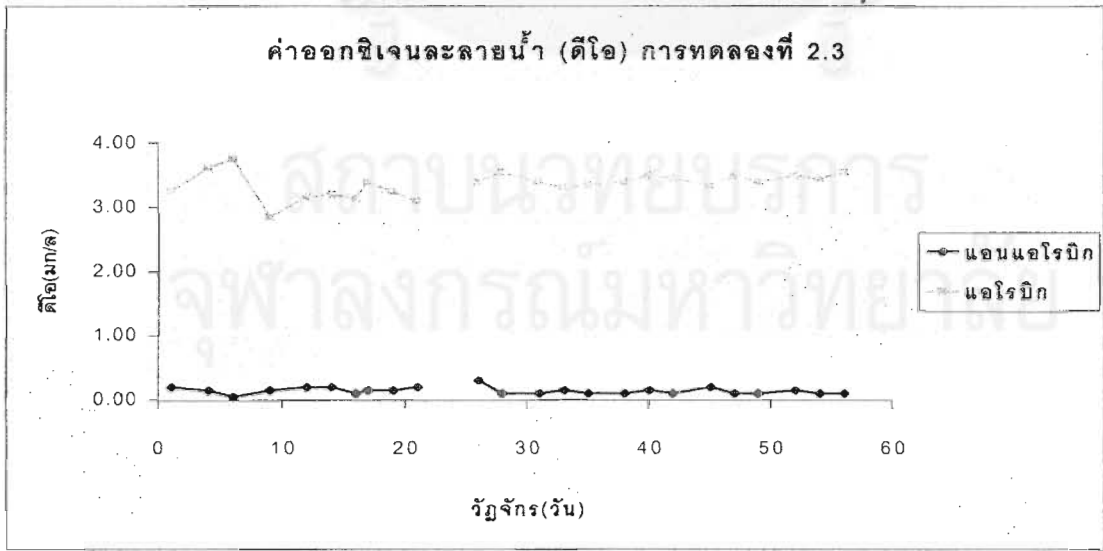
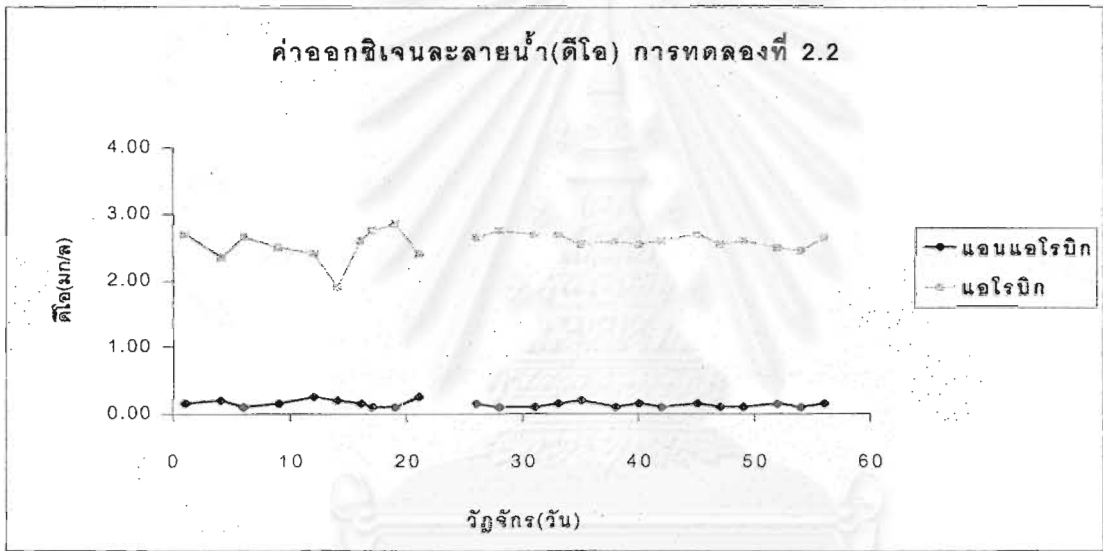
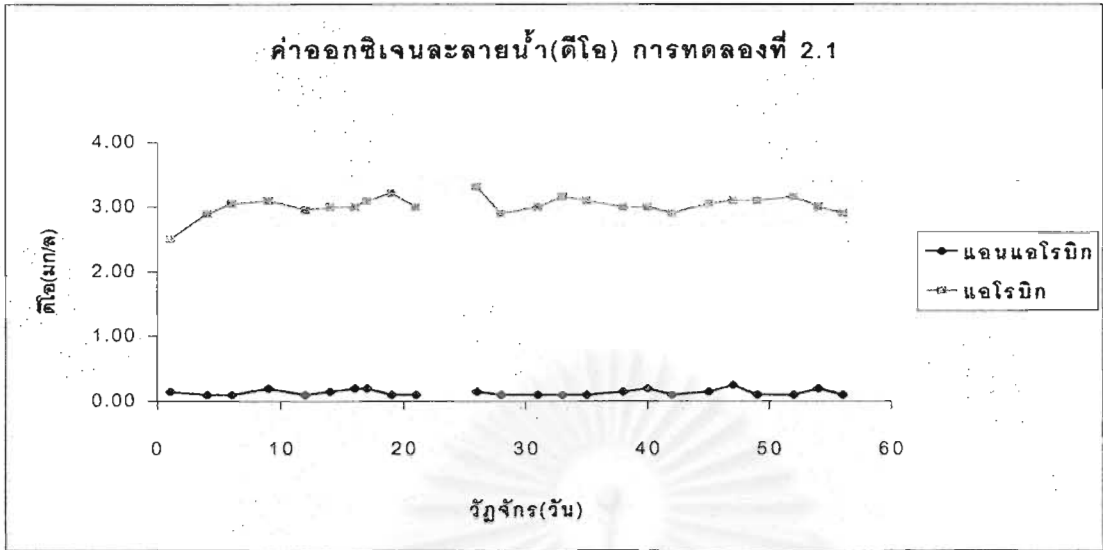
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 2



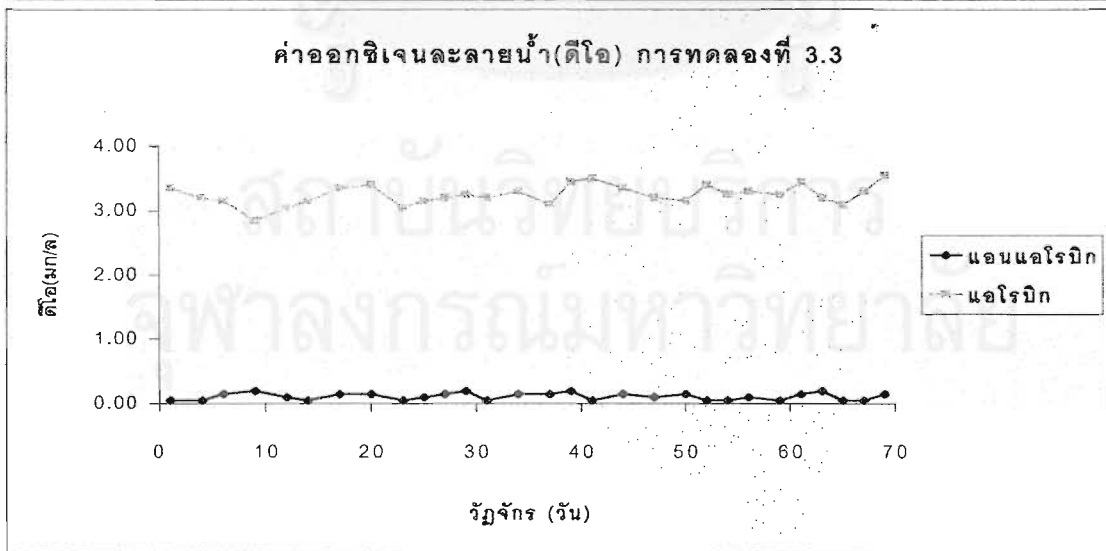
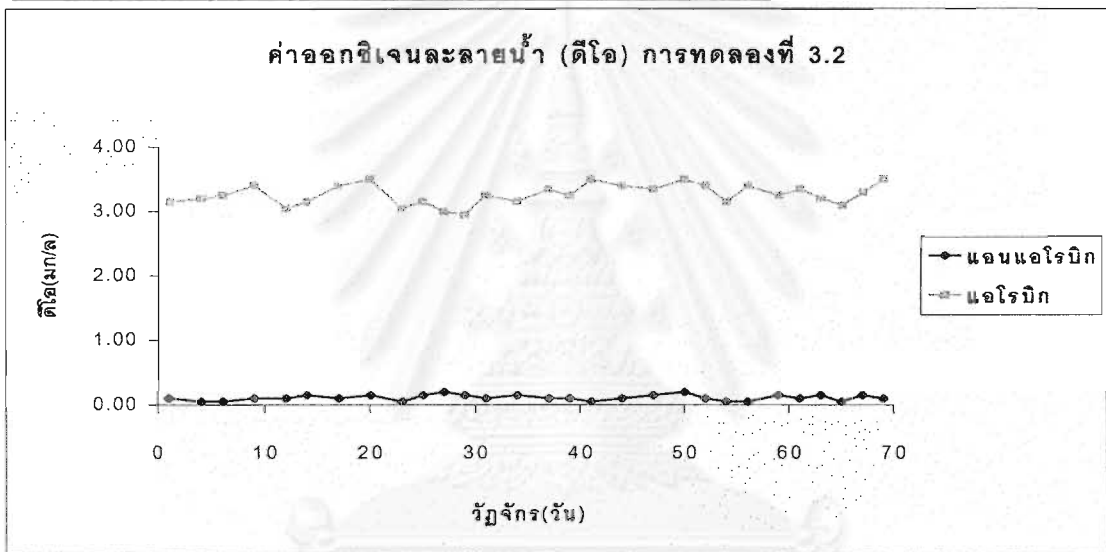
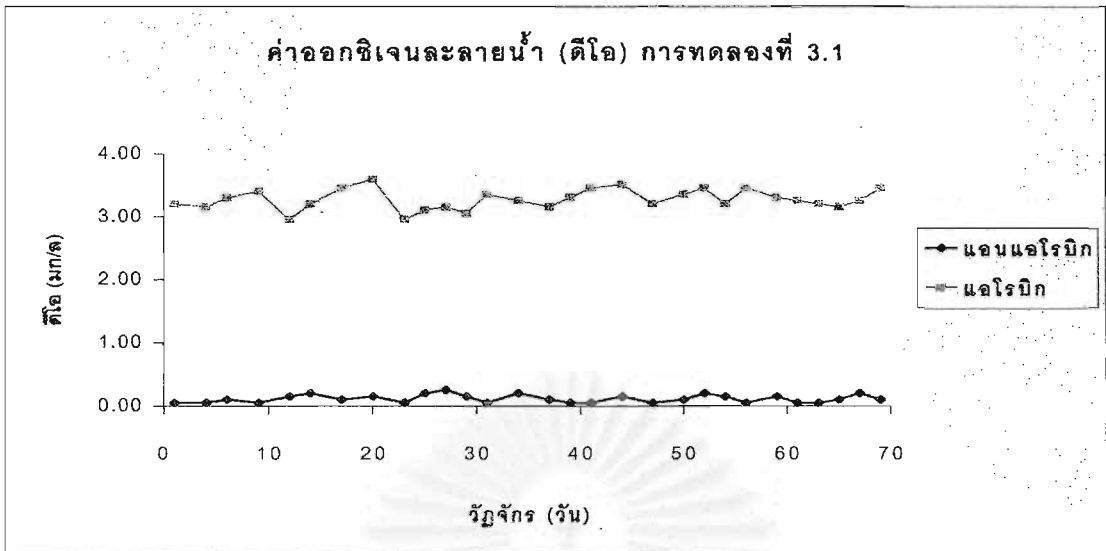
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.5 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 1

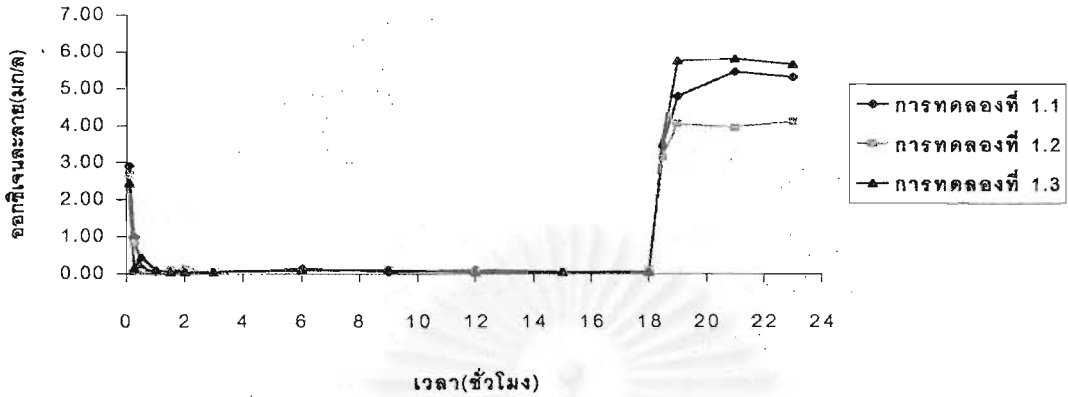


รูปที่ 4.6 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 2

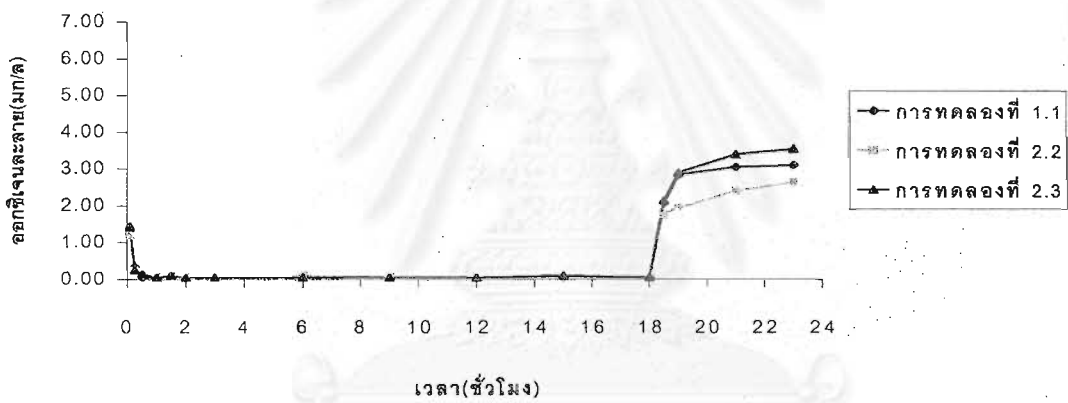


รูปที่ 4.7 ออกซิเจนละลายของชุดการทดลองที่ 3

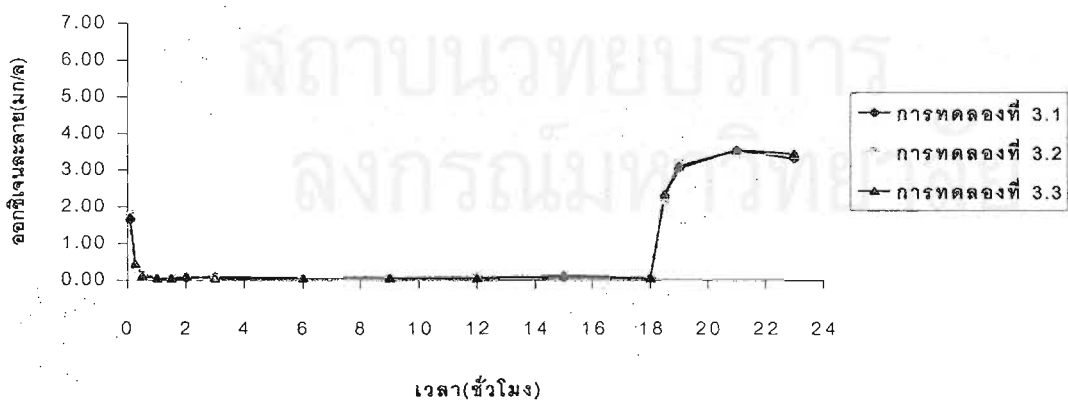
โพรไฟล์ออกซิเจนละลายการทดลองที่ 1



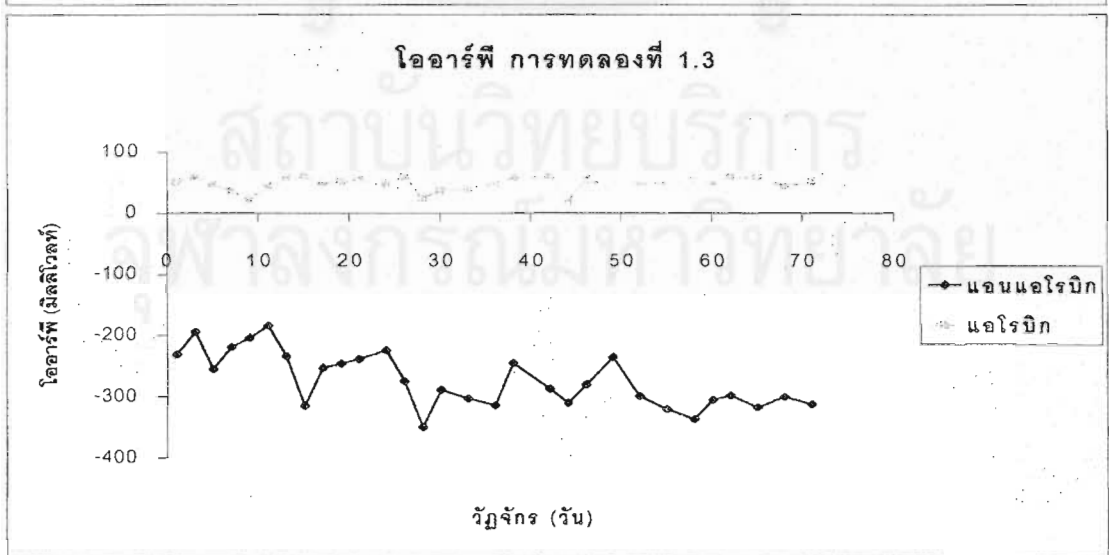
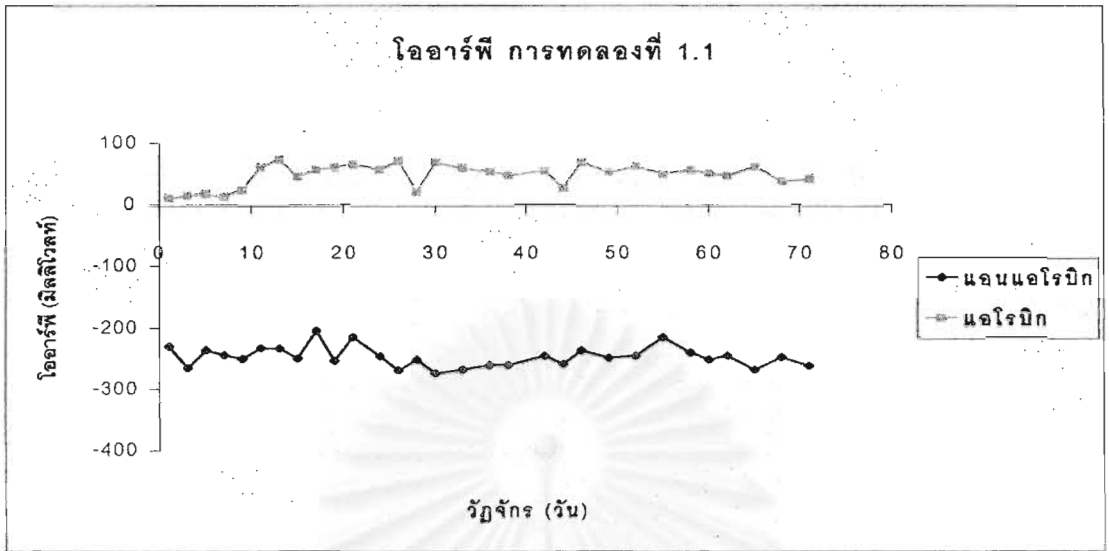
โพรไฟล์ออกซิเจนละลายการทดลองที่ 2



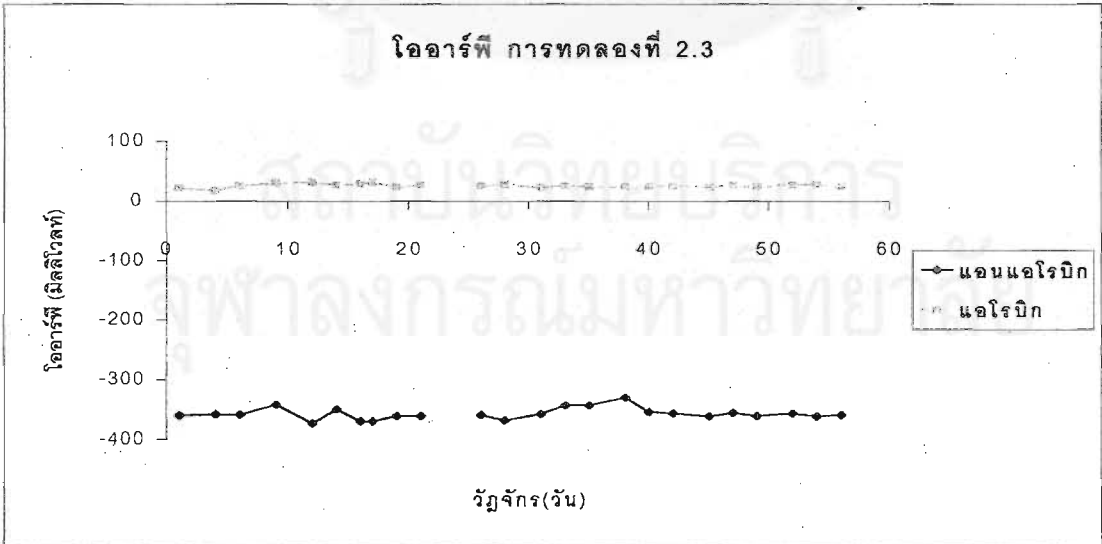
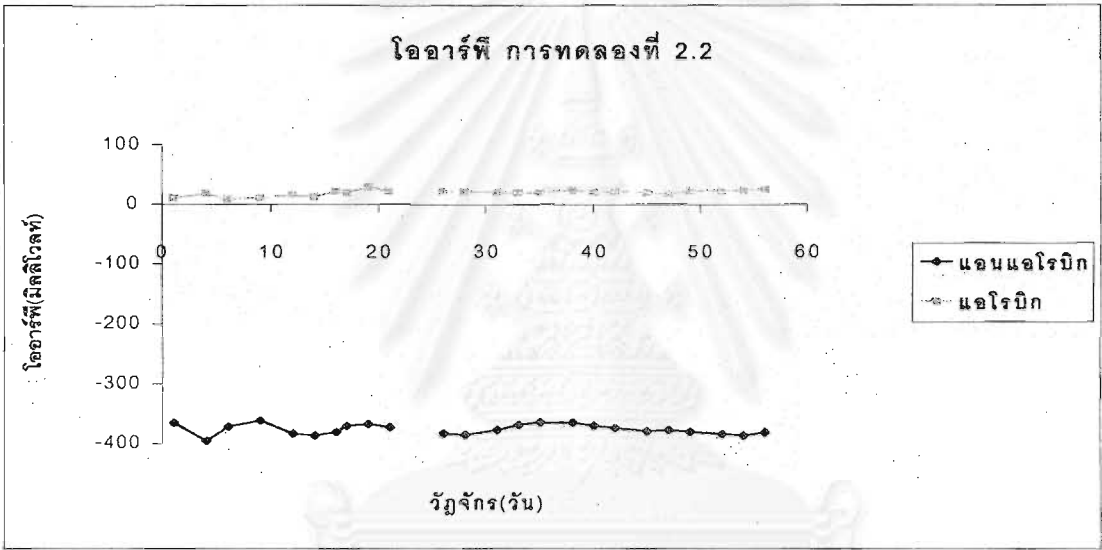
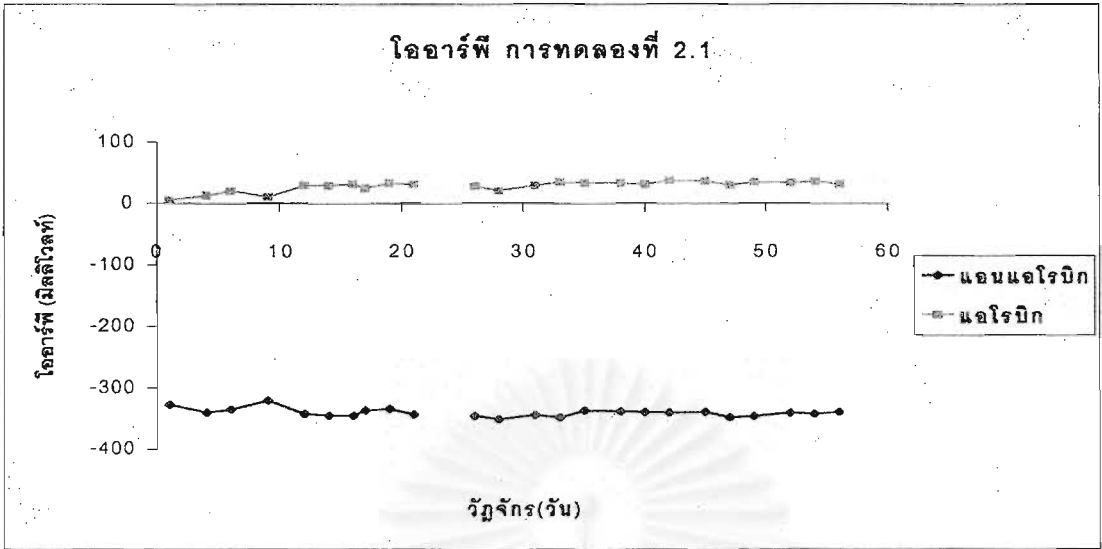
โพรไฟล์ออกซิเจนละลาย การทดลองที่ 3



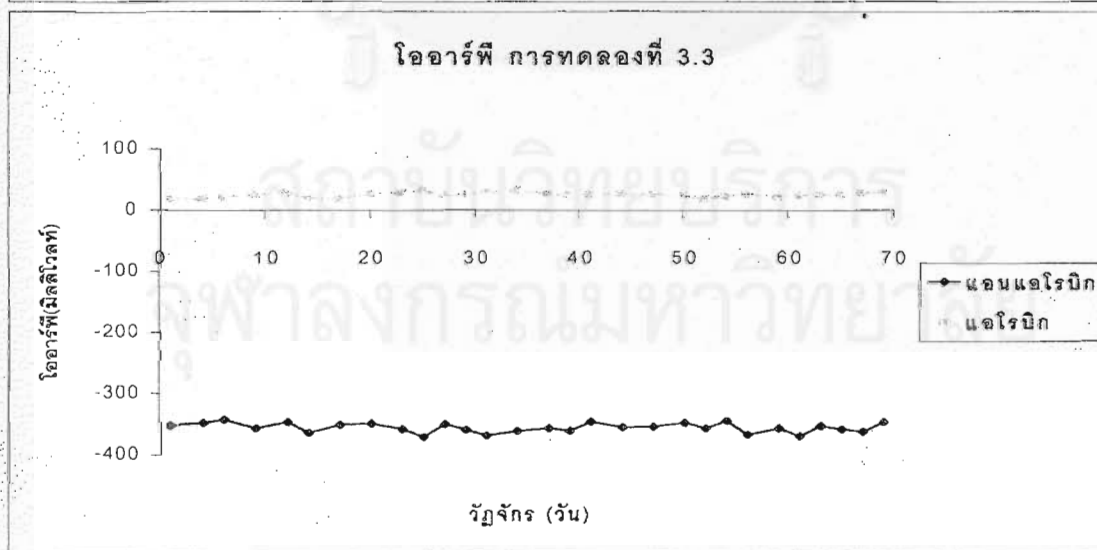
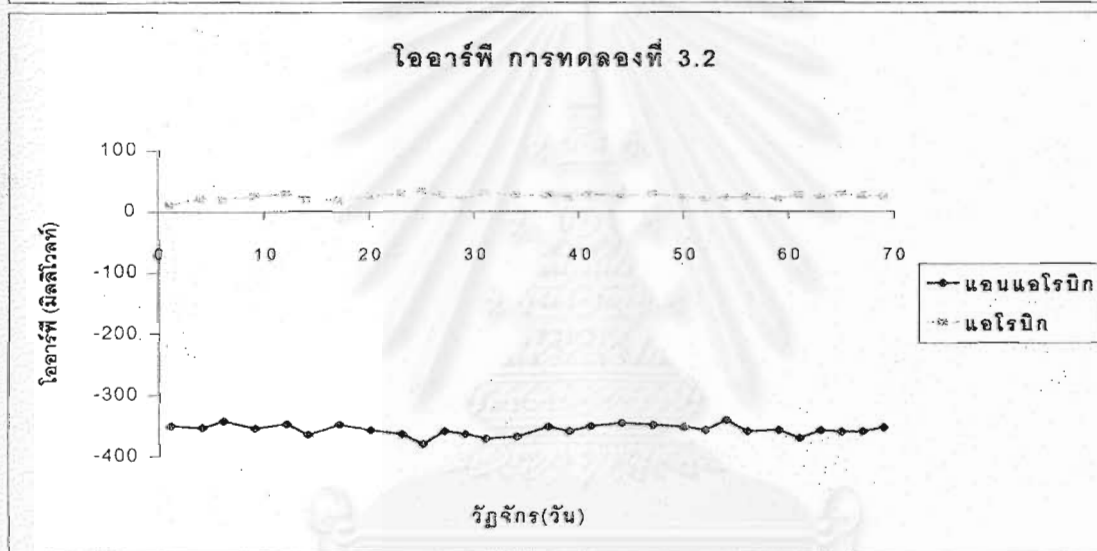
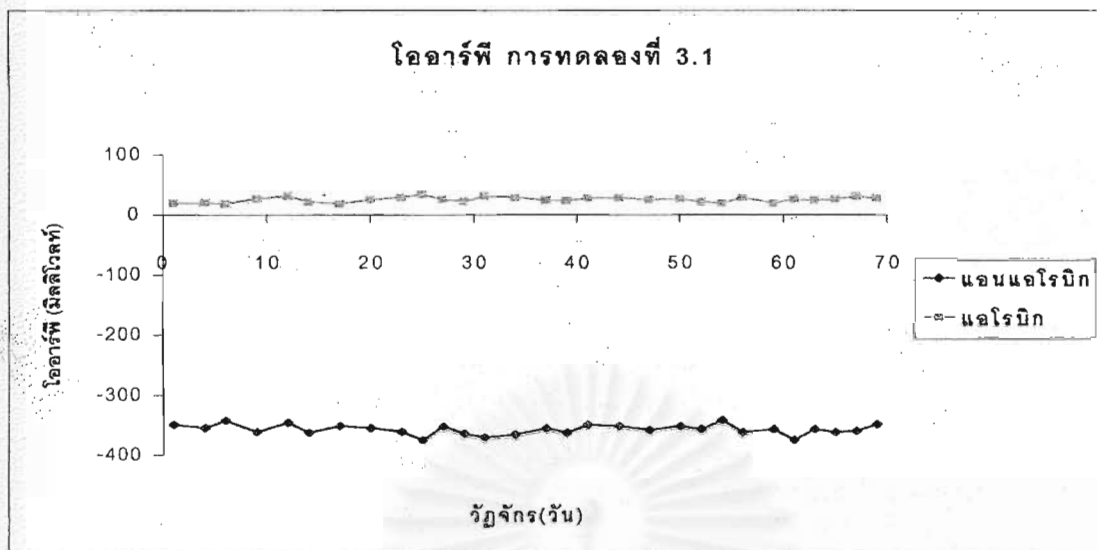
รูปที่ 4.8 โพรไฟล์ออกซิเจนละลายของแต่ละการทดลอง



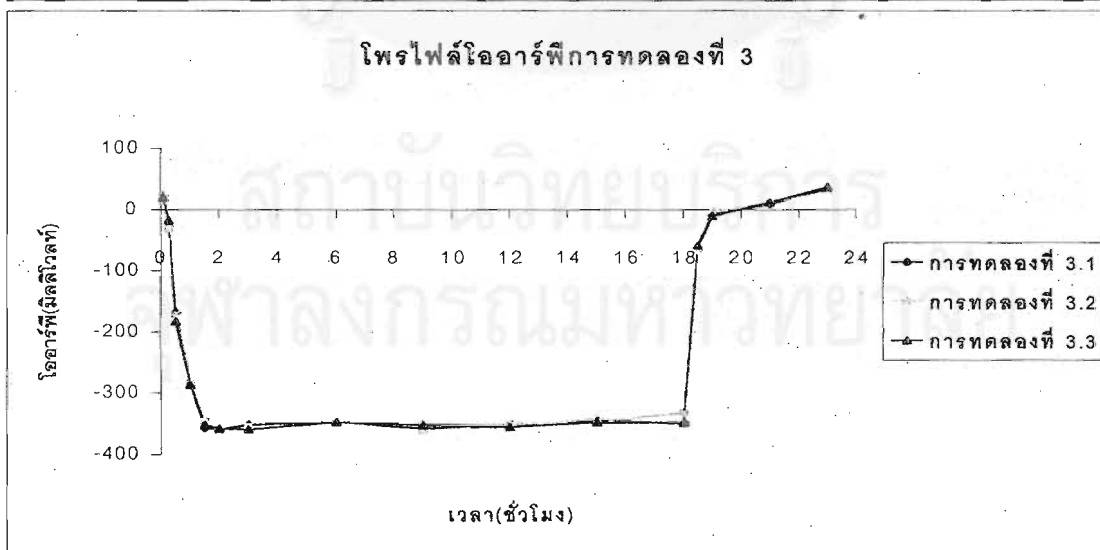
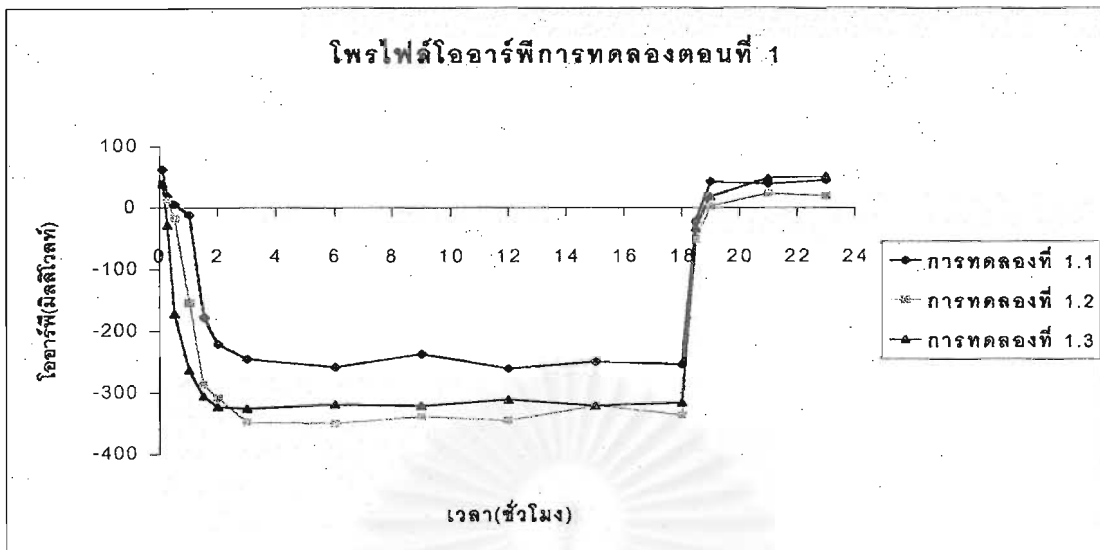
รูปที่ 4.9 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 1



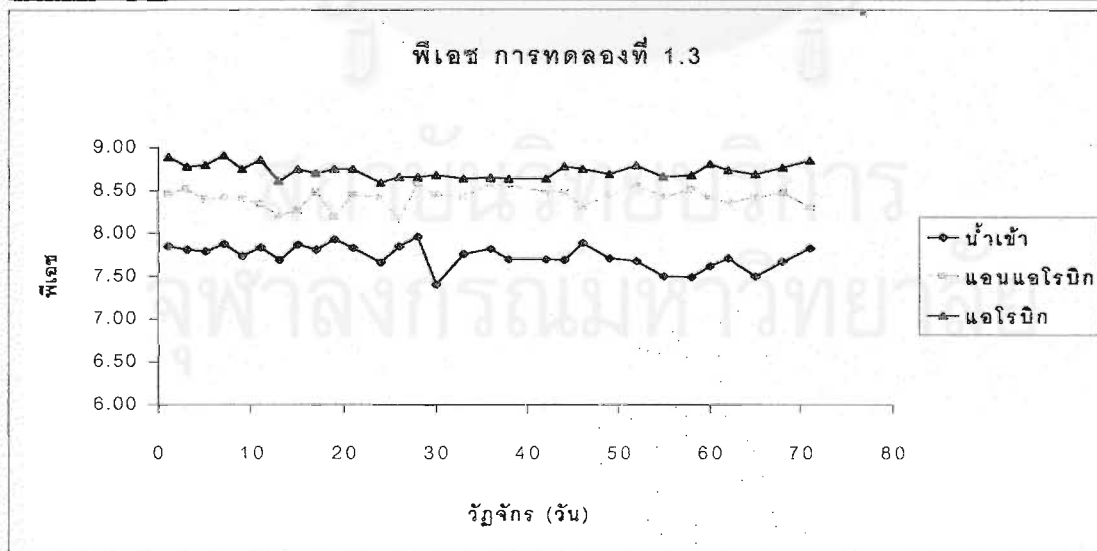
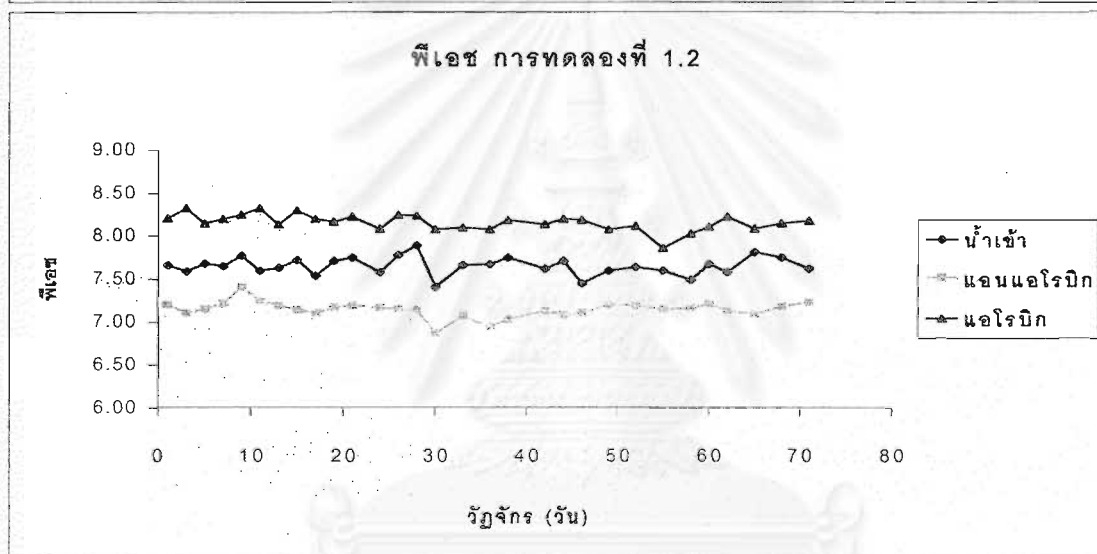
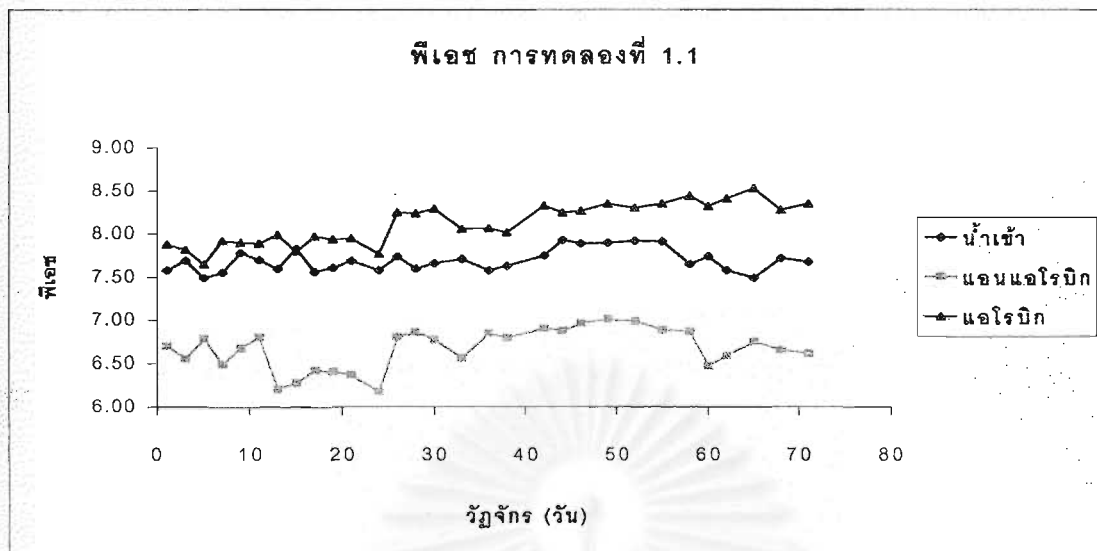
รูปที่ 4.10 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 2



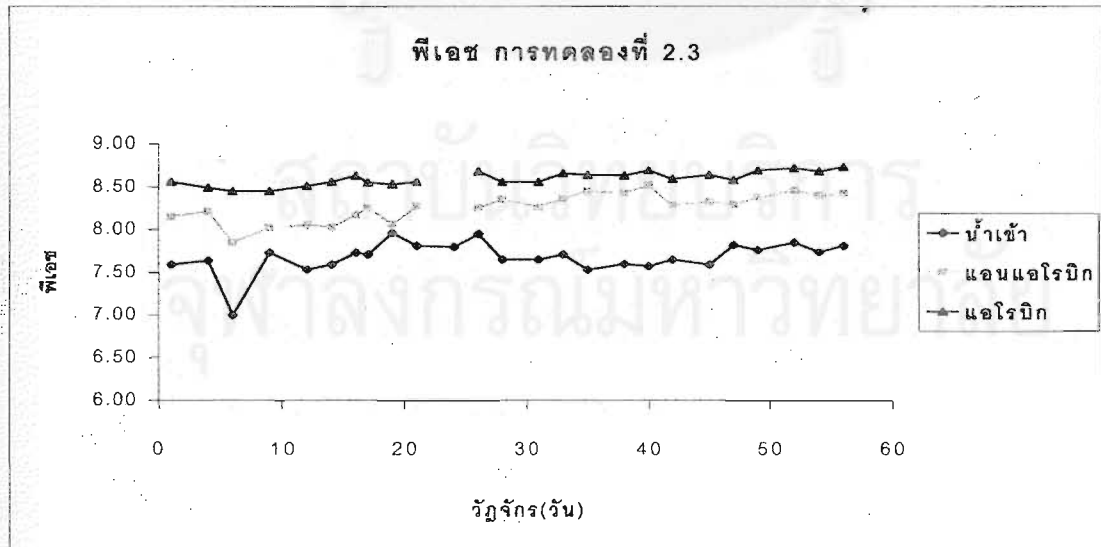
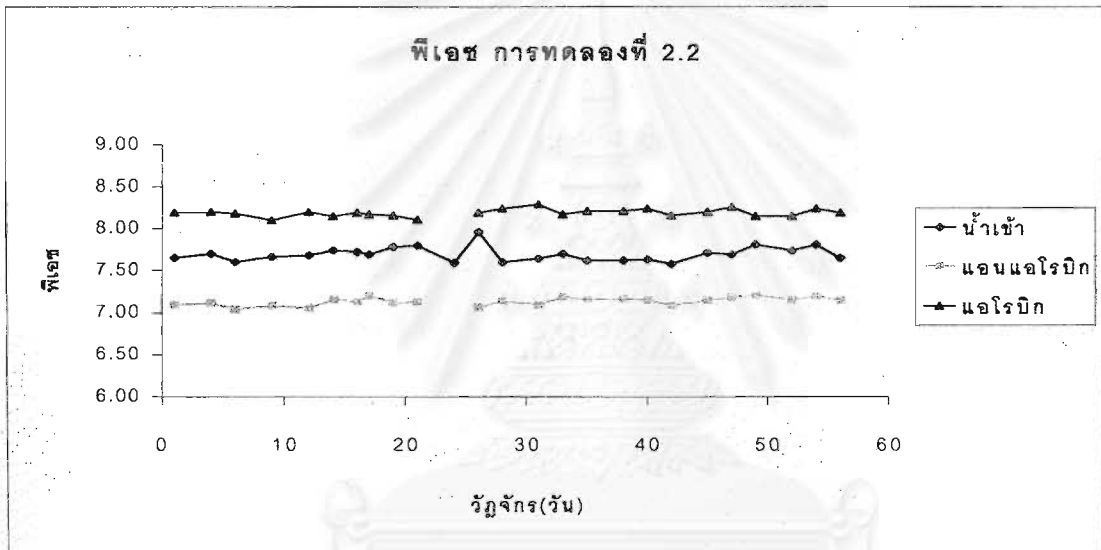
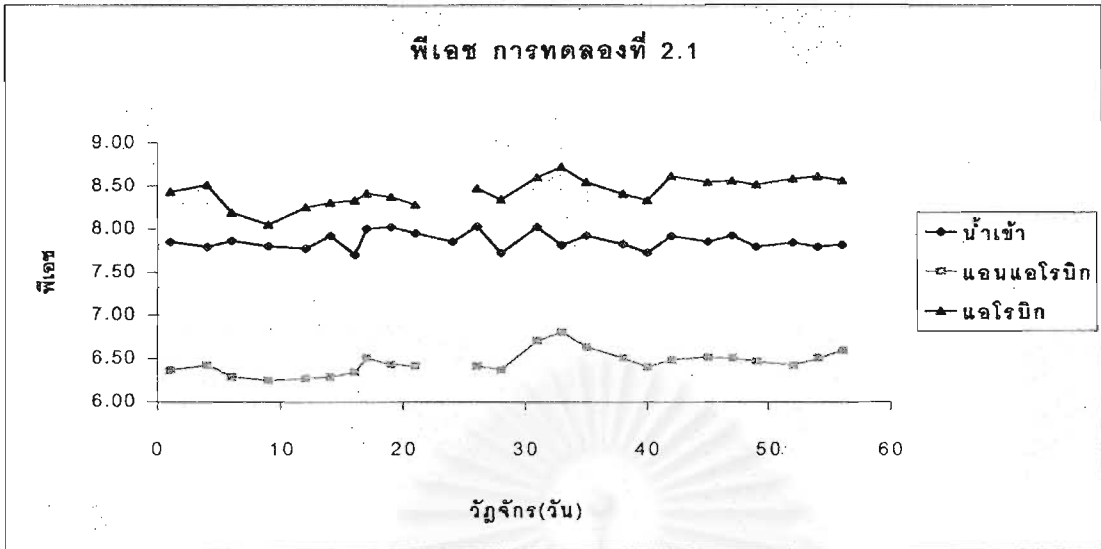
รูปที่ 4.11 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 3



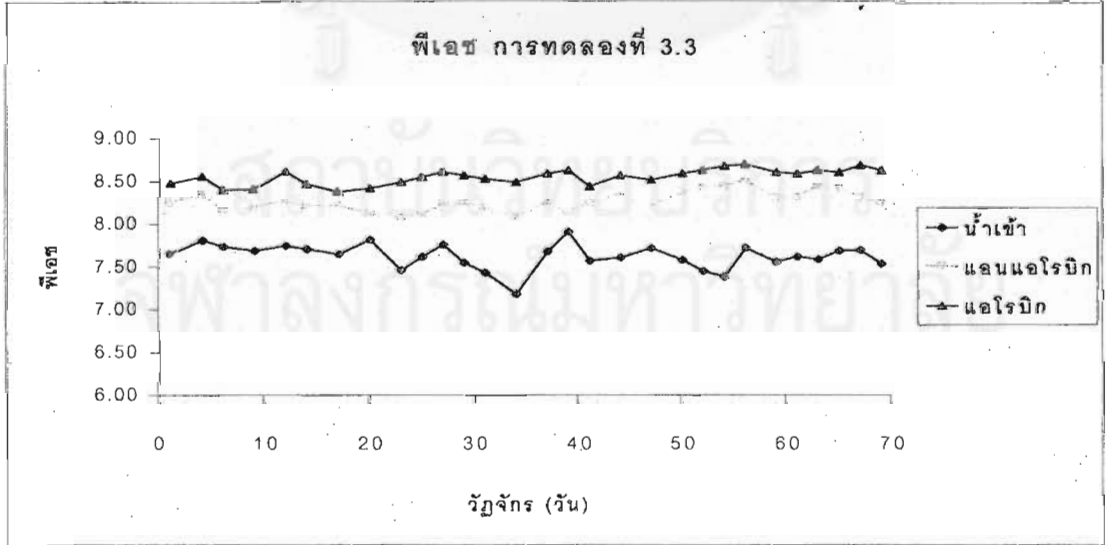
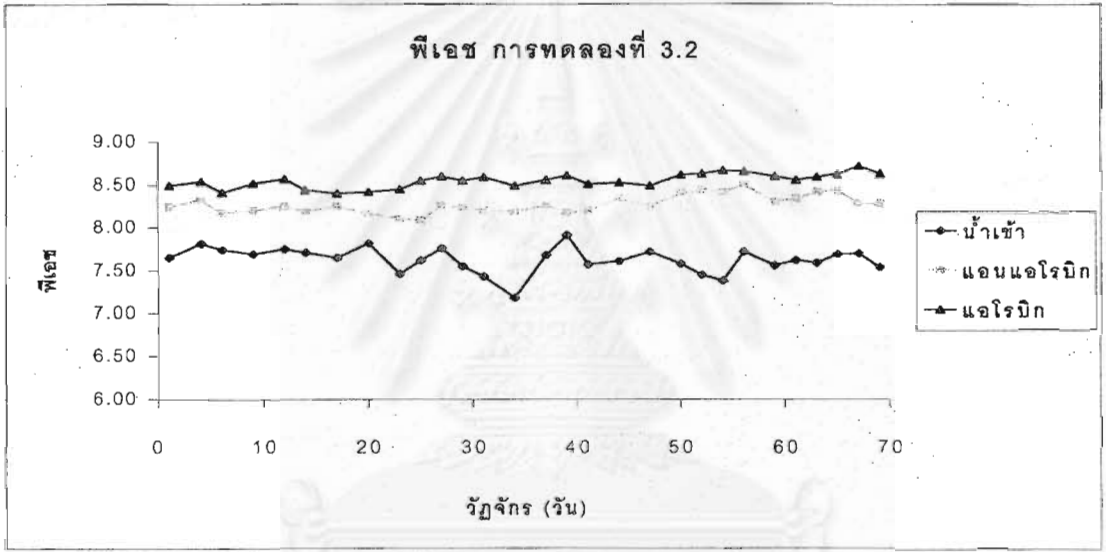
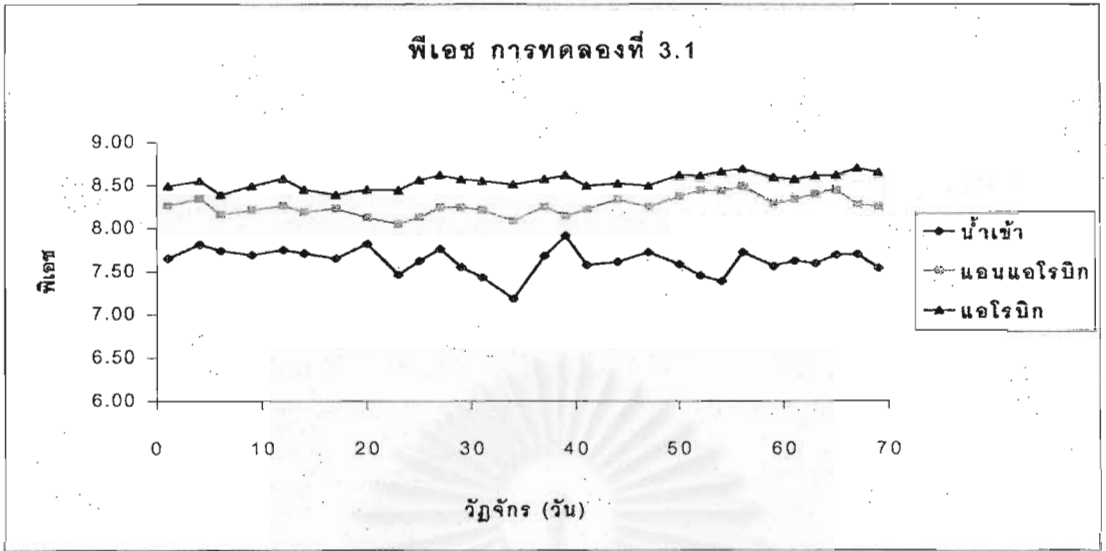
รูปที่ 4.12 โพรไฟล์ไออาร์พีของแต่ละการทดลอง



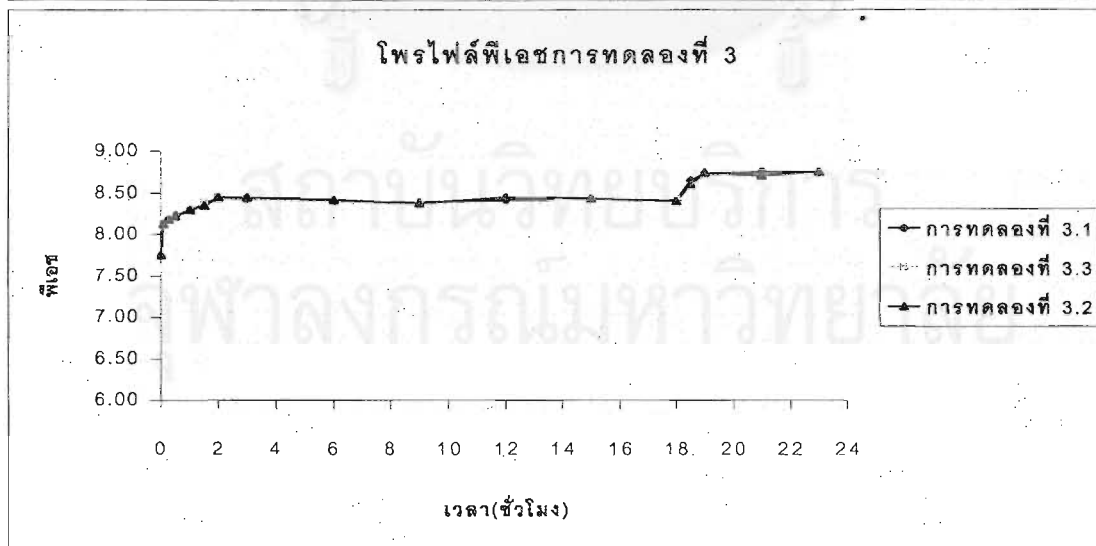
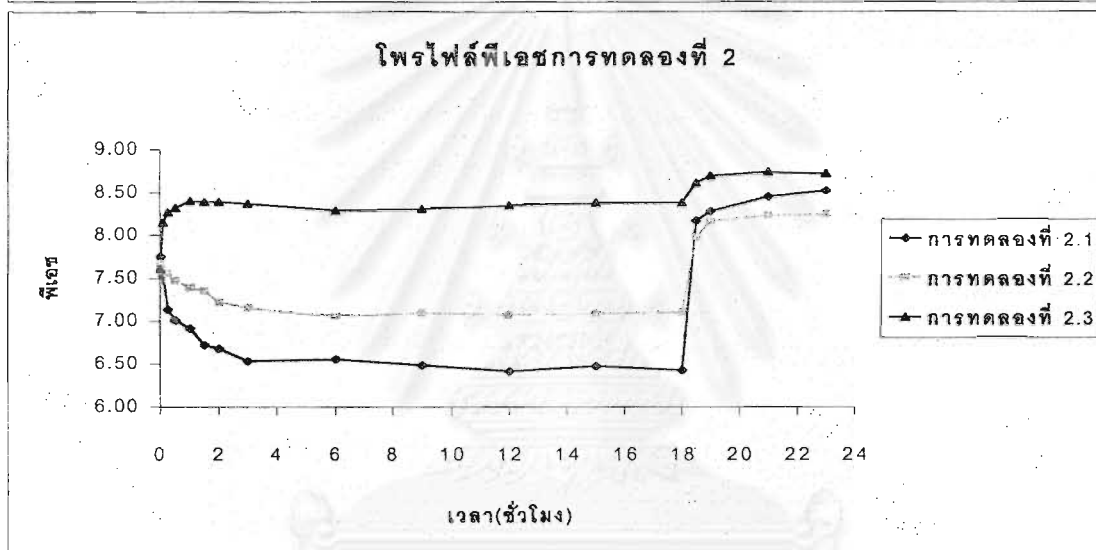
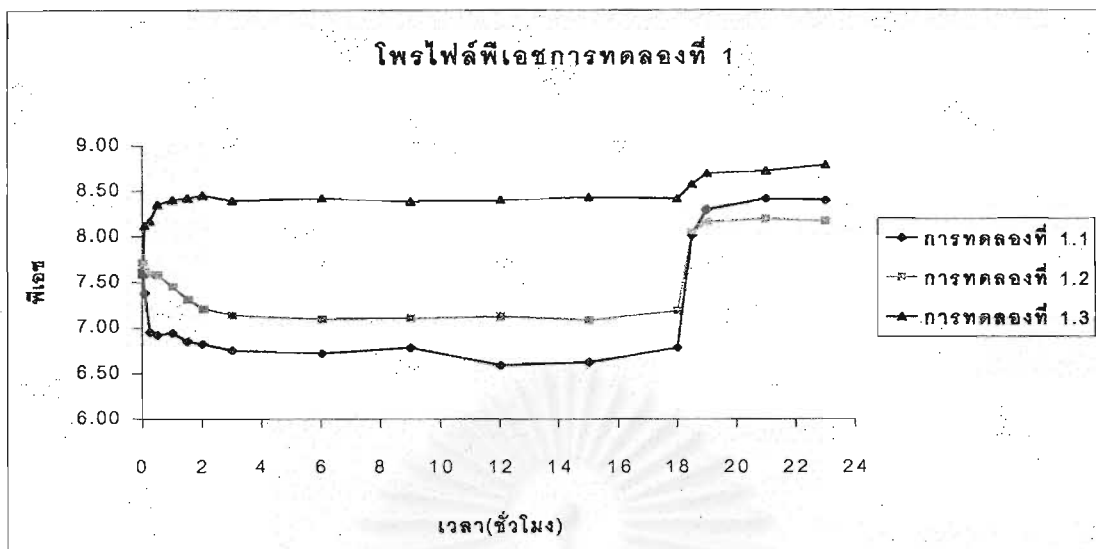
รูปที่ 4.13 พีเอชของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.14 พีเอชของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.15 พีเอชของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.16 โปรไฟล์พีเอชของแต่ละการทดลอง

4.1.5 เอ็มแอลเอสเอสและมวลจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง

4.1.5.1 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก

เอ็มแอลเอสเอสเป็นค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออก เอ็มแอลเอสเอสมีค่าแกว่งขึ้นลงมากในช่วงเริ่มระบบหรือเปลี่ยนค่าซีโอดีสารอาหาร เนื่องจากการหลุดลอกของจุลินทรีย์ที่เกาะบนวัสดุตัวกลางไม่แน่นอน แต่เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว อัตราการเกาะติดกับตัวกลางและอัตราการหลุดลอกจากตัวกลางค่อนข้างคงที่มากขึ้น ดังนั้นค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสที่ออกจากระบบจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สังเกตได้จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 ส่วนค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเป็นค่าแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส(ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น มวลของจุลินทรีย์) รูปที่ 4.20 ถึง 4.21 แสดงกราฟของเอ็มแอลเอสเอสกับเอ็มแอลวีเอสเอสเฉลี่ยและอัตราส่วนเอ็มแอลวีเอสเอสต่อเอ็มแอลเอสเอสเฉลี่ยในน้ำออกแต่ละการทดลอง ส่วนตารางที่ 4.5 แสดงค่าเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสแต่ละการทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

ตารางที่ 4.5 เอ็มแอลวีเอสเอสและเอ็มแอลเอสเอสในน้ำออกและบนวัสดุตัวกลางในแต่ละการทดลอง

การทดลองที่	ซีโอดีเฉลี่ย(มก/ล)*	น้ำออก			มวลจุลินทรีย์บนตัวกลาง		
		MLVSS* (มก/ล)	MLSS* (มก/ล)	f ₁ (%)	mgVSS/gMedia**	mgSS/gMedia**	f ₂ (%)
1.1	1449	280	357	78.43	15.4	18.8	81.91
1.2	1449	291	349	83.38	23.3	26.5	87.92
1.3	1440	162	263	61.60	25.1	32.0	78.44
2.1	2565	877	966	90.79	45.4	50.4	90.08
2.2	2542	660	730	90.41	43.5	49.0	88.78
2.3	2553	498	570	87.37	26.9	48.1	55.93
3.1	2581	492	560	87.86	24.9	46.3	53.78
3.2	2581	491	555	88.47	26.7	48.5	55.05
3.3	2581	500	570	87.72	25.5	47.4	53.80

* ค่าเฉลี่ย 10 วัฏจักรของสถานะคงตัว

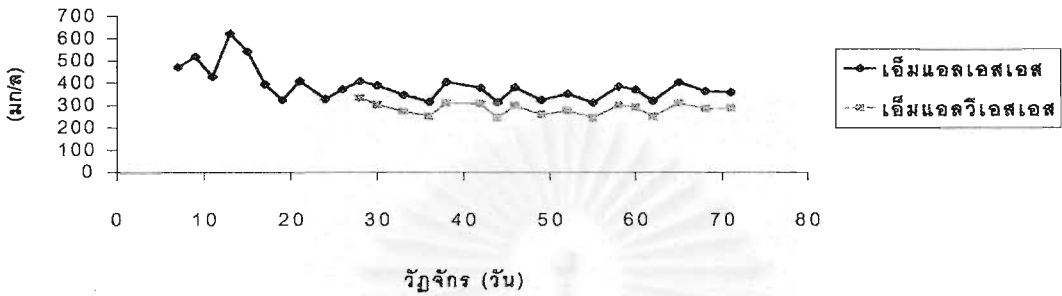
** การวัดมวลจุลินทรีย์ทำเมื่อเก็บโพर्फิล์แต่ละการทดลองเรียบร้อยแล้วและทำการเก็บวัสดุตัวกลางซ้ำ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่ามวลจุลินทรีย์เฉลี่ย

จากตารางที่ 4.11 พบว่าทั้งเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสขึ้นกับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย 1.) ค่าซีไอดี โดยซีไอดีสารอาหารสูงจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเพิ่มจำนวนมาก ทำให้มีการหลุดลอกของฟิล์มชีวภาพมากขึ้นตาม 2.) ชนิดของสารอาหาร(แหล่งคาร์บอน) ทั้งชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าสารอาหารแต่ละชนิดถูกนำไปใช้สร้างเซลล์จุลินทรีย์ได้ไม่เท่ากัน รวมถึงอัตราส่วนเอ็มแอลวีเอสเอสต่อเอ็มแอลเอสเอส(f_1) ในน้ำออกต่างกัน โดยน้ำตาลและนมมีค่า f_1 ใกล้เคียงกัน แต่ซีเดียมะเชเตมีค่า f_1 น้อยที่สุด เนื่องจากในการทดลองของซีเดียมะเชเตทำให้พีเอชของน้ำสูง ดังนั้น จุลินทรีย์จึงต้องใช้พลังงานมากในการดึงอะซิเตทเข้าไปภายในเซลล์ซึ่งทำให้ส่วนที่เป็น Fixed Solid ที่เกิดจากการเผาผลาญภายในเพื่อให้ได้พลังงานมากกว่าการทดลองอื่นๆ (โกลม เอียมเสมอ, 2541) ส่วนชุดการทดลองที่ 3 เอ็มแอลวีเอสเอสและเอ็มแอลเอสเอสมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.3 ดังนั้นฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างใหม่

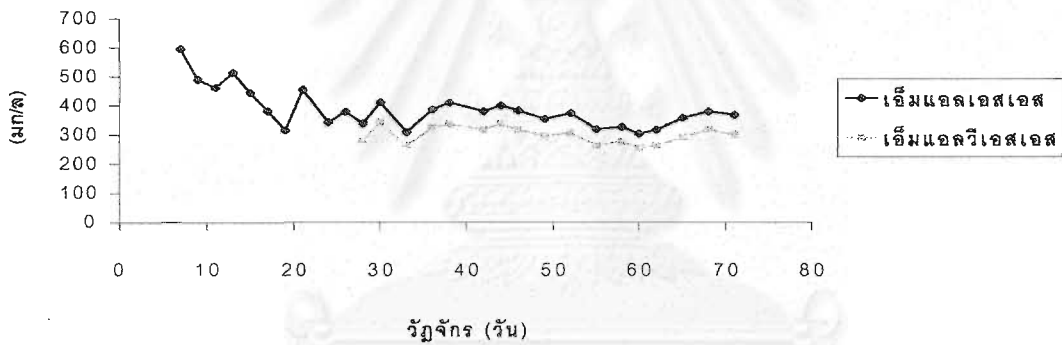
4.1.5.2 มวลจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง

เมื่อสิ้นสุดแต่ละชุดการทดลอง ได้สูมน้ำวัสดุตัวกลางแต่ละถังปฏิกิริยาไปหามวลจุลินทรีย์ โดยแต่ละการทดลองสุ่มเก็บตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง เพื่อมาหาค่าเฉลี่ย โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิคชนิดหัวจุ่ม เพื่อให้เซลล์จุลินทรีย์แตกตัวและหลุดออกจากตัวกลางและอบที่ 110 และ 550 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.22 ถึง 4.23 แสดงเอสเอสกับวีเอสเอสเฉลี่ยและอัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสเฉลี่ยบนวัสดุตัวกลางแต่ละการทดลอง จากตารางที่ 4.5 ทั้งชุดการทดลองที่ 1 และ 2 แม้ในชุดการทดลองเดียวกันซีไอดีจะเท่ากัน แต่เมื่อใช้สารอาหารต่างชนิดกันมวลจุลินทรีย์(วีเอสเอส) และเอสเอสที่เกาะบนตัวกลาง กลับไม่เท่ากัน โดยชุดการทดลองที่ 1 ค่า R1 และ R2 เป็นค่าที่บอกถึง 1 กรัมของตัวกลางมีมวลจุลินทรีย์มาเกาะติดมากน้อยเท่าใด ซึ่งซีเดียมะเชเตมีค่าดังกล่าวมากที่สุด แสดงถึงซีเดียมะเชเตเป็นสารอาหารที่ช่วยให้จุลินทรีย์สร้างและเกาะติดบนตัวกลางได้ดีซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในระบบฟิล์มชีวภาพ ในชุดการทดลองที่ 2 เมื่อซีไอดีสูงขึ้น ค่า R1 และ R2 ของซีเดียมะเชเตกลับมีค่าน้อยที่สุด คาดว่าเกิดจากความเป็นพิษของซีเดียมะเชเตต่อจุลินทรีย์ ทำให้ความสามารถเกาะติดตัวกลางต่ำเทียบกับน้ำตาลและนม ในชุดการทดลองที่ 3 มีค่า R1 และ R2 ใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.3 แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลต่อการสร้างเซลล์และการเกาะติดบนตัวกลางของจุลินทรีย์ เมื่อซีไอดีสูงขึ้น(ชุดการทดลองที่ 2) อัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสบนตัวกลาง (f_2) ของน้ำตาลและนมมีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 1 แต่ซีเดียมะเชเตมีค่า f_2 ต่ำลงมาก เนื่องจากความเป็นพิษของซีเดียมะเชเตต่อจุลินทรีย์ซึ่งค่า f_2 ลดลง แต่ค่า f_1 กลับเพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มจุลินทรีย์ส่วนที่เป็นวีเอสเอส หลุดลอกไปกับน้ำออกมากขึ้น

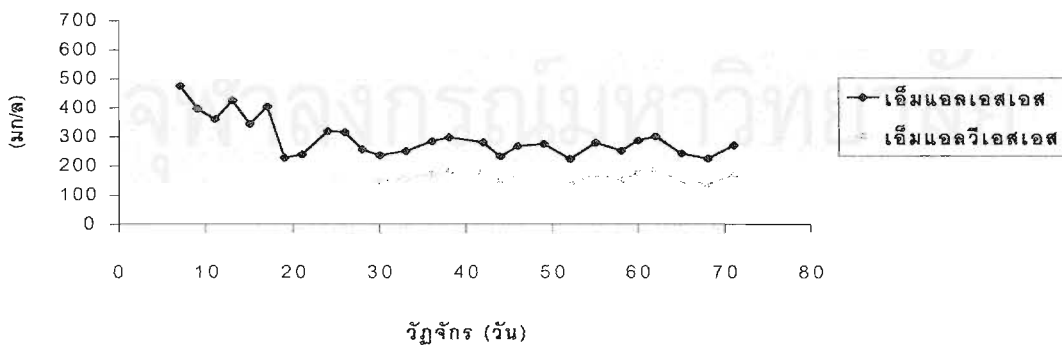
เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 1.1



เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 1.2

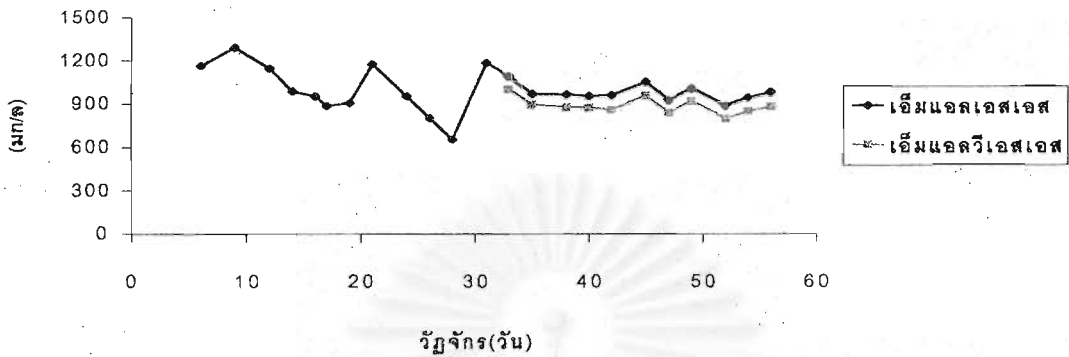


เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 1.3

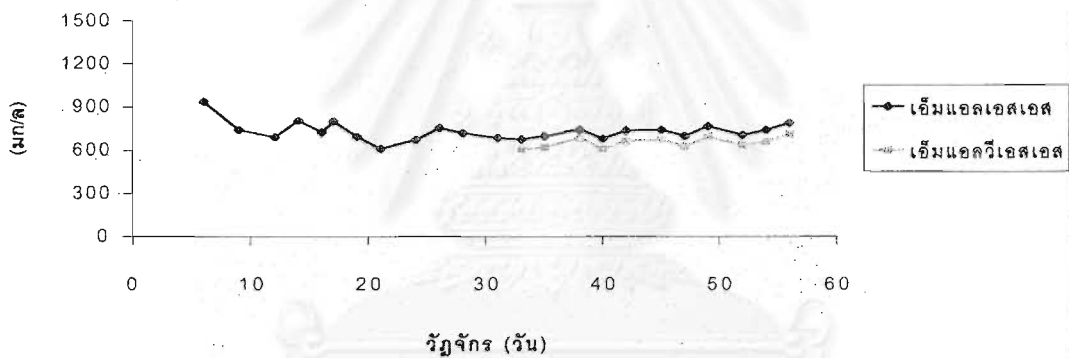


รูปที่ 4.17 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 1

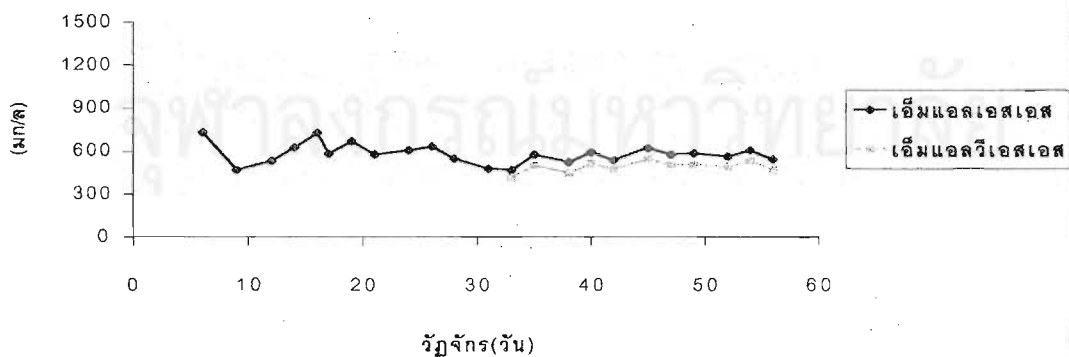
เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 2.1



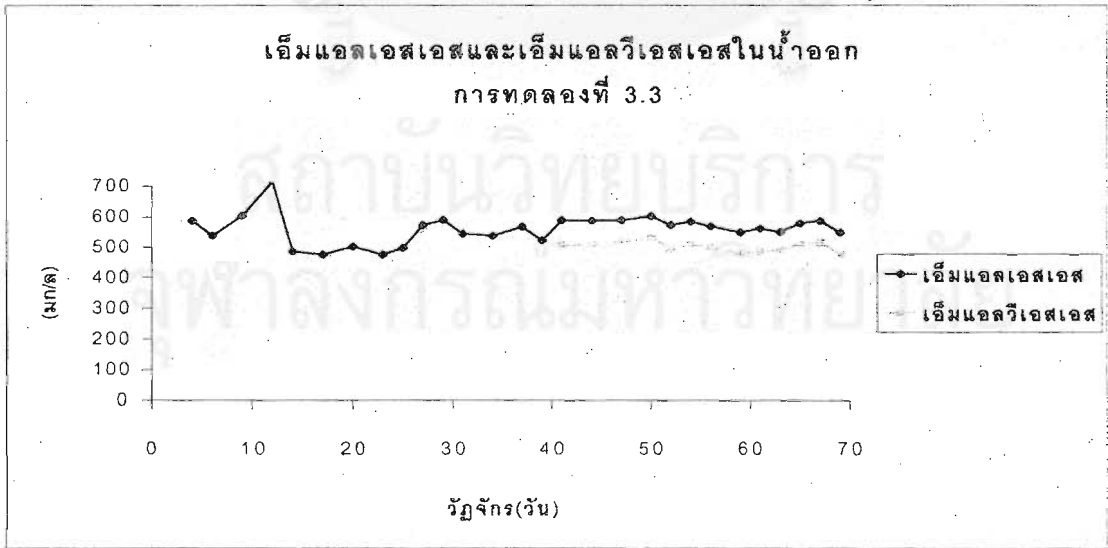
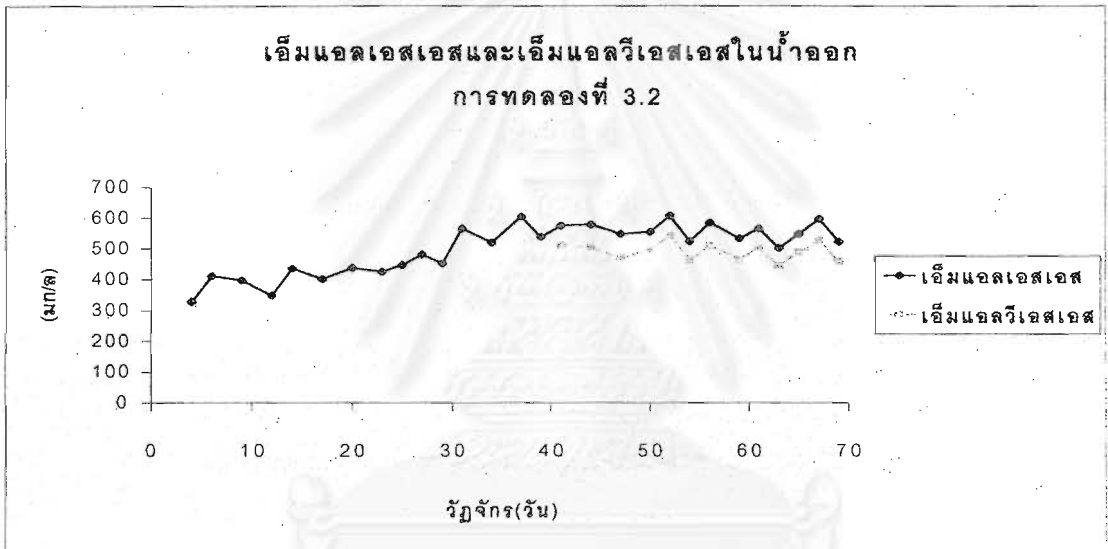
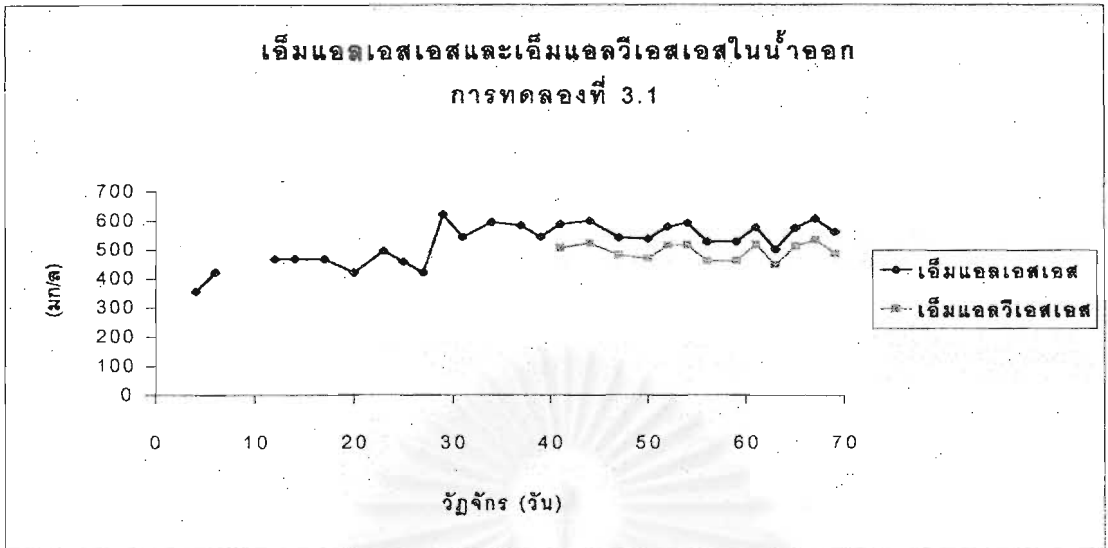
เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 2.2



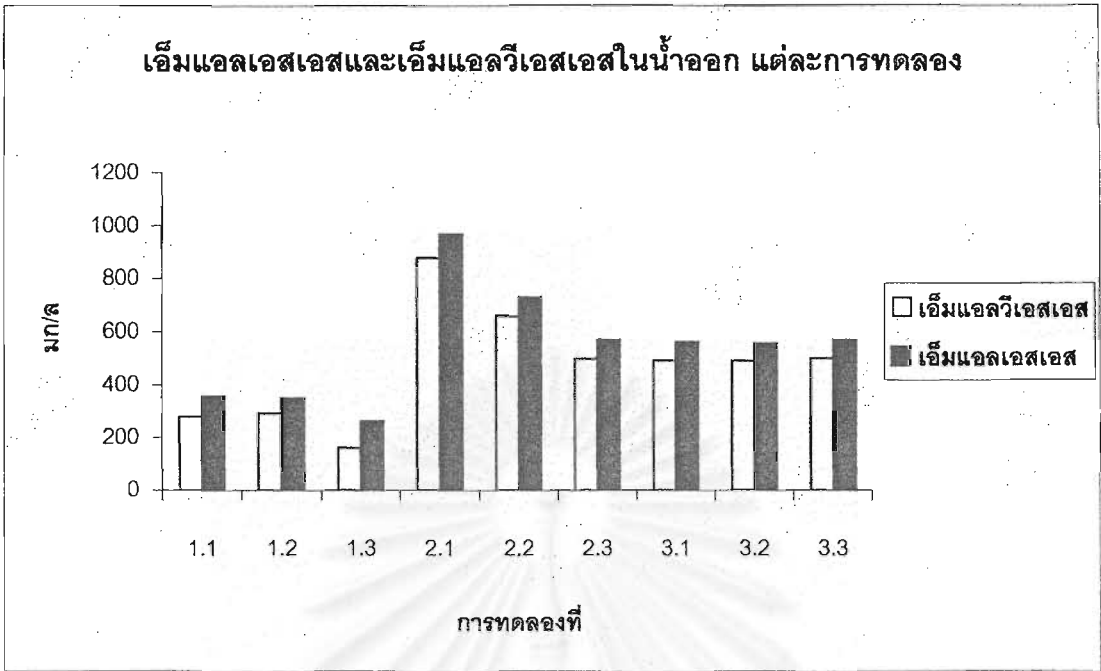
เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก
การทดลองที่ 2.3



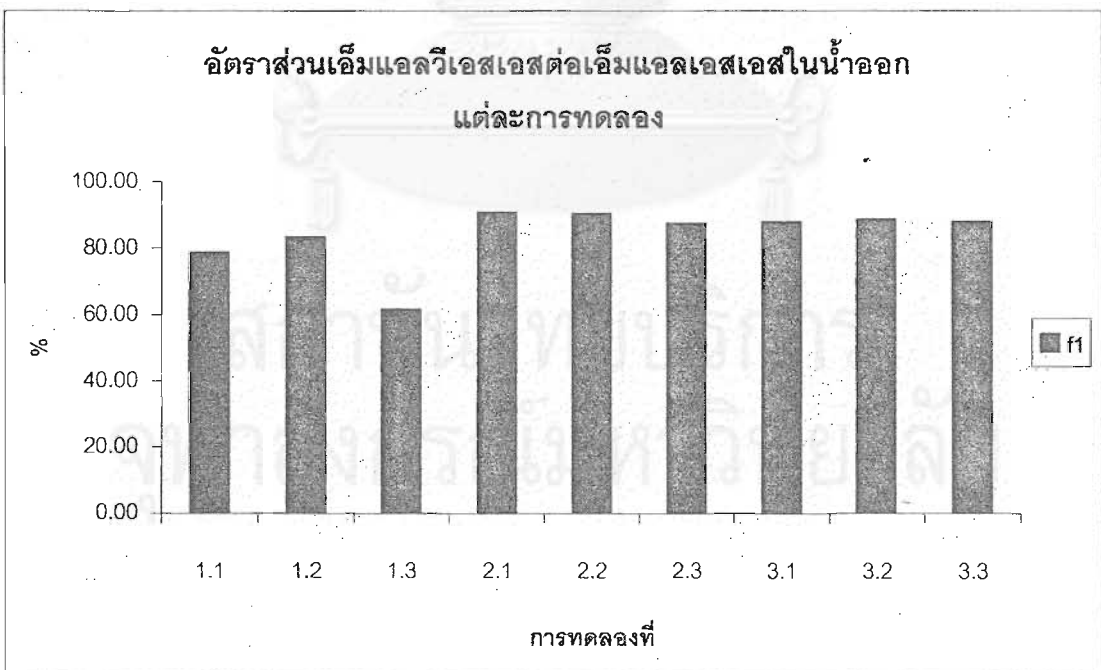
รูปที่ 4.18 เอเอ็มแอลเอสเอสและเอเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 2



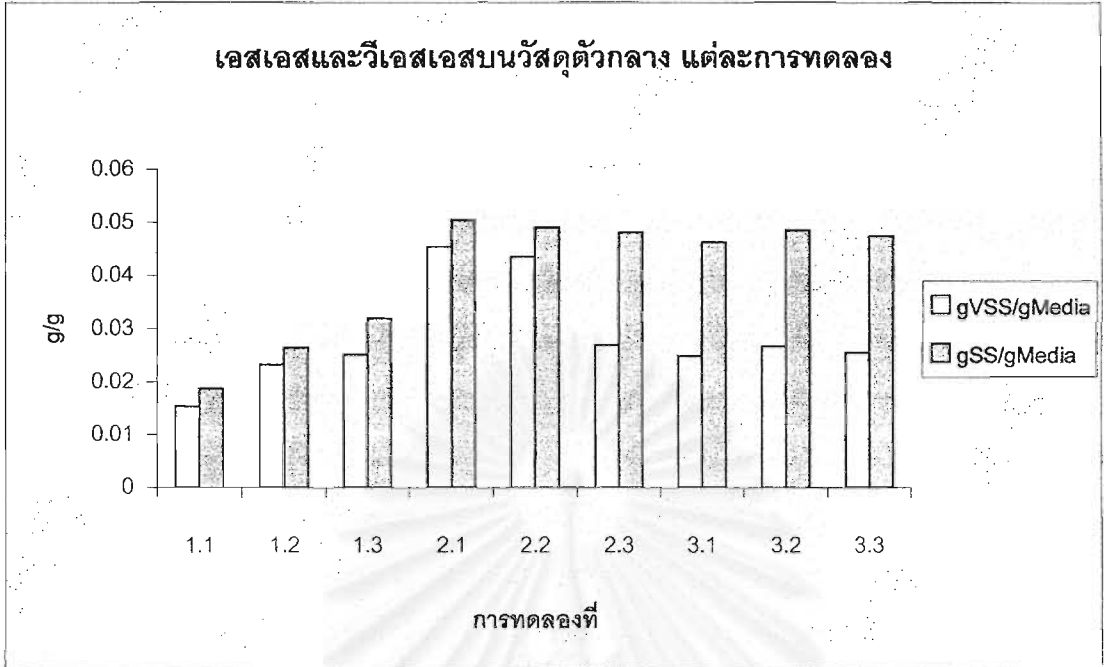
รูปที่ 4.19 เอี่ยมแอลเอสเอสและเอี่ยมแอลวีเอสเอสในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 3



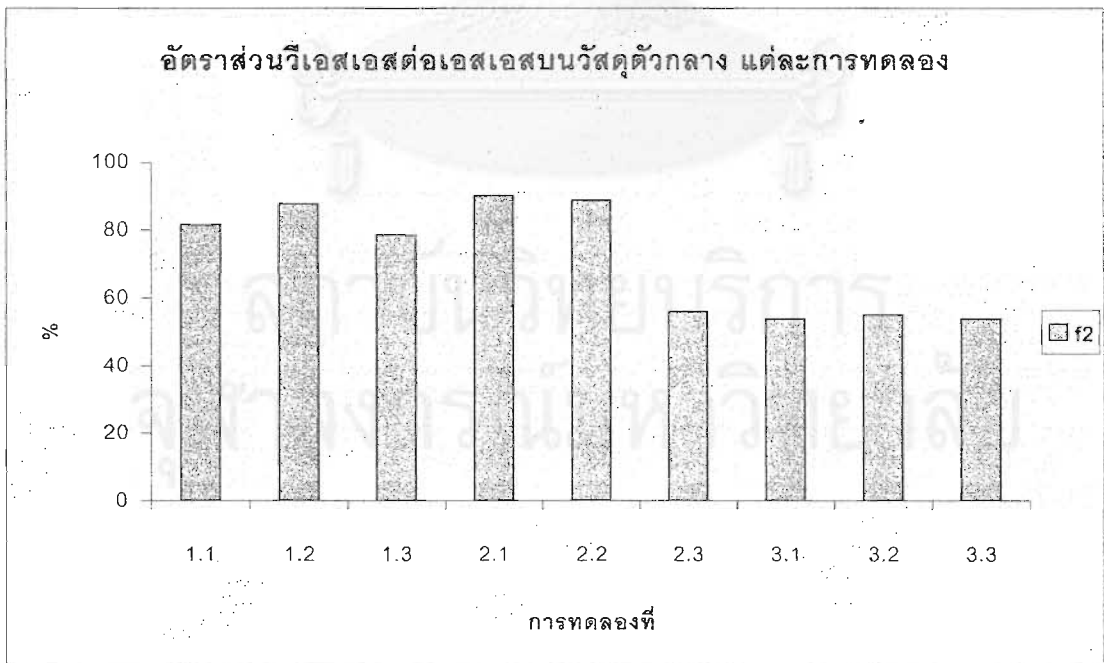
รูปที่ 4.20 เอมีนแอลเอสเอสและเอมีนแอลวีเอสเอสเฉลี่ยในน้ำออกของแต่ละการทดลอง



รูปที่ 4.21 อัตราส่วนเอมีนแอลวีเอสเอสต่อเอมีนแอลเอสเอสเฉลี่ยในน้ำออกของแต่ละการทดลอง



รูปที่ 4.22 เอสเอสและวีเอสเอสเฉลี่ยบนวัสดุตัวกลางของแต่ละการทดลอง



รูปที่ 4.23 อัตราส่วนวีเอสเอสต่อเอสเอสเฉลี่ยบนวัสดุตัวกลางของแต่ละการทดลอง

4.1.6 ซีโอดี

ค่าซีโอดีเฉลี่ยของแต่ละการทดลองช่วงสถานะคงตัวแสดงในตารางที่ 4.6 ในงานวิจัยนี้ใช้สารอาหาร(แหล่งคาร์บอน) เพื่อจุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต 3 ชนิด คือ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท โดยเติมสารอาหารเป็นอัตราส่วนกับซีโอดีในรูป ซีโอดี_{อาหาร} ต่อ ซีโอดี_{ซี} เท่ากับ 30 : 1 รูปที่ 4.24 ถึง 4.26 เป็นผลการทดลองซีโอดีในแต่ละชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1 ซีโอดีน้ำออกของน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตทลดลงเกือบเท่าซีโอดีของซี (ซีโอดี_{ซี} = 45.8 มก/ล) แสดงว่าระบบมีการกำจัดสารอาหารได้เกือบทั้งหมด ซีโอดีน้ำออกส่วนใหญ่จึงน่าเป็นซีโอดีของซี ซึ่งย่อยสลายได้ยากกว่า ยกเว้นกรณีของนม ซึ่งมีซีโอดีน้ำออกเฉลี่ยประมาณ 81 มก/ล ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยของน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตทเท่ากับ 96.33% 94.40% และ 96.55% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 ซีโอดีสารอาหารเพิ่มขึ้น เนื่องจากเปลี่ยนชนิดซี (ซีโอดี_{ซี} = 82.3 มก/ล) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยของน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท เท่ากับ 94.83% 94.31% และ 82.29% ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.3 เท่ากับ 83.68% 83.59% และ 83.27%

ตารางที่ 4.6 ค่าซีโอดีเฉลี่ยแต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

การทดลองที่	ซีโอดีเฉลี่ย* (มก/ล)			ประสิทธิภาพเฉลี่ย การกำจัดซีโอดี %	AOLR (Kg-COD/(d*m ²))	VOLR (Kg-COD/(d*m ³))
	น้ำเข้า**	แอมโมเนีย	ไนโตรเจน			
1.1	1449	180	53	96.33	8.77E-07	1.45E-03
1.2	1449	237	81	94.40	8.77E-07	1.45E-03
1.3	1440	639	50	96.55	8.72E-07	1.44E-03
2.1	2565	852	133	94.83	1.55E-06	2.57E-03
2.2	2542	651	145	94.31	1.54E-06	2.54E-03
2.3	2553	1638	452	82.29	1.55E-06	2.55E-03
3.1	2581	1623	421	83.68	1.56E-06	2.58E-03
3.2	2581	1624	423	83.59	1.56E-06	2.58E-03
3.3	2581	1617	432	83.27	1.56E-06	2.58E-03
AOLR = Area Organic Loading Rate				VOLR = Volumetric Organic Loading Rate		

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วันปฏิบัติการที่สถานะคงตัว

** ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

จากรูปที่ 4.27 แสดงโพรไฟล์การกำจัดซีไอดี พบว่าค่าซีไอดีส่วนใหญ่จะลดลงในช่วงแอนแอโรบิก ยกเว้นไซโตเดียมอะซิเตทซึ่งไม่สามารถลดซีไอดีให้ต่ำได้ในช่วงแอนแอโรบิก คาดว่าเกิดการสะสมพีเอชเอจนอิ่มตัวแล้ว (Glycogen exhaust) (Mino และคณะ, 1998) แม้จะใช้ช่วงเวลาแอนแอโรบิกนานถึง 18 ชั่วโมง

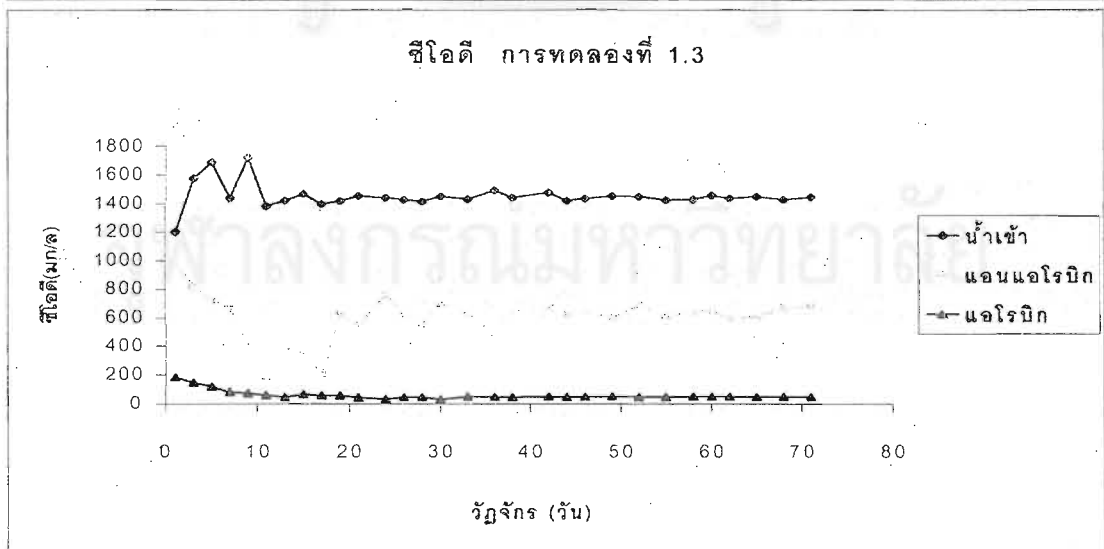
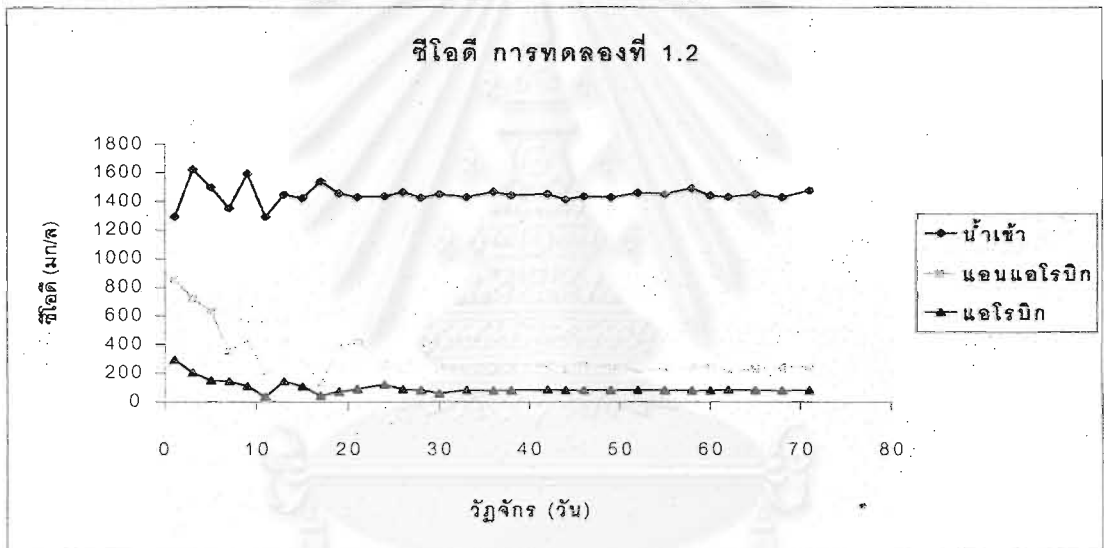
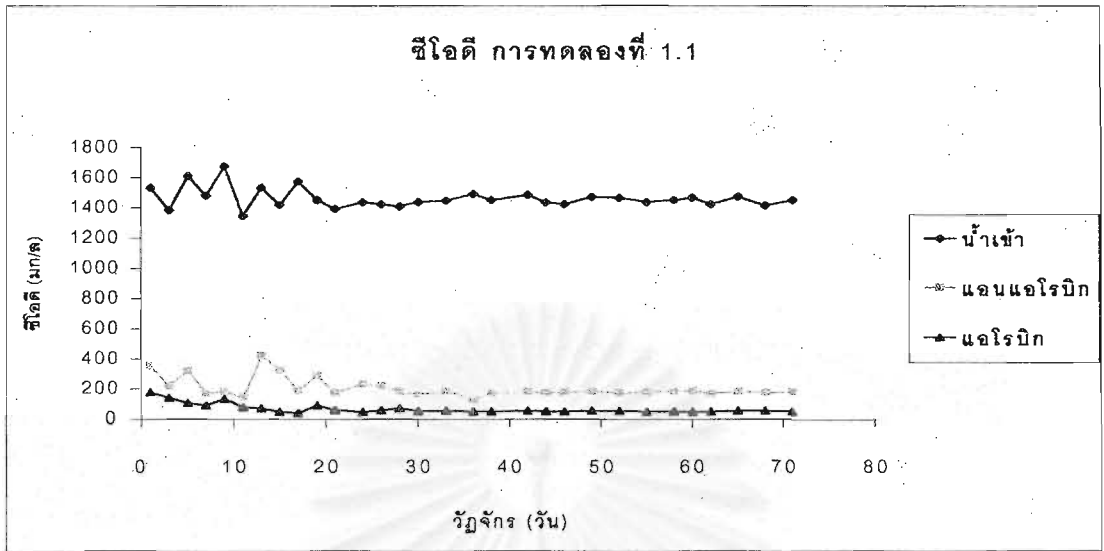
ชุดการทดลองที่ 1 น้ำตาลสามารถลดซีไอดีลงอย่างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิกเท่านั้น ส่วนนมสามารถลดซีไอดีอย่างรวดเร็วภายใน 6 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก เป็นเพราะนมต้องใช้เวลาขั้นตอนไฮโดรไลซิสและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยนานกว่าอันเนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าน้ำตาล ส่วนไซโตเดียมอะซิเตทจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้อย่างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิกเพราะมีการดึงกรดอะซิติกเข้าไปใช้ได้ทันทีดังสมการ



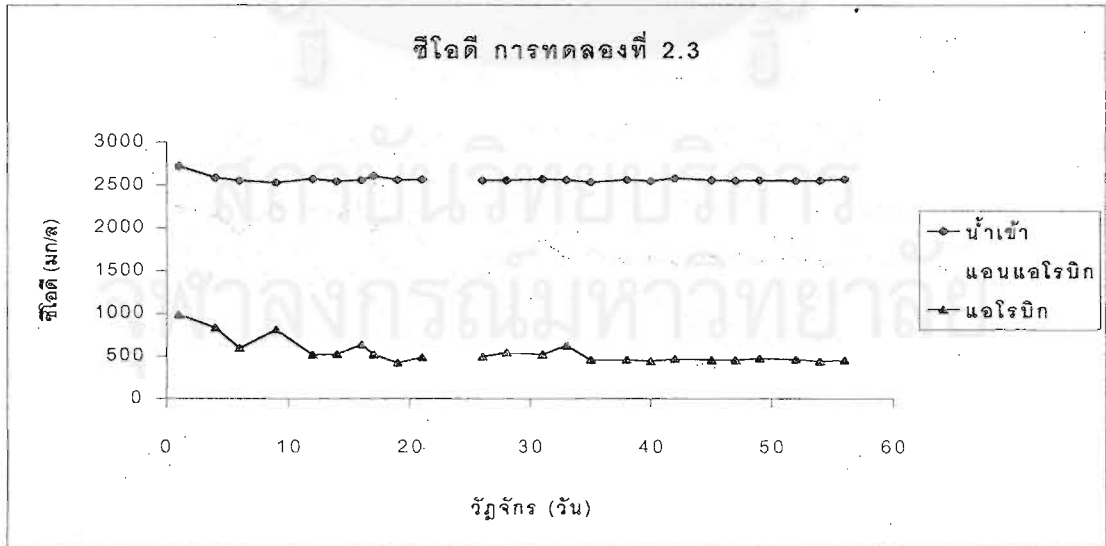
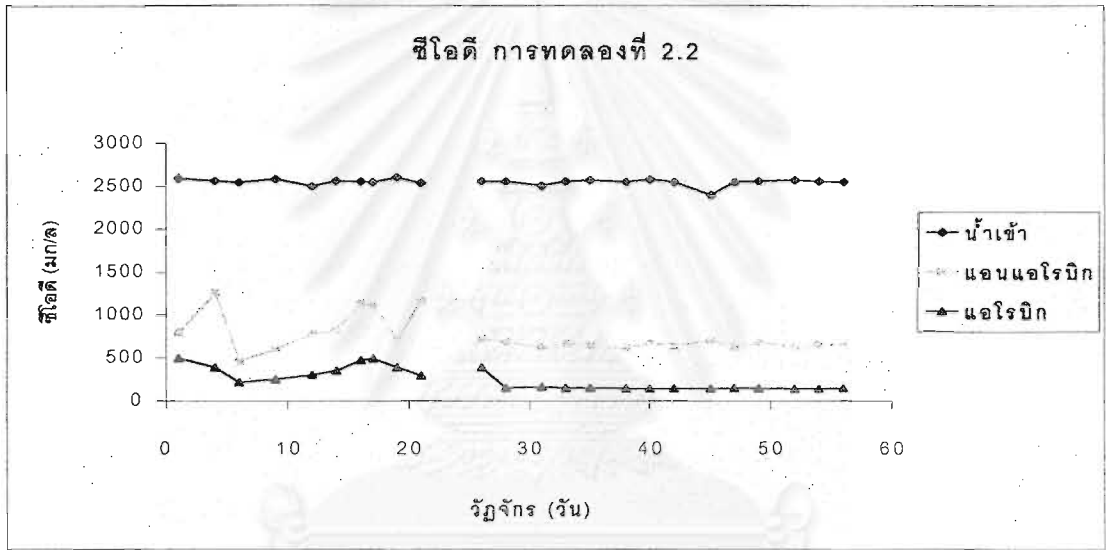
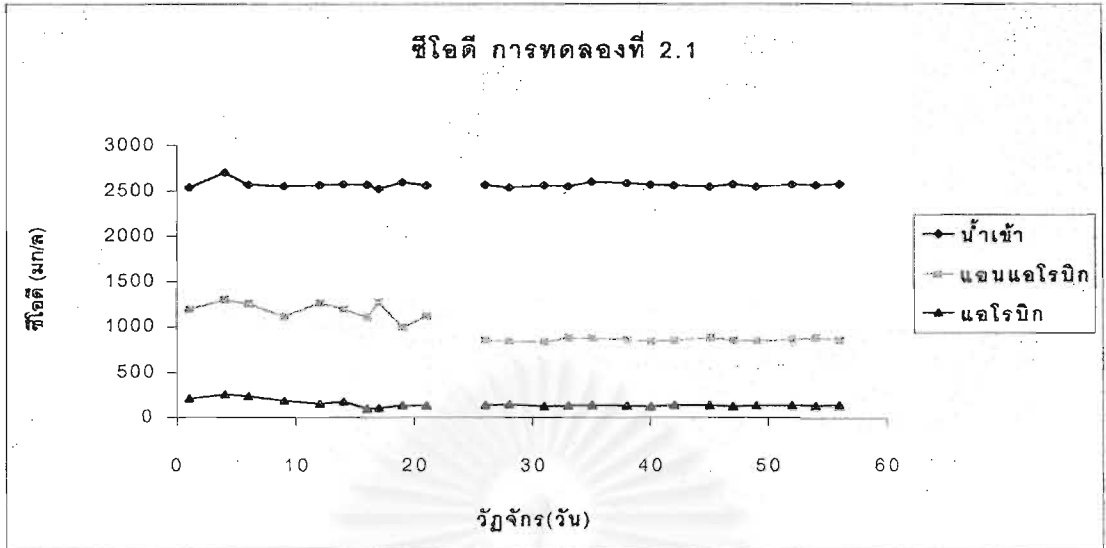
แต่ไซโตเดียมอะซิเตทก็มีซีไอดีเฉลี่ยเหลือมากในช่วงปลายแอนแอโรบิก (639 มก/ล) เมื่อเทียบกับน้ำตาลและนมที่เหลือซีไอดีเฉลี่ยในช่วงปลายแอนแอโรบิกเพียง 180 และ 237 มก/ล ตามลำดับ จากรูปที่ 4.27 พบว่าซีไอดีของไซโตเดียมอะซิเตทจะถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงแอโรบิก (กราฟโพรไฟล์การกำจัดซีไอดีมีความชันมาก) ซึ่งสามารถทำให้น้ำออกช่วงปลายแอนแอโรบิกมีซีไอดีต่ำเช่นเดียวกับน้ำตาลและนม

ชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งมีซีไอดีสารอาหารเข้าเฉลี่ยมากขึ้น ระบบต้องใช้เวลามากขึ้นในการกำจัดซีไอดี (ดูจากรูปที่ 4.27) พบว่าทั้งน้ำตาลและนมใช้เวลาลดซีไอดีอย่างรวดเร็วประมาณ 6 ชั่วโมงของช่วงแอนแอโรบิก แต่ไซโตเดียมอะซิเตทยังใช้เวลาเท่าเดิมคือ 2 ชั่วโมง ซึ่งคาดว่าสาเหตุมาจากการสะสมพีเอชเอจนอิ่มตัวแล้ว ส่วนช่วงแอโรบิกสารอาหารทั้ง 3 มีแนวโน้มการกำจัดซีไอดีค่อนข้างเร็ว (กราฟโพรไฟล์การกำจัดซีไอดีมีความชันมาก) แต่ไซโตเดียมอะซิเตทยังมีซีไอดีเฉลี่ยในน้ำออกมากถึง 452 มก/ล ซึ่งถ้ามีการเติมอากาศมากขึ้นคาดว่าระบบจะสามารถกำจัดซีไอดีของไซโตเดียมอะซิเตทได้อีก

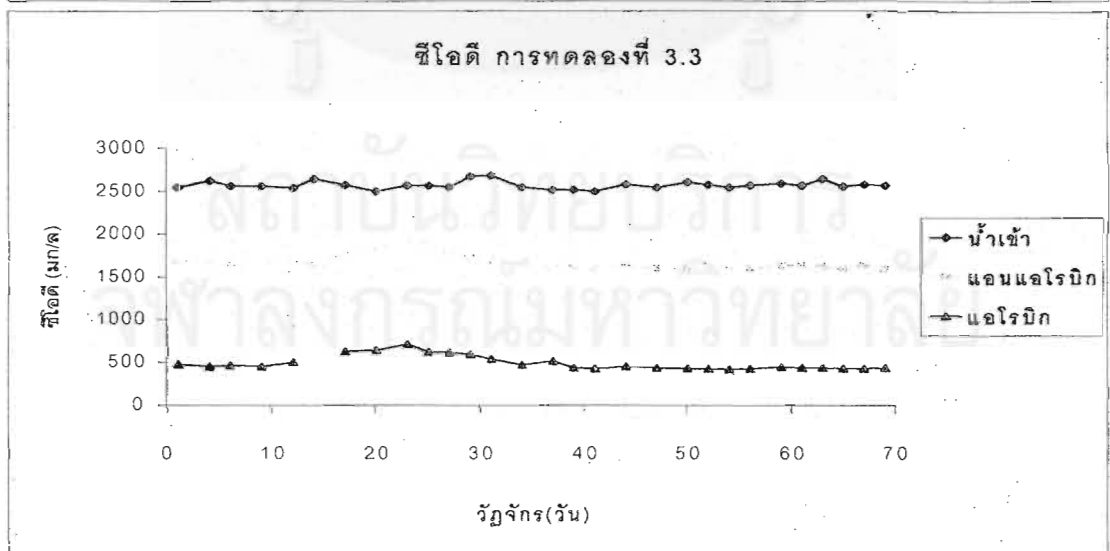
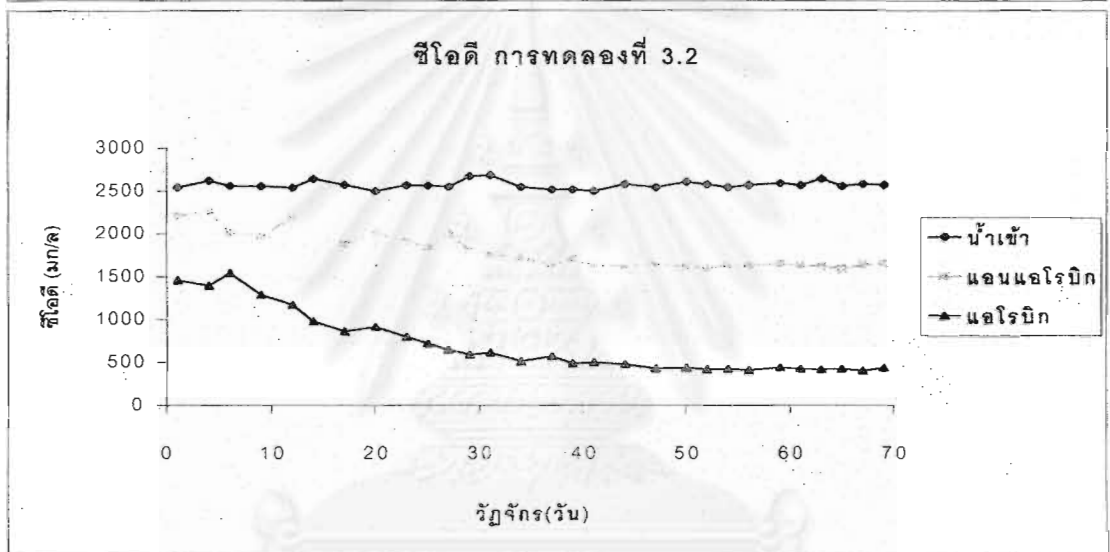
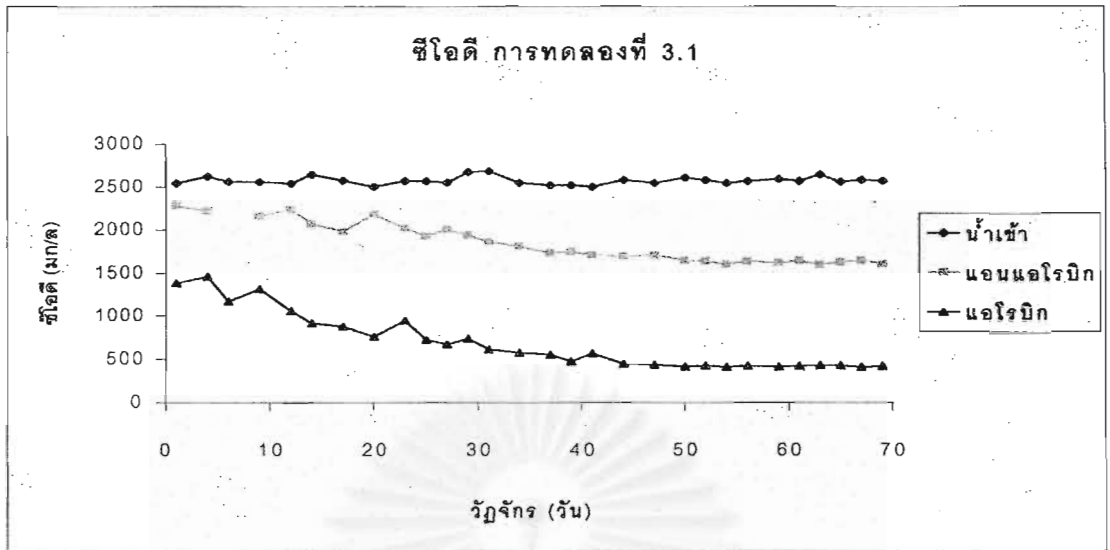
ชุดการทดลองที่ 3 มีแนวโน้มและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (ไซโตเดียมอะซิเตท) คล้ายกับการทดลองที่ 2.3 แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลกระทบต่อการกำจัดซีไอดี



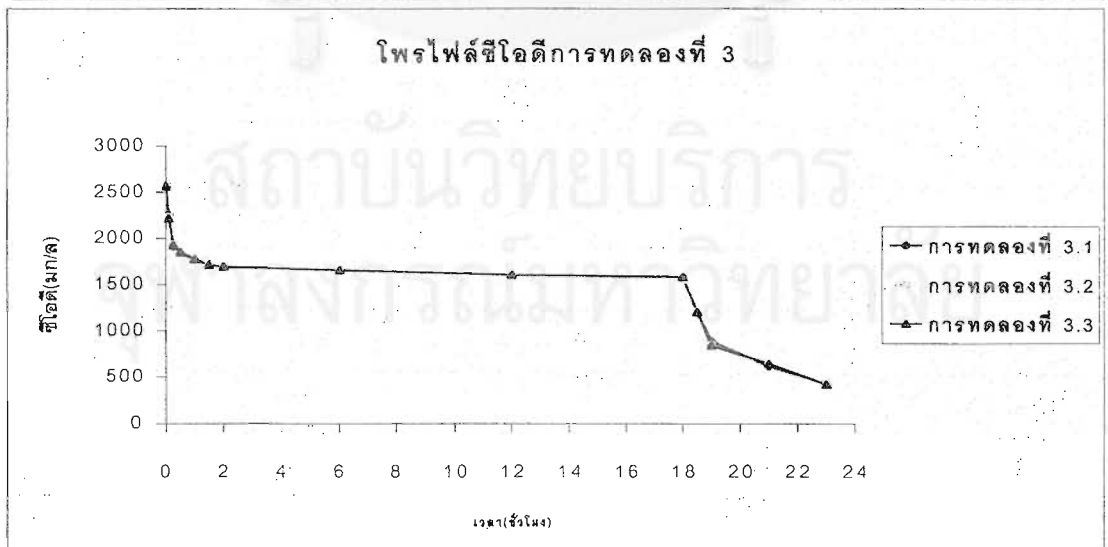
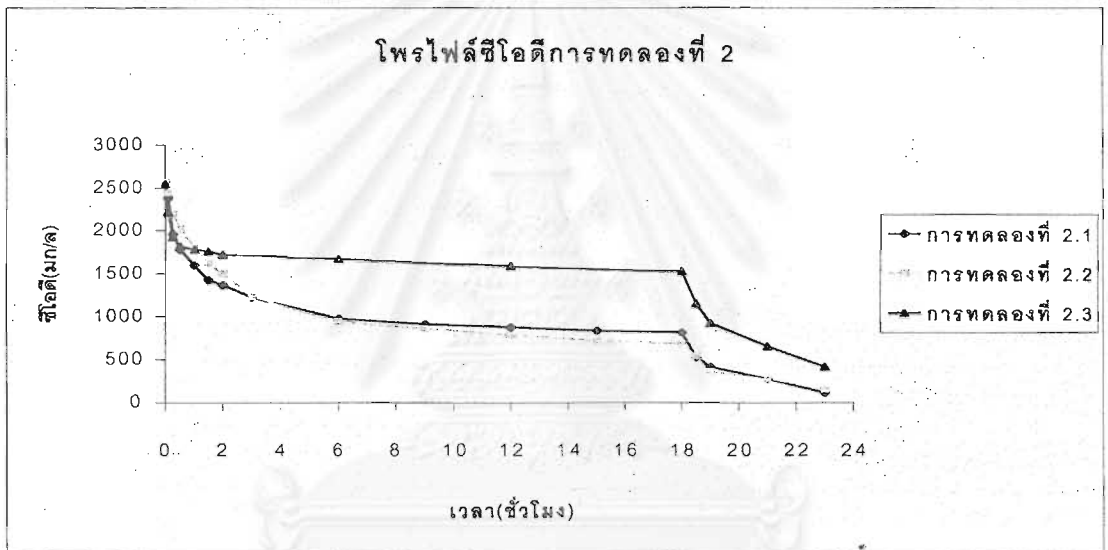
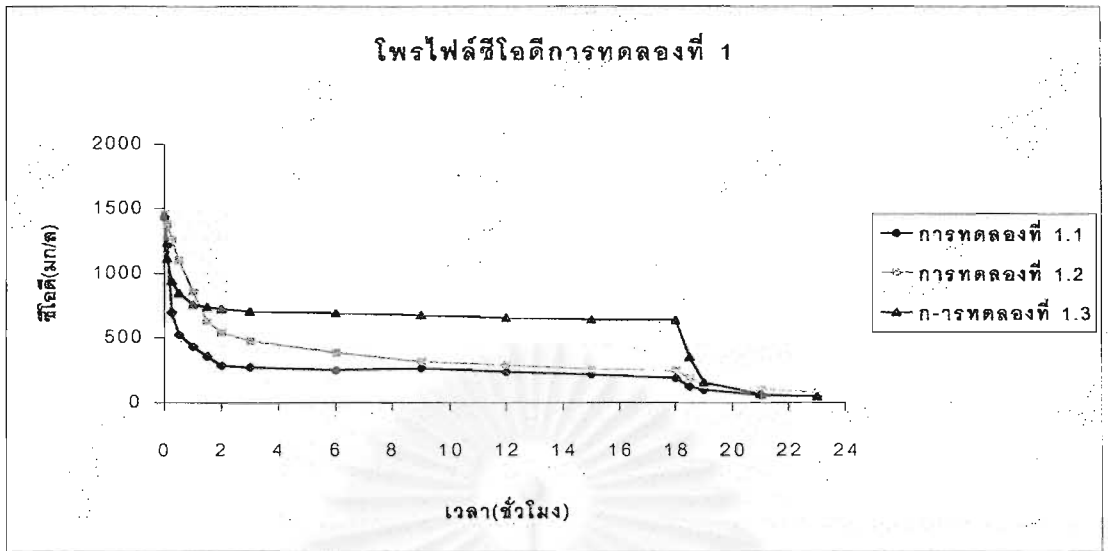
รูปที่ 4.24 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.25 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.26 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.27 โพรไฟล์ซีโอดีของแต่ละการทดลอง

4.1.7 ทีเคเอ็น

ในงานวิจัยนี้เติมไนโตรเจน(ยูเรีย) ในอัตราส่วน ซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 150 : 5 ค่าเฉลี่ยทีเคเอ็นช่วงสถานะคงตัวแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.28 ถึง 4.30 เป็นผลการทดลองทีเคเอ็นในแต่ละชุดการทดลอง กรณีของนม(การทดลองที่ 1.2 และ 2.2) จะมีที่เค้นสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ประมาณ 2 เท่า เพราะมีไนโตรเจนจากนมส่วนหนึ่ง โดยประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1 สำหรับน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตทเท่ากับ 92.08% 24.03% และ 61.36% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 เท่ากับ 92.00% 44.39% และ 86.45% ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 3 เท่ากับ 86.17% 86.10% และ 86.42% ตามลำดับ เมื่อเทียบชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า เมื่อซีโอดีสารอาหารเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของนมและโซเดียมอะซิเตทเพิ่มสูงขึ้น(แม้จะมีทีเคเอ็นในน้ำเสียเข้ามากขึ้นก็ตาม) โดยเฉพาะการทดลองที่ 2.3 สามารถทำให้ทีเคเอ็นในน้ำออกต่ำกว่าการทดลองที่ 1.3 (ให้โซเดียมอะซิเตทเหมือนกัน) ฉะนั้นเมื่อซีโอดีสูงขึ้น การกำจัดทีเคเอ็นของนมและโซเดียมอะซิเตทมีแนวโน้มดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับน้ำตาล ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นยังใกล้เคียงการทดลองที่ 1.1

ตารางที่ 4.7 ค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยแต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น

การทดลองที่	ทีเคเอ็นเฉลี่ย* (มก/ล)			ประสิทธิภาพเฉลี่ย การกำจัดทีเคเอ็น %
	น้ำเข้า**	แอมโมเนีย	ไนโตรเจน	
1.1	47.8	21.3	3.8	92.08
1.2	87.5***	77.0	66.5	24.03
1.3	47.1	36.3	18.2	61.36
2.1	85.4	33.6	6.8	92.00
2.2	174.7****	143.7	97.1	44.39
2.3	86.2	45.1	11.7	86.45
3.1	86.3	45.4	11.9	86.17
3.2	86.3	45.3	12.0	86.10
3.3	86.3	44.8	11.7	86.42

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว

** ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

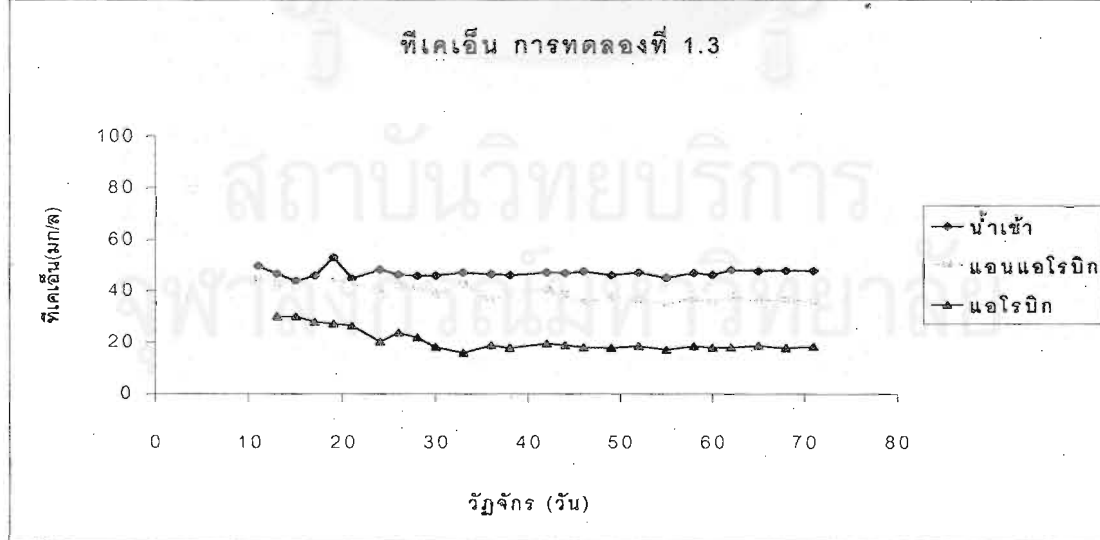
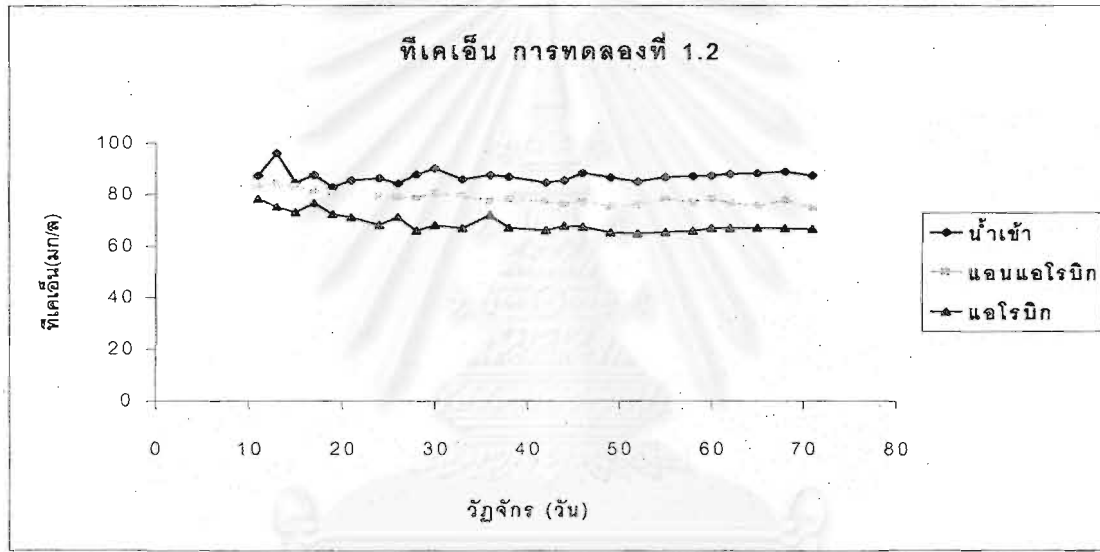
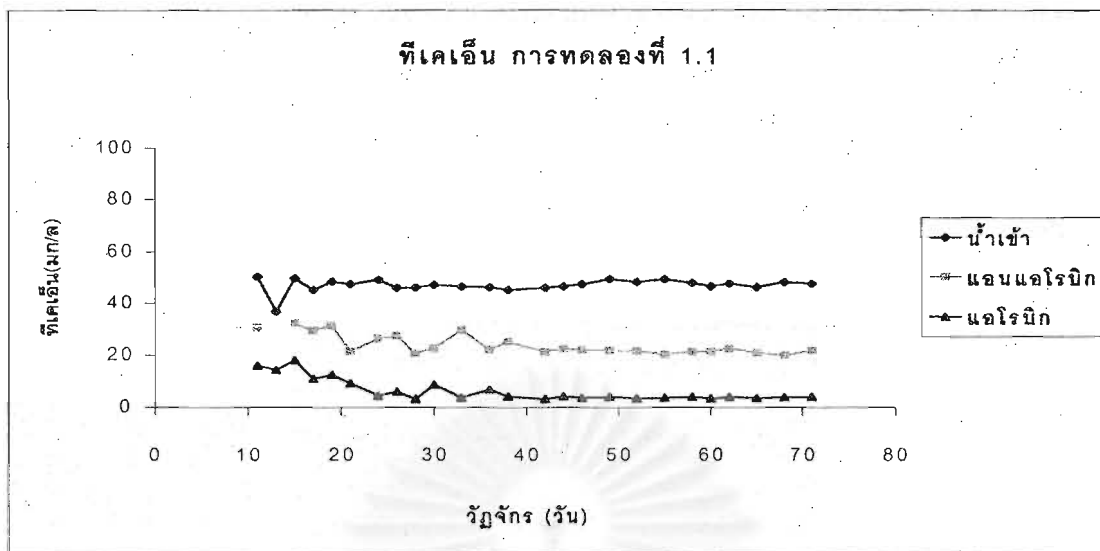
และ* มีค่า COD:N= 150:9 และ 150:10 ตามลำดับ เพราะได้ไนโตรเจนเพิ่มจากนม

ปริมาณที่เคเอ็นในน้ำเสียเข้าทั้ง 3 ชุดการทดลอง ควบคุมให้เพียงพอแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เท่านั้น เมื่อซีโอดีเพิ่มขึ้นทำให้อาหารสำหรับจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เซลล์จึงเจริญเติบโตได้มากส่งผลให้น้ำไนโตรเจนไปใช้สร้างเซลล์มากขึ้นตาม ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นที่เพิ่มขึ้นคาดว่าเกิดจากนำไปใช้สร้างเซลล์เป็นส่วนใหญ่ เพราะเมื่อซีโอดีสูงขึ้น จุลินทรีย์ (Heterotroph) เจริญเติบโตมากขึ้นทำให้มีการเกาะติดบนวัสดุตัวกลางมากขึ้น และมีการหลุดลอกได้มากและเร็วเช่นกัน แต่จุลินทรีย์พวกไนตริไฟเออร์ เจริญเติบโตช้ากว่า จึงไม่สามารถโตได้ทันก่อนที่ฟิล์มจะหลุดลอก ซึ่งจะส่งผลให้การกำจัดที่เคเอ็นลดลง แต่ในการทดลองกลับได้ประสิทธิภาพกำจัดที่เคเอ็นดีขึ้น ดังนั้นคาดว่าจุลินทรีย์นำไนโตรเจนไปใช้สร้างเซลล์เป็นส่วนใหญ่มากกว่าผลจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

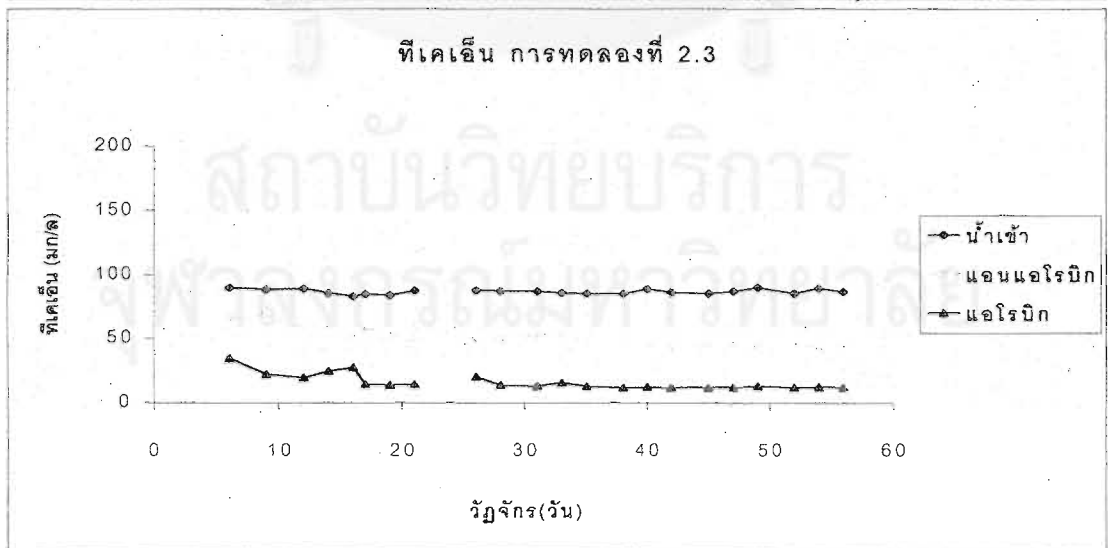
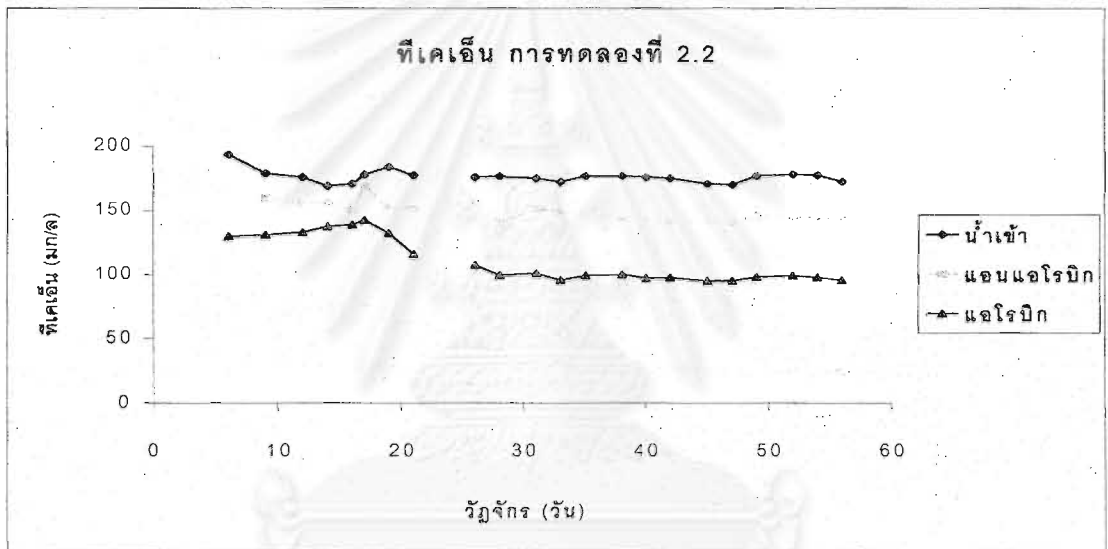
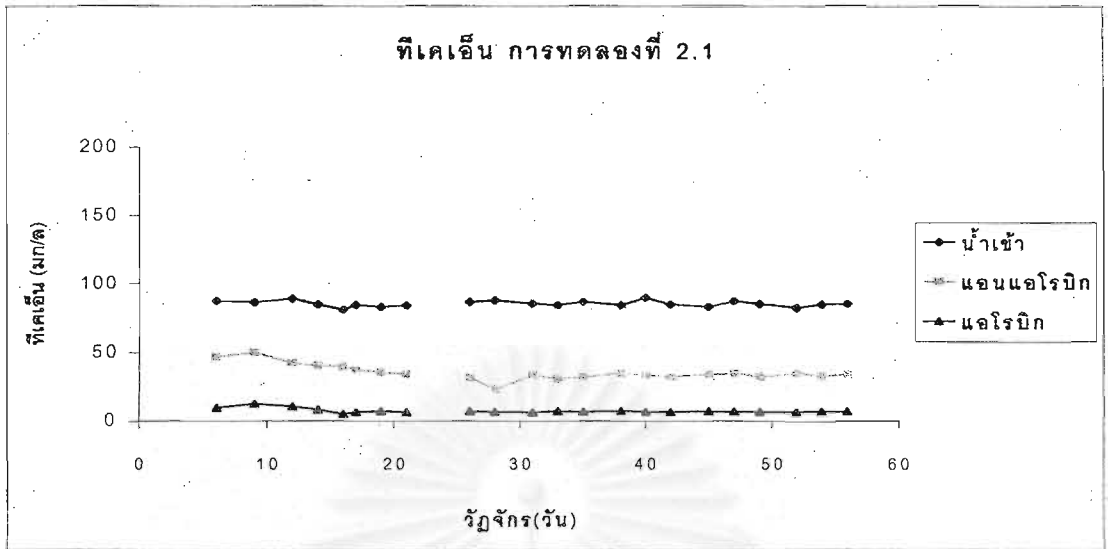
จากรูปที่ 4.31 แสดงโพรไฟล์การกำจัดที่เคเอ็นในสถานะคงตัว ในชุดการทดลองที่ 1 พบว่าภายใน 3 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก น้ำตาลสามารถกำจัดที่เคเอ็นได้เร็วมาก(กราฟโพรไฟล์มีความชันมาก) และสามารถกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้ถึง 55.35% ตลอดช่วงเวลาแอนแอโรบิก ส่วนนมกำจัดที่เคเอ็นช่วงแอนแอโรบิกได้ช้ามาก โดยกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้เพียง 12.01% ตลอดช่วงเวลาแอนแอโรบิก และโซเดียมอะซิเตทกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้ 22.97 % ตลอดช่วงเวลาแอนแอโรบิก ส่วนช่วงแอโรบิก น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตทยังสามารถกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้อีก 36.73% 12.02% และ 38.39% ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 2 ช่วงแอนแอโรบิกทั้งน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท กำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้ 60.66% 17.72% และ 47.70% ตามลำดับ และช่วงแอโรบิก กำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้อีก 31.37% 26.67% และ 38.75% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อซีโอดีเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นช่วงแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้นทุกชนิดสารอาหาร โดยเฉพาะนมและโซเดียมอะซิเตทมีกราฟโพรไฟล์ช่วงแอนแอโรบิกที่ชันขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าซีโอดีมีส่วนช่วยในการกำจัดที่เคเอ็นของสารอาหารทั้ง 2 ชนิดในช่วงแอนแอโรบิกอย่างมาก โดยเฉพาะช่วงแอนแอโรบิกโซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพเพิ่มจาก 22.97% เป็น 47.70%

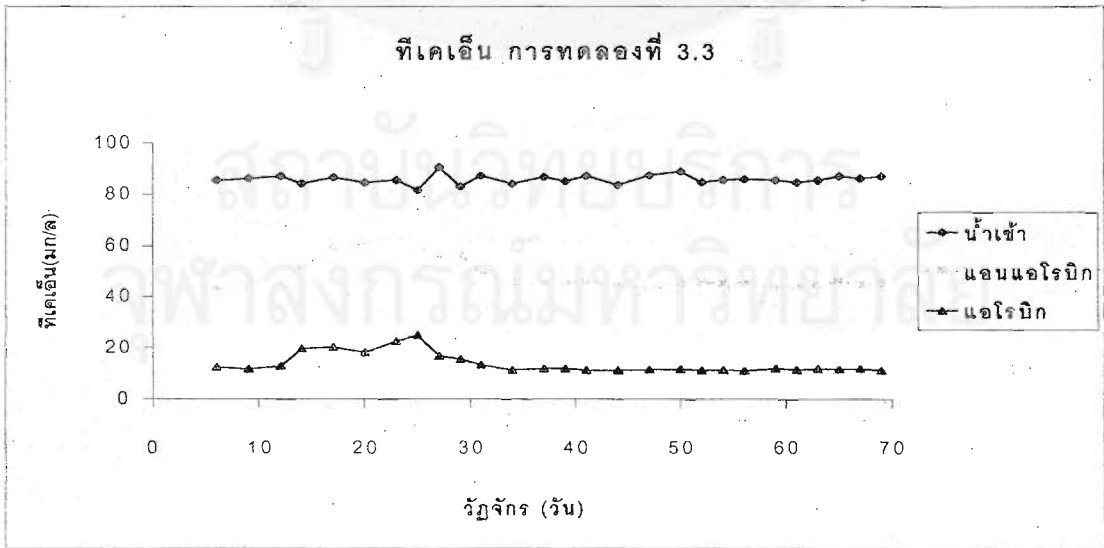
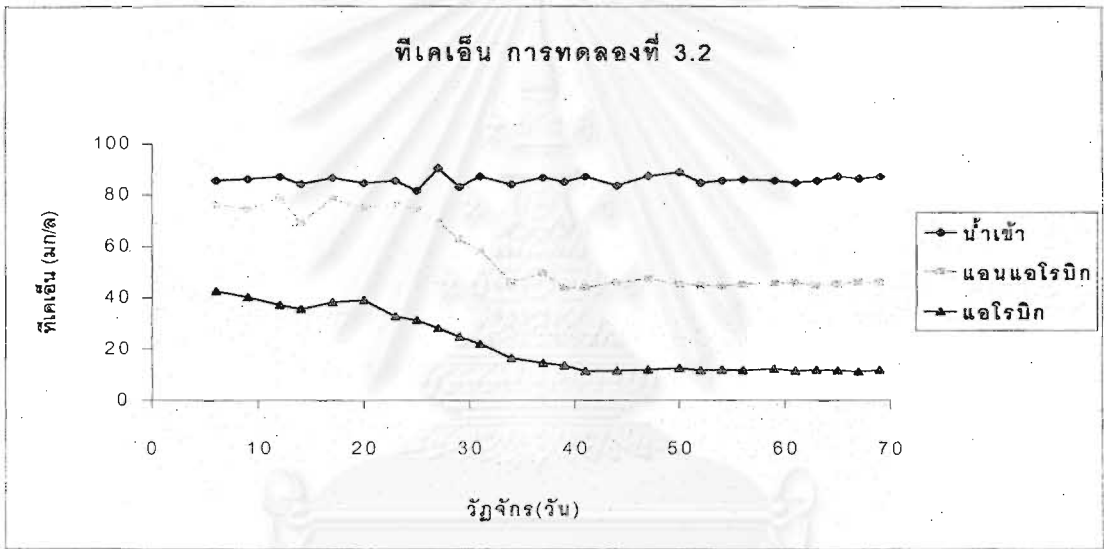
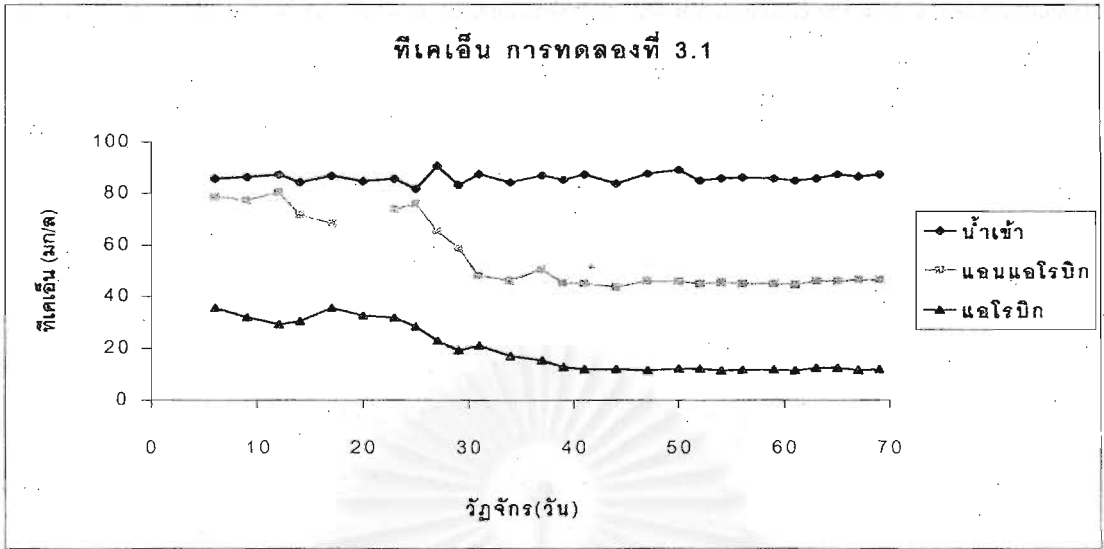
ชุดการทดลองที่ 3 มีการแปรผันอัตราส่วนซีโอดี ต่อ ฟอสฟอรัสเป็น 150:4 150:8 และ 150:10 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยช่วงแอนแอโรบิกเท่ากับ 47.42% 47.45% และ 48.04% ตามลำดับและช่วงแอโรบิกสามารถกำจัดที่เคเอ็นเฉลี่ยได้อีก 38.75% 38.65% และ 38.38% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นทั้งช่วงแอนแอโรบิกและแอโรบิกใกล้เคียงการทดลองที่ 2.3 ดังนั้นฟอสฟอรัสปริมาณสูงจึงไม่มีผลกระทบต่อการกำจัดที่เคเอ็น



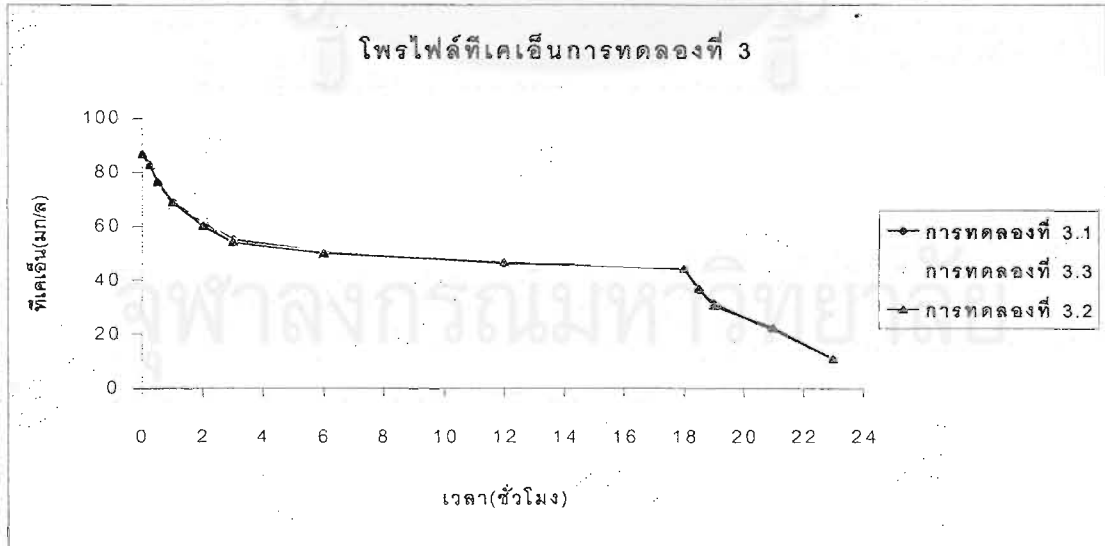
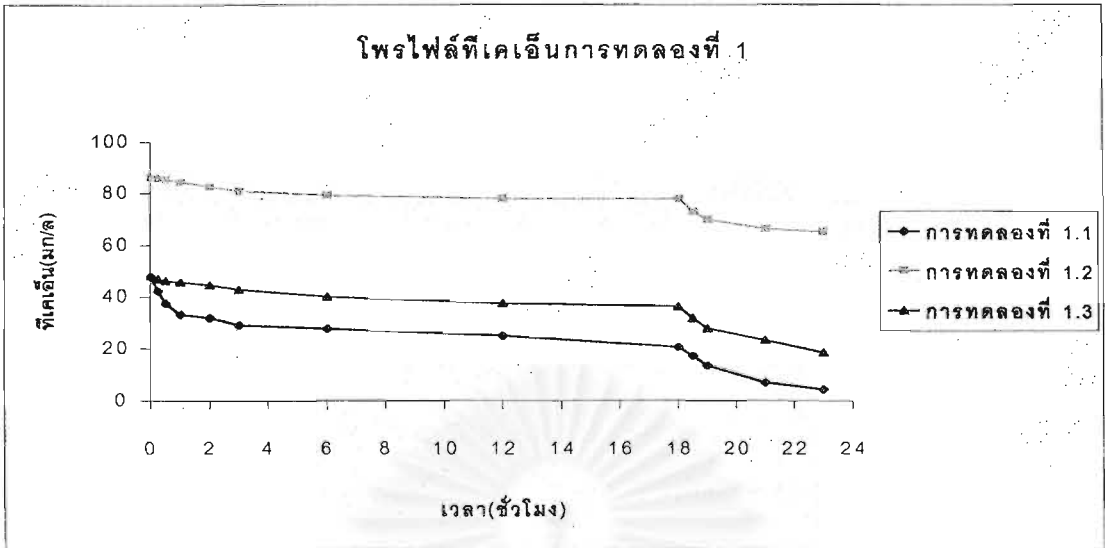
รูปที่ 4.28 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.29 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.30 ทีเคเอ็นของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.31 โพรไฟล์ที่เคเอ็นของแต่ละการทดลอง

4.1.8 ฟอสฟอรัสละลาย

ในงานวิจัยมีการใช้สารอาหารที่ต่างกันเพื่อศึกษาผลกระทบต่อการจัดฟอสฟอรัสละลาย โดยระบบบำบัดแอสซิโบลีที่ใช้ก็เป็นระบบสำหรับกำจัดธาตุอาหารเช่นกัน ดังนั้นฟอสฟอรัสละลายจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญ ในการศึกษาควบคู่กับการลดสีด้วย โดยชุดการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นการศึกษาผลของสารอาหารแต่ละชนิดว่ามีประสิทธิภาพการจัดฟอสฟอรัสละลายแตกต่างกันอย่างไร ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาฟอสฟอรัสปริมาณสูงที่มีผลต่อการลดสี (โดยใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นสารอาหาร) ตารางที่ 4.8 แสดงค่าฟอสฟอรัสละลายเฉลี่ยในช่วงสถานะคงตัว รูปที่ 4.33 ถึง 4.35 เป็นผลการทดลองฟอสฟอรัสละลายในแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.8 ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยแต่ละการทดลองและประสิทธิภาพการจัดฟอสฟอรัส

การทดลองที่	ฟอสฟอรัสละลายเฉลี่ย*(มก/ล)			ประสิทธิภาพเฉลี่ยการจัดฟอสฟอรัสละลาย%
	น้ำเข้า**	แอสซิโบลี	แอสซิโบลี	
1.1	18.0	15.3	11.5	35.94
1.2	26.8***	24.4	14.3	46.65
1.3	18.0	11.5	8.5	52.56
2.1	17.6	12.8	1.1	93.93
2.2	26.6	13.5	6.6	75.21
2.3	17.6	4.0	1.1	93.53
3.1	69.4	48.4	34.0	51.01
3.2	139.9	104.5	90.1	35.63
3.3	170.2	127.5	108.3	36.35

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว **ค่าของตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง

*** มีค่า COD:P = 150:3 เพราะได้ฟอสฟอรัสเพิ่มจากนม

ชุดการทดลองที่ 1 กำหนดค่า ซีโอดี ต่อ ฟอสฟอรัส เท่ากับ 150:2 โดยเติมฟอสฟอรัสในรูป KH_2PO_4 แต่การทดลองที่ 1.2 จะมีฟอสฟอรัสเข้ามากกว่า การทดลองที่ 1.1 และ 1.3 เพราะมีฟอสฟอรัสบางส่วนจากนม ชุดการทดลองที่ 2 แม้ซีโอดีน้ำเข้าจะเพิ่มขึ้น แต่กำหนดค่าฟอสฟอรัสให้มีค่าคงเดิมเพราะต้องการเปรียบเทียบผลของซีโอดีที่เพิ่มขึ้นต่อประสิทธิภาพการจัดฟอสฟอรัสละลาย ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ทดลองเติมฟอสฟอรัสปริมาณสูงโดยจะแปรผัน

อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส เป็น 150:4 150:8 และ 150:10 คำว่า "ฟอสฟอรัส" ในความหมายต่อจากนี้จนจบหัวข้อ หมายถึง ฟอสฟอรัสละลาย

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสชุดการทดลองที่ 1 สำหรับน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตทเท่ากับ 35.94% 46.65% และ 52.56% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 เท่ากับ 93.93% 75.21% และ 93.53% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 สำหรับ COD:P = 150:4 150:8 และ 150:10 เท่ากับ 51.01% 35.63% และ 36.35% ตามลำดับ

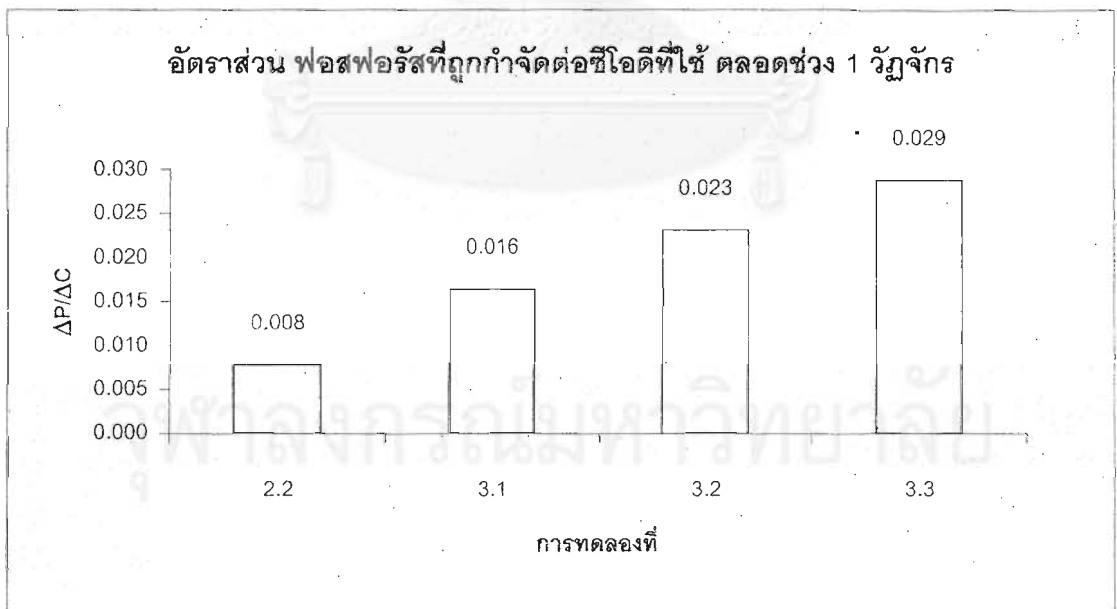
เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า ซีโอดีที่เพิ่มมีผลอย่างมากต่อการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น สำหรับ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก 57.99% 28.56% และ 40.97% ตามลำดับ จากรูปที่ 4.36 แสดงโพรไฟล์การกำจัดฟอสฟอรัสพบว่า ในชุดการทดลองที่ 1 โซเดียมอะซิเตทสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าน้ำตาลและนมในช่วงแอนแอโรบิก โดยโซเดียมอะซิเตทกำจัดฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วได้ตลอดช่วงวัฏจักร ส่วนน้ำตาลและนมสามารถกำจัดฟอสฟอรัสรวดเร็วใน 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นค่าฟอสฟอรัสในน้ำค่อนข้างคงที่ จนถึงช่วงแอโรบิก ทั้งน้ำตาลและนมสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีมาก(กราฟโพรไฟล์ชันมาก) เพราะมีวีเอฟออกซิไดซ์ช่วงแอโรบิกมาก การกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยในช่วงแอนแอโรบิกสำหรับ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท เท่ากับ 2.7 2.4 และ 6.5 มก/ล ตามลำดับ นมกำจัดฟอสฟอรัสช่วงแอนแอโรบิกได้ค่อนข้างต่ำ อาจเป็นเพราะ 1.) นมเป็นสารอาหารที่ต้องผ่านขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดนาน ก่อนจุลินทรีย์จะนำไปใช้ได้ เนื่องจากนมมีโมเลกุลที่ใหญ่และซับซ้อนกว่า 2.) ฟอสฟอรัสที่เป็นส่วนประกอบของนมอยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัส ซึ่งจุลินทรีย์จะนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้ต้องอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต(ละลายน้ำ) จึงต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสนานกว่า เหตุผลที่โซเดียมอะซิเตทกำจัดฟอสฟอรัสได้เร็วเนื่องจากเมื่อโซเดียมอะซิเตทละลายน้ำ จะแตกตัวให้กรดอะซิติกซึ่งจุลินทรีย์สามารถดึงไปใช้ได้ทันที ส่วนน้ำตาลก็ต้องผ่านขั้นตอนสร้างกรดก่อนจุลินทรีย์นำไปใช้เช่นกัน ในช่วงแอโรบิก น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท สามารถกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพิ่มอีกเท่ากับ 3.8 10.1 และ 3.0 มก/ล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าน้ำตาลและนมจะกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในช่วงแอโรบิก เนื่องจากช่วงต้นแอนแอโรบิกต้องใช้เวลาส่วนใหญ่เพื่อเปลี่ยนสารอาหารเป็นวีเอฟก่อนจุลินทรีย์จะนำไปใช้ แต่โซเดียมอะซิเตทจะกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ช่วงแอนแอโรบิกเนื่องจากจุลินทรีย์นำวีเอฟที่เกิดขึ้นไปใช้ได้ทันที และสาเหตุที่โซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสละลายได้ดีที่สุด คาดว่ามาจากพีเอชที่สูง เกิน 8 ในช่วงแอนแอโรบิกและแอโรบิก มีส่วนช่วยทำให้เกิดการจับออร์โ

ฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วตกผลึกในรูปของผลึกสารประกอบแคลเซียม ร่วมกับผลของการนำฟอสฟอรัสไปสร้างเซลล์จุลินทรีย์ปกติ

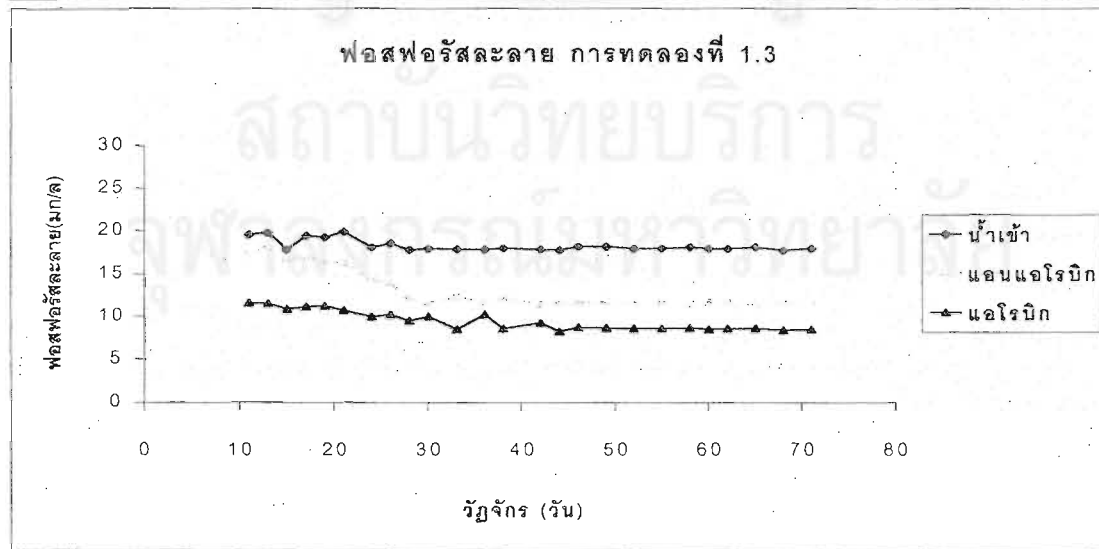
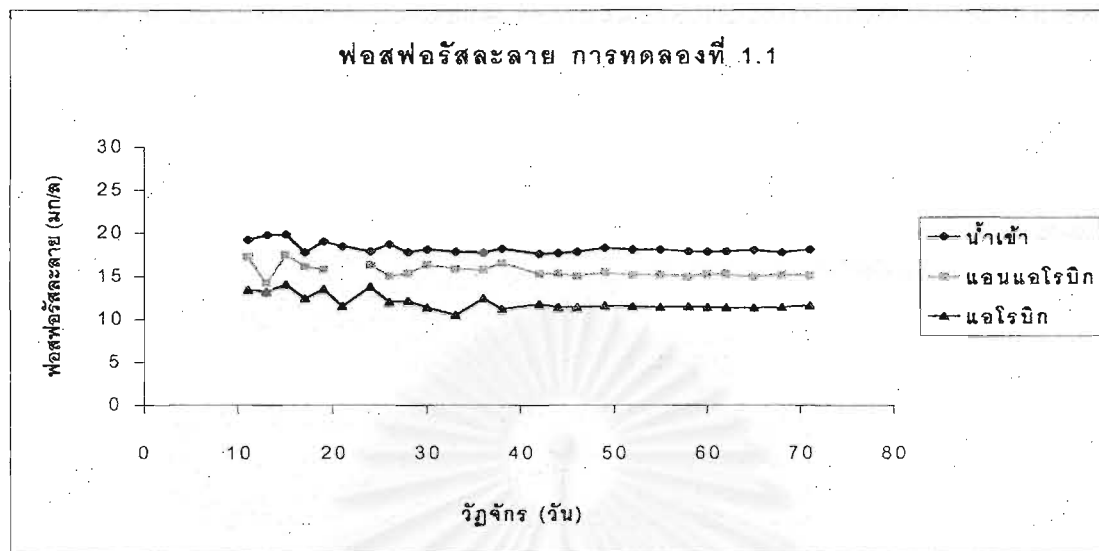
ชุดการทดลองที่ 2 จะเห็นแนวโน้มการกำจัดฟอสฟอรัสเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยช่วงแวนแวนโรบิก สำหรับน้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท กำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยได้ 4.8 13.1 และ 13.6 มก/ล ตามลำดับ ช่วงแวนโรบิกสามารถกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยได้อีกเท่ากับ 11.7 6.9 และ 2.9 มก/ล ตามลำดับ แนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงคือ เมื่อซีโอดีเพิ่มขึ้น สารอาหารทุกตัวสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น โดยเฉพาะช่วงแวนโรบิกของนมและโซเดียมอะซิเตทกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับน้ำตาล ที่น่าสนใจคือกรณีของนม เมื่อซีโอดีเพิ่มขึ้นก็สามารถผลิตวีเอฟเอได้มาก รวมทั้งทำให้จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนฟอสฟอรัสในนมเป็นรูปออร์โธฟอสเฟตได้มากและเร็วขึ้น การกำจัดฟอสฟอรัสในช่วงแวนโรบิกจึงดีขึ้นอย่างชัดเจน รูปที่ 4.36 แสดงโพรไฟล์การกำจัดฟอสฟอรัสพบว่า น้ำตาลและนมมีการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วใน 6 ชั่วโมงแรกของแวนแวนโรบิก หลังจากนั้นฟอสฟอรัสลดลงไม่มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับการกำจัดซีโอดีอย่างรวดเร็วในช่วง 6 ชั่วโมงแรกเช่นกัน แต่โซเดียมอะซิเตท สามารถกำจัดฟอสฟอรัสรวดเร็วและต่อเนื่อง (เส้นกราฟลดลงเรื่อยๆ จนถึงช่วงแวนโรบิก) ส่วนช่วงแวนโรบิก ทั้งน้ำตาลและนมกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มอีกอย่างเห็นได้ชัดเพราะยังมีซีโอดีเหลือมาก รวมถึงมีฟอสฟอรัสเหลือให้จับใช้อีกมากด้วย

ชุดการทดลองที่ 3 มีการเติมฟอสฟอรัสให้เกินพอ โดยการทดลองที่ 3.1-3.3 มีอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 150:4 150:8 และ 150:10 ตามลำดับ แนวโน้มการกำจัดฟอสฟอรัสคล้ายกันทั้ง 3 การทดลอง คือฟอสฟอรัสลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแวนแวนโรบิก หลังจากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่จนถึงช่วงแวนโรบิก ฟอสฟอรัสจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดอีกครั้ง โดยค่าอัตราส่วน $\Delta P/\Delta C$ หมายถึง ปริมาณฟอสฟอรัสที่กำจัดได้ต่อซีโอดีที่ถูกใช้ไปตลอดช่วง 1 วัฏจักร มีหน่วยเป็น มก/ล ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดต่อ มก/ล ของซีโอดีที่ถูกใช้ โดยการทดลองที่ 3.1-3.3 มีค่า $\Delta P/\Delta C$ เฉลี่ยเท่ากับ 0.016 0.023 และ 0.026 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 2.3 (COD:P = 150:2) ซึ่งมีค่า $\Delta P/\Delta C$ เท่ากับ 0.008 (รูปที่ 4.32) ซึ่งคาดว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไปกระตุ้นเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ให้สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากขึ้นกว่าปกติ และเนื่องจากซีโอดีเข้าและจุลินทรีย์(วีเอสเอส) ในน้ำทิ้งและบนวัสดุตัวกลางใกล้เคียงกันทั้ง 3 การทดลอง แสดงว่าสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ไม่เท่ากัน จึงสามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำได้ต่างกัน

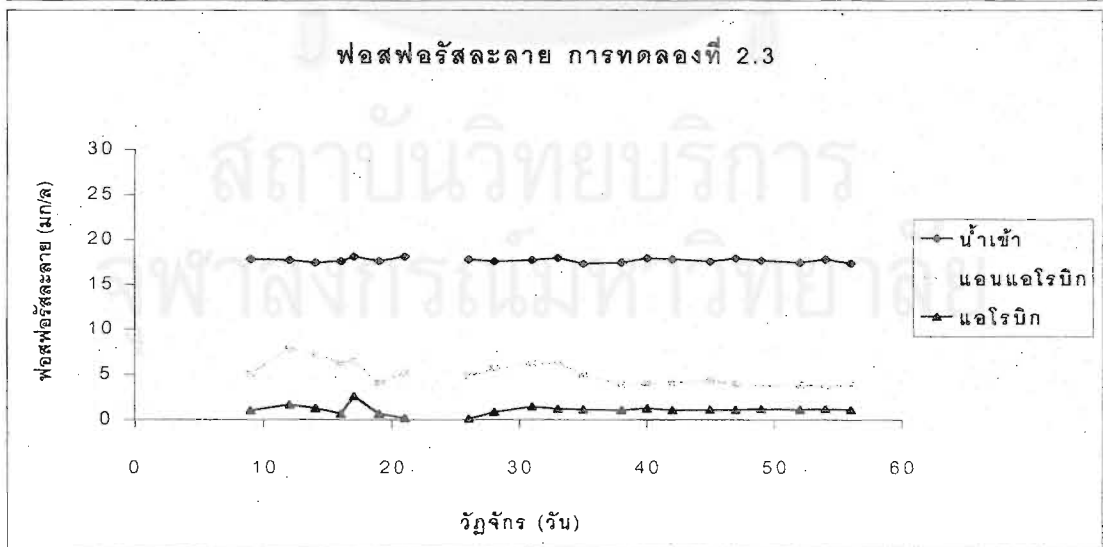
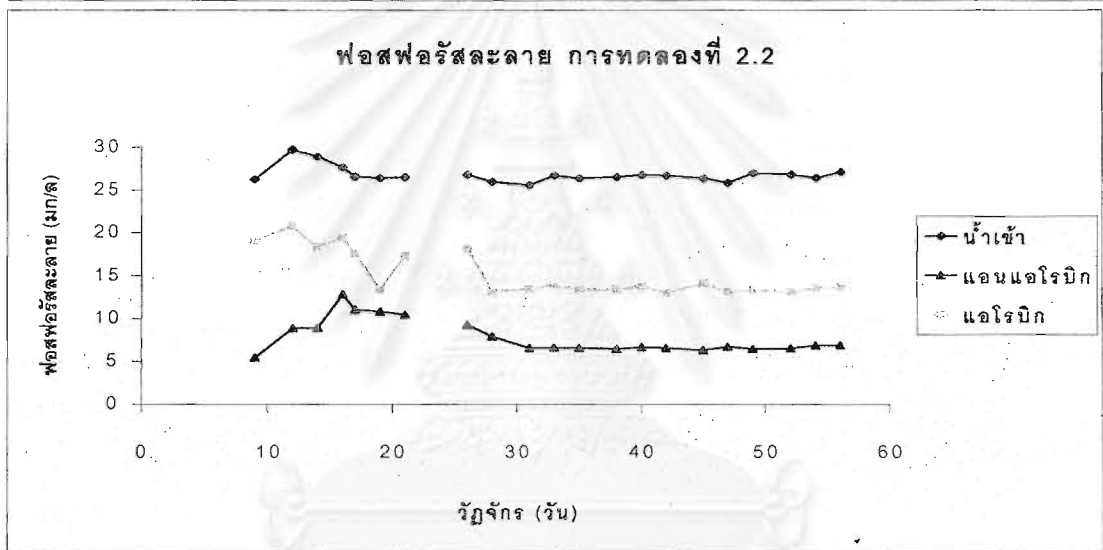
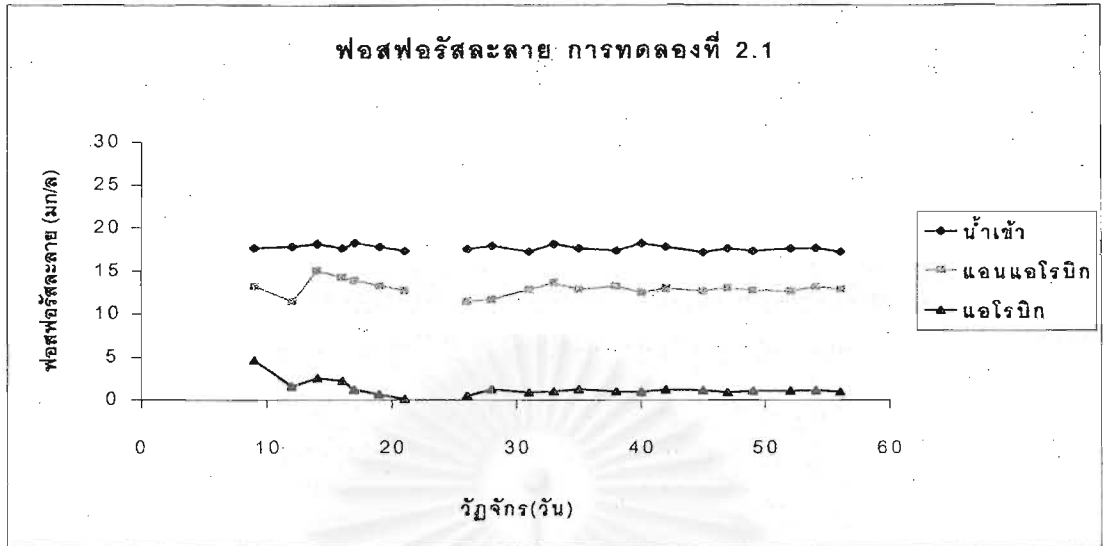
โซเดียมอะซิเตทเป็นสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอิมปีฟิอาร์ เพื่อต้องการให้เกิด PAOs ขึ้นในระบบ แต่ในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ไม่เกิดปรากฏการณ์การกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ เพราะฟอสฟอรัสที่เติมให้เพียงพอสำหรับการสังเคราะห์เซลล์เท่านั้น ส่วนชุดการทดลองที่ 3 แม้จะเพิ่มฟอสฟอรัสเข้าเฉลี่ยสูงสุดถึง 170.2 มก/ล (COD:P = 150:10) ซึ่งฟอสฟอรัสปริมาณดังกล่าวเกินพอสำหรับส่งเสริมให้พีเอไอเป็นสายพันธุ์เด่นในถังปฏิกิริยา แต่ก็ยังไม่เกิดการปล่อยฟอสฟอรัสในชั้นแอนแอโรบิก อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของอะซิเตทสูงเกินไปจนเป็นพิษต่อ PAOs Randall and Rodney(1994) อ้างถึงใน โกมล เอี่ยมเสมอ(2541) ไม่น่าเป็นผลของพีเอไอในช่วงแอนแอโรบิกที่สูงถึง 8.4 – 8.5 จากโมเดลของ Smolder(1995) อ้างถึงใน โกมล เอี่ยมเสมอ (2541) ซึ่งกล่าวว่า การดูดซึมอะซิเตทผ่านเซลล์ขึ้นกับค่าพีเอไอ โดยช่วงพีเอไอต่ำ การดูดซึมของอะซิเตทผ่านเซลล์ต้องการพลังงานเพียงเล็กน้อย แต่ขณะที่พีเอไอสูงขึ้นทำให้การดูดซึมของอะซิเตทผ่านเซลล์ต้องการพลังงานเท่ากับ 0.5 โมลATP/คาร์บอนโมลอะซิเตท ซึ่งจะทำให้เกิดการปล่อยฟอสฟอรัสในชั้นแอนแอโรบิกมากขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอ ซึ่งขัดแย้งกับชุดการทดลองที่ 3 จึงคาดว่าในช่วงแอนแอโรบิกไม่มีการปล่อยฟอสฟอรัสออกมา อาจจะมีผลจากความเป็นพิษของโซเดียมอะซิเตท



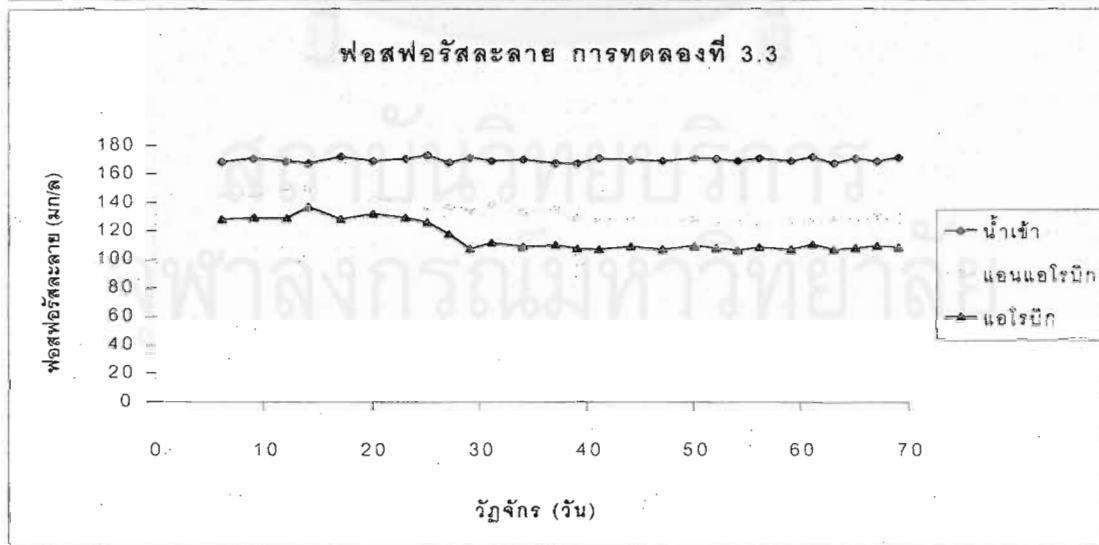
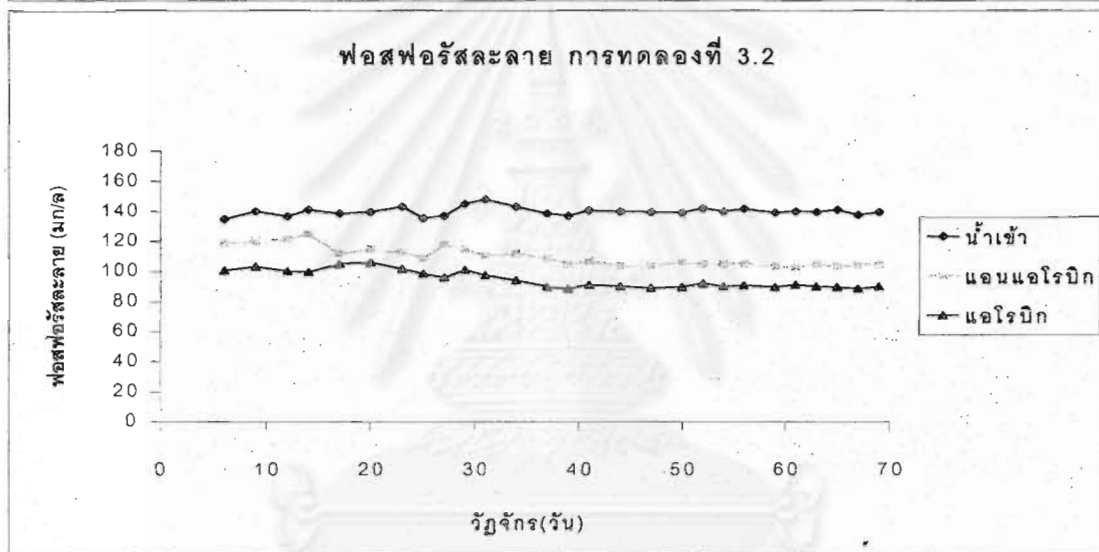
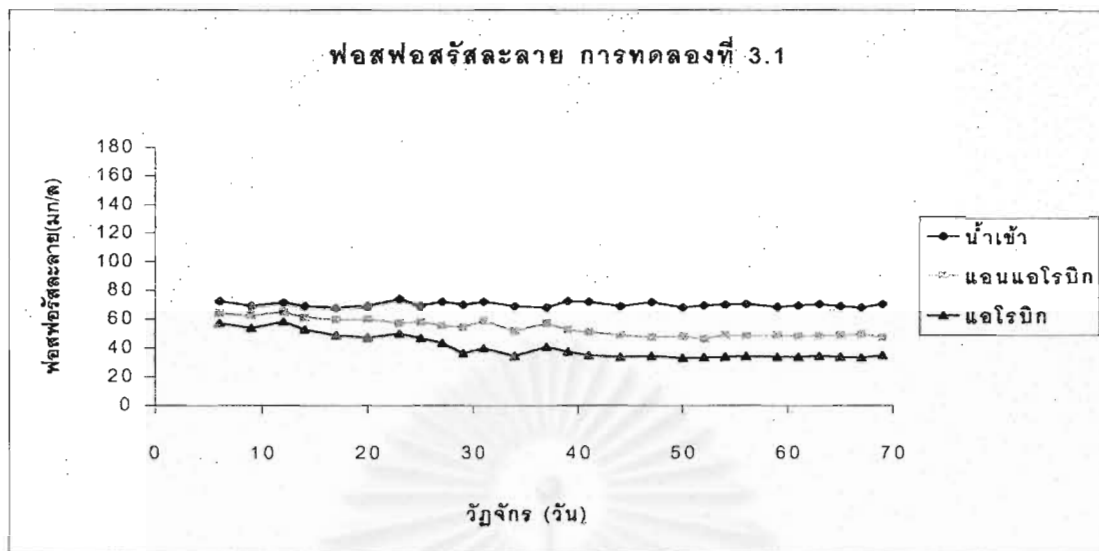
รูปที่ 4.32 อัตราส่วน ฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดต่อซีโอดีที่ใช้ ตลอดช่วง 1 วัฏจักร ของการทดลองที่ 2.3 เทียบกับชุดการทดลองที่ 3



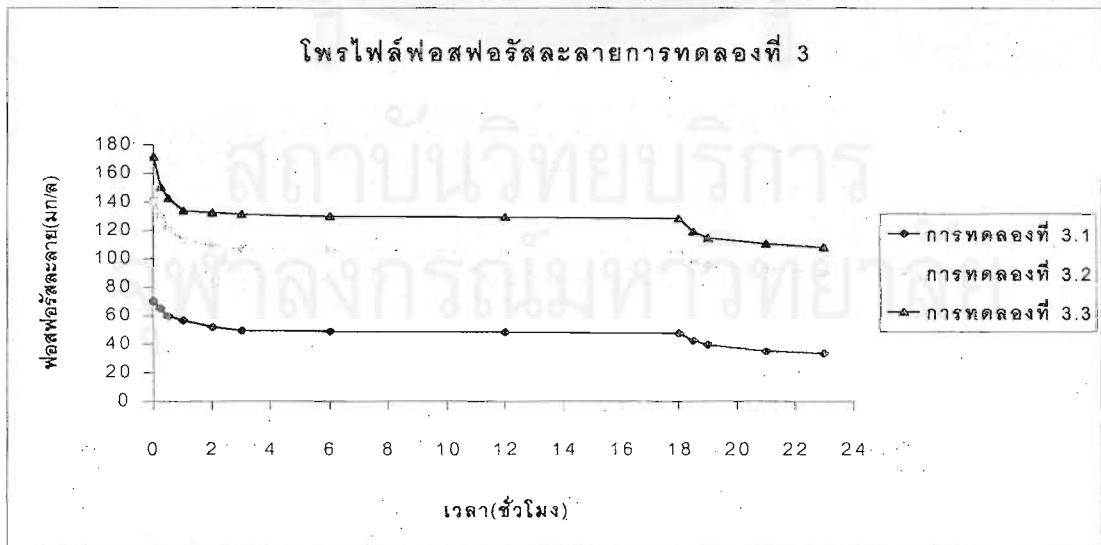
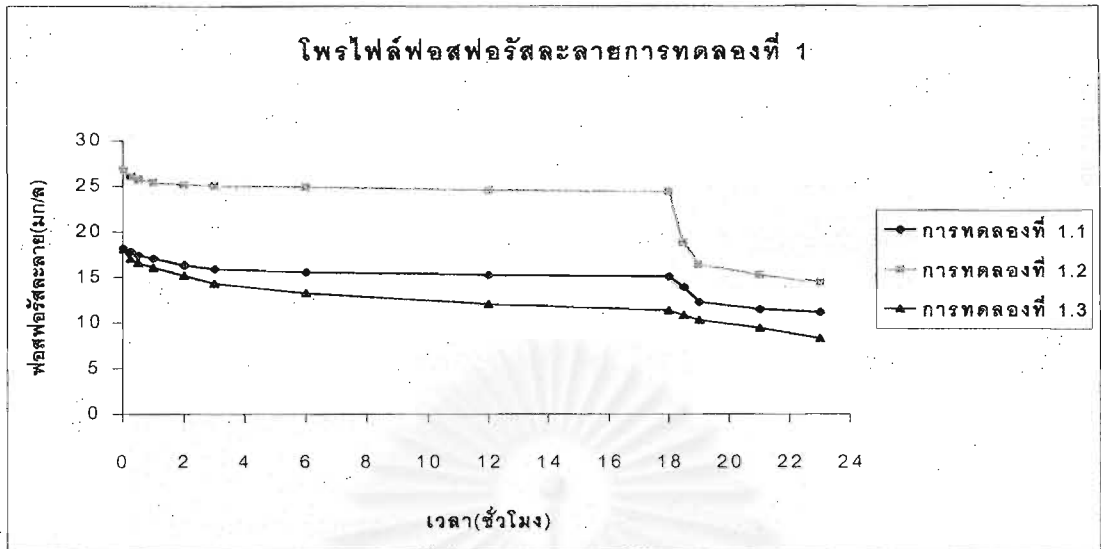
รูปที่ 4.33 ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.34 ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.35 ฟอสฟอรัสละลายของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.36 โพรไฟล์ฟอสฟอรัสละลายของแต่ละการทดลอง

4.2 สีนหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ

ในงานวิจัยนี้ทำการวัดสีเป็น 2 หน่วย คือ หน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ ซึ่งค่าเฉลี่ยผลการทดลองความเข้มสีทั้ง 2 หน่วยและประสิทธิภาพการลดสีแสดงในตารางที่ 4.9 รูปที่ 4.37 ถึง 4.39 และ 4.41 ถึง 4.43 เป็นผลการทดลองการลดสีทั้งหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอในแต่ละชุดการทดลอง และผลของโพรไฟล์การลดสีตามรูปที่ 4.40 และ 4.44 ในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอตามลำดับ ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีคือ ชนิดของสารอาหาร โครงสร้างของสี และฟอสฟอรัสปริมาณสูงในน้ำเข้า

ตารางที่ 4.9 ความเข้มสีเฉลี่ยและประสิทธิภาพการลดสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ

การทดลองที่	ความเข้มสีเฉลี่ย*						ประสิทธิภาพเฉลี่ย	
	น้ำเข้า		แอนแอโรบิก		แอโรบิก		การลดสี%	
	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ
1.1	130.70	4521.92	30.24	350.47	18.77	244.19	85.64	94.60
1.2	192.07	4290.86	32.21	436.40	20.25	311.38	89.46	92.74
1.3	132.11	4519.82	30.91	350.09	14.10	162.95	89.33	96.39
2.1	465.96	7954.00	110.07	1832.58	86.22	1372.49	81.50	82.74
2.2	482.60	7669.29	90.33	1173.62	78.38	800.21	83.76	89.56
2.3	467.98	8107.42	123.59	1746.75	74.88	824.46	84.00	89.83
3.1	471.28	8096.10	105.56	1566.28	71.01	811.31	84.93	89.98
3.2	471.28	8096.10	94.38	1255.79	63.85	752.79	86.45	90.70
3.3	471.28	8096.10	85.20	1144.87	45.03	365.59	90.44	95.50

* ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 10 วัฏจักรที่สถานะคงตัว

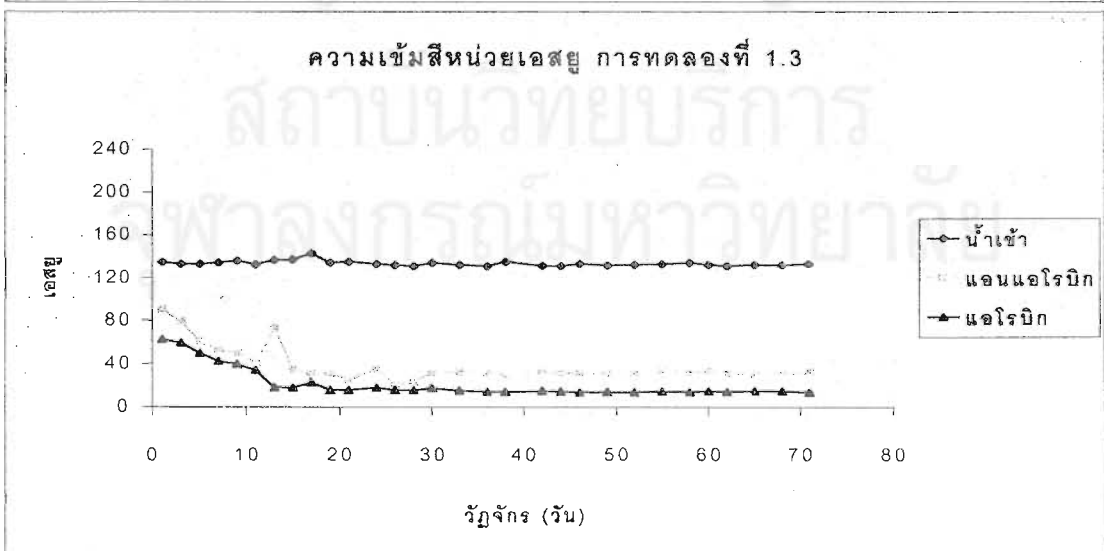
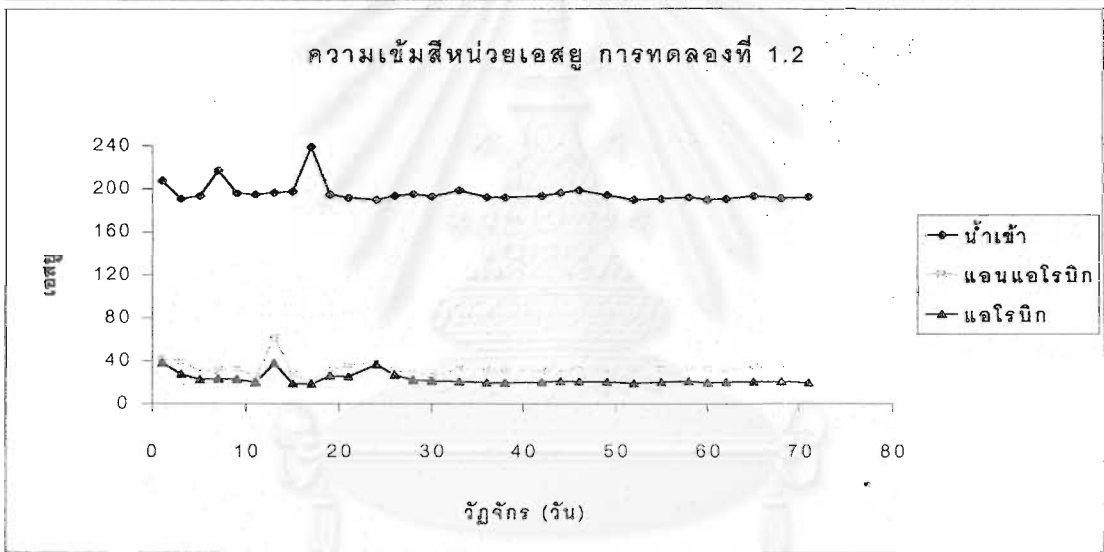
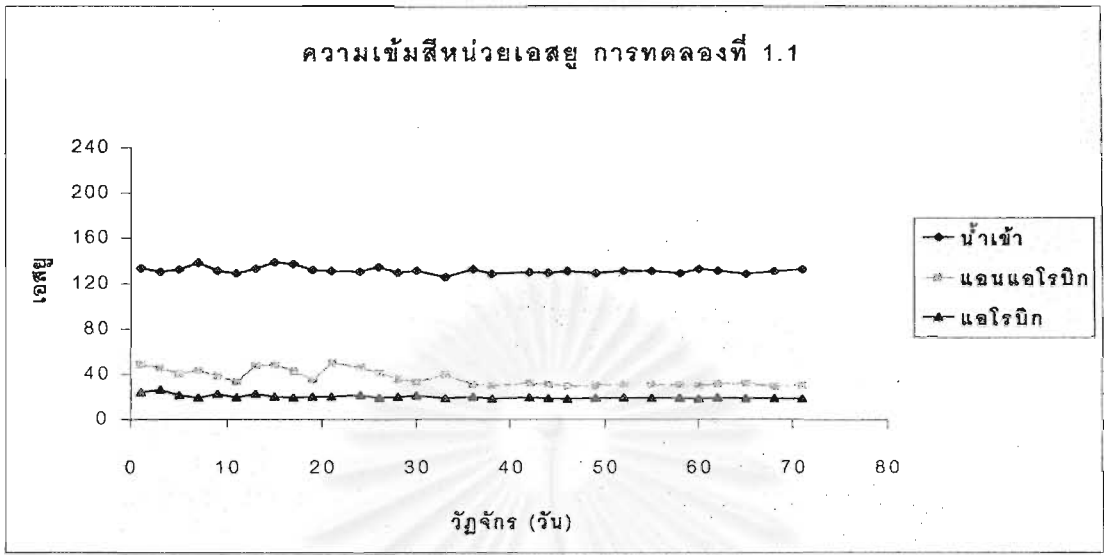
4.2.1 ผลของชนิดสารอาหารต่อประสิทธิภาพการลดสี

ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นการเปรียบเทียบสารอาหาร 3 ชนิด คือ น้ำตาล นม และไซเดียมอะซิเตท ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีทั้งโครงสร้างโมโนอะซิและไดอะซิ โดยชุดการทดลองที่ 1 น้ำตาล นม และไซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 85.64% 89.46% และ 89.33% ในหน่วยเอสยู และ 94.60% 92.74% และ 96.39% ในหน่วยเอดีเอ็มไอตามลำดับ แต่จากตารางที่ 4.9 เห็นได้ว่าน้ำเข้าของนมมีค่าเอสยูสูงกว่า แต่ค่าเอดีเอ็มไอต่ำกว่า น้ำเข้าของน้ำตาลและไซเดียมอะซิเตท เนื่องจากความขุ่นของอนุภาคนมปนอยู่ทำให้ค่าความเข้มสีเอสยูสูง

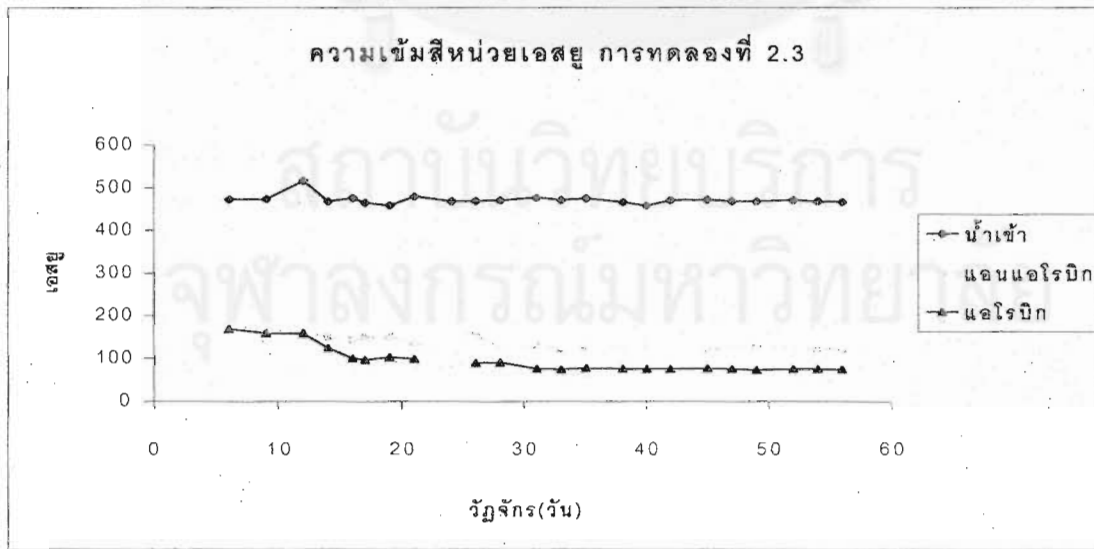
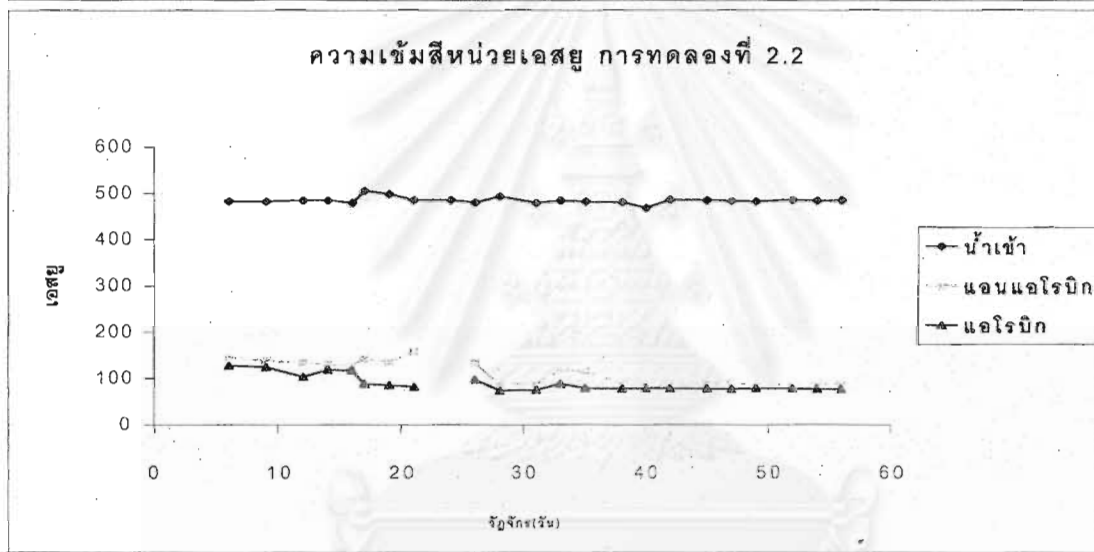
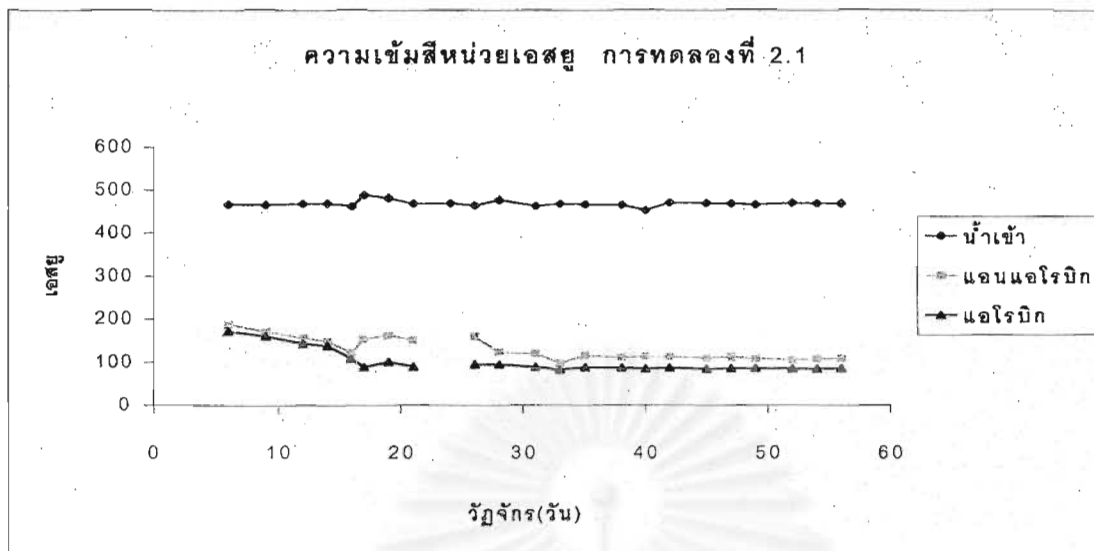
ขึ้น (เนื่องจากดูดกลิ่นแฉะมากขึ้น) ค่าเอดีเอ็มไอที่ลดลงเพราะการวัดอาศัยเปอร์เซ็นต์ทรานสมิทแทนซ์เทียบกับความยาวคลื่น เมื่อความชื้นมากขึ้นทำให้การสแกนของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีแสงผ่านออกจากเซลล์ที่วัดน้อยลง ผลการคำนวณประสิทธิภาพทำให้ดูเหมือนว่านมให้ประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอสยูสูงแต่ในหน่วยเอดีเอ็มไอต่ำกว่าสารอาหารชนิดอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองคำนวณประสิทธิภาพการลดสีของนมโดยปรับฐานการคำนวณเทียบกับความเข้มข้นน้ำเข้าเฉลี่ยของน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตทรวมกันจะได้เอสยูน้ำเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 131.41 และเอดีเอ็มไอเฉลี่ยเท่ากับ 4520.87 จะได้ประสิทธิภาพการลดสีของนมเท่ากับ 84.59% ในหน่วยเอสยู และ 93.11% ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ซึ่งประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอสยูของนมลดลงประมาณ 5% แต่ประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอดีเอ็มไอของนมเพิ่มขึ้นไม่ถึง 1% ดังนั้นประสิทธิภาพการลดสีที่เปลี่ยนแปลงนั้นไม่ถือว่ามีนัยสำคัญในงานทางวิศวกรรม

ชุดการทดลองที่ 2 น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 81.50% 83.76% และ 84.00% ในหน่วยเอสยู และ 82.74% 89.56% และ 89.83% ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ตามลำดับ และเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 น้ำเข้าของนมจะมีค่าเอสยูที่สูงกว่าแต่ค่าเอดีเอ็มไอที่ต่ำกว่า น้ำเข้าของน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตท แต่เมื่อทดลองโดยปรับฐานการคำนวณเทียบกับความเข้มข้นน้ำเข้าเฉลี่ยของน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตทรวมกันจะได้เอสยูน้ำเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 466.97 และเอดีเอ็มไอเท่ากับ 8030.71 จะได้ประสิทธิภาพการลดสีของนมเท่ากับ 83.22% ในหน่วยเอสยู และ 90.04 % ในหน่วยเอดีเอ็มไอ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการลดสีของนมทั้ง 2 หน่วยไม่ได้ต่างจากค่าเดิมมากนัก

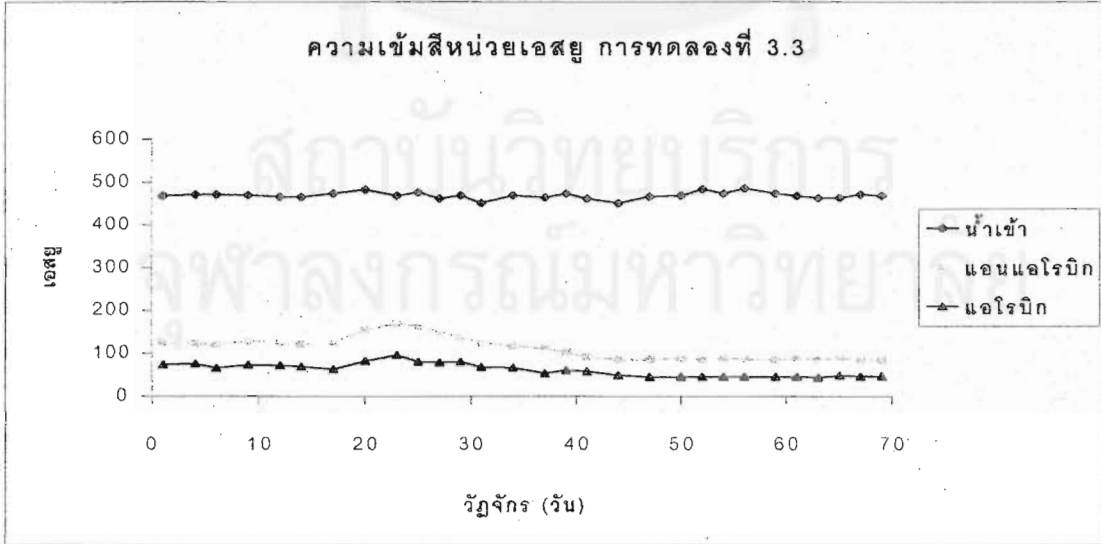
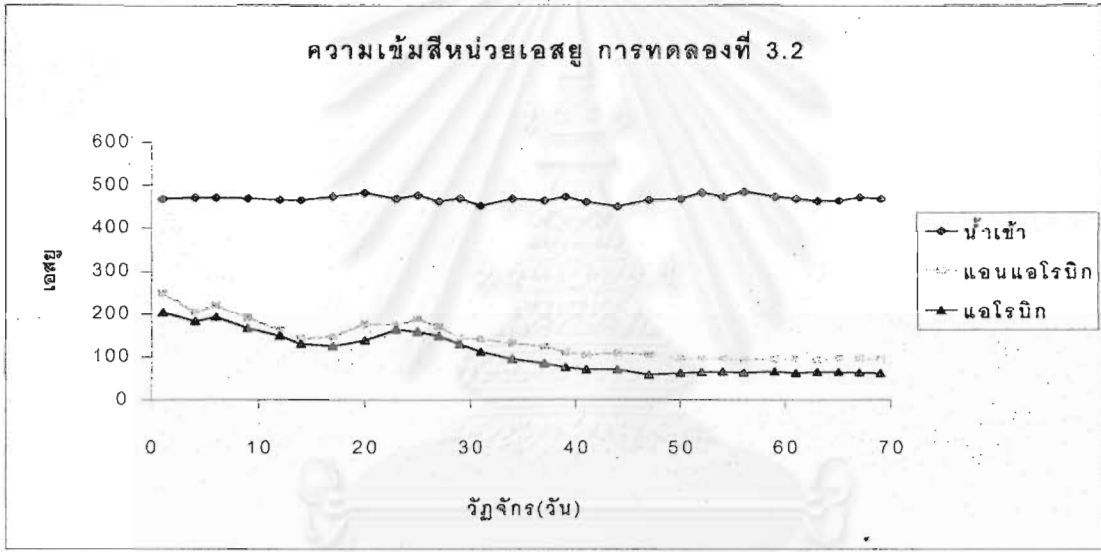
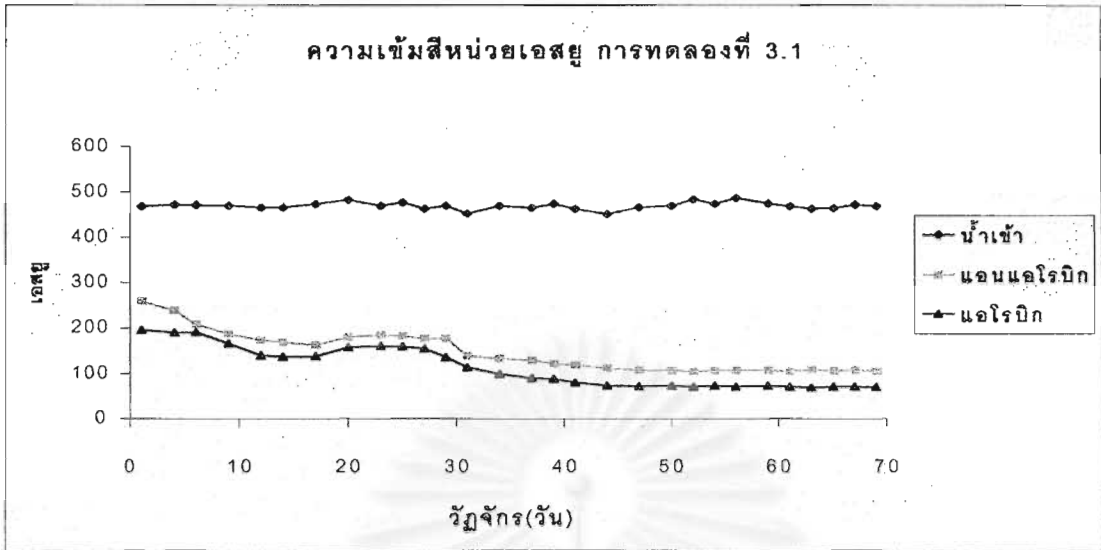
จากโพรไฟล์การลดสี รูปที่ 4.40 และ 4.44 ชุดการทดลองที่ 1 โพรไฟล์สีหน่วยเอสยูมีอัตราการลดสีเร็วมากภายใน 2 ชั่วโมงของช่วงแอนแอโรบิก หลังจาก 2 ชั่วโมง น้ำตาลเกือบไม่ทำให้สีลดลงอีก ในขณะที่นมและโซเดียมอะซิเตทยังมีการลดสีได้อีก แต่อัตราการลดสี (ความชันกราฟ) น้อยกว่าช่วง 2 ชั่วโมงแรก ในช่วงแอนโรบิกสารอาหารทั้ง 3 ช่วยลดสีลงอีกเล็กน้อย สำหรับโพรไฟล์หน่วยเอดีเอ็มไอก็มีแนวโน้มการลดสีคล้ายกับหน่วยเอสยู ชุดการทดลองที่ 2 โพรไฟล์การลดสีทั้ง 2 หน่วย มีแนวโน้มแตกต่างจากชุดการทดลองที่ 1 คือ มีอัตราการลดสีเร็วมากภายใน 3 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก เนื่องจากความเข้มข้นน้ำเข้าและซีไอดีเข้ามากกว่าชุดการทดลองที่ 1 ทำให้ช่วงเวลาการลดสีอย่างรวดเร็วยาวนานขึ้น และข้อแตกต่างอีกประการ คือ ช่วงปลายแอนแอโรบิก นมลดสีลงได้ต่ำที่สุด (แต่ชุดการทดลองที่ 1 สารอาหารทั้ง 3 ให้ค่าเอสยูและเอดีเอ็มไอใกล้เคียงกัน) ในช่วงแอนโรบิกสารอาหารทั้ง 3 ชนิด สามารถลดสีลงอีกเล็กน้อย



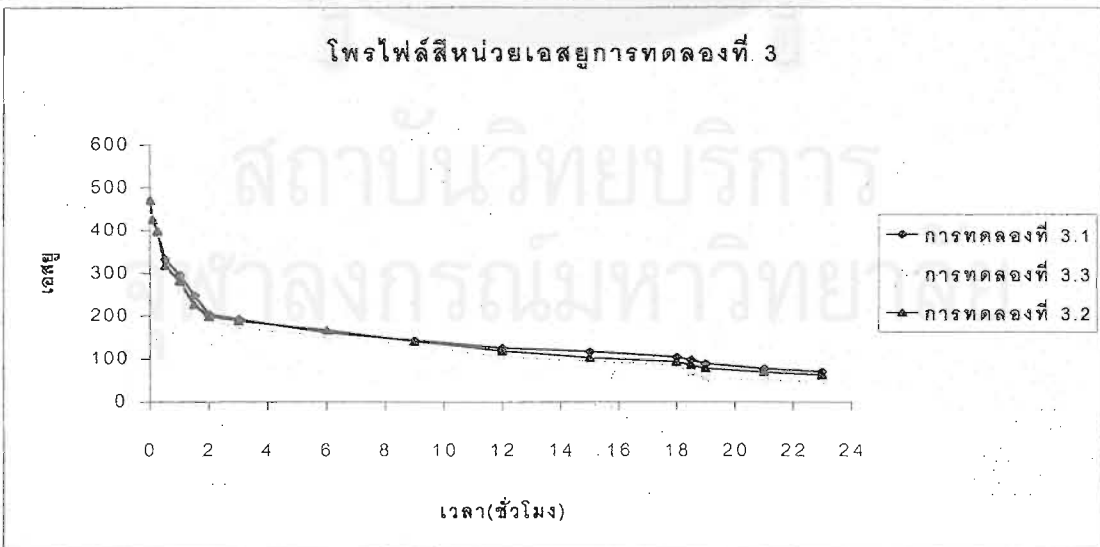
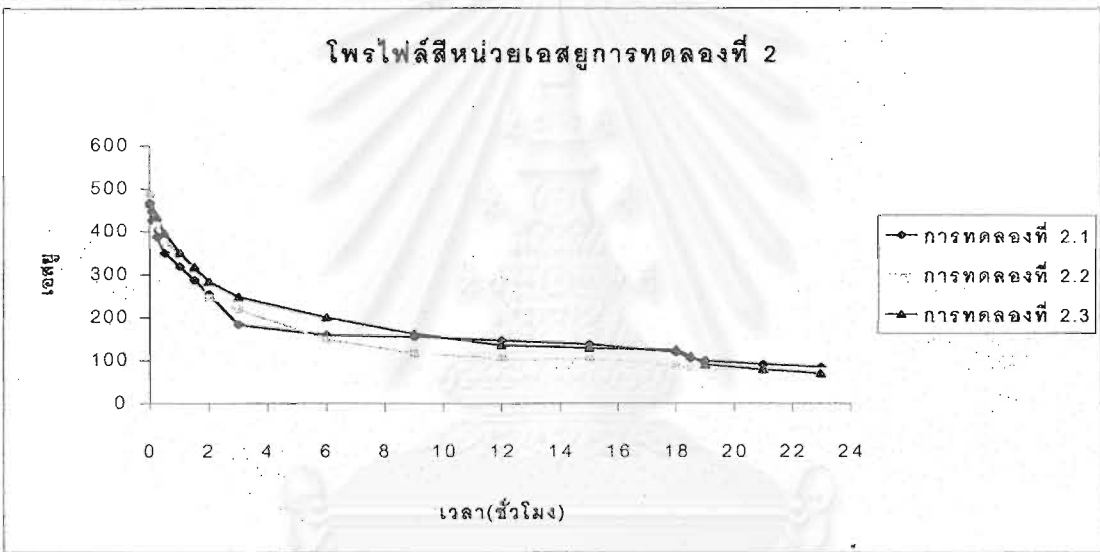
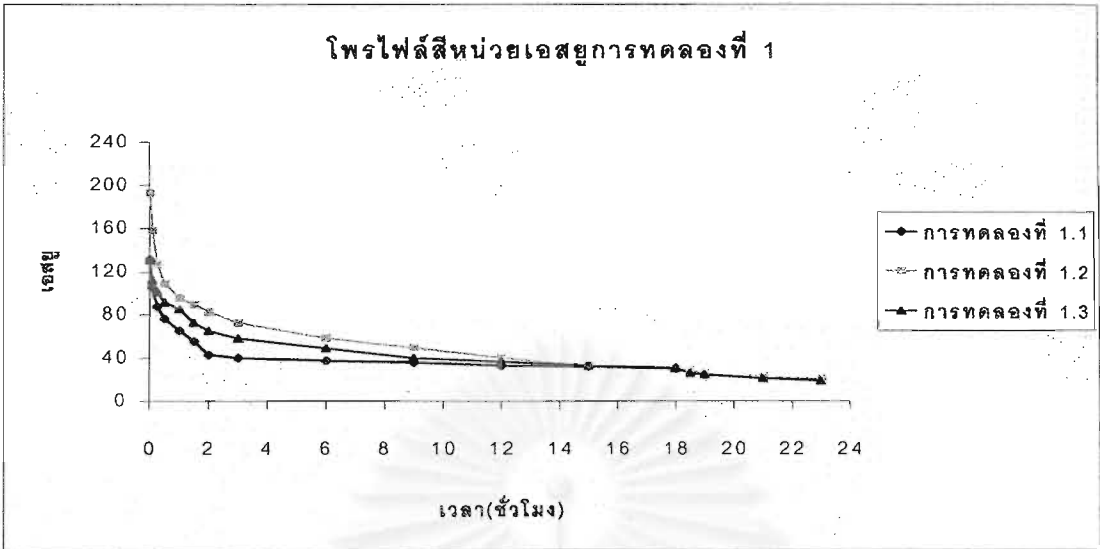
รูปที่ 4.37 สีนหน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 1



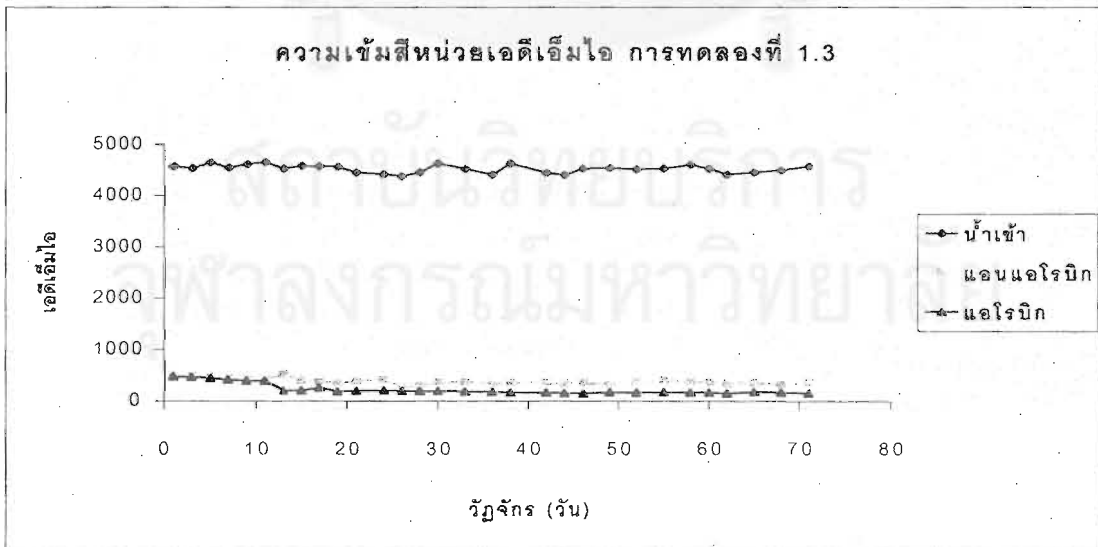
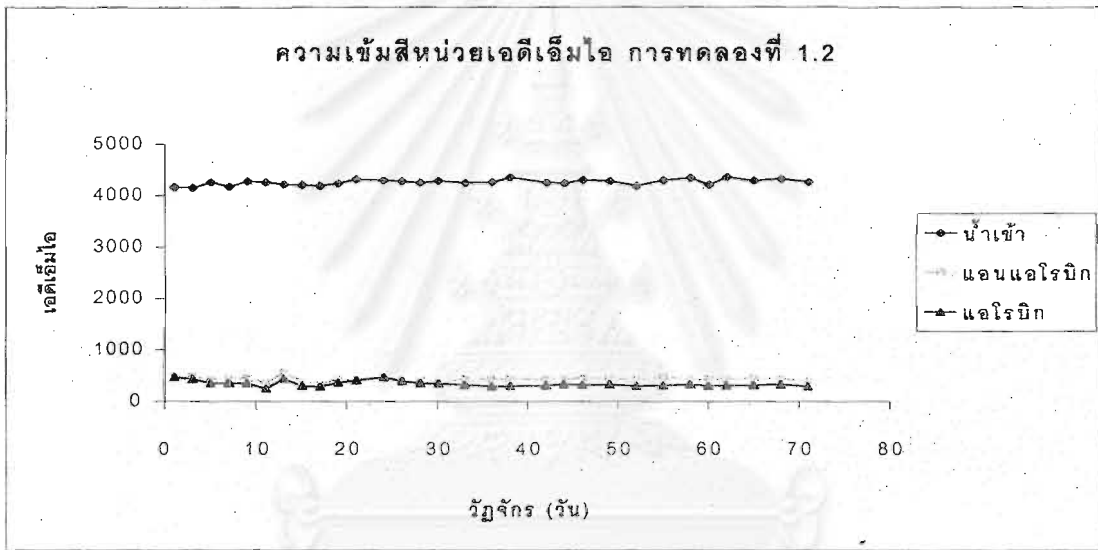
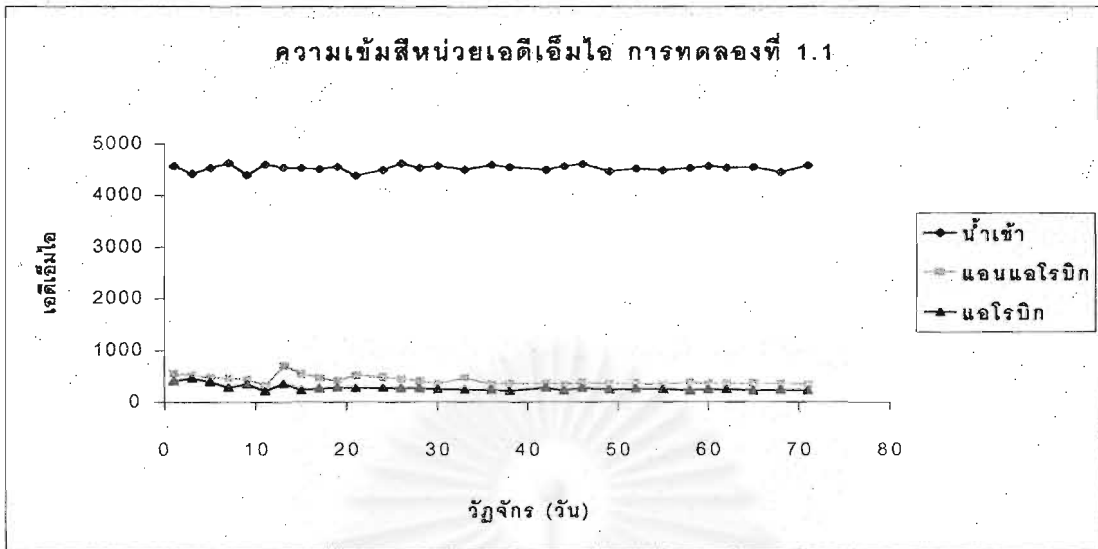
รูปที่ 4.38 สี่หน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 2



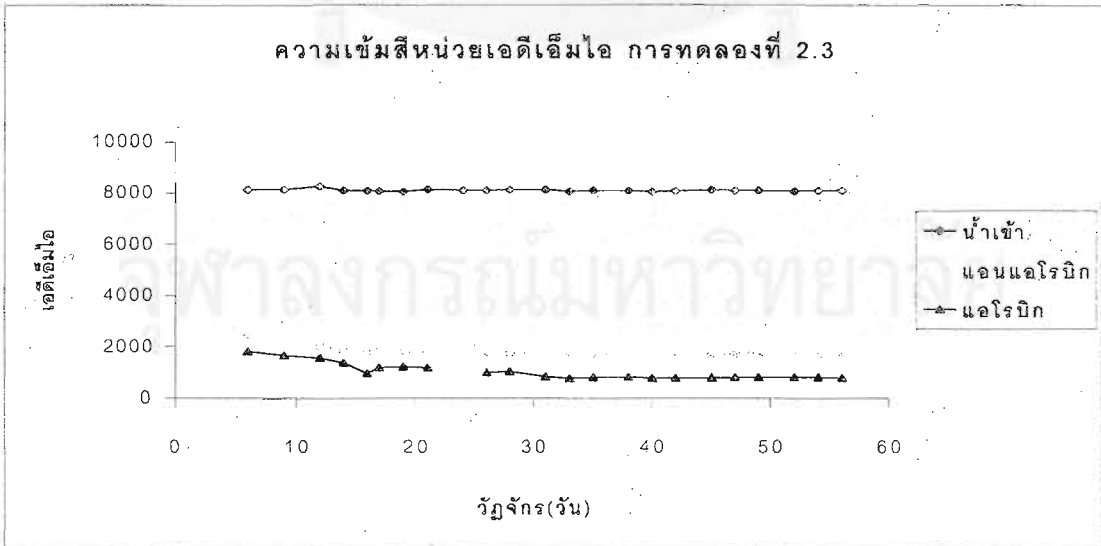
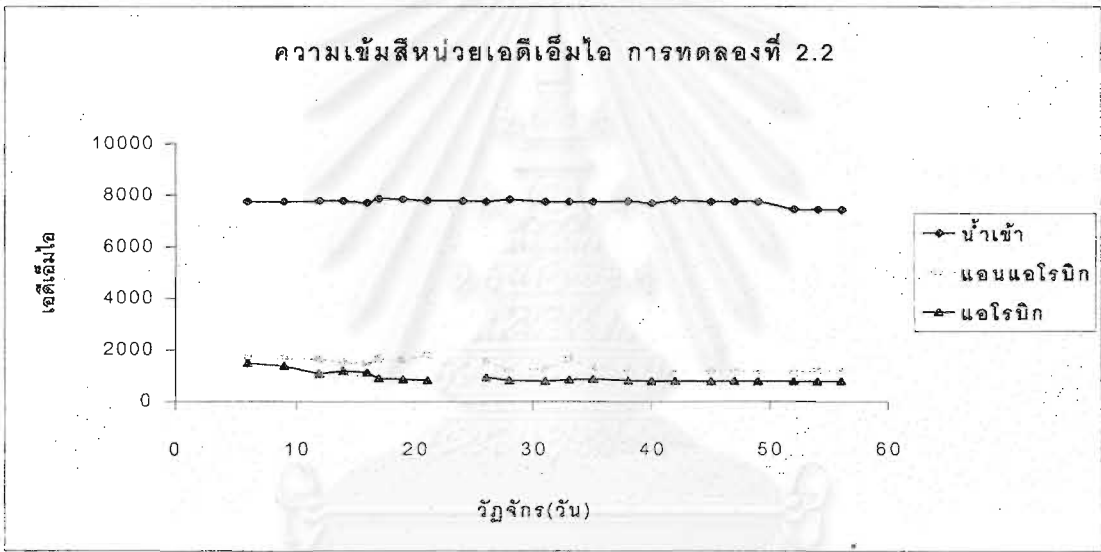
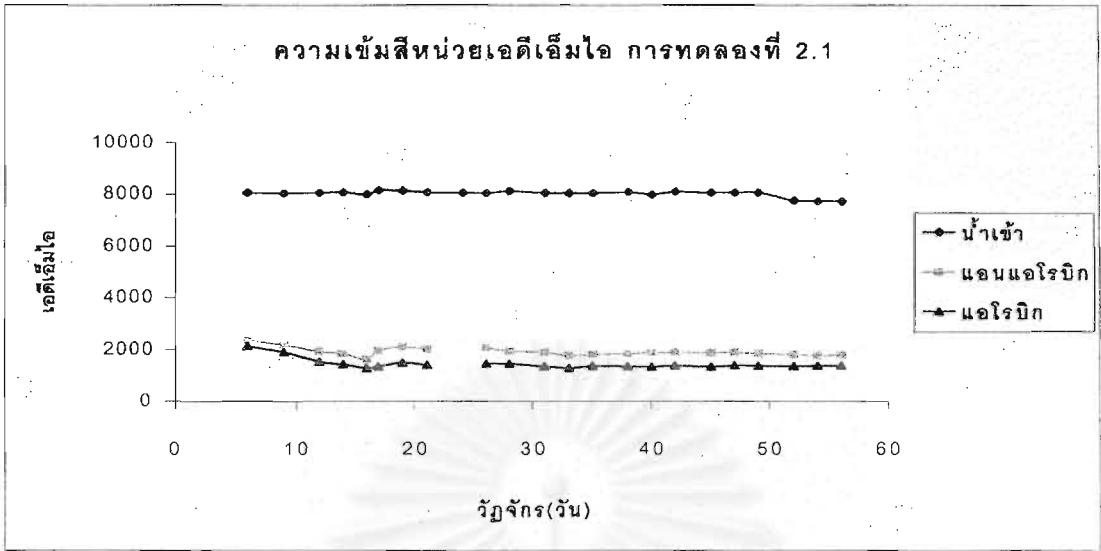
รูปที่ 4.39 สีนหน่วยเอสยูของชุดการทดลองที่ 3



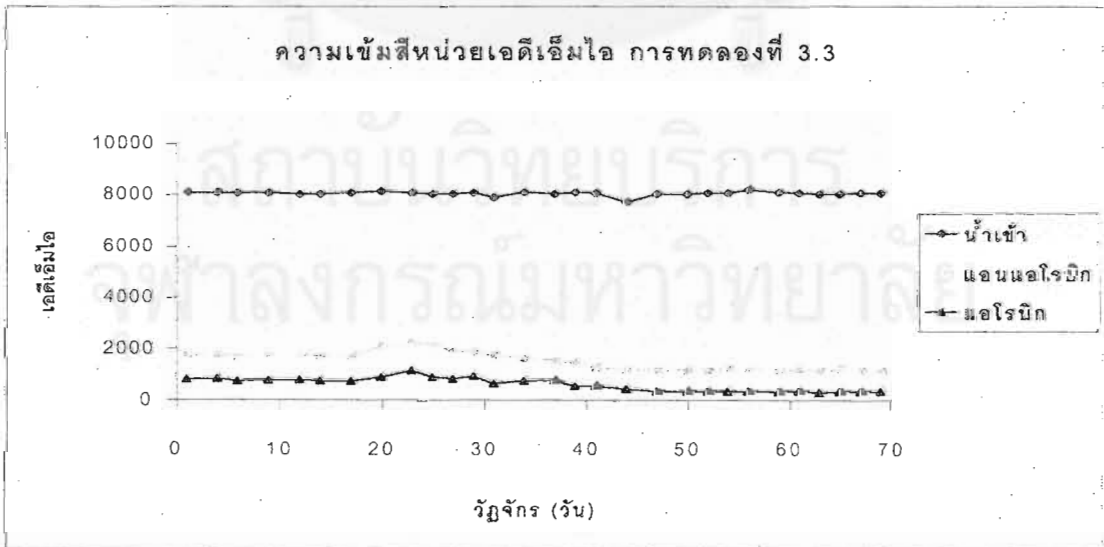
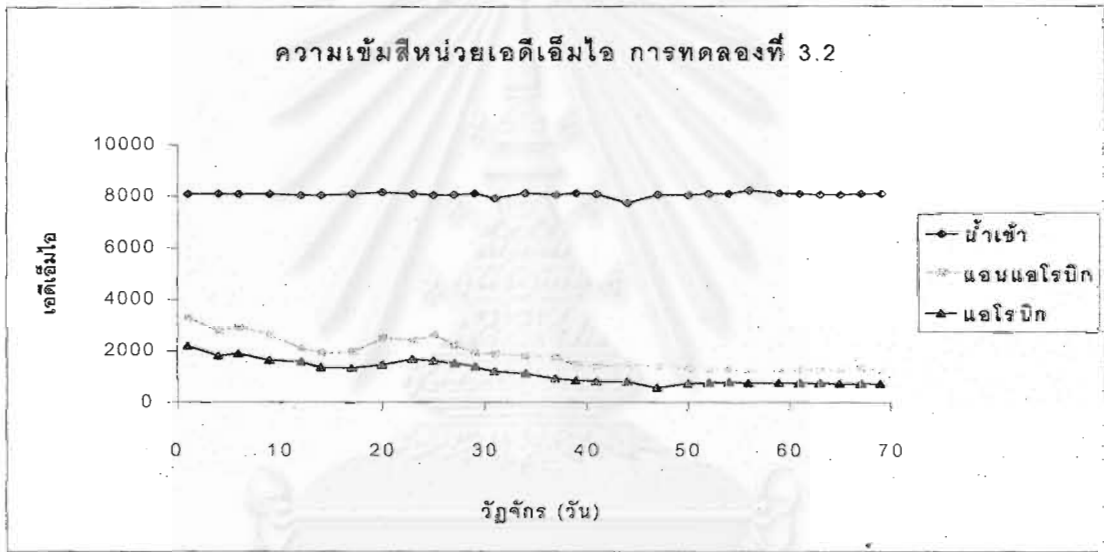
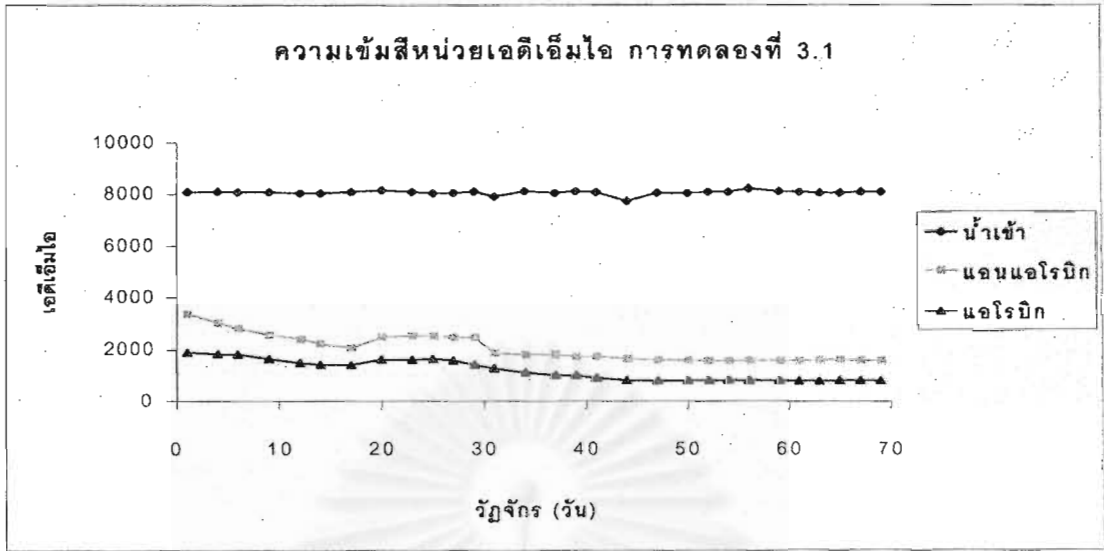
รูปที่ 4.40 โพรไฟล์สีหน่วยเอสยูของแต่ละการทดลอง



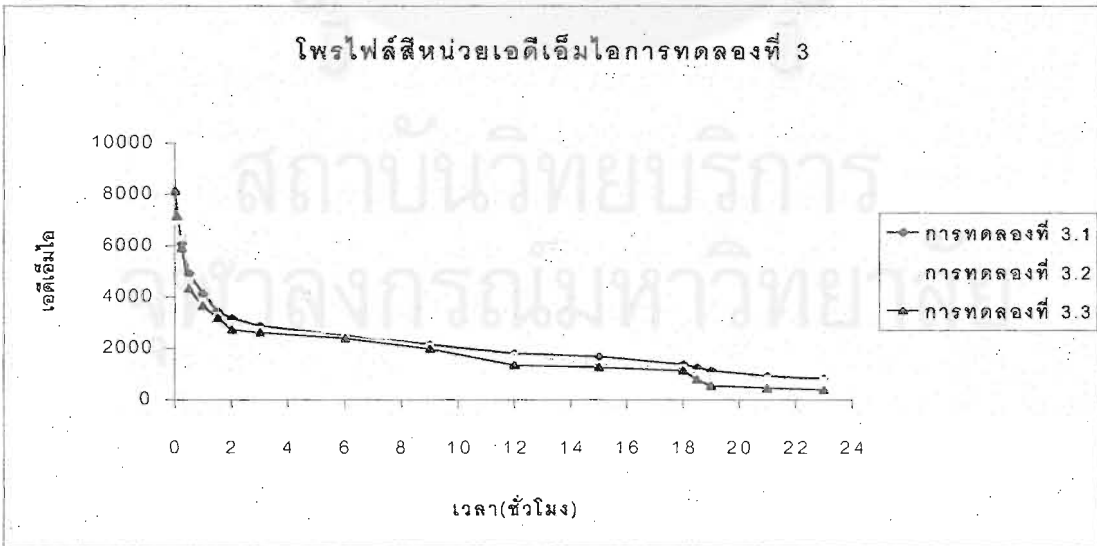
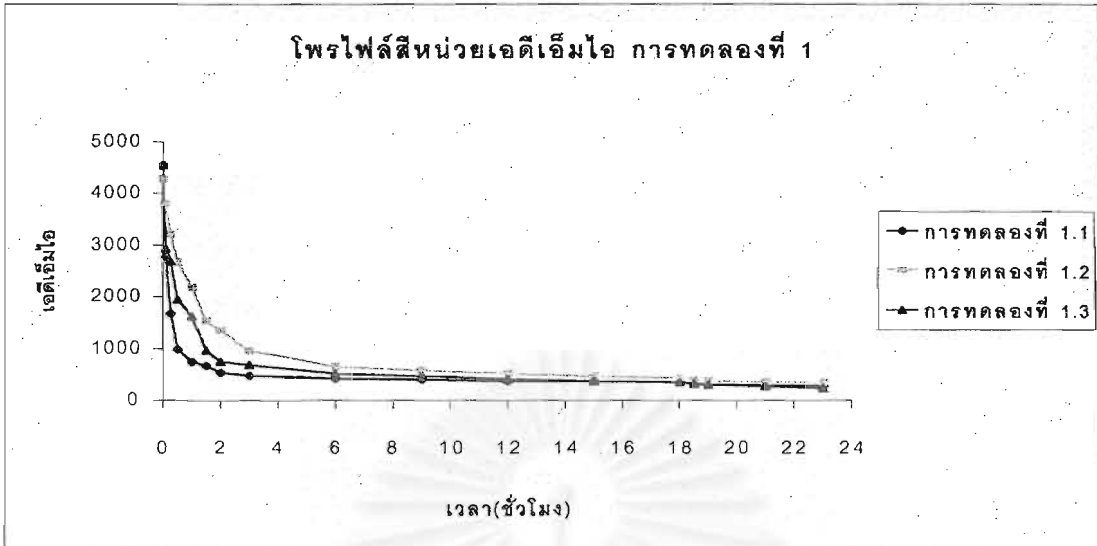
รูปที่ 4.41 สี่หน่วยเอ็ดเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.42 สีหน่วยเอตีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.43 สีหน่วยเอ็ดเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.44 โพรไฟล์สีหน่วยเอตีเอ็มไอของแต่ละการทดลอง

ประสิทธิภาพการลดสีของสารอาหารทั้ง 3 ชนิด สำหรับชุดการทดลองเดียวกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัย ทั้งในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ รวมถึงความเข้มข้นน้ำออก ทั้ง 2 หน่วย ก็มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสารอาหารทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถลดสีได้ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม จากการวิจัยนี้พบว่าสารอาหารแต่ละชนิดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นและฟอสฟอรัส มากกว่า การลดสีและกำจัดซีไอดี ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้ในการลดสีย่อมรวมกับการกำจัดน้ำเสียชุมชนที่มีธาตุอาหารทั้ง 2 ชนิด จึงควรให้ความสนใจติดตามผลกระทบของชนิดสารอาหารต่อการกำจัดธาตุอาหารมากกว่า

4.2.2 ผลของโครงสร้างสีต่อประสิทธิภาพการลดสี

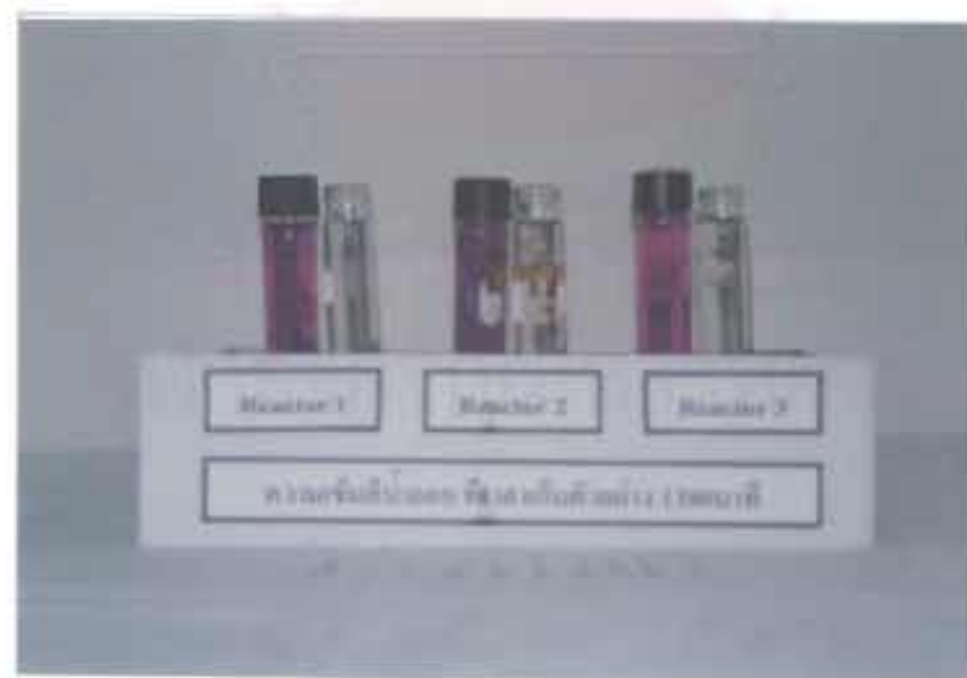
สีที่ใช้ทดลองมี 2 โครงสร้าง คือโมโนอะไซ(สีม่วง) และ ไดอะไซ(สีน้ำเงิน) จากรูปที่ 4.45 ถึง 4.46 4.48 ถึง 4.49 และ 4.51 ถึง 4.52 แสดงสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทั้งช่วงแอนแอโรบิก(1080 นาที) และช่วงแอโรบิก (1380 นาที) ของแต่ละชุดการทดลอง และรูปที่ 4.47 4.50 และ 4.53 แสดงกราฟระหว่างค่าแอบซอบแนนต์กับความยาวคลื่น (400 - 700 นาโนเมตร) ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ชุดการทดลองที่ 1 สีย้อมโทนม่วงถูกกำจัดออกไปอย่างเห็นได้ชัด น้ำที่ผ่านช่วงแอนแอโรบิกมีลักษณะค่อนข้างใส (แต่มีสีชมพูจางๆ ให้เห็นเล็กน้อย) และความขุ่นของอนุภาคนม (การทดลองที่ 1.2) ได้ถูกย่อยสลายไปในกระบวนการบำบัด น้ำที่ผ่านช่วงแอนแอโรบิกจึงค่อนข้างใส และจากกราฟแอบซอบแนนต์ เส้นกราฟจะเปลี่ยนแปลงจากความยาวคลื่นดูดกลืนสูงสุด (λ_{max}) ที่ 559 นาโนเมตร(น้ำเข้า) เป็นกราฟที่มีลักษณะราบเรียบจึงไม่สามารถระบุค่า λ_{max} ที่ชัดเจนได้ แสดงว่าพันธะโมโนอะไซถูกแตกออกเกือบสมบูรณ์ เพราะลักษณะพันธะโมโนอะไซรวมถึงโครงสร้างโมเลกุลทั้งหมดของสีไม่สลับซับซ้อนมาก จึงง่ายต่อการกำจัด ส่วนน้ำออกช่วงปลายแอโรบิกมีลักษณะใสขึ้นเล็กน้อย และกราฟแอบซอบแนนต์คล้ายกับช่วงแอนแอโรบิกแต่มีค่าแอบซอบแนนต์ต่ำลง กลไกการลดสีควรเป็นการดูดซับสีที่เหลือ บนมวลจุลินทรีย์มากกว่าการที่พันธะโมโนอะไซที่เหลือจะแตกตัวออก

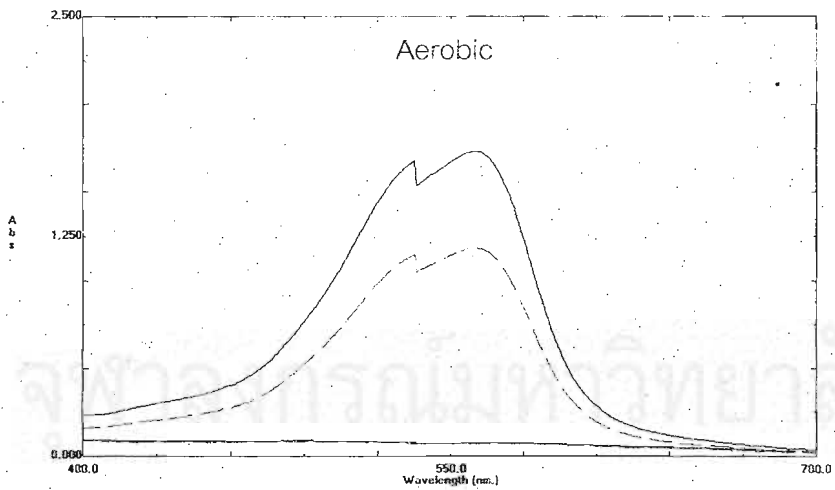
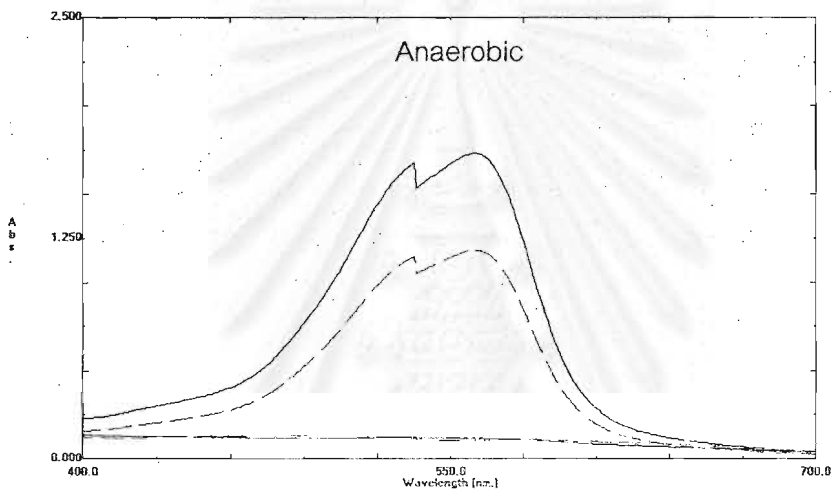
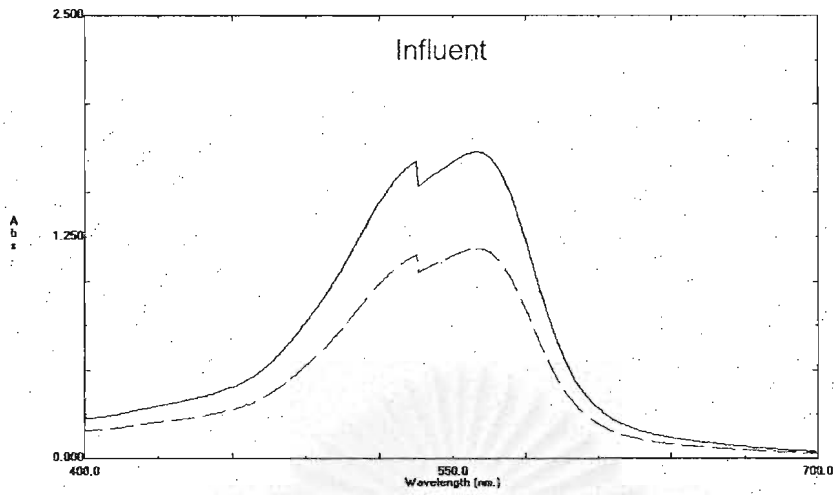
ชุดการทดลองที่ 2 สีย้อมโทนน้ำเงิน ลักษณะการกำจัดสีแตกต่างจากชุดการทดลองที่ 1 น้ำที่ผ่านช่วงแอนแอโรบิก ที่ใช้น้ำตาลและนมมีสีเป็นโทนน้ำเงินอมชมพู แต่สีของน้ำที่ใช้โซเดียมอะซิเตทเป็นสีโทนม่วงอมชมพู จากรูปที่ 4.50 น้ำเข้ามีค่า λ_{max} เท่ากับ 601 นาโนเมตร เมื่อผ่านช่วงแอนแอโรบิก น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท ให้ค่า λ_{max} เท่ากับ 583 587 และ 555



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแอสโรบิก (1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 1

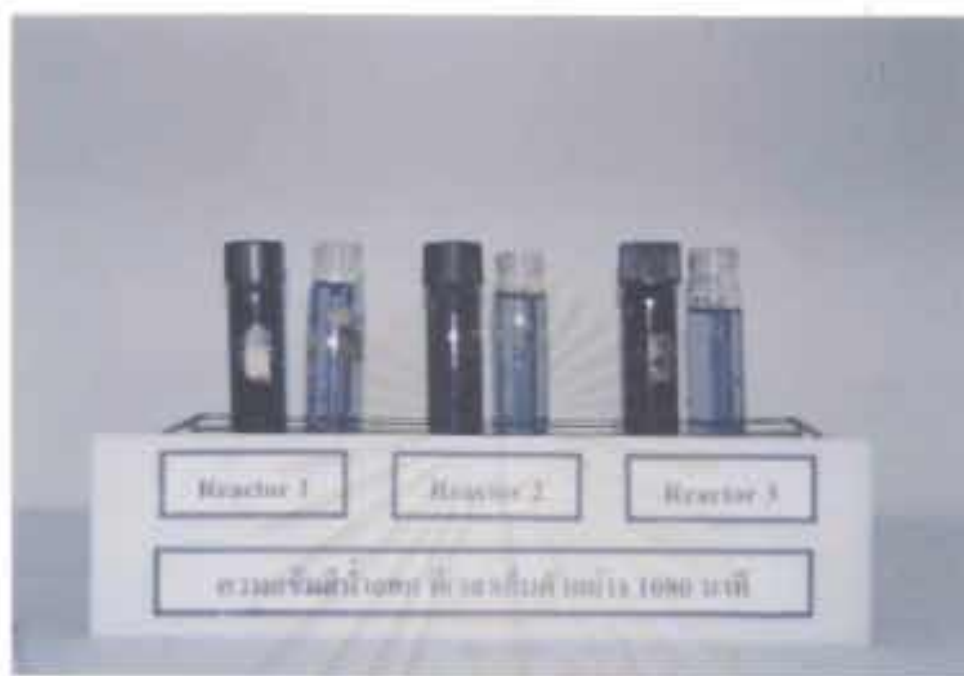


รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแอสโรบิก (1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 1



SUGAR MILK ———
 ACETATE - - - - -

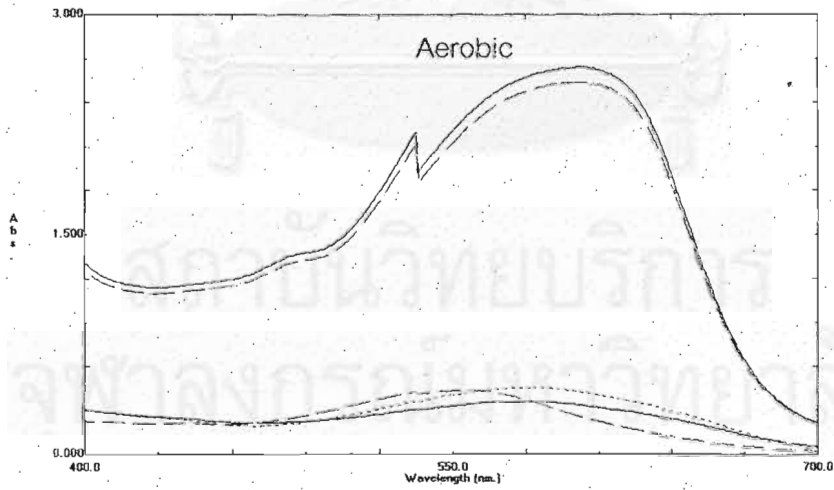
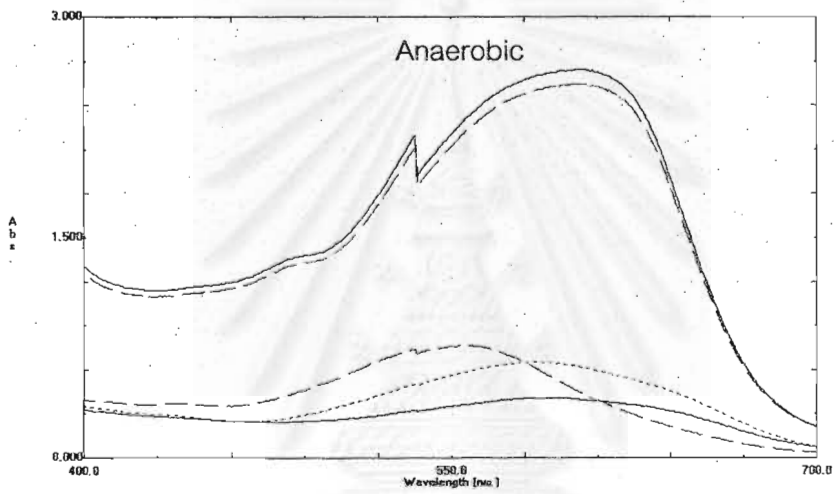
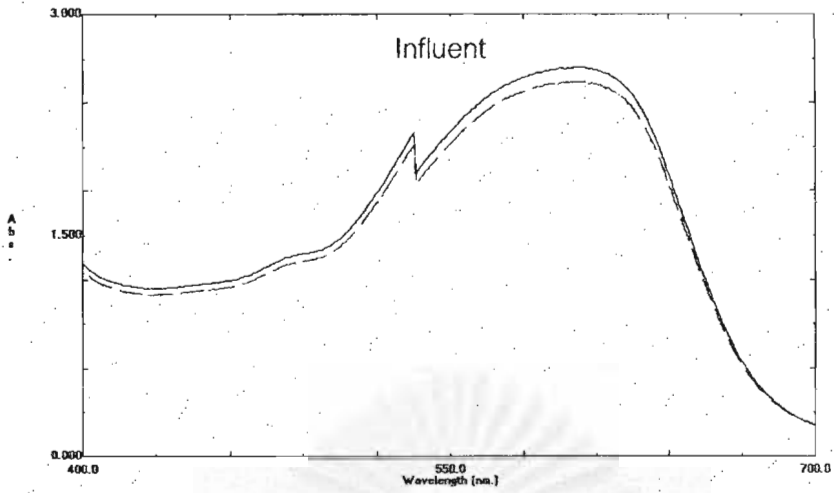
หมายเหตุ เส้นกราฟน้ำเข้า ของน้ำตาลและโซเดียมอะซิเตทจะซ้อนทับกัน
 รูปที่ 4.47 กราฟแอบซอร์เบนต์กับความยาวคลื่น ของชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแชนแอโรบิก (1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแชนแอโรบิก (1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 2



SUGAR MILK _____
 ACETATE -----

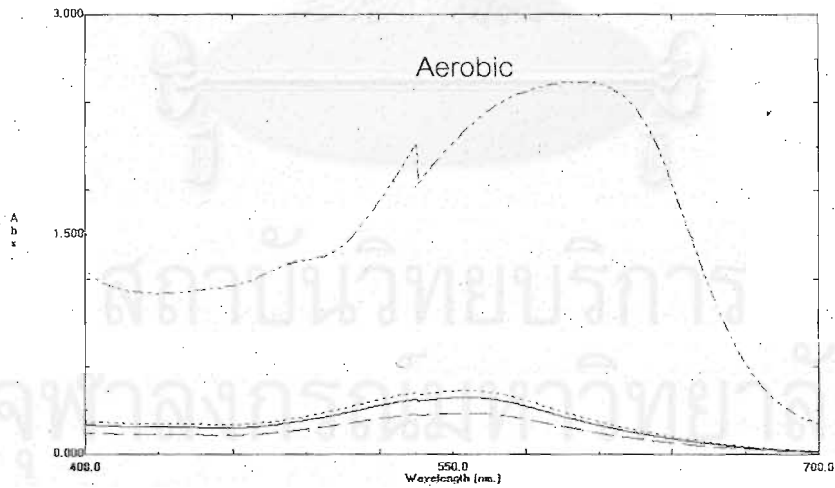
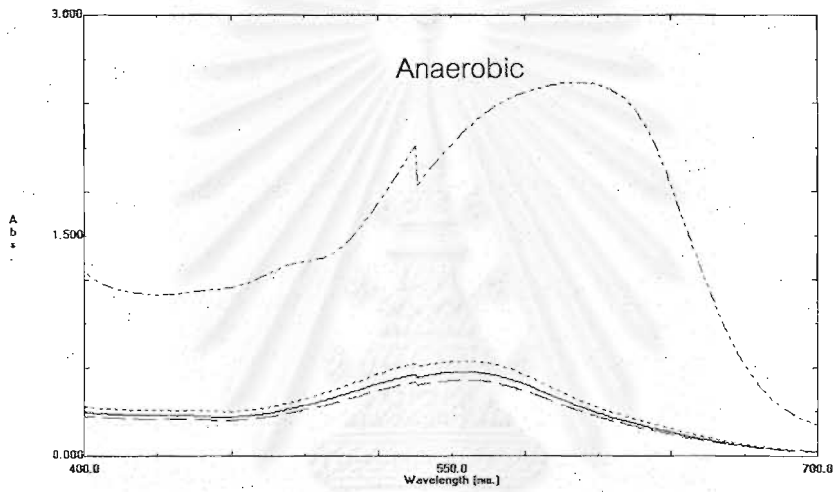
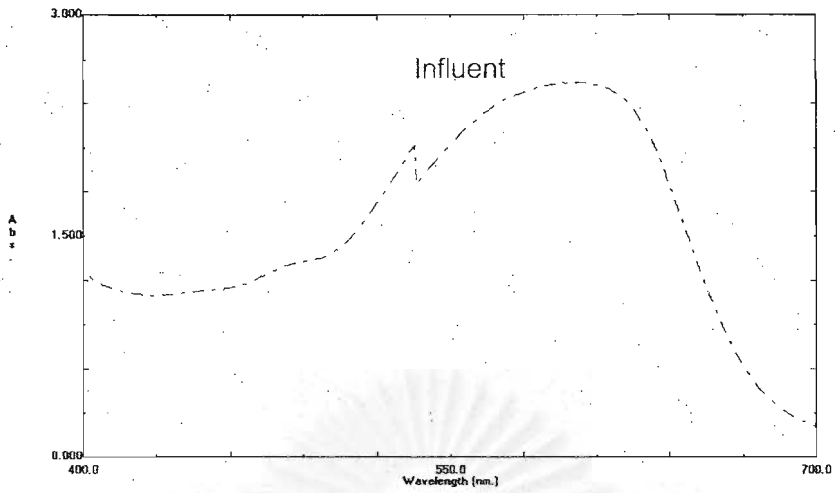
หมายเหตุ เส้นกราฟน้ำเข้า ของน้ำตาล และโซเดียมอะซิเตทจะซ้อนทับกัน
 รูปที่ 4.50 กราฟแอบซอเบแนนต์กับความยาวคลื่น ของชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแอนโธไซกัน (1080 นาที) ของชุดการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบสีน้ำเข้า กับ น้ำที่ผ่านแอนโธไซกัน (1380 นาที) ของชุดการทดลองที่ 3



P4 P8
 P10 P10

หมายเหตุ เส้นกราฟน้ำเข้าจะมีเพียง 1 เส้นเพราะค่าฟอสฟอรัสไม่มีผลกระทบต่อกราฟวัดสี

P4 P8 P10 แทนอัตราส่วน COD:P เท่ากับ 150:4 150:8 150:10 ตามลำดับ

รูปที่ 4.53 กราฟแอบซอเบแนนซ์กับความยาวคลื่น ของชุดการทดลองที่ 3

นาโนเมตร ตามลำดับ จากกราฟแอบซอบแบนด์ โซเดียมอะซิเตททำให้น้ำออกช่วงแอนแอโรบิกมีค่า λ_{max} ย้ายมาทางซ้ายค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับน้ำตาลและนม แสดงว่า โซเดียมอะซิเตทมีความสามารถในการเปลี่ยนโทนสีของน้ำที่ผ่านแอนแอโรบิกมากกว่าสารอาหารอีก 2 ชนิด และที่ยังเห็นลักษณะกราฟหลังช่วงแอนแอโรบิกเป็นรูปประฆัง ซึ่งสามารถระบุค่า λ_{max} ได้ แสดงให้เห็นถึงพันธะไดอะโซรวมถึงโครงสร้างโมเลกุลของสีที่สลับซับซ้อนกว่าชุดการทดลองที่ 1 ทำให้แตกพันธะไดอะโซยากกว่า จึงเหลือพันธะไดอะโซของสีแสดงให้เห็นอยู่มาก ช่วงแอนโอบิกน้ำออกของ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท มีค่า λ_{max} เท่ากับ 583 571 และ 555 นาโนเมตร และกราฟแอบซอบแบนด์คล้ายกับช่วงแอนแอโรบิกแต่มีค่าแอบซอบแบนด์ต่ำลง กลไกการลดสีจึงควรเป็นจุดจับที่เหลือนบนมวลจุลินทรีย์มากกว่า ยกเว้นนมซึ่งน่าจะมีกลไกการแตกพันธะไดอะโซรวมด้วยจึงทำให้ค่า λ_{max} เปลี่ยนจากช่วงปลายแอนแอโรบิก

4.2.3 ผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อประสิทธิภาพการลดสี

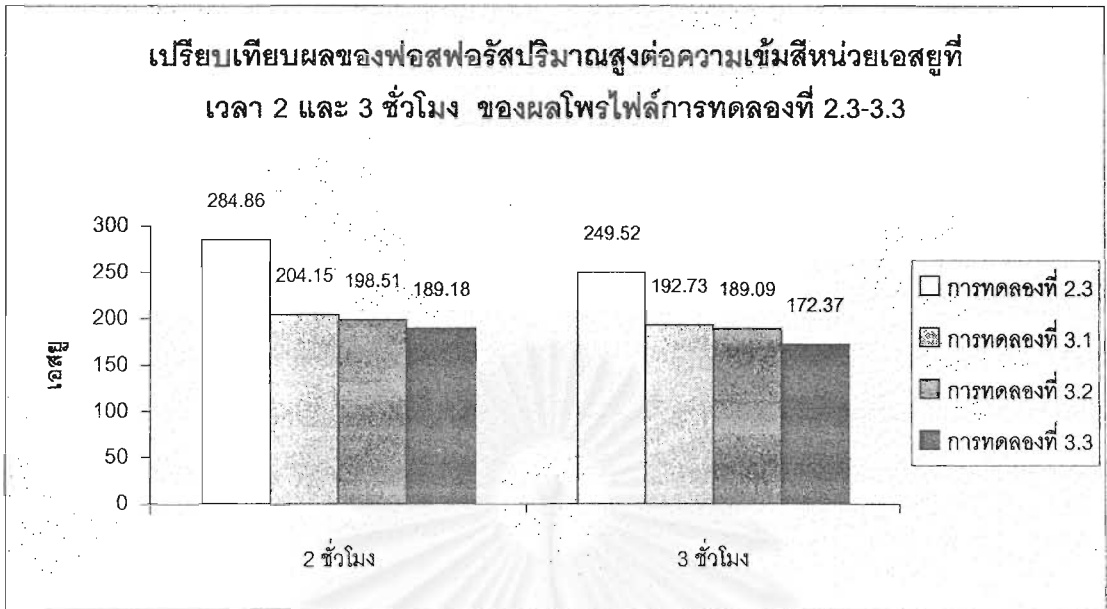
จากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าสารอาหารทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการลดสีทั้งหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอไม่แตกต่างกันมากนัก แต่สารอาหารแต่ละชนิดจะมีผลโดยตรงต่อการกำจัดทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสละลายมากกว่า โดยโซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสละลายดีที่สุด (โดยเฉพาะช่วงแอนแอโรบิก ที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสได้มาก) อีกทั้งมีประสิทธิภาพการลดสีดีกว่าสารอาหารอื่นเล็กน้อย จึงเลือกโซเดียมอะซิเตทเป็นสารอาหารทดลอง โดยศึกษาผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อประสิทธิภาพการลดสี โดยแปรค่า COD:P เท่ากับ 150:4 150:8 และ 150:10 โดยใช้สีย้อมโครงสร้างไดอะโซสีน้ำเงินต่อจากชุดการทดลองที่ 2 เพราะจุลินทรีย์ได้ปรับตัวชินกับสีชนิดนี้แล้ว ประสิทธิภาพการลดสีแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งประสิทธิภาพการลดสีทั้งหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของฟอสฟอรัสที่เพิ่ม แสดงว่าฟอสฟอรัสที่เพิ่มมีส่วนช่วยการทำงานของจุลินทรีย์ในการแตกพันธะอะโซให้มากขึ้น โดยที่อัตราส่วน COD:P เท่ากับ 150:4 150:8 และ 150:10 มีประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอสยูเท่ากับ 84.93% 86.45% และ 90.44% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ 84.00% ของการทดลองที่ 2.3 (ใช้โซเดียมอะซิเตทเหมือนกัน) และประสิทธิภาพการลดสีหน่วยเอดีเอ็มไอเท่ากับ 89.98% 90.70% และ 95.50% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ 89.83% ของการทดลองที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการลดสีทั้ง 2 หน่วย ดีขึ้นเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.40 และ 4.44 แสดงโพรไฟล์การลดสีทั้งหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ พบว่า อัตราการลดสีอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นภายใน 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก แต่การทดลองที่ 2.3 จะเกิดขึ้นภายใน 3 ชั่วโมง ในตารางที่ 4.10 ยืนยันว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงมีผลทำให้การลดสีเร็วขึ้นภายใน 2 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก

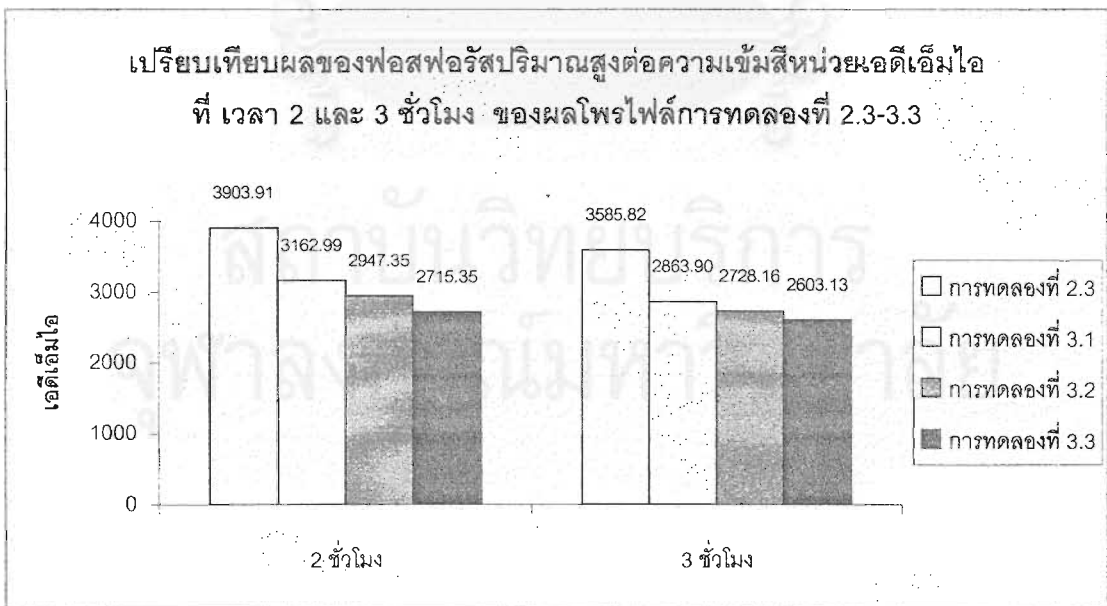
ตารางที่ 4.10 ผลโพรไฟล์การลดสีภายใน 2 และ 3 ชั่วโมงแรกของช่วงแอนแอโรบิก ในการทดลองที่ 2.3 เทียบกับชุดการทดลองที่ 3

เวลา(ชั่วโมง)	การทดลองที่							
	2.3		3.1		3.2		3.3	
	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ	เอสยู	เอดีเอ็มไอ
0	468.36	8109.47	469.32	8127.05	469.32	8127.05	469.32	8127.05
0.083	453.19	7539.54	427.89	7055.81	425.13	6972.86	431.68	7162.85
0.25	435.77	7203.01	395.61	6087.43	398.40	6284.52	392.61	5911.42
0.5	398.48	6218.72	333.02	4919.90	317.85	4653.91	307.85	4326.07
1	351.14	5172.19	295.53	4127.77	281.07	3859.08	261.13	3654.21
1.5	318.03	4452.38	247.81	3429.04	225.93	3263.25	223.40	3178.64
2	284.86	3903.91	204.15	3162.99	198.51	2947.35	189.18	2715.35
3	249.52	3585.82	192.73	2863.90	189.09	2728.16	172.37	2603.13

รูปที่ 4.51 ถึง 4.52 น้ำที่ผ่านช่วงแอนแอโรบิกมีสีม่วงอมชมพูจางๆ โดยรูปที่ 4.53 แสดงน้ำเข้ามีค่า λ_{max} เท่ากับ 601 นาโนเมตร เมื่อผ่านช่วงแอนแอโรบิก ที่ COD : P เท่ากับ 150:4 150:8 และ 150:10 มีค่า λ_{max} เท่ากับ 555 553 และ 550 นาโนเมตร แสดงว่าอัตราส่วนของฟอสฟอรัสมากขึ้นมีผลทำให้ค่า λ_{max} ลดลง (โทนสีเปลี่ยนจากเดิมมากขึ้น) กลไกการลดสียังคงเป็นการแตกพันธะไดอะโซเหมือนการทดลองที่ 2.3 ส่วนน้ำที่ผ่านช่วงแอโรบิกมีโทนสีเหมือนช่วงปลายแอนแอโรบิก โดยความเข้มสีจางลงและค่า λ_{max} เท่าเดิม แต่ค่าแอมซอบแบนด์ต่ำลง แสดงว่ากลไกการลดสีช่วงแอโรบิก ควรเป็นการดูดซับสีบนมวลจุลินทรีย์มากกว่าการแตกพันธะไดอะโซ



รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อความเข้มข้นหน่วยเอสยูที่ เวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ของผลโพรไฟล์การทดลองที่ 2.3-3.3



รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบผลของฟอสฟอรัสปริมาณสูงต่อความเข้มข้นหน่วยเอดีเอ็มไอที่ เวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ของผลโพรไฟล์การทดลองที่ 2.3-3.3

4.2.4 อัตราการลดสีและอัตราการลดสีจำเพาะ

จากโพรไฟล์การลดสีรูปที่ 4.40 และ 4.44 และโพรไฟล์การกำจัดซีไอดีรูปที่ 4.27 ของแต่ละชุดการทดลอง พบว่าการลดสีจะมีความสัมพันธ์กับการกำจัดซีไอดีในระบบ โดยช่วง 2 ชั่วโมงแรกของแอนเอโรบิก มีการใช้ซีไอดีอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้สีลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ฉะนั้นในการลดสีจึงต้องใช้สารอาหารรวมเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานแก่จุลินทรีย์ เพื่อแตกพันธะอะไซของสี อัตราการลดสีที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ อัตราการลดสีเริ่มต้น (Initial Decolorization Rate, IDR) จากข้อมูลโพรไฟล์ในภาคผนวก ง. ในช่วงตั้งแต่เติมน้ำเสียสังเคราะห์ ถึง 30 นาทีแรก จะได้ความสัมพันธ์ความเข้มข้นสีที่ลดลงกับเวลา เป็นสมการอันดับหนึ่ง (First Order) คือ

$$\begin{aligned} \text{Initial Decolorization Rate} &= dC/dt = -kC \\ &= \ln(C/C_0) = -kt \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้สมการอัตราการลดสีเริ่มต้น ในช่วง 30 นาที เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\ln(C) = \ln(C_0) - kt$$

โดย C_0 คือ ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นในหน่วยเอสยู หรือ เอดีเอ็มไอ

C คือ ค่าความเข้มข้นสีช่วงเวลาหนึ่งๆ ในช่วง 30 นาที ทั้งหน่วยเอสยูหรือเอดีเอ็มไอ

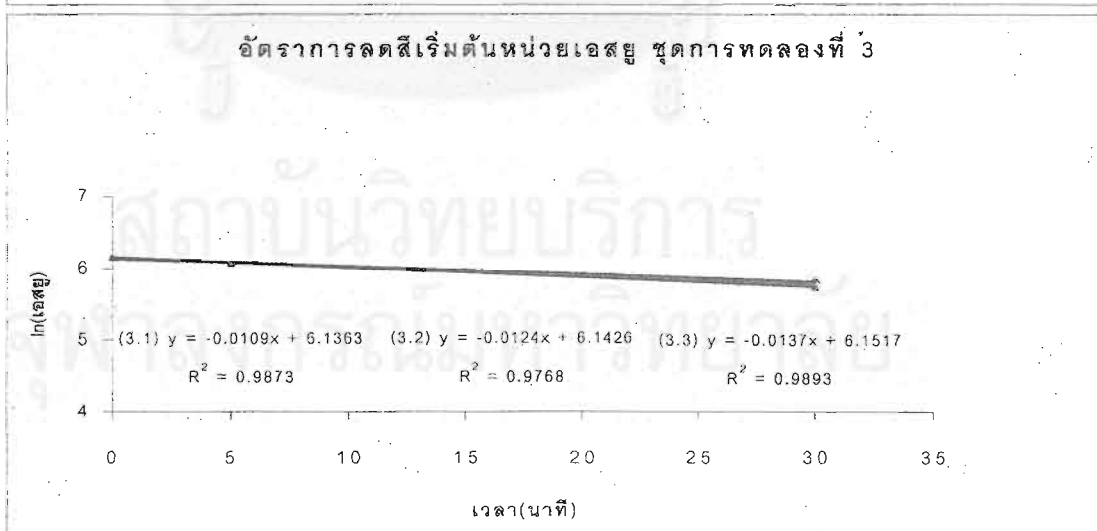
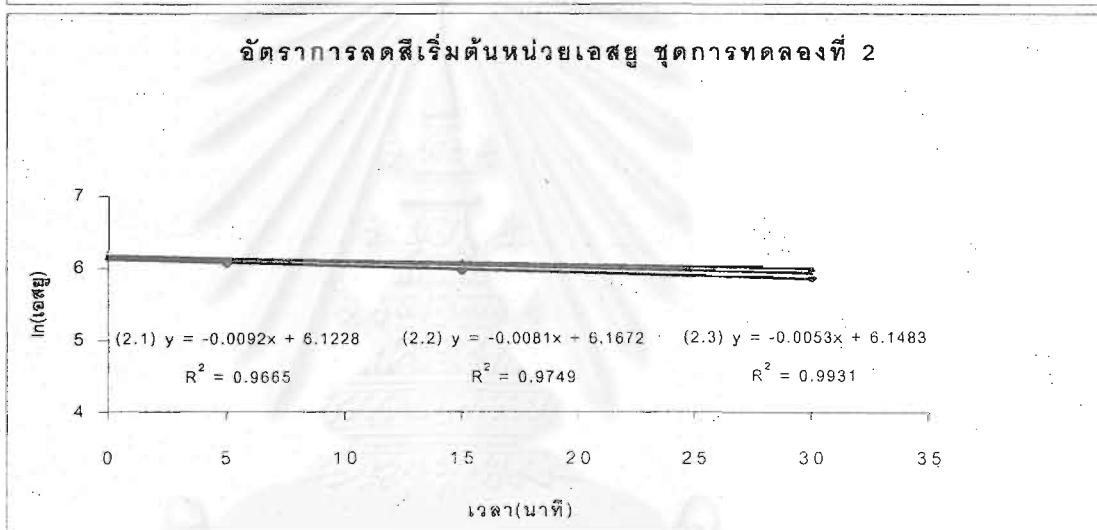
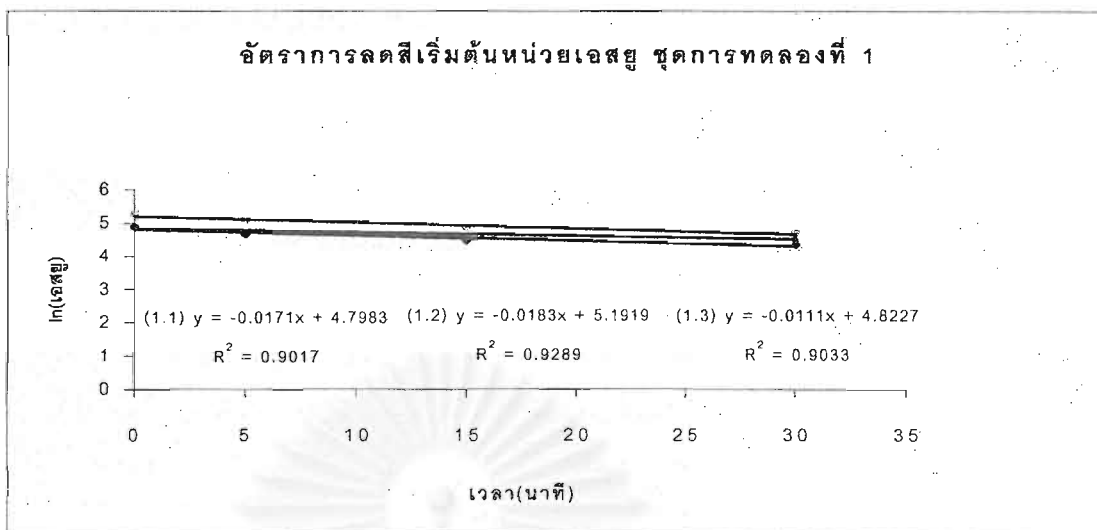
t คือ เวลาหลังจากเติมน้ำเสีย(นาที) ในช่วง 30 นาที

k คือ อัตราการลดสีเริ่มต้น, $\ln(C)/\text{min}$

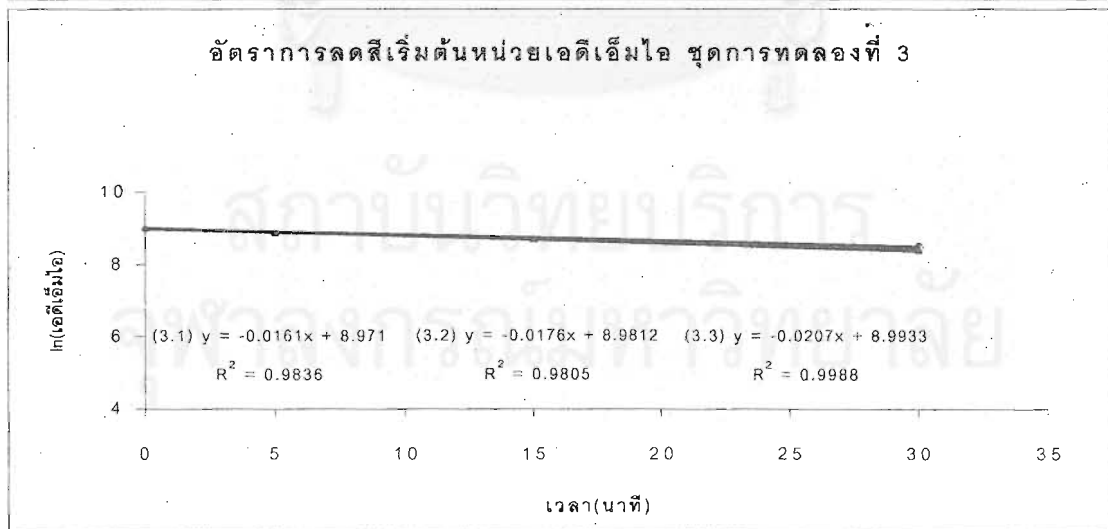
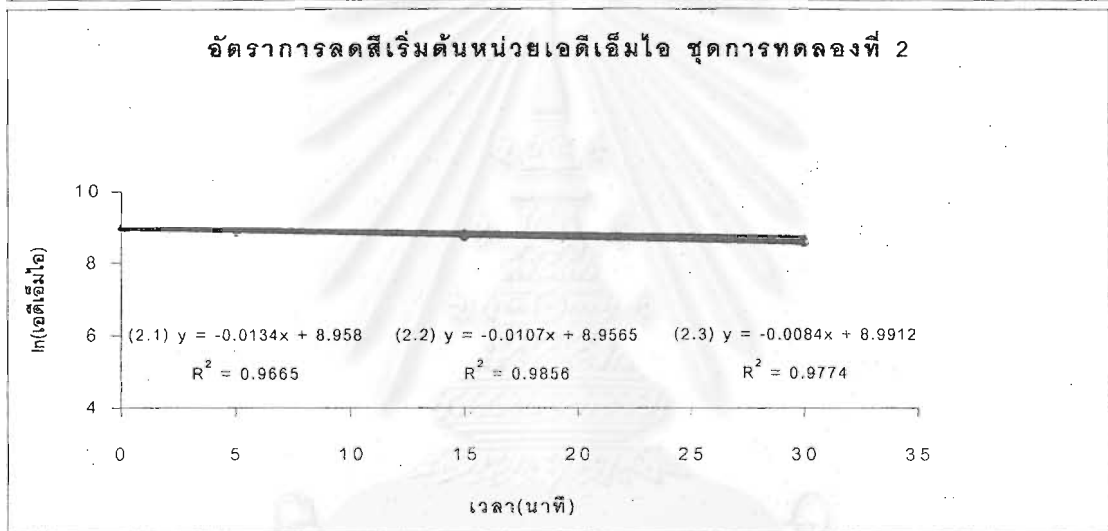
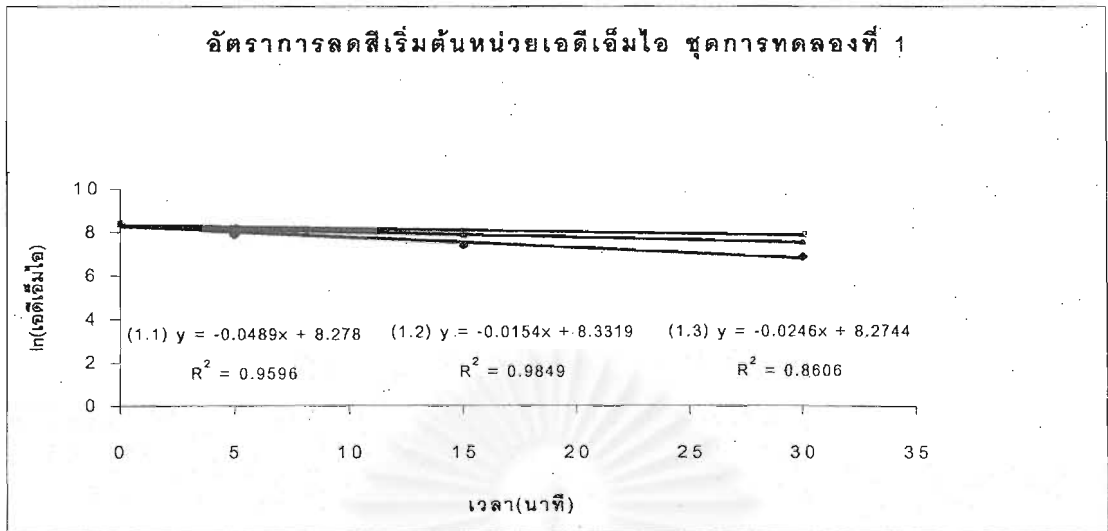
ส่วนอัตราการลดสีเริ่มต้นจำเพาะ คือ อัตราการลดสีเริ่มต้นเทียบกับพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง

ตารางที่ 4.11 อัตราการลดสีเริ่มต้นและอัตราการลดสีเริ่มต้นจำเพาะ

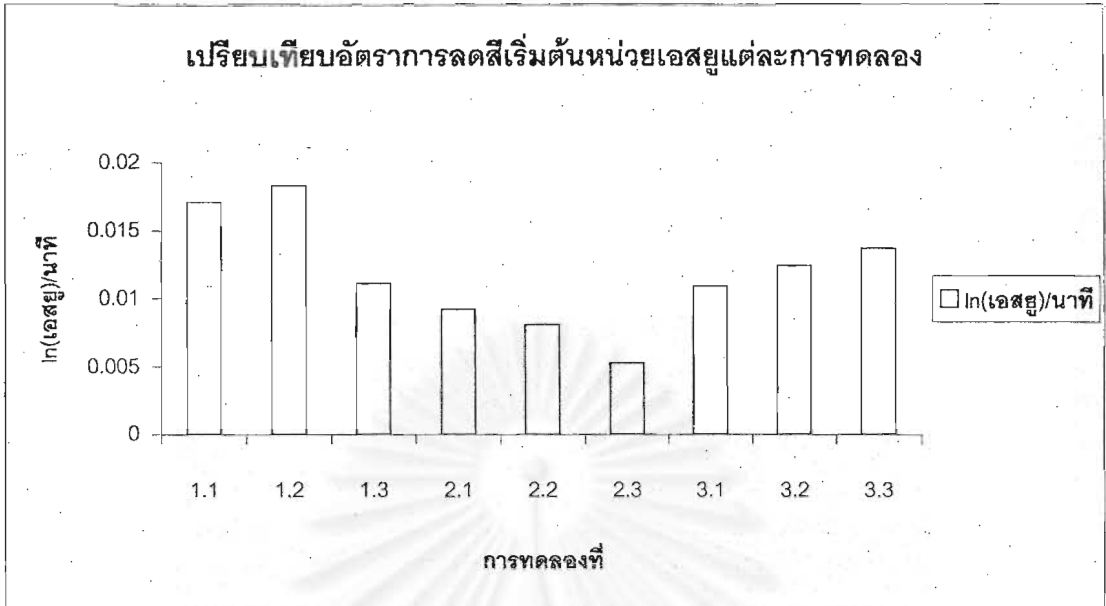
การทดลอง ที่	อัตราการลดสีเริ่มต้น (IDR)		อัตราการลดสีเริ่มต้นจำเพาะ (Specific IDR)	
	$\ln(\text{SU})/\text{min}$	$\ln(\text{ADMI})/\text{min}$	$\ln(\text{SU})/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$	$\ln(\text{ADMI})/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$
1.1	0.0171	0.0489	2.07014E-06	5.91988E-06
1.2	0.0183	0.0154	2.21542E-06	1.86434E-06
1.3	0.0111	0.0246	1.34378E-06	2.9781E-06
2.1	0.0092	0.0134	1.11376E-06	1.62222E-06
2.2	0.0081	0.0107	9.80594E-07	1.29535E-06
2.3	0.0053	0.0084	6.41623E-07	1.01691E-06
3.1	0.0109	0.0161	1.31956E-06	1.94908E-06
3.2	0.0124	0.0176	1.50116E-06	2.13067E-06
3.3	0.0137	0.0207	1.65854E-06	2.50596E-06



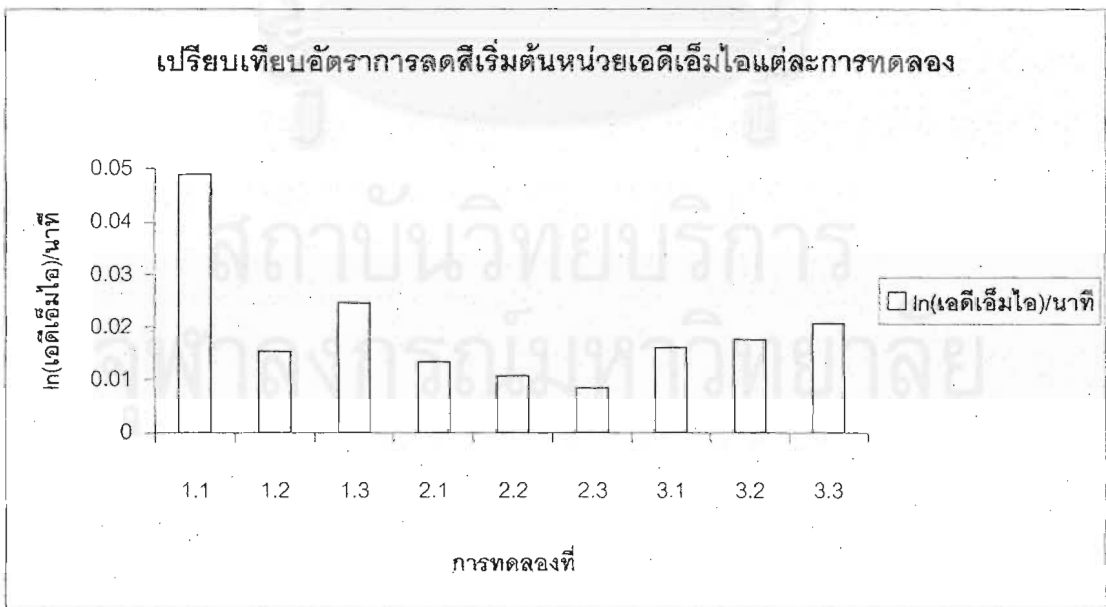
รูปที่ 4.56 กราฟอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอสยูของแต่ละชุดการทดลอง



รูปที่ 4.57 กราฟอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอตีเอ็มไอของแต่ละชุดการทดลอง



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอสยูของแต่ละการทดลอง



รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นหน่วยเอ็ดไอของแต่ละการทดลอง

จากตารางที่ 4.11 แสดงอัตราการลดสีเริ่มต้นและอัตราการลดสีเริ่มต้นจำเพาะของสารอาหารต่างชนิดในแต่ละชุดการทดลอง พบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดสี จากโครงสร้างโมโนอะไซ (ชุดการทดลองที่ 1) เป็นโครงสร้างไดอะไซ(ชุดการทดลองที่ 2) ทำให้อัตราการลดสีเริ่มต้นต่ำลงทุกชนิดของสารอาหาร ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแตกพันธะไดอะไซยากกว่าโมโนอะไซ ความเข้มข้นจึงลดลงในช่วง 30 นาทีแรกค่อนข้างช้า แม้จะเพิ่มซีโอดีของสารอาหารให้สูงขึ้นก็ตาม

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการลดสีเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นของชุดการทดลองที่ 3 กับการทดลองที่ 2.3

การทดลองที่	อัตราการลดสีเริ่มต้น (IDR)		% อัตราการลดสีเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น	
	ln(SU)/min	ln(ADMI)/min	% (ln(SU)/min)	% (ln(ADMI)/min)
2.3	0.0053	0.0084	-	-
3.1	0.0109	0.0161	105.66	91.67
3.2	0.0124	0.0176	133.96	109.52
3.3	0.0137	0.0207	158.49	146.43

แต่สิ่งที่น่าสนใจ คือ ชุดการทดลองที่ 3 เมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสพบว่าอัตราการลดสีเริ่มต้นทั้งในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ COD:P เท่ากับ 150:4 150:8 และ 150:10 อัตราการลดสีเริ่มต้น(เมื่อเทียบกับการทดลองที่ 2.3) เพิ่มขึ้นเท่ากับ 105.66% 133.96% และ 158.49% ในหน่วยเอสยู และ 91.67% 109.52% และ 146.43% ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ตามลำดับ แสดงว่าฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยการทำงานของจุลินทรีย์ให้ดีขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาอัตราการลดสีเริ่มต้น ใช้เวลาเพียง 30 นาที ซึ่งไม่เพียงพอที่จะคาดการณ์ความเข้มข้นในช่วงเวลาที่เหลือได้ รวมถึงผลของฟอสฟอรัสต่ออัตราการลดสีช่วงอื่นๆ เพราะจากตารางที่ 4.9 (ชุดการทดลองที่ 3) ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นน้ำออกช่วงแอโรบิกทั้งหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับอัตราการลดสีเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. กระบวนการเอสปีอาร์ มีความสามารถในการลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียลงได้ และสามารถกำจัดธาตุอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) ได้ดีอีกด้วย

2. ชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของสารอาหารทั้ง 3 ชนิด ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อซีโอดีเพิ่มขึ้นในชุดการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของไซเดียมอะซิเตทต่ำกว่าสารอาหารตัวอื่น คาดว่าเกิดจากความเป็นพิษของไซเดียมอะซิเตทต่อจุลินทรีย์ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 (ที่เพิ่มอัตราส่วนฟอสฟอรัสในน้ำเสียเข้า) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.3 แสดงว่าฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี

3. ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นของสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ 1 เรียงจากมากไปน้อย คือ น้ำตาล ไซเดียมอะซิเตท และนมตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่ 2 เมื่อซีโอดีสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นก็ดีขึ้นอย่างเห็นชัด ทั้งนม และไซเดียมอะซิเตท แต่กรณีของน้ำตาล มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่าเดิม ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นที่สูงขึ้นคาดว่า มีการนำไนโตรเจนไปสร้างเซลล์เป็นส่วนใหญ่มากกว่าผลจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เพราะเมื่อซีโอดีสูงขึ้น การเจริญเติบโตของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์มีมากขึ้น และมีการหลุดลอกของฟิล์มจุลินทรีย์มากขึ้น จนกลุ่มไนตริไฟเออร์ซึ่งเป็นกลุ่มที่กำจัดไนโตรเจนเจริญเติบโตไม่ทัน ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นน่าจะลดลง แต่ผลการทดลองกลับตรงกันข้าม เหตุผลที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมไนโตรเจนในอัตราส่วนที่เพียงพอแก่การเจริญเติบโตเท่านั้น ดังนั้นเมื่อซีโอดีสูงขึ้นจุลินทรีย์จะผลิตเซลล์ใหม่มากและดึงไนโตรเจนไปใช้สร้างเซลล์มากขึ้น ส่วนฟอสฟอรัสปริมาณสูงไม่มีผลต่อการกำจัดที่เคเอ็น

4. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ของสารอาหาร ในชุดการทดลองที่ 1 เรียงจากมากไปน้อย คือ ไซเดียมอะซิเตท นม และน้ำตาล ตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่ 2 เมื่อซีโอดีสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น โดย น้ำตาลและไซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพการ

การกำจัดเท่ากัน และมากกว่า นม จากการทดลองพบว่าโซเดียมอะซิเตทมีข้อดีกว่าสารอาหารชนิดอื่น คือ สามารถกำจัดฟอสฟอรัสในช่วงแอนไอโรบิกได้เร็วกว่า ในทางปฏิบัติ สามารถเติมโซเดียมอะซิเตทในน้ำเสียชุมชน (ในกรณีที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ แต่ฟอสฟอรัสสูง) เพื่อลดระยะเวลาช่วงแอนไอโรบิกของกระบวนการกำจัดธาตุอาหารได้ และสาเหตุที่โซเดียมอะซิเตทมีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสละลายได้ดี คาดว่ามาจากพีเอชที่สูง เกิน 8 ในช่วงแอนไอโรบิกและแอนไอโรบิก มีส่วนช่วยให้เกิดการจับอโรฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วตกผลึกในรูปของผลึกสารประกอบแคลเซียม ร่วมกับผลของการนำฟอสฟอรัสไปสร้างเซลล์จุลินทรีย์ปกติ ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน เพราะมีการเติมฟอสฟอรัสให้เพียงพอแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เท่านั้น ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ถึงแม้ว่าจะเติมฟอสฟอรัสปริมาณสูง แต่ก็ยังไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน คาดว่ามีผลจากความเป็นพิษของโซเดียมอะซิเตทต่อจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs ในระบบ

5. ในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 สารอาหารทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท มีความสามารถลดสีที่ได้ออกใกล้เคียงกัน ทั้งในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ โดยประสิทธิภาพการลดสีในหน่วยวัดสีเดียวกันของสีแต่ละโครงสร้าง มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อนำไปใช้งานทางวิศวกรรม ดังนั้นการเลือกใช้สารอาหารในการลดสีร่วมกับการกำจัดธาตุอาหาร จึงควรให้ความสำคัญถึงชนิดของสารอาหารที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดธาตุอาหารมากกว่า

6. โครงสร้างของสีที่พื้ผลต่อการลดสีแตกต่างกัน โดยโครงสร้างโมโนอะโซเมื่อผ่านชั้นแอนไอโรบิก ลักษณะกราฟแอบซอร์เบนต์กับความยาวคลื่นราบเรียบจนไม่สามารถระบุค่า λ_{max} ได้ แสดงว่าสามารถแตกพันธะโมโนอะโซได้เกือบหมด น้ำที่ผ่านแอนไอโรบิกค่อนข้างใส เนื่องจากโครงสร้างโมโนอะโซรวมถึงโครงสร้างโมเลกุลของสีไม่สลับซับซ้อนจึงถูกกำจัดได้ง่าย ส่วนโครงสร้างไดอะโซ เมื่อผ่านชั้นแอนไอโรบิก ลักษณะกราฟแอบซอร์เบนต์กับความยาวคลื่นยังเป็นรูปประจักษ์ชัดและสามารถระบุค่า λ_{max} ได้ น้ำที่ผ่านชั้นแอนไอโรบิกจึงมีโทนสีเปลี่ยนจากโทนน้ำเงินเป็นโทนน้ำเงินอมชมพูหรือม่วงอมชมพู เนื่องจากโครงสร้างไดอะโซรวมถึงโครงสร้างโมเลกุลของสีค่อนข้างซับซ้อนจึงยากต่อการกำจัด ส่วนน้ำที่ผ่านชั้นแอนไอโรบิกของสีทั้ง 2 โครงสร้าง มีโทนสีใกล้เคียงช่วงแอนไอโรบิก แต่ความเข้มสีจางลง

7. การลดสีรีแอกทีฟทั้งโครงสร้างโมโนอะโซและไดอะโซ จะเกิดการลดสีอย่างมากในช่วงแอนแอโรบิก ซึ่งกลไกการลดสีหลักคาคว่าเป็นการแตกสลายพันธะอะโซ และในช่วงแอโรบิกเกิดการลดสีได้อีกเล็กน้อย ซึ่งกลไกการลดสีคาคว่าเป็นการดูดซับของสีรีแอกทีฟที่เหลือ บนมวลจุลินทรีย์

8. ในชุดการทดลองที่ 3 ฟอสฟอรัสปริมาณสูงมีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีโครงสร้างไดอะโซ โดยใช้ไซเตียมอะซิเตทเป็นสารอาหาร ซึ่งฟอสฟอรัสปริมาณสูงขึ้นมีผลให้ประสิทธิภาพการลดสีดีขึ้นทั้งในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอ เมื่อเทียบกับการทดลองที่ 2.3 ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่มากขึ้น คาคว่ามีผลทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้สีย้อมเป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำงานได้ดีขึ้น

9. ซีโอดีสูงขึ้นมีผลให้ เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออกมีมากขึ้น รวมถึงมวล จุลินทรีย์ที่เกาะติดวัสดุตัวกลางก็มากขึ้นเช่นกัน ชนิดของสารอาหารก็มีผลต่อการผลิตเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสในน้ำออก โดยสารอาหารที่ผลิตเอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสเรียงจากมากไปน้อย คือ น้ำตาล นม และ ไซเตียมอะซิเตท ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดสารที่เหลือจากการลดสี ว่าเป็นสารชนิดใด และมีผลกระทบอย่างไรต่อประสิทธิภาพการลดสี
2. ศึกษาถึงอัตราการหมุนเวียนน้ำเสียที่เหมาะสม ที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ
3. ศึกษาเกี่ยวกับน้ำเสียสีย้อมจริงจากโรงฟอกย้อม ซึ่งมีสารเคมีตัวอื่นเจือปนและพิจารณาประสิทธิภาพการลดสีเทียบกับการใช้น้ำเสียสังเคราะห์
4. ศึกษาถึงปริมาณธาตุอาหารหลักตัวอื่น เช่น ไนโตรเจน ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีอย่างไร

ความสำคัญของงานวิจัยและการประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปัญหาน้ำเสียในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายสิบปีที่ผ่านมา มุ่งเน้นการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นความสกปรกในน้ำเป็นหลัก ในกระบวนการทางชีวภาพสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่น้ำเสียส่วนที่เป็นปัญหามากที่สุดคือ น้ำเสียอุตสาหกรรม โดยเฉพาะน้ำเสียโรงฟอกย้อม เพราะนอกจากมีสารอินทรีย์ทั้งรูปที่ย่อยสลายง่ายและย่อยสลายยากแล้วยังมีความเข้มข้นสูงอีกด้วย ซึ่งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ รวมถึงจุลินทรีย์ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์ย่อยยากเป็นสารอาหารเพื่อการดำรงชีวิตได้ แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้แนวความคิดการบำบัดน้ำเสียย่อยยาก เช่น น้ำเสียสีย้อม หรือ น้ำเสียจากหลุมฝังกลบขยะ(Leachate) เปลี่ยนไป โดยเมื่อต้องการกำจัดสารที่ไม่สามารถเป็นสารอาหารที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ได้ ก็จะเติมสารอาหารที่ย่อยง่ายเพื่อให้จุลินทรีย์ดำรงชีวิตได้ และสามารถกำจัดสารที่ย่อยยากได้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยสารอินทรีย์ย่อยง่าย ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า Cosubstrate หรือ Cometabolism

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดสีย้อมประเภทสีรีเอกทีฟ ซึ่งเป็นสารที่ย่อยยาก โดยการเติมสารอาหารย่อยง่าย (สารให้อิเลกตรอนกับจุลินทรีย์) ได้แก่ น้ำตาล นม และโซเดียมอะซิเตท โดยจุลินทรีย์ใช้สีย้อมเป็นสารรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้กลุ่มโครโมฟอร์ที่แสดงสีของสีย้อมแตกตัวออก และไม่สามารถแสดงสีได้อีก และในงานวิจัยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่มากขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดสีดีขึ้นเล็กน้อย

ในทางปฏิบัติ สามารถใช้น้ำเสียสีย้อมบำบัดร่วมกับน้ำเสียจากการเกษตรหรือน้ำเสียจากโรงงานผลิตปุ๋ย ซึ่งมีฟอสฟอรัสอยู่มาก รวมถึงใช้บำบัดร่วมกับน้ำเสียชุมชน โดยอาจต้องเติมสารอาหารย่อยง่ายเพิ่ม ในการบำบัดร่วม (Joint treatment) เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบบำบัดใหม่ รวมถึงการนำองค์ประกอบและข้อดีของน้ำเสียแต่ละประเภท มาใช้ในการบำบัดร่วมกันให้เกิดประโยชน์สูงสุด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์. การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแยกทิวเด็ดสลดจี้ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาค วิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ. การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อมพิมพ์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537.
- โกมล เขียมเสมอ. การกำจัดสีย้อมรีเอกทีฟชนิดอะไซโดยกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกภายใต้สารอาหารและเวลาแอนแอโรบิกที่ต่างกัน. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการระดับชาติครั้งที่ 10 ของสวสท. 2541, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.
- จินตนา แป้นสุวรรณ. การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถภาพของการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงฟอกย้อมระหว่างกระบวนการเอสปีอาร์แบบธรรมดา กับแบบแอนนออกซิก+แอนแอโรบิก/ออกซิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544.
- ธีรวัตร โสมวดี. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไบโอดรัมที่มีไม้ไผ่เป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- ธีระ เกรอด. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- นุกูล อินทระสังขา. การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารและศักยภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยระบบฟักเบดแอเรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2530.
- ปาจริย์ ทองสนิท. การพัฒนาระบบเอสปีอาร์สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539.

- ปรียะดา เหล่ารุจิจินดา. ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง
กัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ปัญจรัตน์ โฉลานนท์. ประสิทธิภาพของระบบแเอโรบิกแพคเก็ตเบด สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจากโรง
อาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2537.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กด้วยระบบเอสบีอาร์.
กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2525.
- วรรณยา ประทุมแก้ว. การลดสีรีแอกทีฟและการกำจัดไนโตรเจนโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบ
แอนแเอโรบิก/แเอโรบิก/แอนนออกซิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- วรวิทย์ เหลืองดิลก. ผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟต่อการลดสีโดยกระบวนการแอน
แเอโรบิก-แเอโรบิก. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 10 ของ
สวสท.2541, สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.
- วุฒิ วิพันธ์พงษ์. การใช้สารเคมีเพนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลง
กรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ. การกำจัดสีของน้ำเสียจากการฟอกย้อมผ้าโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต
ไฮเดรตเบสิค. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- สุเมธ ชวเดช. ลักษณะสมบัติเมือกจุลินทรีย์. สัมมนาทางวิชาการระดับชาติเทคโนโลยีน้ำและน้ำ
เสีย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- โสภา ชินเวชกิจวานิชย์. การลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- อัจฉราพร ไสละสูต. คู่มือการย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เทคนิค 19 การพิมพ์,
2527.
- อำพล เตโชวานิชย์. การเปรียบเทียบการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยกระบวนการเอสเอสและระบบบีเอ็น
อาร์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 10 ของสวสท. 2541, สมาคม
วิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Abu-ghararah, Z.H. and Randall, C.W. The Effect of Organic Compounds on Biological Phosphorus Removal. Water Science and Technology. 23(1991): 585.
- Alvarez, P.J.J. and Vogel, T.M. Substrate Interaction of Benzene, Toluene and Paraxylene during Microbial Degradation by Pure Culture and Mixed Culture Aquifer Slurries Applied and Environmental Microbiology. 57(1991): 2981-2985.
- Barnard, J.L. Activated Primary Tanks for Phosphate Removal. Water SA. 10,3(1984): 121-126.
- Brodisch, K.E.U. and Joyner, S.J. The Role of Microorganism Other Than Acinetobacter in Biological Phosphate Removal in Activated Sludge Process. Water Science and Technology. 15,3-4(1983): 117-125.
- Brown, D. and Laboureur, P. The Degradation of Dyestuffs: Part I – Primary Biodegradation under Anaerobic Conditions. Chemosphere. 12,3(1983): 397-404.
- Buchnan, L. The Possible Biological Mechanism of Phosphorus Removal. Water Science and Technology. 15,3(1983): 87-103.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholland, D.A. and Senior, E. Anaerobic Decolorization of Reactive Dyes in Conventional Sewage Treatment Process. Water SA. 20,4(1994): 341-344.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholland, D.A. and Senior, E. Microbial Decolorization of a Reactive Azo Dye under Anaerobic Condition. Water SA. 21,1(1995): 61-69.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A. Treatment of Exhausted Reactive Dye bath Effluent Using Anaerobic Digestion: Laboratory and Full-Scale Trials. Water SA. 22,3(1996): 225-233.
- Characklis, W.G. Fouling bioslime development a process analysis. Biotechnology and Bioengineering. 18(1981): 1923-1960.
- Chipperfield, P.N.J. Performance of plastic filter media in industrial and domestic waste treatment. Journal WPCF. 39(1967): 1860-1874.

- Chung, K., Stevens, S.E. Jr. and Cerniglia, C.E. The Reduction of Azo Dyes by the intestinal Microflora. Crit. Rev. Microbiol. 18,3(1992): 175-190. cited in Munruk Tuntoolavest, 1997.
- Criddle, C.S. The Kinetics of Cometabolism. Biotechnology and Bioengineering. 41 (1993): 1048-1056.
- Comeau, Y., Hall, K.J., Hancock, R.E.W. and Oldham, W.K. Biochemical Model for Enhanced Biological Phosphorus Removal. Water Science and Technology. 20,12(1986): 1511-1521.
- Coughlin, M.F., Kinkle, B.K., Tepper, A. and Bishop, P.L. Characterization of Azo-Dye Degradation Bacteria and their Activity in Biofilms. Water Science and Technology. 36,1(1997): 215-220.
- Cybis, L.F.A. and Horan, N.J. Protozoan and Metazoan Populations in Sequencing Batch Reactors Operated for Nitrification and/or Denitrification. Water Science and Technology. 35,1(1997): 81-86.
- Daniel M.White and William Schnabel. Treatment of Cyanide Waste in a sequencing batch biofilm reactors. Water Science and Technology. 32,1(1998): 254-257.
- Dennis, R.W. and Irvine, R.L. Effect of Fill:React Ratio on Sequencing Batch Biological Reactor. Journal WPCF. 51,2(1979): 255-263.
- Devkota, B.H., Biodegradation of TCE under Aerobic and Anaerobic Condition. Thesis No.EV.95-6, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1995.
- Dollerer, J., Wilderer, P.A. Biological Treatment of Leachates from Hazardous Waste Landfills Using SBBR Technology. Water Science and Technology. 34,7-8 (1996): 437-444.
- Dubrow, S.F., Boardman, G.D. and Michelsen, D.J. Chemical Pretreatment and Aerobic-Anaerobic Degradation of Textile Dye Wastewater. Environmental Chemistry of Dyes and Pigments. John Wiley and Sons, Inc., 1996: 75-104.
- Fenchel, T. and Finlay, B.J., Ecology and Evolution in Anoxic Worlds. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Florentz, M. and Granger, P. Phosphorus-31 Nuclear Magnetic Resonance of Activated Sludge: Use for the Study of the Biological Removal of Phosphate from Wastewater. Environ. Technol. Lett. 4,9-12(1983).

- Ganesh, R., Boardman, G.D. and Michesen, D. Fate of Azo Dyes in Sludges. Wat. Res. 28,6(1994): 1367-1376.
- Gerald E. Speitel Jr. and Robert L. Segar Jr. Cometabolism in Biofilm Reactors. Water Science and Technology. 31,1(1995): 215-225.
- Goronszy, M.C. and Tomas, H. Characterization and Biological Treatability of A Textile Dyehouse Wastewater. 47th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, 1992: 743-764.
- Gottschalk, G., Bacterial Metabolism. Second edition. New York: New York Inc., 1988.
- Gupta Munish, Makram T. Suisan and Gregory D Sayles. Modeling Kinetics of Chloroform Cometabolism in Metanogenic and Sulfate-Reducing Environmentals. Water Science and Technology. 34,5-6(1996): 403-410.
- Harmer, C. and Bishop, P. Transformation of Azo Dye AO-7 by Wastewater Biofilms. Water Science and Technology. 26,3-4(1992): 627-636.
- Haug, W., Schmidt, A., Nortemann, B., Hempel, D.C., Stolz, A. and Knackmuss, H.J. Mineralization of the sulphonated Azo Dye Modant Yellow 3 by a 6-aminonaphthalene-2-sulphonate-degrading Bacterium Consortium. Appl. Environ. Microbial. 57(1991): 3144-3149.
- Herzburn, P.A., Irvine, R.L., Malinowski, K.C. Biological Treatment of hazardous Waste in Sequencing Batch Reactors. Journal WPCF. 57,12(1985): 1163-1167.
- Hirl, P.J. and Irvine, R.L. Reductive Decoloration of Perchloroethylene Using Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactors(AnSBBR). Water Science and Technology. 35,1(1997): 49-56.
- Huag, R.T. and McCarty, P.L. Nitrification with submerge filters. Journal WPCF. 4 (1972): 2086-2102.
- Hussain, N. Cleaner Production in the Dyeing Industry. Thesis NO.EV.94-13, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1994.
- Irvine, R.L., Miller, G. and Bhamrah, A.S. Sequencing Batch Treatment of Wastewater in Rural Areas. Journal WPCF. 51,2(1979): 244-254.
- Irvine, R.L., Murthy, D.V.S., Arora, M.L., Coperman, J.L., Heidman, J.A. Analysis of full-scale SBR operation at Grundy Center, Iowa. Journal WPCF. 59,3(1987): 132-138.

- Irvine, R.L., Yocum, P.S., Early, J.P. and Chozick, R. Periodic Process for InSitu and Onsite Bioremediation of Leachates and Soils. Water Science and Technology. 27,7-8(1993): 97-104.
- Kaballo, H.P., Yuangang Zhao and Wilderer, P.A. Elimination of p-Chlorophenol in Biofilm Reactors – A comparative Study of Continuous Flow and Sequencing Batch Operation. Water Science and Tecjnology. 31,1(1995): 51-60.
- Kaballo, H.P. Shock Loading Management with the Sequencing Batch Biofilm Reactor Technology. Water and Technology. 35,1(1997): 35-40.
- Kolb, F.R. and Wilderer, P.A. Activated Carbon Membrane Biofilm Reactor for the Degradation of Volatile Organic Pollutants. Water Science and Technology. 31,1(1995): 205-213.
- Kolb, F.R. and Wilderer, P.A. Activated Carbon Sequencing Batch Biofilm Reactor to Treatment Industrial Wastewater. Water Science and Technology. 35,1(1997): 169-176.
- Konegay, B.H. and Andrews, J.F. Kinetic of fixed film biological reactors. Journal WPCF. 40,11(1970): 460-468.
- Lida, Y. and Teranishi. Nitrogen removal from municipal wastewater by a single submerge filter. Journal WPCF. 51,2(1984): 264-273.
- Liu, W.T. Determination of the Microbial Diversity of Anaerobic-Aerobic Activated Sludge by a Novel Molecular Biological Technique. Water Science and Technology. 37,4-5(1995): 417-422.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker, J. Brock Biology of Microorganisms. Eighth edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- Marquez, M.C. and Costa, C. Biomass Concentration in PACT Process. Wat. Res. 30,9 (1996): 2079-2085.
- Martinez, S.G. and Wilderer, P.A. Phosphate Removal in a Biofilm Reactor. Water Science and Technology. 33(1991): 1405-1415.
- Metcalf and Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse. 3rd Edition., McGraw-Hill, Book Company Inc., Singapore, 1991.

- Meyer, U. Biodegradation of Synthetic Organic Colorants. Microbial Degradation of Xenobiotic and Recalcitrant Compound. FEMS Symposium 12th Edition, by Leisinger, T., Cook, A.M., Hutter, R. and Nuesch, J. London: Academic Press., 1981: 371-385. cited in Banat, I.M. et al., 1996.
- Mino, T., Van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. Microbiology and Biochemistry of the Enhanced Biological Phosphate Removal Process. Water Science and Technology. 32,11(1998): 3193-3207.
- Mosey, F.E. New Development in the anaerobic Treatment of Industrial Wastes. Water Pollution Control, 1982: 540-552.
- Munish, G., Suidan, M.T. and Sayles, G.D. Modeling Kinetic of Chloroform Cometabolism in Methanogenic and Sulfate-Reducing Environment. Water Science and Technology. 34,5-6(1996): 403-410.
- Munruk Tuntoolavest. Biological Treatment of Azo Dyes in Textile Wastewater. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement of the Degree of Master of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, USA, 1997.
- Myung-Keun Chang, Voice, T.C. and Criddle, C.S. Kinetics of Competitive Inhibition and Cometabolism in the Biodegradation of Benzene, Toluene and p-Xylene by two Pseudomonas Isolates. Biotechnology and Bioengineering. 41(1992): 1057-1065.
- Nakamura, K., Masuda, K. and Mikami, E. Isolation of a New Type of Polyphosphate Accumulating Bacteria and Its Phosphate Removal Characteristics. J.Ferment. Bioeng. 71,4(1991): 258-263.
- Nigam, P., Mullan, G.M., Banat, I.M. and Marchant, R. Decolorization of Effluent from the Process for Simultaneous Removal of Nitrogen Phosphorus and BOD as Applied to Small Community Sewage Treatment. Water Science and Technology. 18(1986): 363-370.
- Nigam, P. and Marchant, R. Selection of a Substratum for Composing Biofilm System of a Textile-Effluent Decolorizing Bacteria. Biotechnology Letters. 17,9(1995): 993-996.

- Nigam, P., Mullan, G.M., Banat, I.M. and Marchant, R. Decolorization of Effluent from the Textile Industry by a Microbial Consortium. Biotechnology Letters. 18,1 (1996): 117-120.
- Oleszkiewicz, J.A., Mateja, S. and Hutchison, J.E. Treatment of Food Industry Wastewater in Sequencing Batch Reactors. Environment Technology. 11 (1990): 499-508.
- Oxspring, D., Mullan, G.M., Smyth, W.F. and Marchant, R. Decolorization and Metabolism of the Reactive Textile Dye, Remazol Black B by an Immobilized Microbial Consortium. Biotechnology Letters. 18,5(1996): 527-530.
- Pearson, C.R. Use of Synthetic media in the biological treatment of industrial waste. Journal and Proceeding of the Institute of Sewage Purification, 1965: 519-524.
- Randall, W.B., et al., Pilot Scale Study on Anaerobic Treatment of A Textile Wastewater. Hazardous and Industrial Wastes Proceeding of the Mid Atlantic Industrial Waste Conference, 1993: 218-227.
- Razo-Flores, E., Luijten, M., Donlon, B., Lettinga, G. and Field, J. Biodegradation of Selected Azo Dyes under Methanogenic Conditions. Water Science and Technology. 36,6-7(1997): 65-72.
- Reddy, M. The Concept of Phosphorus Storage Capability and Its Implications for Design of Systems for Enhanced Biological Uptake of Phosphate. Water Science and Technology. 23(1991): 577.
- Reife, A. and Freeman, H.S. Chemical Pretreatment and Aerobic-Anaerobic Degradation of Textile Dye Wastewater. Environmental Chemistry of Dye and Pigments. John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- Satoh, H.; Mino, T. and Matsuo, T. Uptake of Organic Substrates and Accumulation of Polyhydroxyalkanoates Linked with Glycolysis of Intracellular Carbohydrates under Anaerobic Condition in the Biological Excess Phosphate Removal Process. Water Science and Technology. 26,5-6(1992): 933-942.
- Shah, T.J. Color Removal From Textile Effluent Using a Two-Stage Activated Process. Thesis No.EV.97-39, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1997.

- Shaul, G.M., Dempsey, C.R., Dostal, K.A. and Lieberman, R.J. Fate of Azo Dyes in The Activated Sludge Process. 41th Purdue Industrial Waster Conference Proceeding, 1986: 603-611.
- Shoda, M., Ohsumi, T. and Udaka, S. Screening for High Phosphate Accumulating Bateria. Agri-Biochemical. 44,2(1980): 319-324.
- Shore, J. Colorants and Auxiliaries Organic Chemistry and Application Propeties. Vol.1, England Society of Dyes and Colorists, 1990.
- Shore, J. Dyeing with Reactive Dyes Cellulosics Dyeing. Edition by John Shore, Manchester, UK:The Alden Press, Oxford, 1995: 189-245.
- Simon, G.M. and Peter, A.W. Phosphate removal in a biofilm reactor. Water Science and Technology. 23(1991): 1405-1415.
- Smolders, G.J.F., Van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. Model of the Anaerobic Metabolism of the Biological Phosphorus Removal Process: Stoichiometry and pH Influence. Biotech. Bioeng. 43(1994): 461-470.
- Suresh, N., Warburg, R., Timmerman, M., Wells, J., Coccia, M., Roberts, M.F. and Halvorson, H.O. New Strategies for the Isolation of Microorganisms Responsible for Phosphate Accumulation. Water Science and Technology. 17,99(1985).
- Ubukata, Y. and Takii, S. Induction Ability of Excess Phosphate Accumulation for Phosphate Removing Bacteria. Water Science and Technology. 28,5(1994): 247-249.
- Van Niel, E.W.J., Appeldoorn, K.J., Zehnder, A.J.B. and Kortstee, G.J.J. Inhibition of Anaerobic Phosphate Release by Nitric Oxide in Activated Sludge. Appl. Environ. Microbiol. 64,8(1998): 2925-2930.
- Wagner, M., Erhart, R., Manz, W., Amann, R., Lemmer, H., Wedi, D. and Schleifer, K.H. Development of an rRNA-targeted Oligonucleotide Probe Specific for the Genus *Acinetobacter* and Its Application for in situ Monitoring in Activated Sludge. App. and Env. Microb. 60,3(1994): 792-800.
- Wentzel, M.C., Dold, P.L., Ekama, G.A. and Marais, G.V.R. Kinetics of Biological Phosphorus Release. Water Science and Technology. 17,11(1985): 57-71.

- Wentzel, M.C., Dold, P.L., Ekama, G.A. and Marais, G.V.R. Enhanced Polyphosphate Organism Cultures in Activated Sludge. Water SA, 14,2(1988): 81-92.
- Wilderer, P.A. Technology of Membrane Biofilm Reactor Operated Under Periodically Changing Process Conditions. Water Science and Technology, 31,1(1995): 173-183.
- Wilderer, P.A., Kaballo, H.P. and Rehbein, V. Sequencing Batch Biofilm Reactor Technology. Trends in Water Environmental Management-Seminar University of Tokyo proceedings, 1996.
- Woolard, C.R. and Irvine, R.L. Response of a Periodically Operated Halophilic Biofilm Reactor to Change in Salt Concentration. Water Science and Technology, 31,1 (1995): 41-50.
- Zaoyan, Y.K., Guangliang, S., Fan, Y., Jinshan, D. and Huanian, M. Anaerobic-Aerobic Treatment of a Dye Wastewater by Combination of RBC with Activated Sludge. Water Science and Technology, 26,9-11(1992): 2093-2096.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียที่เติมสารที่ฟุ้งซ่าน 100 มก/ล เท่ากันทุกการทดลอง และเติมสารอาหาร(แหล่งคาร์บอน) ต่างๆกัน มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ น้ำตาล นม และ โซเดียมอะซิเตท

1.ปริมาณสารอาหารที่เติมแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลองที่ 1

- ใช้สีโมโนอะซิ สีม่วง 100 มก/ล ให้ค่าซีไอดีเท่ากับ 45.8 มก/ล
- กำหนดอัตราส่วน ซีไอดี_{สารอาหาร} ต่อ ซีไอดี_{สี} เท่ากับ 30 : 1 เท่ากันทุกการทดลอง
- ดังนั้น ซีไอดีของสารอาหาร คือ 30×45.8 เท่ากับ 1374 มก/ล
- น้ำตาล 1 มก/ล มีซีไอดีเท่ากับ 1.12 มก/ล
- นม 1 มล/ล มีซีไอดีเท่ากับ 118 มก/ล
- โซเดียมอะซิเตท 1 มก/ล มีซีไอดีเท่ากับ 0.458 มก/ล

ดังนั้น

- การทดลองที่ 1.1 ใช้ น้ำตาล = $1374 / 1.12 = 1226.78$ มก/ล (1.227 ก/ล)
- การทดลองที่ 1.2 ใช้ นม = $1374 / 118 = 11.6$ มล/ล
- การทดลองที่ 1.3 ใช้ โซเดียมอะซิเตท = $1374 / 0.458 = 3000$ มก/ล (3ก/ล)

ชุดการทดลองที่ 2

- ใช้สีไดอะอะซิสีน้ำเงิน 100 มก/ล ให้ค่าซีไอดีเท่ากับ 82.3 มก/ล
- ซีไอดีสารอาหาร คือ 30×82.3 เท่ากับ 2469 มก/ล

ดังนั้น

- การทดลองที่ 2.1 ใช้ น้ำตาล = $2469 / 1.12 = 2204.46$ มก/ล (2.204 ก/ล)
- การทดลองที่ 2.2 ใช้ นม = $2469 / 118 = 20.9$ มล/ล
- การทดลองที่ 2.3 ใช้ โซเดียมอะซิเตท = $2469 / 0.458 = 5390.83$ มก/ล (5.391ก/ล)

ชุดการทดลองที่ 3 ใช้โซเดียมอะซิเตทเท่ากันทุกการทดลอง = 5.391 ก/ล และใช้สีไดอะอะซิสีน้ำเงิน 100 มก/ล

2. ปริมาณธาตุอาหารที่เติม

ธาตุอาหารที่เติมมีอัตราส่วนดังนี้ COD:N:P:Ca:Mg:Fe เท่ากับ 150 : 5 : 2 : 2.5 : 1 : 0.2 ใช้สำหรับทุกชุดการทดลอง แต่มีเงื่อนไขคือ ชุดการทดลองที่ 2 จะให้ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับชุดการทดลองที่ 1 และ ชุดการทดลองที่ 3 ใช้ COD:P = 150 : 4 150 : 8 และ 150 : 10 (ส่วนธาตุอาหารอื่นนอกจากฟอสฟอรัสยังคงอัตราส่วนเหมือนชุดการทดลองที่ 1 และ 2) โดยซีไอดีที่ใช้คำนวณเป็นซีไอดีรวม

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุอาหารของการทดลองที่ 1.1

$$\begin{aligned}\text{ซีไอดี}_{\text{รวม}} &= \text{ซีไอดี}_{\text{สารอาหาร}} + \text{ซีไอดี}_{\text{ส}} \\ &= 1374 + 45.8 = 1419.8 \text{ (1420 มก/ล)}\end{aligned}$$

- ไนโตรเจน เติมด้วยยูเรีย $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
 ต้องการไนโตรเจน = $1420 \cdot (5/150) = 47.33 \text{ มก/ล}$
 เติม $(\text{NH}_2)_2\text{CO} = 47.33 \cdot (60/28) = 101 \text{ มก/ล}$
- ฟอสฟอรัส เติมด้วย KH_2PO_4
 ต้องการฟอสฟอรัส = $1420 \cdot (2/150) = 18.93 \text{ มก/ล}$
 เติม $\text{KH}_2\text{PO}_4 = 18.93 \cdot (136/31) = 83.05 \text{ มก/ล}$
- แคลเซียม เติมด้วย $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 ต้องการแคลเซียม = $1420 \cdot (2.5/150) = 23.67 \text{ มก/ล}$
 เติม $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 23.67 \cdot (147/40) = 86.98 \text{ มก/ล}$
- แมกนีเซียม เติมด้วย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
 ต้องการแมกนีเซียม = $1420/150 = 9.47 \text{ มก/ล}$
 เติม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 9.47 \cdot (246/24) = 97.07 \text{ มก/ล}$
- เหล็ก เติมด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ FeCl_3 เข้มข้น 500 มก*Fe/ล หรือ 0.5 มก*Fe/มล
 ต้องการเหล็ก = $1420 \cdot (0.2/150) = 1.893 \text{ มก/ล}$
 เติม สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ $\text{FeCl}_3 = 1.893/0.5 = 3.8 \text{ มล/ล}$
- สภาพต่าง เติมด้วย NaHCO_3
 กำหนด NaHCO_3 : ซีไอดี_{รวม} = 0.5 : 1
 เติม $\text{NaHCO}_3 = 0.5 \cdot 1420 = 710 \text{ มก/ล}$



ภาคผนวก ข

การหาพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุตัวกลางที่ใช้ในการทดลองเป็นพลาสติกสังเคราะห์ผลิตจากพลาสติกโพลีโพรไพลีนที่มีลักษณะเป็น Hollow pellet (ทรงกระบอกกลวง) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 มม. ยาว 5 มม. มีความหนาแน่น 1.003 กรัม/ลบ.ซม. และได้นำไปหาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่อง Micromeritics ASAP 2000 (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) ด้วยวิธี BET Surface

พื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง (BET Surface Area)	=	5.4704	ตร.ม./กรัม
น้ำหนักวัสดุตัวกลาง ต่อ 1 ถึงปฏิกิริยา	=	1510	กรัม
พื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง ต่อ 1 ถึงปฏิกิริยา	=	5.4704×1510	= 8260 ตร.ม.
ปริมาตรวัสดุตัวกลาง ต่อ 1 ถึงปฏิกิริยา	=	$1510 / 1.003$	= 1505.48 ลบ.ซม.
พื้นที่ผิวจำเพาะวัสดุตัวกลาง	=	5.4704×1.003	= 5.487 ตร.ม./ลบ.ซม.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-1 ผลการทดลองที่ 1.1

การทดลองที่ 1.1																																
วันที่	วันที่	Influent						Anaerobic										Aerobic						Efficiency %								
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD	TKN	P	SU	ADMI
22/6/01	1	7.58	133.44	4565.25	1534.28			6.70	-230	0.10	27.8	48.65	543.65	350.46			7.88	12	4.55	28.1	23.93	415.65	176.15					88.52			82.07	90.90
24/6/01	3	7.69	130.25	4416.19	1384.74			6.56	-265	0.15	27.9	45.62	510.11	219.18			7.82	16	4.90	29.6	26.47	462.36	140.25					89.87			79.66	89.53
26/6/01	5	7.49	132.38	4525.86	1613.24			6.78	-236	0.20	28.6	40.23	472.36	320.91			7.65	19	4.50	29.6	21.60	396.15	105.61					93.45			83.66	91.25
28/6/01	7	7.55	138.44	4629.77	1482.11			6.49	-244	0.10	28.5	42.94	462.65	169.75			7.92	14	4.75	30.1	19.42	279.65	89.72			470	93.95			85.97	93.96	
30/6/01	9	7.78	131.15	4392.34	1678.02			6.68	-250	0.10	29.0	38.45	429.96	181.03			7.90	25	4.90	30.5	22.59	351.19	135.00			519	91.95			82.77	92.00	
2/7/01	11	7.70	129.08	4597.17	1346.75	50.21	19.25	6.80	-232	0.10	28.9	33.22	326.88	142.28	30.56	17.30	7.89	61	5.60	30.0	19.69	215.16	80.64	16.08	13.45		428	94.01	67.98	30.13	84.75	95.32
4/7/01	13	7.60	132.89	4538.48	1534.78	36.75	19.80	6.21	-233	0.20	28.3	47.65	695.99	421.79	X	14.25	7.99	74	5.35	29.5	22.83	357.07	71.05	14.39	13.30		623	95.37	60.84	32.83	82.97	92.13
6/7/01	15	7.83	138.61	4528.43	1421.09	49.65	19.85	6.28	-249	0.15	28.6	48.38	540.84	324.68	32.25	17.55	7.80	47	5.70	29.6	20.09	240.49	47.49	18.18	14.10		542	96.66	63.38	28.97	85.51	94.69
8/7/01	17	7.56	137.18	4514.03	1576.04	45.12	17.80	6.42	-204	0.10	29.0	42.59	461.96	189.03	29.45	16.20	7.97	58	5.70	29.2	19.31	269.52	38.65	10.94	12.50		395	97.55	75.75	29.78	85.92	94.03
10/7/01	19	7.61	131.91	4551.76	1453.82	48.32	19.05	6.40	-263	0.15	28.8	34.64	406.55	287.10	31.26	15.80	7.94	62	5.15	29.1	20.06	280.69	89.37	12.40	13.55		325	93.85	74.34	28.87	84.79	93.83
12/7/01	21	7.69	130.97	4380.44	1392.73	47.36	18.50	6.36	-215	0.20	28.5	49.96	513.05	174.56	21.39	X	7.95	66	5.30	29.2	19.99	277.69	60.29	9.27	11.60		409	95.67	80.43	37.30	84.74	93.66
15/7/01	24	7.58	130.37	4489.60	1436.82	49.14	17.90	6.17	-246	0.20	27.5	45.68	479.10	232.80	26.32	16.30	7.77	58	5.20	28.9	21.50	283.59	46.30	4.46	13.80		329	96.78	90.92	22.91	83.51	93.68
17/7/01	26	7.74	134.53	4611.73	1424.72	45.96	18.70	6.80	-269	0.20	28.0	40.98	440.72	220.97	27.36	15.10	8.25	71	5.55	28.4	19.12	266.19	59.22	5.97	12.10		372	95.84	87.01	35.29	85.79	94.23
19/7/01	28	7.60	129.58	4531.87	1410.80	46.12	17.80	6.85	-252	0.10	27.7	35.42	402.63	184.80	20.48	15.40	8.24	22	4.90	28.5	19.80	263.50	72.70	3.24	12.20	332	408	94.85	92.97	31.46	84.72	94.19
21/7/01	30	7.66	131.22	4573.73	1439.31	47.10	18.10	6.77	-274	0.10	28.1	32.89	341.95	159.65	22.64	16.30	8.29	69	5.50	28.7	21.09	257.76	53.51	8.82	11.40	302	389	96.28	81.27	37.02	83.93	94.36
24/7/01	33	7.71	125.48	4493.35	1448.73	46.44	17.85	6.56	-268	0.15	27.6	39.23	451.36	187.40	29.65	15.90	8.06	60	5.65	28.5	18.85	246.38	55.17	3.82	10.55	272	347	96.19	91.77	40.90	84.98	94.52
27/7/01	36	7.58	132.73	4585.44	1492.21	46.20	17.80	6.84	-260	0.10	28.7	30.57	334.54	127.58	22.14	15.80	8.07	55	5.90	29.4	19.98	240.91	51.43	6.89	12.50	251	316	96.55	85.09	29.78	84.95	94.75
29/7/01	38	7.63	128.59	4543.01	1450.80	45.10	18.20	6.79	-260	0.10	27.9	29.64	348.41	174.07	24.92	16.55	8.02	49	5.70	29.9	18.47	218.85	49.98	4.17	11.25	310	405	96.56	90.75	38.19	85.64	95.18
2/8/01	42	7.75	130.12	4497.65	1486.22	45.92	17.80	6.90	-245	0.20	29.3	31.79	359.96	181.34	21.28	15.30	8.33	56	5.35	30.5	19.55	280.79	56.28	3.25	11.80	308	378	96.21	92.92	32.95	84.98	93.74
4/8/01	44	7.93	129.40	4559.81	1436.37	46.50	17.70	6.87	-258	0.25	29.3	30.50	328.68	175.90	22.50	15.40	8.25	29	4.90	30.2	18.76	225.76	52.83	4.28	11.50	246	315	96.32	90.80	35.03	85.50	95.05
6/8/01	46	7.89	131.09	4602.27	1423.66	47.32	17.85	6.96	-236	0.15	27.9	29.52	367.13	179.27	21.92	15.10	8.27	69	5.40	29.5	18.10	270.33	51.49	3.69	11.50	298	380	96.38	92.20	35.57	86.19	94.13
9/8/01	49	7.90	129.33	4461.40	1473.53	49.28	18.30	7.00	-248	0.10	27.6	29.76	346.24	185.01	21.78	15.50	8.35	54	5.55	29.1	19.07	243.92	57.36	3.98	11.65	258	324	96.11	91.92	36.34	85.25	94.53
12/8/01	52	7.92	131.28	4513.19	1466.29	48.27	18.10	6.98	-245	0.15	28.5	31.08	357.90	171.22	21.62	15.25	8.30	63	5.60	28.9	19.14	257.41	53.27	3.48	11.60	275	352	96.37	92.79	35.91	85.42	94.30

ตาราง ค-1 ผลการทดลองที่ 1.1 (ต่อ)

การทดลองที่ 1.1

วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %												
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD	TKN	P	SU	ADMI
(ต่อ)																																
15/8/01	55	7.91	130.94	4481.37	1438.76	49.28	18.10	6.88	-215	0.10	28.2	30.85	334.22	178.28	20.28	15.30	8.35	50	5.15	29.7	19.01	268.30	50.87	3.75	11.50	245	312	96.46	92.39	36.46	85.48	94.24
18/8/01	58	7.85	128.96	4521.43	1452.11	47.88	17.90	6.86	-240	0.20	27.8	30.12	369.09	186.95	21.31	15.10	8.44	57	5.30	30.0	18.93	224.47	53.11	4.05	11.55	300	384	96.34	91.54	35.47	85.32	95.04
20/8/01	60	7.74	132.78	4560.91	1468.24	46.53	17.85	6.47	-251	0.20	27.9	29.38	351.86	189.50	21.44	15.40	8.32	52	5.25	29.1	18.22	243.08	49.39	3.43	11.50	290	371	96.64	92.63	35.57	86.28	94.67
22/8/01	62	7.58	131.13	4524.87	1423.09	47.80	17.90	6.59	-245	0.15	28.1	31.24	349.35	170.19	22.63	15.35	8.41	48	5.25	28.9	19.13	254.90	50.68	4.01	11.45	250	320	96.44	91.58	36.03	85.41	94.37
25/8/01	65	7.49	128.47	4541.03	1473.63	46.24	18.05	6.74	-268	0.10	27.5	31.59	357.81	185.99	20.79	15.10	8.53	62	5.50	28.8	18.85	222.85	57.76	3.49	11.40	310	403	96.08	92.45	36.84	85.33	95.09
28/8/01	68	7.72	130.81	4439.70	1417.83	48.27	17.80	6.65	-247	0.10	28.2	29.12	342.36	176.83	19.95	15.30	8.26	40	5.40	29.9	18.73	239.18	55.29	3.90	11.50	284	363	96.10	91.92	35.39	85.68	94.61
31/8/01	71	7.68	132.25	4573.04	1452.07	47.55	18.15	6.61	-261	0.15	28.1	29.77	328.71	181.45	21.67	15.25	8.35	43	5.15	29.4	18.47	227.49	52.80	4.12	11.65	287	359	96.36	91.34	35.81	86.03	95.03

Average	n=10	7.75	130.70	4521.92	1449	47.8	18.0	6.77	-246	0.14	28.0	30.24	350.47	180	21.3	15.3	8.36	54	5.36	29.3	18.77	244.19	53	3.8	11.5	280	357	96.33	92.08	35.94	85.64	94.60
SD	n=10	0.14	1.32	48.07	.21	1.0	0.2	0.18	14	0.04	0.3	0.83	12.48	6	0.8	0.1	0.08	9	0.15	0.4	0.36	15.24	3	0.2	0.1	21	28	0.17	0.47	0.45	0.37	0.34

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ชนิดทดลองแตก หรือ ติดรทผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-2 ผลการทดลองที่ 1.2

การทดลองที่ 1.2																																					
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %																	
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD	TKN	P	SU	ADMI					
22/6/01	1	7.66	207.51	4164.08	1293.45			7.20	-353	0.10	27.9	40.98	492.62	854.36			8.21	-12	4.05	28.4	38.30	469.82	294.75										77.21			81.54	88.72
24/6/01	3	7.59	190.77	4155.11	1624.94			7.11	-322	0.10	28.0	39.62	485.49	720.69			8.33	-8	3.95	29.5	27.85	429.32	204.59										87.41			85.40	89.67
26/6/01	5	7.68	193.51	4258.42	1496.78			7.15	-299	0.15	28.5	29.61	419.90	630.15			8.15	-10	4.00	29.4	22.60	353.60	150.22										89.96			88.32	91.70
28/6/01	7	7.85	217.08	4174.08	1349.35			7.22	-321	0.20	28.4	30.69	430.12	352.78			8.20	-6	3.80	30.3	23.29	354.18	140.58				596	89.58						89.27	91.51		
30/6/01	9	7.77	195.78	4273.52	1593.17			7.40	-330	0.10	28.9	32.56	457.60	430.04			8.25	-7	4.15	30.4	22.65	352.60	107.97				489	93.22						88.43	91.75		
2/7/01	11	7.60	194.51	4261.77	1289.73	87.50	24.75	7.25	-292	0.15	29.0	24.69	352.23	202.59	83.59	22.80	8.33	-3	4.25	29.8	19.93	248.33	35.64	78.52	17.45		462	97.24	10.26	29.49	89.75	94.17					
4/7/01	13	7.63	196.14	4220.63	1445.29	96.23	29.80	7.19	-303	0.15	28.2	61.17	557.99	435.69	84.56	27.60	8.14	5	3.80	29.5	37.89	438.86	141.08	75.40	17.90		513	90.24	21.65	39.93	80.68	89.60					
6/7/01	15	7.72	197.32	4208.11	1421.09	84.65	29.10	7.14	-324	0.20	28.6	27.44	375.07	290.96	83.25	25.35	8.30	8	3.95	29.5	18.79	295.01	106.23	73.26	18.80		444	92.52	13.46	35.40	90.48	92.99					
8/7/01	17	7.54	239.12	4189.61	1539.01	87.69	23.15	7.11	-280	0.20	29.1	21.39	340.51	120.00	81.69	20.70	8.20	12	3.95	29.3	18.46	280.90	42.58	76.90	17.60		382	97.23	12.30	23.97	92.28	93.30					
10/7/01	19	7.71	194.56	4238.72	1453.62	83.13	26.50	7.17	-291	0.10	28.8	30.69	425.82	387.10	80.65	24.50	8.17	10	4.10	29.1	26.14	362.32	69.68	72.63	15.15		316	95.21	12.63	42.83	86.56	91.45					
12/7/01	21	7.75	191.57	4319.80	1428.07	85.56	27.00	7.19	-283	0.25	28.8	35.23	421.31	415.50	X	22.80	8.23	9	4.25	29.3	25.42	405.22	88.19	71.29	17.40		456	93.75	16.68	35.56	86.73	90.62					
15/7/01	24	7.58	189.88	4298.55	1435.29	86.32	29.25	7.17	-280	0.15	27.4	39.04	480.88	258.16	79.65	27.45	8.09	11	3.90	29.0	36.68	469.56	119.53	68.31	16.75		344	91.67	20.86	42.74	80.68	89.08					
17/7/01	26	7.78	193.53	4283.75	1463.73	84.39	26.70	7.15	-284	0.15	28.1	31.08	429.30	225.74	79.21	24.70	8.25	14	4.00	28.6	26.97	394.91	85.25	71.43	16.20		380	94.18	15.36	39.33	86.06	90.78					
19/7/01	28	7.89	195.13	4260.46	1425.78	87.88	27.10	7.14	-328	0.10	27.8	28.09	391.43	373.80	78.95	25.30	8.24	10	4.15	28.5	22.34	351.33	82.31	66.09	15.20	281	340	94.23	24.80	43.91	88.55	91.75					
21/7/01	30	7.41	192.69	4290.78	1448.80	90.20	26.90	6.88	-325	0.10	28.2	26.28	361.83	242.93	80.65	24.10	8.08	11	4.30	28.7	21.28	344.83	80.80	68.22	14.75	346	413	95.80	24.37	45.17	88.96	91.96					
24/7/01	33	7.66	198.25	4252.49	1430.07	85.95	26.90	7.07	-316	0.10	27.7	32.16	448.28	230.78	79.61	23.45	8.10	12	3.95	28.6	20.64	320.28	81.82	67.06	14.20	265	310	94.28	21.98	47.21	89.59	92.47					
27/7/01	36	7.67	192.13	4268.83	1467.32	87.69	26.80	6.94	-319	0.10	28.9	32.08	425.38	218.09	77.62	24.40	8.08	13	4.10	29.5	19.78	290.76	78.26	72.26	14.60	327	388	94.67	17.80	45.52	89.70	93.19					
29/7/01	38	7.75	191.77	4355.11	1440.62	86.98	27.10	7.03	-299	0.15	27.9	31.34	439.29	241.78	78.33	24.30	8.19	15	3.85	29.8	19.38	295.27	80.51	67.26	15.10	338	411	94.41	22.67	44.28	89.89	93.22					
2/8/01	42	7.62	192.94	4261.70	1450.70	84.79	26.75	7.13	-302	0.20	29.2	30.18	430.75	252.30	77.51	24.20	8.14	14	4.20	30.3	20.18	309.08	83.91	66.27	14.50	321	382	94.22	21.84	45.79	89.54	92.75					
4/8/01	44	7.71	195.98	4245.40	1413.55	85.55	27.10	7.08	-352	0.15	28.5	29.85	418.87	223.78	76.45	24.45	8.20	10	4.10	29.9	21.10	328.63	79.22	68.01	14.35	340	401	94.40	20.50	47.05	89.23	92.26					
6/8/01	46	7.45	198.31	4306.92	1434.86	88.49	26.65	7.11	-315	0.10	27.8	33.93	457.59	261.92	77.69	24.35	8.19	11	4.05	29.5	20.56	317.75	83.14	67.63	14.20	321	384	94.21	23.57	46.72	89.63	92.62					
9/8/01	49	7.60	193.98	4287.45	1428.67	86.75	26.75	7.20	-348	0.10	27.5	30.46	435.89	249.58	75.65	24.55	8.08	8	3.90	29.3	20.48	325.87	82.02	65.43	14.35	299	355	94.26	24.58	46.36	89.44	92.40					
12/8/01	52	7.64	189.61	4192.59	1480.22	85.16	26.80	7.19	-298	0.15	28.3	32.15	419.31	215.44	76.20	24.15	8.12	13	3.75	28.7	19.10	298.28	81.50	65.02	14.25	310	375	94.42	23.65	46.83	89.93	92.89					

ตาราง ค-2 ผลการทดลองที่ 1.2 (ต่อ)

การทดลองที่ 1.2																																			
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic								Aerobic								Efficiency %											
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD	TKN	P	SU	ADMI			
(ต่อ)																																			
15/8/01	55	7.60	190.52	4298.67	1451.89	86.80	26.85	7.15	-314	0.15	28.2	33.35	472.04	232.23	78.64	24.35	7.86	12	4.10	29.6	20.20	311.90	80.54	65.52	14.45	265	320	94.45	24.60	46.18	89.40	92.74			
18/8/01	58	7.49	191.77	4352.48	1490.32	87.25	27.00	7.16	-322	0.15	27.9	32.90	424.51	239.72	77.12	24.60	8.03	15	4.05	30.1	21.05	325.53	79.21	66.01	14.35	278	328	94.69	24.34	46.85	89.02	92.52			
20/8/01	60	7.67	189.69	4215.44	1438.72	87.51	26.70	7.21	-330	0.10	28.0	31.86	435.80	247.06	78.56	24.30	8.11	9	3.95	29.0	19.42	300.95	78.15	67.13	14.20	255	305	94.57	23.29	46.82	89.76	92.86			
22/8/01	62	7.58	190.25	4359.15	1431.06	88.12	26.90	7.13	-309	0.10	28.2	30.74	427.17	206.59	76.98	24.50	8.23	11	4.00	28.9	20.13	305.18	83.89	67.04	14.40	263	318	94.14	23.92	46.47	89.42	93.00			
25/8/01	65	7.81	193.01	4295.36	1449.75	88.36	26.85	7.09	-317	0.15	27.4	33.96	449.55	229.90	75.81	24.25	8.09	17	4.00	28.9	20.64	315.69	82.01	67.27	14.25	296	359	94.34	23.87	46.93	89.31	92.65			
28/8/01	68	7.75	191.18	4331.88	1428.41	89.01	27.00	7.18	-322	0.20	28.2	32.49	440.18	238.37	78.03	24.30	8.15	12	4.10	30.0	21.10	328.01	79.94	66.98	14.50	320	381	94.40	24.75	46.30	88.96	92.43			
31/8/01	71	7.62	192.34	4268.70	1474.29	87.49	26.80	7.23	-351	0.10	28.0	30.23	401.93	244.83	75.19	24.55	8.18	13	4.25	29.4	19.83	284.62	80.98	66.75	14.20	304	369	94.51	23.71	47.01	89.89	93.33			
Average	n=10	7.62	192.07	4290.86	1448.82	87.5	26.8	7.17	-323	0.13	28.0	32.21	436.40	237	77.0	24.4	8.10	12	4.02	29.3	20.25	311.38	81	66.5	14.3	291	349	94.40	24.03	46.65	89.46	92.74			
SD	n=10	0.10	2.49	51.31	19.86	1.0	0.1	0.04	16	0.03	0.3	1.31	19.01	16	1.2	0.1	0.10	3	0.13	0.4	0.62	13.35	2	0.9	0.1	23	28	0.16	0.48	0.28	0.29	0.27			

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดหาปริมาณเตอรินั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พหามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ชนิดทดลองแตก หรือ ติดรทผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-3 ผลการทดลองที่ 1.3

การทดลองที่ 1.3																																				
วันที่	ชั่วโมง	Influent						Anaerobic									Aerobic									Efficiency %										
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD	TKN	P	SU	ADMI				
22/6/01	1	7.85	134.50	4571.80	1199.73			8.46	-232	0.15	27.8	89.65	501.36	985.36			8.89	51	4.90	28.2	62.36	478.83	184.30									84.64			53.64	89.53
24/6/01	3	7.81	133.06	4537.70	1576.30			8.51	-195	0.10	27.9	78.32	489.46	819.40			8.78	58	5.30	29.8	59.61	465.75	146.89									90.68			55.20	89.74
26/6/01	5	7.79	132.70	4644.75	1690.38			8.39	-256	0.15	28.5	60.26	472.43	729.72			8.80	49	5.20	29.6	50.24	437.81	120.92									92.85			62.14	90.57
28/6/01	7	7.88	134.02	4543.94	1438.65			8.42	-220	0.25	28.3	51.81	439.79	658.64			8.91	37	4.90	30.2	42.62	409.28	79.26				475	94.49				68.20	90.99			
30/6/01	9	7.74	135.72	4618.70	1724.37			8.40	-205	0.10	28.9	49.36	432.61	408.13			8.75	22	5.45	30.6	39.41	389.65	70.43				397	95.92				70.96	91.56			
2/7/01	11	7.84	132.20	4651.99	1382.65	49.62	19.55	8.34	-185	0.15	28.8	41.36	405.51	175.26	44.36	17.30	8.86	45	5.90	29.9	34.45	389.04	56.08	X	11.55		361	95.94		40.92	73.94	91.64				
4/7/01	13	7.69	136.29	4528.67	1421.97	46.54	19.80	8.20	-235	0.20	28.3	72.44	514.27	395.14	42.79	18.05	8.61	58	5.35	29.5	18.21	205.85	47.13	30.18	11.60		425	96.69	35.15	41.92	86.64	95.45				
6/7/01	15	7.87	136.63	4583.78	1468.71	43.82	17.80	8.26	-315	0.10	28.9	33.49	390.85	361.09	40.97	16.50	8.75	60	5.80	29.5	18.09	199.79	66.89	30.05	10.80		344	95.45	31.42	39.33	86.76	95.64				
8/7/01	17	7.81	142.55	4577.66	1398.07	45.91	19.40	8.48	-254	0.10	29.1	30.20	382.93	200.80	X	17.05	8.70	49	5.70	29.3	22.87	256.50	58.10	27.98	11.10		404	95.84	39.05	42.78	83.96	94.40				
10/7/01	19	7.93	134.04	4565.16	1420.18	53.15	19.20	8.19	-247	0.15	28.7	30.58	334.05	631.57	44.31	16.30	8.75	52	5.85	29.1	15.71	182.92	58.10	27.35	11.20		228	95.91	48.54	41.67	88.28	95.99				
12/7/01	21	7.83	134.70	4455.93	1454.95	45.03	19.85	8.44	-240	0.10	28.6	24.71	381.94	544.54	42.61	16.20	8.75	55	5.65	29.3	15.79	193.62	42.92	26.59	10.65		240	97.05	40.95	46.35	88.28	95.65				
15/7/01	24	7.66	132.83	4419.56	1440.27	48.22	18.05	8.41	-225	0.15	27.7	34.68	404.67	765.49	40.46	14.30	8.59	50	5.45	28.9	18.09	204.00	33.10	20.31	9.95		320	97.70	57.88	44.88	86.38	95.38				
17/7/01	26	7.85	131.74	4380.40	1428.55	46.21	18.50	8.16	-275	0.10	28.1	19.91	274.07	621.68	41.78	13.85	8.66	60	5.75	28.4	16.02	190.43	45.90	23.81	10.20		316	96.79	48.47	44.86	87.84	95.65				
19/7/01	28	7.96	130.55	4460.49	1415.37	45.98	17.75	8.58	-350	0.10	27.6	22.78	288.47	557.16	41.36	12.10	8.66	25	5.45	28.6	15.63	191.85	46.27	21.92	9.40		257	96.73	52.33	47.04	88.03	95.70				
21/7/01	30	7.40	133.76	4632.62	1449.76	46.08	17.90	8.44	-289	0.15	28.3	30.65	371.99	695.21	38.57	11.50	8.68	38	5.95	28.7	17.41	197.14	27.59	18.24	9.90	148	236	98.10	60.42	44.69	86.98	95.74				
24/7/01	33	7.76	132.04	4523.29	1430.59	47.10	17.80	8.43	-303	0.10	27.8	31.53	364.08	639.18	42.30	12.25	8.64	40	6.15	28.6	15.12	184.63	48.28	16.01	8.46	158	251	96.63	66.01	52.53	88.55	95.92				
27/7/01	36	7.82	130.91	4412.54	1492.21	46.56	17.80	8.57	-314	0.10	28.8	30.78	336.47	476.83	36.36	11.60	8.65	48	5.75	29.5	14.28	177.57	47.90	18.98	10.20	175	284	96.79	59.24	42.70	89.09	95.98				
29/7/01	38	7.70	134.73	4627.70	1441.02	46.20	17.95	8.56	-246	0.20	27.9	29.30	342.94	650.79	39.52	12.10	8.64	58	5.95	30.0	13.69	155.70	46.29	17.96	8.50	181	298	96.79	61.13	52.65	89.84	96.64				
2/8/01	42	7.70	131.02	4451.07	1476.67	47.04	17.80	8.48	-287	0.15	29.2	31.29	358.25	667.14	40.24	11.30	8.64	59	5.65	30.3	14.57	165.12	49.42	19.58	9.20	177	281	96.65	58.38	48.31	88.88	96.29				
4/8/01	44	7.69	130.88	4407.73	1419.95	46.84	17.70	8.48	-310	0.10	29.1	30.94	329.86	631.80	38.68	11.50	8.78	19	5.25	30.1	14.31	151.65	48.01	18.98	8.20	148	233	96.62	59.48	53.67	89.07	96.56				
6/8/01	46	7.89	132.86	4531.10	1435.18	47.52	18.15	8.31	-280	0.20	28.1	30.68	345.10	642.25	35.56	11.55	8.75	55	5.85	29.6	13.60	144.34	50.91	18.18	8.65	165	268	96.45	61.78	52.34	89.76	96.81				
9/8/01	49	7.71	131.25	4542.04	1452.08	46.24	18.10	8.45	-236	0.20	27.8	29.85	322.92	602.32	37.41	11.65	8.69	43	5.80	29.1	14.08	173.45	52.98	17.91	8.60	170	275	96.35	61.27	52.49	89.27	96.18				
12/8/01	52	7.68	131.94	4518.97	1446.79	47.19	17.90	8.55	-299	0.15	28.7	30.92	359.54	681.77	36.08	11.40	8.79	48	5.90	29.0	13.43	163.21	46.59	18.66	8.55	140	224	96.78	60.46	52.23	89.82	96.39				

ตาราง ค-4 ผลการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่ 2.1																																
วันที่	วัฏจักร	Influent					Anaerobic										Aerobic								Efficiency %							
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %
14/9/01	1	7.85			2538.11		6.36	-327	0.15	27.8			1192.38			8.43	5	2.50	28.5			213.61						91.58				
17/9/01	4	7.79			2703.83		6.42	-340	0.10	27.7			1293.40			8.51	12	2.90	29.2			259.40						90.41				
19/9/01	6	7.86	466.12	8051.54	2565.84	87.36	6.29	-335	0.10	28.6	185.67	2349.68	1250.58	46.48		8.19	20	3.05	29.7	171.49	2143.68	236.80	9.52			1164	90.77	89.10		63.21	73.38	
21/9/01	9	7.80	464.90	8035.32	2549.76	86.27	17.65	6.25	-320	0.20	28.7	189.45	2162.85	1109.81	49.84	13.15	8.05	10	3.10	30.2	159.82	1904.38	188.67	12.35	4.65	1282	92.60	85.68	73.65	65.62	76.30	
24/9/01	12	7.77	467.28	8063.90	2560.27	89.04	17.80	6.27	-342	0.10	28.9	155.10	1923.59	1261.43	42.36	11.40	8.25	29	2.95	29.9	142.52	1546.84	152.58	10.64	1.60	1147	94.04	88.05	91.01	69.50	80.82	
26/9/01	14	7.92	467.44	8066.78	2571.43	84.69	18.10	6.29	-345	0.15	29.2	146.94	1836.61	1183.46	40.56	14.95	8.30	28	3.00	30.2	136.70	1438.11	176.34	8.34	2.55	989	93.14	90.15	85.91	70.76	82.17	
28/9/01	16	7.70	462.15	7995.84	2564.91	81.13	17.60	6.34	-345	0.20	28.1	120.66	1602.09	1094.74	39.76	14.20	8.33	30	3.00	29.3	108.98	1285.81	94.70	5.04	2.20	953	96.31	93.79	87.50	76.42	83.92	
1/10/01	17	8.00	487.72	8153.61	2516.82	84.32	18.25	6.50	-337	0.20	28.3	152.18	1960.67	1258.38	37.06	13.80	8.41	24	3.10	29.8	88.83	1356.91	102.36	6.26	1.20	887	95.93	92.58	93.42	81.79	83.36	
3/10/01	19	8.02	480.86	8133.85	2590.75	82.88	17.80	6.43	-334	0.10	29.2	161.36	2099.31	985.70	35.28	13.25	8.37	32	3.20	29.9	100.85	1506.82	132.19	7.28	0.65	906	94.90	91.22	96.36	79.03	81.47	
5/10/01	21	7.95	468.44	8078.46	2554.85	84.08	17.30	6.41	-343	0.10	28.5	161.07	2018.95	1106.13	34.16	12.70	8.28	30	3.00	30.0	89.80	1415.24	129.43	6.16	0.10	1175	94.93	92.67	99.42	80.83	82.48	
8/10/01	24	7.85	468.49	8065.01																							954					
10/10/01	26	8.03	463.42	8045.13	2564.34	86.72	17.55	6.41	-346	0.15	28.2	158.41	2054.77	847.10	31.92	11.45	8.47	27	3.30	28.9	94.47	1472.82	134.03	7.28	0.50	800	94.77	91.61	97.15	79.61	81.69	
12/10/01	28	7.72	475.45	8118.87	2532.88	87.91	17.90	6.37	-351	0.10	28.0	122.11	1928.72	834.67	22.96	11.70	8.34	20	2.90	28.7	94.74	1459.65	143.46	6.72	1.25	655	94.34	92.36	93.02	80.07	82.02	
15/10/01	31	8.02	462.43	8039.66	2559.20	85.36	17.25	6.70	-344	0.10	28.5	119.58	1877.79	826.94	33.60	12.80	8.60	29	3.00	30.3	89.32	1352.29	125.61	6.16	0.90	1185	95.09	92.78	94.78	80.68	83.18	
17/10/01	33	7.81	467.15	8030.30	2546.41	84.36	18.10	6.80	-348	0.10	28.4	97.88	1780.94	872.12	30.80	13.55	8.72	34	3.15	29.7	83.26	1299.50	129.84	7.13	1.00	1004	1095	94.90	91.55	94.48	82.18	83.82
19/10/01	35	7.92	465.57	8029.72	2597.73	86.92	17.60	6.63	-337	0.10	27.4	114.48	1804.19	864.38	32.36	12.80	8.54	32	3.10	29.1	88.36	1374.51	136.76	6.89	1.25	896	970	94.74	92.07	92.90	81.02	82.88
22/10/01	38	7.82	464.93	8076.92	2581.24	84.36	17.35	6.50	-338	0.15	27.6	110.34	1832.89	851.63	34.72	13.20	8.40	32	3.00	28.4	87.85	1357.62	131.39	7.36	1.00	878	967	94.91	91.28	94.24	81.15	83.19
24/10/01	40	7.72	451.97	7985.13	2564.29	89.80	18.20	6.40	-339	0.20	28.6	113.35	1885.53	833.19	33.60	12.45	8.33	30	3.00	30.0	84.82	1348.21	125.34	6.58	0.95	872	955	95.11	92.67	94.78	81.23	83.12
26/10/01	42	7.91	470.09	8091.26	2556.52	84.67	17.80	6.48	-340	0.10	29.2	112.35	1878.60	846.80	32.46	12.95	8.61	36	2.90	30.1	86.84	1385.60	140.16	6.49	1.20	866	961	94.52	92.33	93.26	81.53	82.88
29/10/01	45	7.85	468.56	8051.38	2542.36	83.20	17.15	6.51	-339	0.15	29.1	109.42	1859.84	872.34	33.81	12.65	8.54	35	3.05	30.3	84.36	1346.84	136.43	7.06	1.15	958	1051	94.63	91.51	93.29	82.00	83.27
31/10/01	47	7.92	467.37	8052.83	2568.93	87.36	17.60	6.50	-348	0.25	27.7	111.84	1876.31	843.61	34.91	13.00	8.56	29	3.10	29.4	85.72	1390.53	125.90	6.86	0.90	842	930	95.10	92.15	94.89	81.66	82.73
2/11/01	49	7.79	466.13	8058.75	2543.22	85.31	17.30	6.46	-346	0.10	28.4	108.40	1839.46	836.16	32.36	12.70	8.51	34	3.10	29.6	86.80	1386.30	133.16	6.66	1.05	920	1008	94.76	92.17	93.93	81.38	82.80

ตาราง ค-4 ผลการทดลองที่ 2.1 (ต่อ)

การทดลองที่ 2.1																																					
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %																	
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %					
(ต่อ)																																					
5/11/01	52	7.84	469.38	7749.68	2565.45	82.43	17.60	6.42	-340	0.10	28.8	104.68	1798.30	855.61	34.61	12.60	8.58	33	3.15	30.0	86.12	1363.26	136.43	6.42	1.05	802	890	94.68	92.21	94.03	81.65	82.41					
7/11/01	54	7.79	467.36	7725.91	2558.39	84.61	17.65	6.50	-342	0.20	29.1	107.23	1764.53	865.93	32.87	13.15	8.61	35	3.00	30.3	85.61	1389.40	126.80	6.81	1.15	853	943	95.04	91.95	93.48	81.68	82.02					
9/11/01	56	7.81	468.28	7718.43	2570.46	85.36	17.20	6.59	-339	0.10	28.7	108.59	1786.11	847.81	34.02	12.85	8.56	30	2.90	29.8	85.87	1382.64	134.76	7.14	0.95	885	980	94.76	91.64	94.48	81.66	82.09					
Average	n=10	7.84	465.96	7954.00	2565	85.4	17.5	6.50	-341	0.15	28.5	110.07	1832.58	852	33.6	12.8	8.52	33	3.03	29.7	86.22	1372.49	133	6.8	1.1	877	966	94.83	92.00	93.93	81.50	82.74					
SD	n=10	0.06	4.92	148.37	16	2.0	0.3	0.07	3	0.05	0.6	2.85	40.49	12	1.0	0.2	0.09	2	0.08	0.6	1.16	16.23	5	0.3	0.1	40	41	0.20	0.40	0.64	0.28	0.42					

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ติดรทผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-5 ผลการทดลองที่ 2.2(ต่อ)

การทดลองที่ 2.2																																				
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %																
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %				
(ต่อ)																																				
5/11/01	52	7.74	488.04	7470.77	2568.34	177.59	26.80	7.16	-385	0.15	28.6	84.63	1107.31	622.45	144.73	13.20	8.15	22	2.50	30.0	78.38	785.17	141.20	98.94	6.50	638	705	94.50	44.29	75.75	83.88	89.49				
7/11/01	54	7.81	483.95	7447.85	2553.80	176.94	26.45	7.20	-387	0.10	29.2	89.44	1183.20	656.60	143.61	13.65	8.24	24	2.45	30.1	76.98	774.85	139.62	97.50	6.85	663	739	94.53	44.90	74.10	84.09	89.60				
9/11/01	56	7.65	484.91	7440.64	2546.61	172.17	27.10	7.15	-382	0.15	28.7	87.01	1159.43	647.53	142.85	13.70	8.19	26	2.65	29.7	77.67	791.56	146.49	95.09	6.90	710	789	94.25	44.77	74.54	83.98	89.36				
Average	n=10	7.69	482.60	7669.29	2542	174.6	26.6	7.16	-377	0.13	28.5	90.33	1173.62	651	143.7	13.5	8.20	22	2.58	29.7	78.38	800.21	145	97.1	6.6	660	730	94.31	44.39	75.21	83.76	89.56				
SD	n=10	0.08	5.09	143.90	49	2.8	0.3	0.03	7	0.03	0.7	8.23	53.09	28	1.7	0.3	0.04	2	0.07	0.6	0.72	27.89	4	1.7	0.2	31	32	0.18	0.42	0.72	0.27	0.34				

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ดิเรกผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-6 ผลการทดลองที่ 2.3 (ต่อ)

การทดลองที่ 2.3																																	
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %													
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %	
(ต่อ)																																	
5/11/01	52	7.85	470.40	8078.14	2547.76	84.63	17.45	8.45	-356	0.15	28.5	124.68	1742.36	1654.59	45.91	3.85	8.72	28	3.50	30.1	74.36	844.91	458.16	11.29	1.15	490	559	82.02	86.84	93.41	84.19	89.54	
7/11/01	54	7.74	468.45	8110.23	2550.61	88.67	17.80	8.39	-361	0.10	29.3	121.11	1720.19	1582.18	43.24	3.60	8.68	28	3.45	30.3	75.01	829.98	439.59	11.92	1.20	532	602	82.77	86.56	93.26	83.99	89.77	
9/11/01	56	7.81	466.58	8107.89	2565.28	86.05	17.35	8.42	-359	0.10	28.4	123.05	1731.23	1627.61	44.82	3.90	8.73	25	3.55	29.9	73.9	801.4	446.73	11.76	1.10	465	539	82.59	86.33	93.66	84.17	90.12	
Average	n=10	7.89	467.98	8107.42	2553	86.2	17.6	8.39	-354	0.12	28.5	123.59	1746.75	1638	45.1	4.0	8.66	26	3.45	29.7	74.88	824.46	452	11.7	1.1	498	570	82.29	86.45	93.53	84.00	89.83	
SD	n=10	0.11	4.30	20.47	12	1.7	0.2	0.07	9	0.03	0.6	1.50	26.35	40	1.3	0.3	0.05	1	0.06	0.6	1.11	17.23	10	0.3	0.1	28	29	0.36	0.31	0.34	0.25	0.21	

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ติดรศผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-7 ผลการทดลองที่ 3.1

การทดลองที่ 3.1																																				
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %																
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %				
2/12/01	1	7.65	467.62	8097.46	2543.20			8.26	-349	0.05	27.4	257.19	3349.92	2278.51			8.49	19	3.20	29.0	195.54	1899.34	1381.84									45.67			58.18	76.54
5/12/01	4	7.81	471.34	8106.84	2621.16			8.34	-354	0.05	27.2	236.42	3015.13	2219.07			8.55	20	3.15	28.6	189.72	1839.01	1462.59				356	44.20				59.75	77.32			
7/12/01	6	7.74	470.76	8096.43	2560.26	85.64	72.5	8.16	-342	0.10	27.4	206.71	2787.51	X	78.62	64.0	8.39	18	3.30	28.6	190.09	1827.59	1172.06	35.63	57.5		423	54.22	58.40	20.69	59.62	77.43				
10/12/01	9	7.69	469.40	8087.90	2557.38	86.23	69.5	8.21	-361	0.05	26.2	185.67	2549.01	2156.33	77.23	62.5	8.49	26	3.40	27.8	165.84	1654.71	1315.22	32.01	54.0			48.57	62.88	22.30	64.67	79.54				
13/12/01	12	7.75	465.05	8043.16	2537.62	87.16	71.5	8.26	-345	0.15	26.0	172.33	2375.28	2231.84	80.36	65.0	8.58	31	2.95	27.1	140.26	1492.51	1057.16	29.31	58.5		469	58.34	66.37	18.18	69.84	81.44				
15/12/01	14	7.71	464.59	8043.71	2645.31	84.37	69.0	8.19	-362	0.20	25.2	167.89	2192.17	2072.01	71.43	61.0	8.45	21	3.20	26.5	136.74	1428.62	914.98	30.46	53.0		470	65.41	63.90	23.19	70.57	82.24				
18/12/01	17	7.65	472.61	8101.29	2573.16	86.71	68.0	8.23	-351	0.10	24.5	161.85	2045.32	1981.13	68.27	59.5	8.39	18	3.45	25.9	137.69	1411.83	881.05	35.61	49.0		469	65.76	58.93	27.94	70.87	82.57				
21/12/01	20	7.82	481.84	8153.16	2498.35	84.67	69.5	8.12	-355	0.15	23.2	179.41	2461.36	2179.23	X	60.0	8.45	25	3.60	25.1	157.61	1622.63	759.37	32.57	47.5		423	69.61	61.53	31.65	67.29	80.10				
24/12/01	23	7.46	468.28	8098.73	2568.73	85.61	74.0	8.05	-361	0.05	23.1	182.68	2513.02	2016.48	73.69	57.0	8.44	29	2.95	25.4	160.40	1614.30	945.50	31.92	50.0		498	63.19	62.71	32.43	65.75	80.07				
26/12/01	25	7.62	476.34	8043.61	2564.89	81.67	69.5	8.12	-375	0.20	23.4	181.24	2501.50	1927.87	75.91	58.0	8.56	34	3.10	25.2	159.73	1649.13	721.76	28.37	47.0		461	71.86	65.26	32.37	66.47	79.50				
28/12/01	27	7.76	462.13	8049.67	2549.67	90.88	72.0	8.24	-352	0.25	24.1	176.27	2447.98	2001.54	65.36	55.5	8.62	25	3.15	25.9	154.69	1598.16	670.08	22.90	43.5		423	73.72	74.75	39.58	66.53	80.15				
30/12/01	29	7.55	468.67	8106.49	2673.55	83.15	70.0	8.24	-364	0.15	24.8	175.43	2450.23	1940.23	58.61	54.5	8.57	22	3.05	26.5	136.43	1426.27	735.10	19.25	36.5		624	72.50	76.85	47.86	70.89	82.41				
1/1/02	31	7.43	451.32	7920.42	2683.47	87.36	72.0	8.21	-370	0.05	26.1	138.62	1852.41	1861.03	47.99	59.0	8.65	30	3.35	27.0	113.13	1284.61	616.24	21.08	40.0		545	77.04	75.67	44.44	74.93	83.78				
4/1/02	34	7.18	468.76	8118.52	2547.69	84.16	69.0	8.09	-365	0.20	25.5	131.81	1783.14	1809.15	46.04	51.5	8.51	29	3.25	26.9	98.46	1116.21	571.89	17.11	34.5		597	77.55	79.67	50.00	79.00	86.25				
7/1/02	37	7.68	464.45	8049.31	2519.23	86.94	68.0	8.25	-355	0.10	26.9	128.48	1791.52	1729.63	50.23	57.0	8.57	24	3.15	27.2	89.81	1021.61	549.67	15.36	41.0		586	78.18	82.33	39.71	80.66	87.31				
9/1/02	39	7.91	472.64	8120.34	2516.74	85.13	72.5	8.14	-362	0.05	27.2	120.36	1715.01	1741.89	45.31	52.5	8.62	23	3.30	28.5	87.65	1011.47	472.90	12.79	37.5		546	81.21	84.98	48.28	81.45	87.54				
11/1/02	41	7.57	461.34	8079.37	2497.60	87.25	72.0	8.22	-349	0.05	27.0	119.06	1712.67	1708.31	44.94	51.0	8.49	27	3.45	28.7	79.69	903.19	567.19	11.98	35.0	507	590	77.29	86.27	51.39	82.73	88.82				
14/1/02	44	7.61	450.20	7734.79	2579.11	83.68	69.0	8.33	-351	0.15	27.6	110.36	1641.39	1689.73	43.67	49.0	8.52	28	3.50	28.7	72.46	822.03	448.05	12.01	34.0	522	601	82.63	85.65	50.72	83.90	89.37				
17/1/02	47	7.72	465.09	8058.61	2543.83	87.52	71.5	8.24	-358	0.05	27.4	106.32	1571.62	1701.44	45.74	47.5	8.49	25	3.20	28.5	71.31	799.44	436.85	11.56	34.5	483	544	82.83	86.79	51.75	84.67	90.08				
20/1/02	50	7.58	468.36	8043.31	2604.39	88.93	68.0	8.38	-351	0.10	27.3	105.83	1581.79	1642.24	45.58	48.0	8.62	26	3.35	28.9	73.58	815.76	415.71	12.19	33.0	471	539	84.04	86.29	51.47	84.29	89.86				
22/1/02	52	7.45	482.29	8088.67	2576.34	84.73	69.5	8.45	-356	0.20	27.1	103.39	1556.33	1629.96	44.73	46.5	8.61	21	3.45	28.7	70.71	807.88	428.00	12.09	33.5	513	581	83.39	85.73	51.80	85.34	90.01				
24/1/02	54	7.38	472.50	8103.01	2543.82	86.68	70.0	8.44	-341	0.15	27.6	105.71	1569.28	1598.62	45.29	49.0	8.66	19	3.20	28.9	72.75	817.38	409.28	11.49	34.0	516	593	83.91	86.59	51.43	84.60	89.91				
26/1/02	56	7.72	484.85	8219.11	2568.48	86.08	70.5	8.49	-361	0.05	27.0	107.04	1566.58	1637.19	44.85	48.5	8.69	28	3.45	28.7	70.36	812.14	427.62	11.76	34.5	462	529	83.35	86.34	51.06	85.49	90.12				

ตาราง ค-5 ผลการทดลองที่ 2.2(ต่อ)

การทดลองที่ 2.2																																		
วันที่	วัฏจักร	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %														
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %		
(ต่อ)																																		
5/11/01	52	7.74	486.04	7470.77	2568.34	177.59	26.80	7.16	-385	0.15	28.6	84.63	1107.31	622.45	144.73	13.20	8.15	22	2.50	30.0	78.36	785.17	141.20	98.94	6.50	638	705	94.50	44.29	75.75	83.88	89.49		
7/11/01	54	7.81	483.95	7447.85	2553.80	176.94	26.45	7.20	-387	0.10	29.2	89.44	1183.20	656.60	143.61	13.65	8.24	24	2.45	30.1	76.98	774.85	139.62	97.50	6.85	663	739	94.53	44.90	74.10	84.09	89.60		
9/11/01	56	7.65	484.91	7440.64	2546.61	172.17	27.10	7.15	-382	0.15	28.7	87.01	1159.43	647.53	142.85	13.70	8.19	26	2.65	29.7	77.67	791.56	146.49	95.09	6.90	710	789	94.25	44.77	74.54	83.96	89.36		
Average	n=10	7.69	482.60	7669.29	2542	174.6	26.6	7.16	-377	0.13	28.5	90.33	1173.62	651	143.7	13.5	8.20	22	2.58	29.7	78.38	800.21	145	97.1	6.6	660	730	94.31	44.39	75.21	83.76	89.56		
SD	n=10	0.08	5.09	143.90	49	2.8	0.3	0.03	7	0.03	0.7	8.23	53.09	28	1.7	0.3	0.04	2	0.07	0.6	0.72	27.89	4	1.7	0.2	31	32	0.18	0.42	0.72	0.27	0.34		

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ตีเคาะผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-6 ผลการทดลองที่ 2.3 (ต่อ)

การทดลองที่ 2.3																																		
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic								Aerobic								Efficiency %										
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %		
(ต่อ)																																		
5/11/01	52	7.85	470.40	8078.14	2547.76	84.53	17.45	8.45	-356	0.15	28.5	124.68	1742.36	1654.59	45.91	3.85	8.72	28	3.50	30.1	74.36	844.91	458.16	11.29	1.15	490	659	82.02	86.64	93.41	84.19	89.54		
7/11/01	54	7.74	468.45	8110.23	2550.61	88.67	17.80	8.39	-361	0.10	29.3	121.11	1720.19	1582.18	43.24	3.60	8.68	28	3.45	30.3	75.01	829.98	439.59	11.92	1.20	532	602	82.77	86.56	93.26	83.99	89.77		
9/11/01	56	7.81	466.58	8107.89	2565.28	86.05	17.35	8.42	-359	0.10	28.4	123.05	1731.23	1627.61	44.82	3.90	8.73	25	3.55	29.9	73.9	801.4	448.73	11.76	1.10	465	539	82.59	86.33	93.66	84.17	90.12		
Average	n=10	7.69	467.98	8107.42	2553	86.2	17.6	8.39	-354	0.12	28.5	123.59	1746.75	1638	45.1	4.0	8.66	26	3.45	29.7	74.88	824.46	452	11.7	1.1	498	570	82.29	86.45	93.53	84.00	89.83		
SD	n=10	0.11	4.30	20.47	12	1.7	0.2	0.07	9	0.03	0.6	1.50	26.35	40	1.3	0.3	0.05	1	0.06	0.6	1.11	17.23	10	0.3	0.1	28	29	0.36	0.31	0.34	0.25	0.21		

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ดิเรกผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-7 ผลการทดลองที่ 3.1

การทดลองที่ 3.1																																
วันที่	วันที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %												
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %
2/12/01	1	7.65	467.62	8097.46	2543.20		8.26	-349	0.05	27.4	257.19	3349.92	2278.51			8.49	19	3.20	29.0	195.54	1899.34	1381.84						45.67			58.18	76.54
5/12/01	4	7.81	471.34	8106.84	2621.16		8.34	-354	0.05	27.2	236.42	3015.13	2219.07			8.55	20	3.15	28.6	189.72	1839.01	1462.59			356	44.20			59.75	77.32		
7/12/01	6	7.74	470.76	8096.43	2560.28	85.64	72.5	8.16	-342	0.10	27.4	206.71	2787.51	X	78.62	64.0	8.39	18	3.30	28.6	190.09	1827.59	1172.06	35.63	57.5	423	54.22	58.40	20.69	59.62	77.43	
10/12/01	9	7.69	469.40	8087.90	2557.38	86.23	69.5	8.21	-361	0.05	26.2	185.67	2549.01	2166.33	77.23	62.5	8.49	26	3.40	27.8	165.84	1654.71	1315.22	32.01	54.0		48.57	62.88	22.30	64.67	79.54	
13/12/01	12	7.75	465.05	8043.16	2537.62	87.16	71.5	8.26	-345	0.15	26.0	172.33	2375.28	2231.84	80.36	65.0	8.58	31	2.95	27.1	140.26	1492.51	1057.16	29.31	58.5	469	58.34	66.37	18.18	69.84	81.44	
15/12/01	14	7.71	464.59	8043.71	2645.31	84.37	69.0	8.19	-362	0.20	25.2	167.89	2192.17	2072.01	71.43	61.0	8.45	21	3.20	26.5	136.74	1428.62	914.98	30.46	53.0	470	65.41	63.90	23.19	70.57	82.24	
18/12/01	17	7.65	472.61	8101.29	2573.16	86.71	68.0	8.23	-351	0.10	24.5	161.85	2045.32	1981.13	68.27	59.5	8.39	18	3.45	25.9	137.69	1411.83	881.05	35.61	49.0	469	65.76	58.93	27.94	70.87	82.57	
21/12/01	20	7.82	481.84	8153.16	2498.35	84.67	69.5	8.12	-355	0.15	23.2	179.41	2461.36	2179.23	X	60.0	8.45	25	3.60	25.1	157.61	1622.63	759.37	32.57	47.5	423	69.61	61.53	31.65	67.29	80.10	
24/12/01	23	7.46	468.28	8098.73	2568.73	85.61	74.0	8.05	-361	0.05	23.1	182.68	2513.02	2016.48	73.69	57.0	8.44	29	2.95	25.4	160.40	1614.30	945.50	31.92	50.0	498	63.19	62.71	32.43	65.75	80.07	
26/12/01	25	7.62	476.34	8043.61	2564.89	81.67	69.5	8.12	-375	0.20	23.4	181.24	2501.50	1927.87	75.91	58.0	8.56	34	3.10	25.2	159.73	1649.13	721.76	28.37	47.0	461	71.86	65.26	32.37	66.47	79.50	
28/12/01	27	7.76	462.13	8049.67	2549.67	90.68	72.0	8.24	-352	0.25	24.1	176.27	2447.98	2001.54	65.36	55.5	8.62	25	3.15	25.9	154.69	1598.16	670.08	22.90	43.5	423	73.72	74.75	39.58	66.53	80.15	
30/12/01	29	7.55	468.67	8106.49	2673.55	83.15	70.0	8.24	-364	0.15	24.8	175.43	2450.23	1940.23	58.61	54.5	8.57	22	3.05	26.5	136.43	1426.27	735.10	19.25	36.5	624	72.50	76.85	47.86	70.89	82.41	
1/1/02	31	7.43	451.32	7920.42	2683.47	87.36	72.0	8.21	-370	0.05	25.1	138.62	1852.41	1861.03	47.99	59.0	8.55	30	3.35	27.0	113.13	1284.61	616.24	21.08	40.0	545	77.04	75.87	44.44	74.93	83.78	
4/1/02	34	7.18	468.76	8118.52	2547.69	84.16	69.0	8.09	-365	0.20	25.5	131.81	1783.14	1809.15	46.04	51.5	8.51	29	3.25	26.9	98.46	1116.21	571.89	17.11	34.5	597	77.65	79.67	60.00	79.00	86.25	
7/1/02	37	7.68	464.45	8049.31	2519.23	86.94	68.0	8.25	-355	0.10	26.9	128.48	1791.52	1729.63	50.23	57.0	8.57	24	3.15	27.2	89.81	1021.61	549.67	15.36	41.0	586	78.18	82.33	39.71	80.66	87.31	
9/1/02	39	7.91	472.64	8120.34	2516.74	85.13	72.5	8.14	-362	0.05	27.2	120.36	1715.01	1741.89	45.31	52.5	8.62	23	3.30	28.5	87.65	1011.47	472.90	12.79	37.5	546	81.21	84.98	48.28	81.45	87.54	
11/1/02	41	7.57	461.34	8079.37	2497.60	87.25	72.0	8.22	-349	0.05	27.0	119.06	1712.67	1708.31	44.94	51.0	8.49	27	3.45	28.7	79.69	903.19	567.19	11.98	35.0	507	590	77.29	86.27	51.39	82.73	88.82
14/1/02	44	7.61	450.20	7734.79	2579.11	83.68	69.0	8.33	-351	0.15	27.6	110.36	1641.39	1689.73	43.67	49.0	8.52	28	3.50	28.7	72.46	822.03	448.05	12.01	34.0	522	601	82.63	85.65	50.72	83.90	89.37
17/1/02	47	7.72	465.09	8058.61	2543.83	87.52	71.5	8.24	-358	0.05	27.4	106.32	1571.62	1701.44	45.74	47.5	8.49	25	3.20	28.5	71.31	799.44	436.85	11.56	34.5	483	544	82.83	86.79	51.75	84.67	90.08
20/1/02	50	7.58	468.36	8043.31	2604.39	88.93	68.0	8.38	-351	0.10	27.3	105.83	1581.79	1642.24	45.58	48.0	8.62	26	3.35	28.9	73.58	815.76	415.71	12.19	33.0	471	539	84.04	86.29	51.47	84.29	89.86
22/1/02	52	7.45	482.29	8088.67	2576.34	84.73	69.5	8.45	-356	0.20	27.1	103.39	1556.33	1629.96	44.73	46.5	8.61	21	3.45	28.7	70.71	807.88	428.00	12.09	33.5	513	581	83.39	85.73	51.80	85.34	90.01
24/1/02	54	7.38	472.50	8103.01	2543.82	85.68	70.0	8.44	-341	0.15	27.6	105.71	1569.28	1598.62	45.29	49.0	8.66	19	3.20	28.9	72.75	817.38	409.28	11.49	34.0	516	593	83.91	86.59	51.43	84.60	89.91
26/1/02	56	7.72	484.85	8219.11	2568.48	86.08	70.5	8.49	-361	0.05	27.0	107.04	1566.58	1637.19	44.85	48.5	8.69	28	3.45	28.7	70.38	812.14	427.62	11.76	34.5	462	529	83.35	86.34	51.06	85.49	90.12

ตาราง ค-7 ผลการทดลองที่ 3.1 (ต่อ)

การทดลองที่ 3.1																																					
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic								Efficiency %															
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %					
(ต่อ)																																					
29/1/02	59	7.56	473.08	8120.50	2590.49	85.89	68.5	8.29	-356	0.15	27.5	106.12	1569.47	1617.47	44.67	49.0	8.59	19	3.30	29.0	72.43	813.53	414.13	11.83	34.0	463	529	84.01	86.19	50.36	84.69	89.98					
31/1/02	61	7.62	467.46	8096.23	2568.68	84.83	69.5	8.35	-374	0.05	27.4	103.81	1545.10	1638.38	44.39	48.0	8.57	26	3.25	28.8	70.07	807.02	425.45	11.49	34.0	516	578	83.44	86.46	51.08	85.01	90.03					
2/2/02	63	7.59	462.39	8054.61	2645.67	85.61	70.5	8.41	-358	0.05	27.0	107.63	1574.29	1595.44	45.73	48.5	8.61	24	3.20	28.9	68.81	804.43	432.61	12.37	34.5	449	502	83.65	85.55	51.06	85.12	90.01					
4/2/02	65	7.69	463.61	8049.85	2559.46	87.28	69.0	8.45	-361	0.10	27.6	105.44	1579.14	1624.95	45.68	49.0	8.62	26	3.15	28.7	70.70	813.82	428.96	12.43	34.0	511	576	83.24	85.76	50.72	84.75	89.89					
6/2/02	67	7.70	470.84	8087.31	2581.02	86.48	68.0	8.29	-359	0.20	27.5	106.23	1564.70	1641.36	48.33	49.5	8.70	30	3.25	28.9	70.90	810.92	409.83	11.68	33.5	532	608	84.12	86.49	50.74	84.94	89.97					
8/2/02	69	7.54	467.39	8098.43	2569.43	87.25	70.5	8.27	-348	0.10	27.6	104.38	1556.12	1605.68	46.24	47.5	8.65	27	3.45	28.8	69.78	810.24	420.41	11.93	35.0	488	562	83.64	86.33	50.35	85.07	90.00					
Average	n=10	7.58	471.28	8096.10	2581	86.3	69.4	8.38	-356	0.12	27.4	105.56	1566.28	1623	45.3	48.4	8.63	25	3.31	28.8	71.01	811.31	421	11.9	34.0	492	560	83.68	86.17	51.01	84.93	89.98					
SD	n=10	0.10	6.97	47.50	27	1.2	0.9	0.07	8	0.06	0.2	1.28	10.69	17	0.6	0.8	0.04	4	0.11	0.1	1.40	3.84	8	0.3	0.5	28	32	0.31	0.34	0.45	0.34	0.07					

หมายเหตุ

1. ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
2. สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ตีเทรปผิดพลาด
3. ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

ตาราง ค-8 ผลการทดลองที่ 3.2

การทดลองที่ 3.2																																			
วันที่	วันที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %															
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %			
2/12/01	1	7.65	467.62	8097.46	2543.20			8.25	-351	0.10	27.3	249.31	3287.46	2212.41			8.49	11	3.15	28.8	203.43	2195.52	1458.21								42.66			56.50	72.89
5/12/01	4	7.81	471.34	8106.84	2621.16			8.33	-354	0.05	27.2	205.12	2754.71	2257.30			8.54	21	3.20	28.7	183.37	1813.24	1395.79			329	46.75				61.10	77.63			
7/12/01	6	7.74	470.76	8096.43	2560.26	85.64	134.5	8.18	-343	0.05	27.4	220.73	2901.37	2016.17	76.25	119.0	8.41	19	3.25	28.6	193.19	1902.35	1541.32	42.63	100.5	412	39.80	50.22	25.28	58.96	76.50				
10/12/01	9	7.69	469.40	8087.90	2557.38	86.23	140.0	8.21	-355	0.10	26.1	190.69	2612.92	1976.53	74.53	120.0	8.52	25	3.40	27.9	166.72	1649.42	1290.61	40.26	103.0	398	49.53	53.31	26.43	64.46	79.61				
13/12/01	12	7.75	465.05	8043.16	2537.62	87.16	136.5	8.25	-348	0.10	26.0	160.01	2051.80	2188.06	78.91	121.5	8.57	29	3.05	27.1	149.22	1575.62	1172.05	37.31	100.0	349	53.81	57.19	26.74	67.91	80.41				
15/12/01	14	7.71	464.59	8043.71	2645.31	84.37	141.0	8.19	-365	0.15	25.3	141.48	1899.84	X	69.29	125.0	8.44	20	3.15	26.3	129.46	1375.29	984.01	35.73	99.5	436	62.80	57.65	29.43	72.13	82.90				
18/12/01	17	7.65	472.61	8101.29	2573.16	86.71	138.5	8.25	-349	0.10	24.4	146.26	1952.60	1882.71	78.36	112.0	8.40	18	3.40	25.8	124.35	1346.80	861.29	38.32	105.0	402	66.53	55.81	24.19	73.69	83.38				
21/12/01	20	7.82	481.84	8153.16	2498.35	84.67	139.5	8.17	-356	0.15	23.2	175.17	2475.18	2009.49	75.19	114.5	8.42	26	3.50	25.4	138.08	1472.64	913.38	39.19	106.0	439	63.44	53.71	24.01	71.34	81.94				
24/12/01	23	7.46	468.28	8098.73	2568.73	85.61	143.0	8.11	-364	0.05	23.1	173.40	2401.83	1915.54	76.24	113.0	8.45	29	3.05	25.4	162.73	1689.99	798.12	32.90	101.5	426	68.93	61.57	29.02	65.25	79.13				
26/12/01	25	7.62	476.34	8043.61	2564.89	81.67	135.5	8.09	-380	0.15	23.4	186.67	2589.56	1839.43	74.33	109.0	8.55	32	3.15	25.2	158.16	1627.16	720.93	31.37	98.5	448	71.89	61.59	27.31	66.80	79.77				
28/12/01	27	7.76	462.13	8049.67	2549.67	90.68	137.0	8.26	-359	0.20	24.0	168.91	2184.39	1986.21	69.61	118.0	8.60	26	3.00	25.6	148.36	1621.81	649.55	28.31	96.0	482	74.52	68.78	29.93	67.90	81.09				
30/12/01	29	7.55	468.67	8106.49	2673.55	83.15	145.0	8.24	-364	0.15	24.7	143.10	1914.79	1803.95	62.73	115.0	8.55	21	2.95	26.2	128.69	1389.42	593.30	24.80	101.0	453	77.81	70.17	30.34	72.54	82.86				
1/1/02	31	7.43	451.32	7920.42	2683.47	87.36	148.0	8.20	-371	0.10	25.1	139.77	1865.46	1758.24	58.41	110.5	8.59	31	3.25	26.8	111.62	1227.16	617.18	22.04	97.5	567	77.00	74.77	34.12	75.27	84.51				
4/1/02	34	7.18	468.76	8118.52	2547.89	84.16	143.0	8.19	-368	0.15	25.5	131.43	1778.94	1717.65	46.04	112.0	8.49	26	3.15	26.7	95.35	1120.25	513.33	16.51	94.0	521	79.85	80.38	34.27	79.66	86.20				
7/1/02	37	7.68	464.45	8049.31	2519.23	86.94	138.5	8.26	-352	0.10	26.8	122.81	1719.53	1639.42	49.57	109.0	8.56	26	3.35	27.2	85.23	935.49	570.46	14.73	90.0	605	77.36	83.06	35.02	81.65	86.38				
9/1/02	39	7.91	472.64	8120.34	2516.74	85.13	137.0	8.18	-359	0.10	27.1	110.65	1466.05	1701.59	44.06	105.0	8.61	24	3.25	28.6	75.94	869.49	489.71	13.80	89.0	539	80.54	83.79	35.04	83.93	89.29				
11/1/02	41	7.57	461.34	8079.37	2497.60	87.25	140.5	8.20	-351	0.05	27.0	102.97	1376.13	1631.13	44.10	107.0	8.51	28	3.50	28.2	70.67	824.73	501.86	11.56	91.0	515	576	79.91	86.75	35.23	84.64	89.79			
14/1/02	44	7.61	450.20	7734.79	2579.11	83.68	140.0	8.34	-346	0.10	27.3	108.61	1456.46	1625.47	45.91	103.5	8.53	25	3.40	28.4	71.08	812.35	478.18	11.73	90.0	507	580	81.46	85.98	35.71	84.21	89.50			
17/1/02	47	7.72	465.09	8058.61	2543.83	87.52	139.5	8.25	-349	0.15	27.4	103.59	1398.68	1651.83	47.32	104.0	8.49	29	3.35	28.9	58.19	576.41	431.08	12.03	89.0	470	549	83.05	86.25	36.20	87.49	92.85			
20/1/02	50	7.58	468.36	8043.31	2604.39	88.93	139.0	8.40	-352	0.20	27.2	95.11	1301.37	1611.27	45.39	106.0	8.62	24	3.50	28.8	62.67	739.13	436.02	12.69	89.5	499	556	83.26	85.73	35.61	86.62	90.81			
22/1/02	52	7.45	482.29	8088.67	2576.34	84.73	142.0	8.44	-357	0.10	27.1	95.86	1268.67	1592.50	44.86	105.0	8.63	21	3.40	28.5	64.37	766.08	419.26	11.87	92.0	545	609	83.73	85.99	35.21	86.65	90.53			
24/1/02	54	7.38	472.50	8103.01	2543.82	85.68	140.0	8.42	-341	0.05	27.4	93.46	1257.81	1631.78	44.60	105.0	8.67	23	3.15	29.1	65.54	784.03	421.73	12.09	90.0	465	524	83.42	85.89	35.71	86.13	90.32			
26/1/02	56	7.72	484.85	8219.11	2568.48	86.08	141.5	8.50	-359	0.05	27.0	92.73	1201.74	1627.03	45.37	105.5	8.66	24	3.40	28.7	63.23	763.98	408.26	11.84	90.5	511	566	84.11	86.25	36.04	86.96	90.70			

ตาราง ค-8 ผลการทดลองที่ 3.2

การทดลองที่ 3.2																																							
วันที่	ถัง	Influent						Anaerobic									Aerobic									Efficiency %													
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %							
2/12/01	1	7.65	467.62	8097.46	2543.20			8.25	-351	0.10	27.3	249.31	3287.46	2212.41			8.49	11	3.15	28.8	203.43	2195.52	1458.21												42.66			56.50	72.89
5/12/01	4	7.81	471.34	8106.84	2621.16			8.33	-354	0.05	27.2	205.12	2754.71	2257.30			8.54	21	3.20	28.7	183.37	1813.24	1395.79				329	46.75						61.10	77.63				
7/12/01	6	7.74	470.78	8096.43	2560.26	85.64	134.5	8.18	-343	0.05	27.4	220.73	2901.37	2015.17	76.25	119.0	8.41	19	3.25	28.6	193.19	1902.35	1541.32	42.63	100.5		412	39.80	50.22	25.28	58.96	76.50							
10/12/01	9	7.69	469.40	8087.90	2557.38	86.23	140.0	8.21	-355	0.10	26.1	190.69	2612.92	1976.53	74.53	120.0	8.52	25	3.40	27.9	166.72	1649.42	1290.61	40.26	103.0		398	49.53	53.31	26.43	64.48	79.61							
13/12/01	12	7.75	465.05	8043.16	2537.62	87.16	136.5	8.25	-348	0.10	26.0	160.01	2051.80	2188.06	78.91	121.5	8.57	29	3.05	27.1	149.22	1575.62	1172.05	37.31	100.0		349	53.81	57.19	26.74	67.91	80.41							
15/12/01	14	7.71	464.59	8043.71	2645.31	84.37	141.0	8.19	-365	0.15	25.3	141.48	1899.84	X	69.29	125.0	8.44	20	3.15	26.3	129.46	1375.29	984.01	35.73	99.5		436	62.80	57.65	29.43	72.13	82.90							
18/12/01	17	7.65	472.61	8101.29	2573.16	86.71	138.5	8.25	-349	0.10	24.4	146.26	1952.60	1882.71	78.36	112.0	8.40	18	3.40	25.8	124.35	1346.80	861.29	38.32	105.0		402	66.53	55.81	24.19	73.69	83.38							
21/12/01	20	7.82	481.84	8153.16	2498.35	84.67	139.5	8.17	-358	0.15	23.2	175.17	2475.18	2009.49	75.19	114.5	8.42	26	3.50	25.4	138.08	1472.64	913.38	39.19	106.0		439	63.44	53.71	24.01	71.34	81.94							
24/12/01	23	7.46	468.28	8098.73	2568.73	85.61	143.0	8.11	-364	0.05	23.1	173.40	2401.83	1915.54	76.24	113.0	8.45	29	3.05	25.4	162.73	1689.99	798.12	32.90	101.5		426	68.93	61.57	29.02	65.25	79.13							
26/12/01	25	7.62	476.34	8043.61	2564.89	81.67	135.5	8.09	-380	0.15	23.4	186.67	2589.56	1839.43	74.33	109.0	8.55	32	3.15	25.2	158.16	1627.16	720.93	31.37	98.5		448	71.89	61.59	27.31	66.80	79.77							
28/12/01	27	7.76	462.13	8049.67	2549.67	90.68	137.0	8.26	-359	0.20	24.0	168.91	2184.39	1986.21	69.61	118.0	8.60	26	3.00	25.6	148.36	1521.81	649.55	28.31	96.0		482	74.52	68.78	29.93	67.90	81.09							
30/12/01	29	7.55	468.67	8106.49	2673.55	83.15	145.0	8.24	-364	0.15	24.7	143.10	1914.79	1803.95	62.73	115.0	8.55	21	2.95	26.2	128.69	1389.42	593.30	24.80	101.0		453	77.81	70.17	30.34	72.54	82.86							
1/1/02	31	7.43	451.32	7920.42	2683.47	87.36	148.0	8.20	-371	0.10	25.1	139.77	1865.46	1758.24	58.41	110.5	8.59	31	3.25	26.8	111.62	1227.16	617.18	22.04	97.5		567	77.00	74.77	34.12	75.27	84.51							
4/1/02	34	7.18	468.76	8118.52	2547.69	84.16	143.0	8.19	-368	0.15	25.5	131.43	1778.94	1717.65	46.04	112.0	8.49	26	3.15	26.7	95.35	1120.25	513.33	16.51	94.0		521	79.85	80.38	34.27	79.66	86.20							
7/1/02	37	7.68	464.45	8049.31	2519.23	86.94	138.5	8.26	-352	0.10	26.8	122.61	1719.53	1639.42	49.57	109.0	8.56	26	3.35	27.2	85.23	935.49	570.46	14.73	90.0		605	77.36	83.06	35.02	81.65	88.38							
9/1/02	39	7.91	472.64	8120.34	2516.74	85.13	137.0	8.18	-359	0.10	27.1	110.65	1466.05	1701.58	44.06	105.0	8.61	24	3.25	28.6	75.94	669.49	489.71	13.80	89.0		539	80.54	83.79	35.04	83.93	89.29							
11/1/02	41	7.57	461.34	8079.37	2497.60	87.25	140.5	8.20	-351	0.05	27.0	102.97	1376.13	1631.13	44.10	107.0	8.51	28	3.50	26.2	70.87	824.73	501.86	11.56	91.0	515	576	79.91	86.75	35.23	84.64	89.79							
14/1/02	44	7.61	450.20	7734.79	2579.11	83.68	140.0	8.34	-346	0.10	27.3	108.61	1456.46	1625.47	45.91	103.5	8.53	25	3.40	28.4	71.08	812.35	478.18	11.73	90.0	507	580	81.46	85.98	35.71	84.21	89.50							
17/1/02	47	7.72	465.09	8058.61	2543.83	87.52	139.5	8.25	-349	0.15	27.4	103.59	1398.68	1651.83	47.32	104.0	8.49	29	3.35	28.9	58.19	578.41	431.08	12.03	89.0	470	549	83.05	86.25	36.20	87.49	92.85							
20/1/02	50	7.58	468.36	8043.31	2604.39	88.93	139.0	8.40	-352	0.20	27.2	95.11	1301.37	1611.27	45.39	106.0	8.62	24	3.50	28.8	62.67	739.13	436.02	12.69	89.5	499	556	83.26	85.73	35.61	86.62	90.81							
22/1/02	52	7.45	482.29	8088.67	2576.34	84.73	142.0	8.44	-357	0.10	27.1	95.86	1268.67	1592.50	44.88	105.0	8.63	21	3.40	28.5	64.37	766.08	419.26	11.87	92.0	545	609	83.73	85.99	35.21	86.65	90.53							
24/1/02	54	7.38	472.50	8103.01	2543.82	85.68	140.0	8.42	-341	0.05	27.4	93.46	1257.81	1631.78	44.60	105.0	8.67	23	3.15	29.1	65.54	784.03	421.73	12.09	90.0	465	524	83.42	85.89	35.71	86.13	90.32							
26/1/02	56	7.72	484.85	8219.11	2568.48	86.08	141.5	8.50	-359	0.05	27.0	92.73	1201.74	1627.03	45.37	105.5	8.66	24	3.40	28.7	63.23	763.98	406.26	11.84	90.5	511	586	84.11	86.25	36.04	86.96	90.70							

ตาราง ค-8 ผลการทดลองที่ 3.2 (ต่อ)

การทดลองที่ 3.2																																				
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %																
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %				
(ต่อ)																																				
29/1/02	59	7.56	473.08	8120.50	2590.49	85.69	139.0	8.30	-357	0.15	27.4	94.16	1250.49	1647.18	45.61	103.0	8.60	21	3.25	28.9	65.89	774.92	442.08	12.43	89.5	467	534	82.93	85.49	35.61	86.07	90.46				
31/1/02	61	7.62	467.46	8096.23	2568.68	84.83	140.0	8.34	-370	0.10	27.3	95.35	1271.61	1630.49	45.71	102.5	8.56	27	3.35	28.7	62.01	751.01	425.74	11.61	91.0	505	567	83.43	86.31	35.00	86.73	90.72				
2/2/02	63	7.59	462.39	8054.61	2645.67	85.61	139.5	8.42	-358	0.15	27.2	92.94	1227.46	1619.63	44.68	105.0	8.59	25	3.20	28.5	64.38	755.18	417.01	12.07	90.0	445	503	84.24	85.90	35.48	86.08	90.62				
4/2/02	65	7.69	463.61	8049.85	2559.46	87.28	141.0	8.44	-360	0.05	27.6	94.78	1245.70	1598.77	45.20	103.0	8.63	29	3.10	29.1	64.02	732.16	423.78	11.82	89.5	488	549	83.44	86.46	36.52	86.19	90.90				
6/2/02	67	7.70	470.84	8087.31	2581.02	86.48	137.5	8.31	-359	0.15	27.5	96.23	1296.16	1635.61	46.07	104.5	8.72	26	3.30	28.9	63.80	725.82	405.39	11.39	88.5	528	598	84.29	86.83	35.64	86.45	91.03				
8/2/02	69	7.54	467.39	8098.43	2569.43	87.25	139.5	8.29	-353	0.10	27.4	93.18	1236.93	1643.28	45.72	105.0	8.63	25	3.50	28.7	62.59	735.64	434.22	12.10	90.0	458	523	83.10	86.13	35.48	86.61	90.92				
Average	n=10	7.58	471.28	8096.10	2581	86.3	139.9	8.39	-357	0.11	27.3	94.38	1255.79	1624	45.3	104.5	8.63	25	3.32	28.8	63.85	752.79	423	12.0	90.1	491	555	83.59	86.10	35.63	86.45	90.70				
SD	n=10	0.10	6.97	47.50	27	1.2	1.3	0.07	7	0.05	0.2	1.20	28.87	17	0.5	1.1	0.04	2	0.13	0.2	1.20	18.47	11	0.4	0.9	31	33	0.45	0.36	0.40	0.30	0.22				

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขวดทดลองแตก หรือ ดิเตรทผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-9 ผลการทดลองที่ 3.3

การทดลองที่ 3.3																																
วันที่	วันที่	Influent						Anaerobic									Aerobic									Efficiency %						
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %
2/12/01	1	7.65	467.62	8097.46	2543.20			8.25	-352	0.05	27.5	125.65	1768.61	1685.09			8.48	20	3.35	28.9	73.56	835.84	475.21					81.31			84.27	89.68
5/12/01	4	7.81	471.34	8106.84	2621.16			8.35	-349	0.05	27.2	123.26	1743.49	1702.61			8.56	18	3.20	28.5	75.89	859.70	451.09				587	82.79			83.90	89.40
7/12/01	6	7.74	470.76	8096.43	2560.26	85.64	168.5	8.15	-344	0.15	27.3	119.43	1675.61	1654.38	43.61	146.5	8.40	21	3.15	28.6	65.42	763.14	461.36	12.68	128.0		539	81.98	85.19	24.04	86.10	90.57
10/12/01	9	7.69	469.40	8087.90	2557.38	86.23	171.0	8.19	-358	0.20	26.2	127.91	1794.24	X	44.73	145.0	8.41	25	2.85	27.8	72.19	805.54	449.13	11.95	129.5		603	82.44	86.15	24.27	84.62	90.04
13/12/01	12	7.75	465.05	8043.16	2537.62	87.16	169.0	8.28	-348	0.10	26.1	124.63	1773.29	1712.63	45.07	150.0	8.62	28	3.05	27.2	71.01	815.96	501.94	13.08	129.0		714	80.22	84.99	23.67	84.73	89.86
15/12/01	14	7.71	464.59	8043.71	2645.31	84.37	167.5	8.20	-365	0.05	25.2	120.82	1701.60	1629.31	51.69	150.5	8.47	20	3.15	26.3	68.27	768.46	X	19.84	137.0		486		76.48	18.21	85.31	90.45
18/12/01	17	7.65	472.61	8101.29	2573.16	86.71	172.0	8.22	-352	0.15	24.5	124.63	1729.36	1789.94	59.45	X	8.38	19	3.35	25.9	62.30	754.43	625.49	20.45	128.5		476	75.69	76.42	25.29	86.82	90.69
21/12/01	20	7.82	481.84	8153.16	2498.35	84.67	169.0	8.12	-350	0.15	23.2	153.42	2085.91	1835.37	60.71	143.0	8.42	26	3.40	25.4	81.29	915.32	643.16	18.36	132.0		502	74.26	78.32	21.89	83.13	88.77
24/12/01	23	7.46	468.28	8098.73	2568.73	85.61	170.5	8.08	-359	0.05	23.0	168.69	2201.64	1925.49	62.88	142.0	8.49	28	3.05	25.5	95.74	1172.16	711.81	22.71	129.5		476	72.29	73.47	24.05	79.55	85.53
26/12/01	25	7.62	476.34	8043.61	2564.89	81.67	173.0	8.10	-372	0.10	23.5	162.10	2143.60	1882.02	59.30	135.5	8.55	33	3.15	25.3	80.02	902.89	621.67	25.14	126.0		498	75.76	69.22	27.17	83.20	88.78
28/12/01	27	7.76	462.13	8049.67	2549.67	90.68	168.0	8.24	-351	0.15	24.1	149.64	1921.31	1785.58	56.29	137.0	8.61	24	3.20	25.8	78.32	854.20	615.29	17.02	118.0		573	75.67	81.23	29.76	83.05	89.39
30/12/01	29	7.55	468.67	8106.49	2673.55	83.15	171.5	8.25	-360	0.20	24.8	136.82	1876.43	1729.46	56.08	135.0	8.57	26	3.25	26.4	79.74	945.71	593.31	15.73	107.5		590	77.81	81.08	37.32	82.99	88.33
1/1/02	31	7.43	451.32	7920.42	2683.47	87.36	169.0	8.19	-369	0.05	25.2	122.67	1735.42	1689.87	49.75	138.5	8.53	29	3.20	27.0	67.24	669.03	536.45	13.59	111.5		545	80.01	84.44	34.02	85.10	91.55
4/1/02	34	7.18	468.76	8118.52	2547.69	84.16	170.0	8.08	-362	0.15	25.6	118.20	1613.75	1656.17	45.29	133.5	8.49	32	3.30	26.9	65.84	774.90	469.54	11.46	109.0		538	81.57	86.38	35.88	85.95	90.46
7/1/02	37	7.68	464.45	8049.31	2519.23	86.94	167.5	8.25	-358	0.15	26.9	110.82	1516.61	1605.93	44.73	135.0	8.59	27	3.10	27.3	52.61	770.34	512.49	12.03	110.0		568	79.66	86.16	34.33	88.67	90.43
9/1/02	39	7.91	472.64	8120.34	2516.74	85.13	167.5	8.14	-362	0.20	27.2	101.26	1442.73	1625.64	44.67	129.5	8.63	24	3.45	28.5	59.88	559.54	436.46	12.13	107.5		523	82.66	85.75	35.82	87.33	93.11
11/1/02	41	7.57	461.34	8079.37	2497.60	87.25	171.0	8.25	-347	0.05	27.1	90.96	1234.84	1618.61	45.84	128.0	8.44	26	3.50	28.6	56.56	562.99	425.81	11.46	107.0	505	689	82.95	86.87	37.43	87.74	93.03
14/1/02	44	7.61	450.20	7734.79	2579.11	83.68	170.0	8.35	-356	0.15	27.5	85.42	1159.05	1642.76	44.35	128.5	8.57	27	3.35	28.8	48.23	456.47	451.64	11.39	109.0	508	587	82.49	86.39	35.88	89.29	94.10
17/1/02	47	7.72	465.09	8058.61	2543.83	87.52	169.0	8.21	-355	0.10	27.4	84.48	1145.62	1598.65	43.15	127.0	8.52	26	3.20	28.6	43.36	375.61	439.15	11.73	107.0	516	589	82.74	86.60	36.69	90.68	95.34
20/1/02	50	7.58	468.36	8043.31	2604.39	88.93	171.0	8.37	-349	0.15	27.3	86.46	1172.22	1602.96	45.08	128.5	8.59	24	3.15	28.5	44.55	369.12	430.14	11.85	109.5	534	602	83.48	86.67	35.96	90.49	95.41
22/1/02	52	7.45	482.29	8088.67	2576.34	84.73	170.5	8.43	-358	0.05	27.1	83.47	1124.91	1623.31	45.14	126.0	8.63	19	3.40	28.7	44.39	370.43	426.12	11.46	108.0	494	573	83.46	86.47	36.66	90.80	95.42
24/1/02	54	7.38	472.50	8103.01	2543.82	85.68	169.0	8.44	-346	0.05	27.5	87.36	1190.43	1595.22	45.17	126.5	8.68	23	3.25	29.0	45.05	365.72	419.74	11.56	106.5	509	584	83.50	86.51	36.98	90.47	95.49
26/1/02	56	7.72	484.85	8219.11	2568.48	86.08	171.0	8.51	-368	0.10	26.9	85.16	1165.56	1602.85	44.79	125.5	8.70	26	3.30	28.9	45.46	381.06	427.63	11.21	108.5	499	569	83.35	86.98	36.55	90.62	95.36

ตาราง ค-9 ผลการทดลองที่ 3.3 (ต่อ)

การทดลองที่ 3.3																																	
วันที่	วัฏจักรที่	Influent						Anaerobic						Aerobic						Efficiency %													
		pH	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	pH	ORP (mv)	DO (mg/l)	Temp (C)	SU	ADMI	COD (mg/l)	TKN (mg/l)	P (mg/l)	MLVSS (mg/l)	MLSS (mg/l)	COD %	TKN %	P %	SU %	ADMI %	
(ต่อ)																																	
29/1/02	59	7.56	473.08	8120.50	2590.49	85.69	169.0	8.31	-358	0.05	27.5	83.03	1098.12	1629.03	43.87	127.5	8.61	22	3.25	29.1	44.67	356.31	443.82	12.09	107.0	479	549	82.87	85.89	36.69	90.56	95.61	
31/1/02	61	7.62	467.46	8096.23	2568.68	84.83	172.0	8.32	-370	0.15	27.3	87.96	1176.26	1649.13	44.09	127.0	8.59	24	3.45	28.7	45.53	377.95	435.77	11.60	110.5	485	562	83.04	86.33	35.76	90.26	95.33	
2/2/02	63	7.59	462.39	8054.61	2645.67	85.61	167.5	8.44	-354	0.20	27.1	85.63	1123.54	1627.51	44.23	129.5	8.63	26	3.20	28.6	42.85	323.01	438.28	12.02	107.0	493	550	83.43	85.96	36.12	90.73	95.99	
4/2/02	65	7.69	463.61	8049.85	2559.46	87.28	171.0	8.42	-359	0.05	27.5	86.91	1187.73	1601.55	45.92	128.0	8.61	25	3.10	28.6	46.91	359.80	429.19	11.86	108.0	510	579	83.23	86.41	36.84	89.88	95.53	
6/2/02	67	7.70	470.84	8087.31	2581.02	86.48	169.0	8.32	-363	0.05	27.4	83.47	1101.34	1643.70	44.71	130.0	8.69	29	3.30	29.0	45.06	372.35	429.60	12.10	109.5	514	587	83.36	86.01	35.21	90.43	95.40	
8/2/02	69	7.54	467.39	8098.43	2569.43	87.25	171.5	8.25	-347	0.15	27.6	82.57	1108.61	1599.08	45.18	126.5	8.63	30	3.55	28.9	45.87	380.16	437.32	11.39	108.5	478	549	82.98	86.95	36.73	90.19	95.31	
Average	n=10	7.58	471.28	8096.10	2581	86.3	170.2	8.38	-357	0.10	27.3	85.20	1144.87	1617	44.8	127.5	8.64	25	3.30	28.8	45.03	365.59	432	11.7	108.3	500	570	83.27	86.42	36.35	90.44	95.50	
SD	n=10	0.10	6.97	47.50	27	1.2	1.4	0.08	8	0.05	0.2	1.86	35.10	19	0.6	1.4	0.04	3	0.13	0.2	1.01	16.18	7	0.3	1.2	17	17	0.22	0.37	0.54	0.26	0.20	

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตารางผลการทดลอง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น
- สัญลักษณ์ X หมายถึง พารามิเตอร์นั้นมีความผิดพลาดในการวิเคราะห์ เช่น ขาดหลอดจลนตก หรือ ติเคเรทผิดพลาด
- ค่าเฉลี่ย และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากผลการทดลองในช่วงสถานะคงตัว 10 วัฏจักร (n=10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ՆԱԽԵՅՄԱՆԵԼԱԲԵՍՄԷՄՅԵՐԸ

Ի ԱՐՄԽԼԱ

ตาราง ง-1 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 1.1

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.63	1432.57	47.82	18.15	131.51	4557.19
5	0.083	2.90	62	7.38	1214.68			105.56	2781.46
15	0.25	1.00	18	6.95	695.53	42.26	17.80	87.39	1673.26
30	0.5	0.15	5	6.92	522.94	37.47	17.40	76.07	981.08
60	1	0.05	-12	6.94	431.78	33.19	17.05	65.13	739.01
90	1.5	0.10	-178	6.85	358.17			55.43	666.52
120	2	0.05	-221	6.82	286.57	31.83	16.30	42.78	528.69
180	3	0.05	-245	6.75	275.08	29.07	15.90	40.13	472.85
360	6	0.15	-258	6.72	251.72	27.78	15.55	37.51	418.03
540	9	0.05	-237	6.78	263.41			35.72	402.42
720	12	0.10	-260	6.59	236.92	25.08	15.25	32.89	371.64
900	15	0.05	-249	6.62	218.24			32.15	369.50
1080	18	0.05	-254	6.78	189.58	20.73	15.05	29.85	348.75
1110	18.5	3.45	-22	8.01	123.48	17.29	13.90	26.93	323.34
1140	19	4.80	43	8.29	98.76	13.58	12.25	24.58	307.03
1260	21	5.45	39	8.41	59.10	7.12	11.50	21.42	289.59
1380	23	5.30	45	8.39	47.08	4.42	11.15	20.37	281.49

หมายเหตุ

1. ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-2 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 1.2

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.71	1457.13	85.98	26.85	192.58	4267.31
5	0.083	2.65	39	7.62	1379.41			157.95	3782.69
15	0.25	0.85	12	7.59	1259.86	85.79	26.05	126.81	3214.78
30	0.5	0.05	-18	7.58	1098.75	85.28	25.70	108.32	2659.81
60	1	0.05	-156	7.45	851.32	84.32	25.35	95.43	2173.02
90	1.5	0.10	-287	7.31	618.17			89.72	1529.28
120	2	0.15	-308	7.21	536.85	82.51	25.1	82.31	1351.63
180	3	0.05	-348	7.13	473.41	80.76	25.00	72.09	956.42
360	6	0.05	-350	7.09	384.29	79.40	24.85	58.11	643.75
540	9	0.10	-339	7.10	315.18			49.29	571.01
720	12	0.05	-345	7.12	288.93	78.09	24.55	39.83	509.52
900	15	0.05	-321	7.08	257.47			32.47	462.37
1080	18	0.10	-336	7.18	248.08	77.92	24.35	30.24	428.63
1110	18.5	3.15	-50	8.05	190.29	72.98	18.85	28.65	398.05
1140	19	4.05	2	8.16	136.25	69.87	16.50	25.48	371.22
1260	21	3.95	23	8.19	102.44	66.45	15.35	23.25	354.96
1380	23	4.10	19	8.17	82.41	65.22	14.45	21.04	339.72

หมายเหตุ

1. ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-3 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 1.3

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.60	1446.83	48.16	18.10	131.37	4541.63
5	0.083	2.45	39	8.12	1113.67			112.21	2927.13
15	0.25	0.15	-28	8.17	937.08	46.87	17.05	101.98	2682.64
30	0.5	0.45	-172	8.35	846.31	46.21	16.60	91.37	1938.78
60	1	0.10	-263	8.40	758.15	45.73	16.05	85.59	1628.10
90	1.5	0.05	-305	8.42	739.56			72.73	962.91
120	2	0.05	-322	8.45	724.92	44.65	15.15	65.29	747.32
180	3	0.05	-325	8.39	703.79	42.91	14.30	58.10	689.15
360	6	0.10	-318	8.42	689.45	40.33	13.25	49.17	522.61
540	9	0.10	-321	8.38	672.28			40.22	466.37
720	12	0.05	-310	8.40	652.57	37.68	12.05	36.61	411.27
900	15	0.05	-320	8.43	640.18			32.76	370.15
1080	18	0.05	-315	8.41	635.34	36.42	11.35	30.87	352.16
1110	18.5	3.55	-32	8.57	353.87	31.81	10.85	26.12	319.70
1140	19	5.75	18	8.69	156.62	27.90	10.30	24.95	301.59
1260	21	5.80	49	8.72	67.38	23.49	9.45	21.35	272.03
1380	23	5.65	52	8.78	48.23	18.64	8.35	18.78	235.19

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-4 โปรไฟล์ของการทดลองที่ 2.1

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.75	2573.19	86.75	18.05	467.85	8062.78
5	0.083	1.35	16	7.54	2381.53			427.62	7069.24
15	0.25	0.35	-89	7.13	1962.75	80.56	17.45	389.17	6175.07
30	0.5	0.05	-192	7.01	1783.15	72.97	17.10	350.23	5293.11
60	1	0.05	-275	6.91	1592.39	65.21	16.60	318.67	4418.93
90	1.5	0.10	-317	6.72	1424.03			287.42	3967.16
120	2	0.05	-340	6.68	1367.52	58.73	15.95	254.83	3646.77
180	3	0.05	-342	6.53	1218.85	50.08	15.10	183.09	2911.41
360	6	0.10	-339	6.55	976.27	42.94	13.75	159.20	2429.61
540	9	0.05	-328	6.48	912.08			154.68	2177.02
720	12	0.05	-319	6.41	874.26	34.15	12.90	146.70	1970.64
900	15	0.05	-337	6.47	832.83			138.37	1846.35
1080	18	0.05	-327	6.42	815.57	31.52	12.35	118.39	1701.24
1110	18.5	2.10	-87	8.17	528.20	28.31	11.15	105.46	1527.13
1140	19	2.85	-5	8.28	414.86	22.19	8.60	99.25	1448.69
1260	21	3.05	37	8.45	273.19	15.85	4.25	91.48	1361.18
1380	23	3.10	34	8.52	115.49	7.08	1.15	84.93	1295.55

หมายเหตุ

1. ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-5 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 2.2

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.67	2563.51	172.51	26.65	486.52	7798.36
5	0.083	1.20	8	7.58	2436.79			449.63	7215.81
15	0.25	0.25	-115	7.55	2189.46	167.13	25.95	418.04	6746.50
30	0.5	0.10	-278	7.47	2013.02	159.62	25.40	376.71	5583.74
60	1	0.05	-347	7.39	1797.08	152.34	24.35	345.75	4822.79
90	1.5	0.05	-359	7.35	1619.54			315.62	4161.03
120	2	0.05	-376	7.22	1493.96	149.62	22.15	247.05	3280.52
180	3	0.05	-352	7.15	1229.11	147.55	20.40	219.33	2458.76
360	6	0.10	-381	7.06	938.47	144.81	17.55	148.09	1859.02
540	9	0.05	-386	7.10	859.31			115.39	1580.14
720	12	0.05	-364	7.08	785.93	142.72	14.15	103.84	1407.98
900	15	0.05	-379	7.09	719.94			102.42	1395.22
1080	18	0.05	-389	7.11	683.01	139.50	13.50	87.37	1017.80
1110	18.5	1.75	-121	7.98	537.05	125.66	12.95	81.48	948.03
1140	19	1.95	-48	8.17	357.12	118.29	11.55	79.93	907.41
1260	21	2.40	3	8.24	275.04	103.87	8.45	77.53	843.95
1380	23	2.65	15	8.25	152.70	89.15	6.35	75.61	792.08

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-6 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 2.3

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.61	2547.69	87.58	18.10	468.36	8109.47
5	0.083	1.45	18	8.15	2215.08			453.19	7539.54
15	0.25	0.25	-37	8.27	1930.22	82.13	17.25	435.77	7203.01
30	0.5	0.15	-185	8.32	1819.27	75.25	15.50	398.48	6218.72
60	1	0.05	-249	8.40	1786.39	69.42	14.15	351.14	5172.19
90	1.5	0.10	-312	8.39	1757.05			318.03	4452.38
120	2	0.05	-355	8.39	1718.57	62.05	13.25	284.86	3903.91
180	3	0.05	-361	8.37		55.31	12.05	249.52	3585.82
360	6	0.05	-363	8.29	1673.42	51.57	9.75	201.83	3185.05
540	9	0.05	-349	8.31				162.12	2537.07
720	12	0.05	-353	8.35	1587.60	45.82	5.05	135.39	1983.63
900	15	0.10	-351	8.38				128.75	1865.11
1080	18	0.05	-362	8.38	1528.02	43.71	3.65	124.08	1759.25
1110	18.5	2.15	-78	8.61	1151.25	37.96	3.20	109.63	1418.73
1140	19	2.90	-17	8.69	924.10	32.67	2.95	90.85	1139.68
1260	21	3.40	10	8.74	653.62	20.35	1.90	79.48	917.01
1380	23	3.55	32	8.72	417.35	10.79	1.05	70.67	795.54

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-7 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 3.1

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.75	2561.38	86.73	70.50	469.32	8127.05
5	0.083	1.65	23	8.12	2254.70			427.89	7055.81
15	0.25	0.35	-27	8.18	1915.29	82.95	65.50	395.61	6087.43
30	0.5	0.15	-169	8.23	1839.01	76.13	59.50	333.02	4919.90
60	1	0.05	-287	8.29	1754.62	68.91	56.50	295.53	4127.77
90	1.5	0.05	-357	8.37	1719.83			247.81	3429.04
120	2	0.05	-360	8.45	1691.42	61.47	52.00	204.15	3162.99
180	3	0.10	-352	8.43		55.32	49.50	192.73	2863.90
360	6	0.05	-348	8.40	1664.98	50.84	49.00	161.68	2498.71
540	9	0.05	-357	8.39				144.07	2147.20
720	12	0.10	-355	8.42	1601.45	46.43	48.50	125.96	1801.46
900	15	0.05	-345	8.43				117.40	1682.15
1080	18	0.05	-350	8.41	1578.37	44.78	47.50	105.71	1371.89
1110	18.5	2.30	-65	8.65	1189.43	36.55	42.50	98.38	1253.59
1140	19	3.05	-8	8.73	887.60	31.47	39.50	89.19	1131.25
1260	21	3.55	9	8.76	613.88	21.69	35.00	77.25	915.56
1380	23	3.30	34	8.75	432.09	11.23	33.50	70.41	811.52

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-8 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 3.2

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.75	2561.38	86.73	140.50	469.32	8127.05
5	0.083	1.80	22	8.13	2236.08			425.13	6972.86
15	0.25	0.25	-31	8.18	1942.75	82.67	130.00	398.40	6284.52
30	0.5	0.10	-172	8.22	1821.68	76.53	121.50	317.85	4653.91
60	1	0.05	-285	8.30	1752.11	69.14	113.00	281.07	3859.08
90	1.5	0.05	-347	8.35	1715.59			225.93	3263.25
120	2	0.10	-363	8.45	1698.73	60.35	109.50	198.51	2947.35
180	3	0.05	-355	8.45		54.31	107.00	189.09	2728.16
360	6	0.05	-349	8.42	1675.32	50.10	106.50	167.15	2549.29
540	9	0.05	-361	8.38				141.67	2081.44
720	12	0.10	-351	8.45	1596.80	46.91	105.00	119.33	1728.52
900	15	0.10	-348	8.44				103.87	1357.89
1080	18	0.05	-335	8.40	1552.49	44.23	104.50	93.76	1241.49
1110	18.5	2.15	-67	8.61	1214.90	37.08	98.00	86.31	1041.34
1140	19	3.20	-2	8.75	851.02	30.83	95.50	78.55	938.57
1260	21	3.45	11	8.72	629.10	22.42	93.00	69.74	813.24
1380	23	3.40	31	8.76	448.13	10.97	90.50	63.19	757.62

หมายเหตุ

1. ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

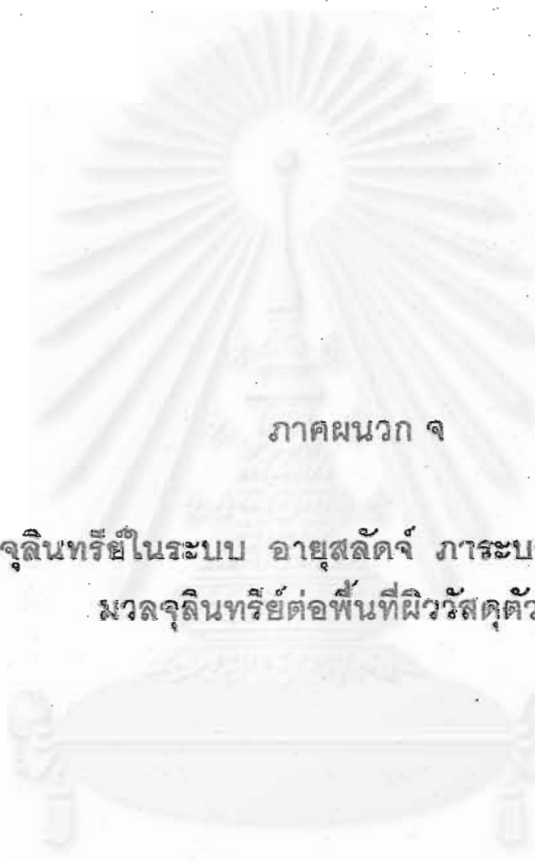
ตาราง ง-9 โพรไฟล์ของการทดลองที่ 3.3

Time(min)	(Hours)	DO(mg/l)	ORP(mv)	pH	COD(mg/l)	TKN(mg/l)	P (mg/l)	SU	ADMI
Influent	0			7.75	2561.38	86.73	171.50	469.32	8127.05
5	0.083	1.70	20	8.11	2218.45			431.68	7162.85
15	0.25	0.45	-17	8.16	1926.13	82.75	150.50	392.61	5911.42
30	0.5	0.10	-183	8.21	1851.27	75.48	142.50	307.85	4326.07
60	1	0.05	-287	8.28	1777.45	67.95	134.00	261.13	3654.21
90	1.5	0.05	-352	8.38	1713.05			223.40	3178.64
120	2	0.10	-358	8.46	1695.91	62.51	132.50	189.18	2715.35
180	3	0.05	-360	8.43		54.49	131.50	172.37	2603.13
360	6	0.05	-347	8.40	1652.90	51.08	130.00	151.69	2381.16
540	9	0.05	-352	8.38				132.54	1975.52
720	12	0.05	-355	8.44	1605.41	47.13	129.50	104.18	1348.85
900	15	0.10	-348	8.42				95.01	1263.19
1080	18	0.05	-349	8.43	1581.23	45.05	128.50	84.68	1130.59
1110	18.5	2.35	-58	8.59	1201.03	36.87	119.00	67.11	794.68
1140	19	3.10	-10	8.72	843.12	30.51	114.50	55.23	534.55
1260	21	3.55	12	8.70	645.36	20.85	110.50	49.75	451.15
1380	23	3.45	37	8.76	419.70	11.17	108.00	45.72	385.34

หมายเหตุ

- ช่องว่างในตาราง หมายถึง ไม่ได้ทำการวัดพารามิเตอร์นั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

มวลจุลินทรีย์ในระบบ อายุสัปดาห์ ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์
มวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. มวลจุลินทรีย์ในระบบ

มวลจุลินทรีย์ในระบบ หมายถึงมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เกาะติดบนวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{มวลจุลินทรีย์ในระบบ (กรัม/ถังปฏิกรณ์)} &= (\text{ปริมาณวีเอสเอสที่เกาะบนตัวกลางต่อ 1 กรัมตัวกลาง}) * \text{น้ำหนักทั้งหมดของตัวกลาง} \\ &= (\text{mgVSS/gMedia}) * \text{Total Weight of Media} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ 1.1

$$\begin{aligned} \text{มวลจุลินทรีย์ในระบบ} &= 15.4 \text{ mgVSS/gMedia} * 1510 \text{ gMedia/reactor} \\ &= 23.3 \text{ gVSS/reactor.} \end{aligned}$$

2. อายุสัปดาห์

สามารถคำนวณจากค่าวีเอสเอสในน้ำทิ้งเฉลี่ย และ ค่ามวลจุลินทรีย์ในระบบ

$$\text{อายุสัปดาห์(วัน)} = \text{มวลจุลินทรีย์ในระบบ} / \text{วีเอสเอสเฉลี่ยในน้ำทิ้งต่อวัน}$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ 1.1

$$\begin{aligned} \text{อายุสัปดาห์(วัน)} &= 23.3 \text{ gVSS} / (0.280 \text{ gVSS/l} * 5 \text{ l/d}) \\ &= 16.6 \text{ days} \end{aligned}$$

3. ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง (Area Organic Loading Rate, AOLR)

$$\begin{aligned} \text{AOLR (Kg-COD/(d*m}^2)) &= \text{COD Loading} / \text{Surface Area of Media} \\ &= \frac{(\text{Avg influent COD} * \text{Vol of Wastewater per day})}{(\text{BET Surface Area} * \text{Total Weight of Media})} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ 1.1

$$\begin{aligned} \text{AOLR} &= (1448.92 \text{ mg/l} * 5 \text{ l/d}) / (5.4704 \text{ m}^2/\text{g} * 1510 \text{ g}) * 10^{-6} \text{ Kg/mg} \\ &= 0.877 * 10^{-6} \text{ Kg-COD}/(\text{d} * \text{m}^2) \end{aligned}$$

4. ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรน้ำเสีย (Volumetric Organic Loading Rate, VOLR)

$$\text{VOLR (Kg-COD}/(\text{d} * \text{m}^3)) = \text{COD Loading} / \text{Vol of Wastewater in Reactor}$$

$$= \frac{(\text{Avg influent COD} * \text{Vol of Wastewater per day})}{(\text{Vol of Wastewater in Reactor})}$$

$$\begin{aligned} \text{VOLR} &= (1448.92 \text{ mg/l} * 5 \text{ l/d}) / (5 \text{ m}^3) * 10^{-6} \text{ Kg/mg} \\ &= 1.45 * 10^{-3} \text{ Kg-COD}/(\text{d} * \text{m}^3) \end{aligned}$$

5. มวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง

เป็นค่าที่บอกถึงความหนาแน่นของจุลินทรีย์บนพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง 1 หน่วย

$$\begin{aligned} \text{มวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง} &= \text{มวลจุลินทรีย์ในระบบ} / \text{พื้นที่ผิววัสดุตัวกลางทั้งหมด} \\ &(\text{mgVSS}/\text{m}^2) \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ 1.1

$$\begin{aligned} \text{มวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง} &= 23.3 \text{ gVSS} * 10^3 / (8260.30 \text{ m}^2) \\ &= 2.8 \text{ mgVSS}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

ตาราง ๑-1 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบเอสบีอาร์

การทดลอง ที่	ซีไอดีเข้า เฉลี่ย (mg/l)	พื้นที่ผิวตัว กลาง (m ²)	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ เชิงพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง Kg-COD/(d*m ²)	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ เชิงปริมาตรน้ำเสีย Kg-COD/(d*m ³)	มวล จุลินทรีย์ ในระบบ(gVSS)	มวลจุลินทรีย์ ต่อพื้นที่ผิว ตัวกลาง(mg-vss/m ²)	เอ็มแอลวีเอสเอส ในน้ำทิ้งเฉลี่ย (mg/l)	อายุสลัดจ์ (วัน)
1.1	1449	8260.30	8.77E-07	1.45E-03	23.3	2.8	280	16.6
1.2	1449		8.77E-07	1.45E-03	35.2	4.3	291	24.2
1.3	1440		8.72E-07	1.44E-03	37.9	4.6	162	46.8
2.1	2565		1.55E-06	2.57E-03	68.6	8.3	877	15.6
2.2	2542		1.54E-06	2.54E-03	65.7	8.0	660	19.9
2.3	2553		1.55E-06	2.55E-03	40.6	4.9	498	16.3
3.1	2581		1.56E-06	2.58E-03	37.6	4.6	492	15.3
3.2	2581		1.56E-06	2.58E-03	40.3	4.9	491	16.4
3.3	2581		1.56E-06	2.58E-03	38.5	4.7	500	15.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

วีเอสเอสและเอสเอส ที่เกาะติดบนวัสดุตัวกลาง
แต่ละการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-1 วิเอสเอสและเอสเอสที่เกาะติดบนวัสดุตัวกลางแต่ละการทดลอง

การทดลองที่	ตัวอย่างที่	A น้ำหนักวัสดุตัวกลาง อบแห้ง* (g Media)	B วิเอสเอสบน ตัวกลาง (g VSS)	C เอสเอสบน ตัวกลาง (g SS)	D=B/A g VSS/g Media	E=C/A g SS/g Media	F= AVG(D)*1000 Average of mg VSS/g Media	G=AVG(E)*1000 Average of mg SS/g Media
1.1	1	0.9521	0.0147	0.0179	0.0154	0.0189	15.4	18.8
	2	0.9487	0.0144	0.0178	0.0152	0.0187		
	3	0.9559	0.0148	0.0181	0.0155	0.0189		
1.2	1	0.9497	0.0220	0.0251	0.0232	0.0264	23.3	26.5
	2	0.9514	0.0224	0.0256	0.0235	0.0269		
	3	0.9456	0.0218	0.0247	0.0231	0.0262		
1.3	1	0.9512	0.0235	0.0302	0.0248	0.0317	25.1	32.0
	2	0.9634	0.0246	0.0310	0.0255	0.0322		
	3	0.9585	0.0241	0.0307	0.0251	0.0320		
2.1	1	0.9473	0.0429	0.0475	0.0453	0.0502	45.4	50.4
	2	0.9485	0.0431	0.0477	0.0454	0.0503		
	3	0.9501	0.0432	0.0482	0.0455	0.0508		
2.2	1	0.9485	0.0413	0.0466	0.0435	0.0491	43.5	49.0
	2	0.9521	0.0417	0.0469	0.0438	0.0493		
	3	0.9458	0.0408	0.0460	0.0432	0.0487		
2.3	1	0.9563	0.0259	0.0462	0.0271	0.0483	26.9	48.1
	2	0.9486	0.0253	0.0454	0.0267	0.0479		
	3	0.9517	0.0256	0.0458	0.0269	0.0482		
3.1	1	0.9529	0.0238	0.0442	0.0250	0.0464	24.9	46.3
	2	0.9535	0.0239	0.0443	0.0251	0.0465		
	3	0.9473	0.0234	0.0436	0.0247	0.0460		
3.2	1	0.9598	0.0258	0.0465	0.0267	0.0485	26.7	48.5
	2	0.9576	0.0253	0.0462	0.0264	0.0482		
	3	0.9613	0.0260	0.0469	0.0270	0.0488		
3.3	1	0.9525	0.0241	0.0450	0.0253	0.0473	25.5	47.4
	2	0.9576	0.0244	0.0453	0.0255	0.0474		
	3	0.9592	0.0246	0.0456	0.0257	0.0476		

* อบวัสดุตัวกลางที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปิยะชน สันดุษฎี เกิดเมื่อวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายเมื่อปี พ.ศ.2537 และได้เข้าศึกษาต่อในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยม อันดับ 2 ในปี 2541 ต่อมาในปี พ.ศ. 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย