



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนของอะซิติกต่อโพรพิโอนิกต่อ
การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา ชินเวชกิจวานิชย์

สิงหาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนของอะซิติกต่อโพรพิโอนิกต่อ การจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภา ชินเวชกิจวานิชย์

สังกัด

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

นักวิจัยที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมราช วันทวิน

สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5280068

ชื่อโครงการ: ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนของอะซิติกต่อโพรพิโอนิกต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภา ชินเวชกิจวานิชย์

อีเมล: sopa.chi@mahidol.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 16 มีนาคม 2552 ถึง 3 สิงหาคม 2558

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละอุณหภูมิ เติมน้ำเสียโดยใช้ถังปฏิกรณ์เอสบีอาร์ (sequencing batch reactor, SBR) จำนวน 2 ถัง ถังแรกเรียกถังปฏิกรณ์ Ac (Ac-rector) ใช้ น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นชนิดกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียวรวมกับนิวเทรียนบร็อท จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกจาก 100:0 เป็น 75:25 และ 50:50 สำหรับถังที่สองเรียกถังปฏิกรณ์ Pr (Pr-reactor) ใช้ น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นชนิดกรดโพรพิโอนิกแต่เพียงอย่างเดียวรวมกับนิวเทรียนบร็อท จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกจาก 0:100 เป็น 25:75 และ 50:50

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าร้อยละ 90 ทั้งในถังปฏิกรณ์ Ac และ ถังปฏิกรณ์ Pr โดยอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตาม ในการทดลองที่ใช้น้ำเสียมีส่วนผสมของกรดทั้งสองชนิด พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ สูงกว่าการทดลองที่ใช้เฉพาะกรดอะซิติกหรือกรดโพรพิโอนิกเท่านั้นอย่างเห็นได้ชัด จากร้อยละ 5.9 เป็นร้อยละ 9.9 และ 9.6 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในอัตราส่วน 100:0 75:25 และ 50:50 ตามลำดับ และ จากร้อยละ 6.4 เป็นร้อยละ 8.9 และ 9.5 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในอัตราส่วน 0:100 25:75 และ 50:50 ตามลำดับ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 52 – 57 ในถังปฏิกรณ์ Ac และร้อยละ 50 – 80 ในถังปฏิกรณ์ Pr โดยประสิทธิภาพสูงสุดพบในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 0:100 ทั้งนี้ อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกส่งผลกระทบต่อสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนี้ กล่าวคือ พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียมากขึ้น สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในช่วงร้อยละ 50 – 62 ในถังปฏิกรณ์ Ac และร้อยละ 60 – 78 ในถังปฏิกรณ์ Pr ทั้งนี้ อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกไม่แสดงแนวโน้มผลกระทบต่อประสิทธิภาพที่ชัดเจนนัก โดยประสิทธิภาพที่สูงกว่า พบในอัตราส่วน 75:25 ในถังปฏิกรณ์ Ac และอัตราส่วน 25:75 ใน

ถึงปฏิกรณ์ 25:75 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ไม่แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ในถึงปฏิกรณ์ Pr สูงกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac อาจกล่าวได้ว่า กรดโพรพิโอนิกส่งผลให้กลุ่มจุลชีพฟีเอโอมีบทบาทมากขึ้น หรือทำให้กลุ่มจุลชีพจีเอโอมีการทำงานลดลง หรือเป็นไปได้ทั้ง 2 อย่าง

ในการศึกษาี้ อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพชัดเจนที่สุด กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพดีกว่า โดยเฉพาะอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสค่อนข้างสูงในทุกอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ในการส่งเสริมกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมินี้ ควรใช้น้ำเสียที่มีส่วนผสมของกรดอะซิติกร่วมกับกรดโพรพิโอนิก (อัตราส่วนเท่าใดก็ได้) สำหรับที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส ควรใช้น้ำเสียที่มีส่วนผสมของกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติกในการเดินระบบ หรือควรเริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีเฉพาะกรดโพรพิโอนิก (ไม่มีกรดอะซิติก) ร่วมกับนิวเทรียนบรอต เพื่อคาดหวังให้ระบบมีกลุ่มจุลชีพฟีเอโอมากกว่ากลุ่มจีเอโอ แต่ไม่สามารถคาดหวังประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่สูงมากแบบเดียวกับที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสได้

คำหลัก : กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ กรดไขมันระเหยง่าย การสะสมฟอสฟอรัส กลัยโคเจน โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต กลุ่มจุลชีพฟีเอโอ กลุ่มจุลชีพจีเอโอ

Abstract

Project Code : MRG5280068

Project Title : Effects of Temperature and Acetic:Propionic Ratios on Enhanced Biological Phosphorus Removal

Investigator : Assist.Prof.Dr.Sopa Chinwetkitvanich

E-mail Address : sopa.chi@mahidol.ac.th

Project Period : March 16, 2009 to August 3, 2015

Abstract:

This study was to investigate the effects of temperature and ratios of acetic acid and propionic acid on biological phosphorus removal (BPR). Temperatures of 10, 20 and 30°C were designated for experimental operations. Each temperature was experimented by using two sequencing batch reactor (SBR) systems. The first SBR (Ac-reactor) was initially fed with acetic acid and nutrient broth, then, Ac:Pr ratios were adjusted from 100:0 to 75:25 and 50:50. The second SBR (Pr-reactor) was initially fed with propionic acid and nutrient broth, then, Ac:Pr ratios were adjusted from 0:100 to 25:75 and 50:50.

At lower temperature (10°C), phosphorus removal efficiencies were higher than 90% in both reactors while Ac:Pr ratios affected the efficiencies insignificantly. However, the mixture of acetic and propionic acids provided more intracellular phosphorus content than the feed with only acetic acid or propionic acid. That is, phosphorus contents of 5.9 % (dry weight) was found in the Ac:Pr ratio of 100:0, then, increased to 9.9 and 9.6 % (dry weight) when the Ac:Pr ratios were 75:25 and 50:50, respectively. As well as, phosphorus content of 6.4% (dry weight) was found in the Ac:Pr ratio of 0:100, then, increased to 8.9 and 9.5% (dry weight) when the Ac:Pr ratios were 25:75 and 50:50, respectively. In case of temperature of 20°C, phosphorus removal efficiencies were in the ranges of 52 – 57% in Ac-reactor and 50 – 80% in Pr-reactor, the highest efficiency of which occurred in the experiment with Ac:Pr ratio of 0:100. Obviously, the variation of Ac:Pr ratios did affected on phosphorus content in this experimental temperature of 20°C. That is, intracellular phosphorus content increased when proportion of propionic acid was raised. For 30°C experiment, phosphorus removal efficiencies were in the ranges of 50 – 62% in Ac-reactor and 60 – 78% in Pr-reactor. The effect of Ac:Pr ratios variation on phosphorus removal efficiencies was not clearly distinguished. The higher efficiencies of both reactors were

found in the experiments with Ac:Pr ratios of 75:25 and 25:75 in Ac-reactor and Pr-reactor, respectively. Also, intracellular phosphorus contents were not clearly related to the variation of Ac:Pr ratios in this temperature. Nevertheless, phosphorus contents found in Pr-reactor were higher than those in Ac-reactor, which possibly indicated more PAOs or less GAOs or both.

In conclusion, experimental temperature presented the most influence on biological phosphorus removal. That is, lower temperature could enhance better phosphorus removal efficiency. Especially, temperature of 10°C in this study showed high phosphorus removal efficiencies in every Ac:Pr ratios. In order to enhance BPR at this temperature, the mixture of acetic and propionic acids could be the approach. In case of higher temperatures of 20 and 30°C, the Ac:Pr ratios containing more propionic acid proportion should be recommended. As well as, the acclimatization with the feed containing only propionic and nutrient broth can be another option for expectation of more PAOs over GAOs in the system. However, high phosphorus removal efficiency similar to those in 10°C operation could not be anticipated.

Keywords : Biological phosphorus removal, Volatile fatty acid, Phosphorus accumulating organisms, PAOs, Glycogen accumulating organisms, GAOs, Glycogen, Polyhydroxyalkanoates

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักวิจัยพี่เลี้ยง รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช วันทวิน ในการให้คำปรึกษา การวิเคราะห์วิจารณ์ผลการวิจัยที่ช่วยเพิ่มพูนความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือและกำลังใจแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี โดยตลอดมา ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ศรีวิริยะรัตน์ ในความร่วมมือและมีส่วนร่วมในการวิเคราะห์และตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ ลุล่วงได้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ รวมทั้งบุคลากรที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ มาโดยตลอด งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

Executive summary

ชื่อโครงการ

ภาษาไทย : ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนอะซิติกต่อโพรพิโอนิกต่อการกำจัดธาตุอาหาร
ฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ภาษาอังกฤษ : Effects of Temperature and Acetic/Propionic Ratios on Enhanced Biological
Phosphorus Removal

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

น้ำเสียชุมชนมักมีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปะปนอยู่ในน้ำเสีย สาเหตุมาจากกิจกรรมการใช้น้ำต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การขับถ่ายของมนุษย์ที่มีธาตุอาหารไนโตรเจน การใช้สารซักฟอกต่างๆ ที่มีธาตุอาหารฟอสฟอรัส ธาตุอาหารทั้งสองจะถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ แต่ธาตุอาหารทั้งสองที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชนมักมีปริมาณเกินกว่าความต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วมีปริมาณหนาแน่นในแหล่งน้ำ ส่งผลต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้นได้ ดังนั้น กลุ่มประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรป จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่เกี่ยวข้องกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อลดปัญหาที่เกิดจากธาตุอาหารทั้งสอง สำหรับประเทศไทยนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังไม่พร้อมรองรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานครในปัจจุบันได้เริ่มมีการออกแบบให้ครอบคลุมถึงการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพไว้ด้วย

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กำจัดธาตุอาหารทั้งสองทางด้านชีวภาพ (Biological Nutrient Removal, BNR) ทำได้โดยการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เพื่อให้มีศักยภาพในการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพสูงกว่าระดับที่ใช้ในการเจริญเติบโตโดยทั่วไป สำหรับการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น ระบบจะทำงานโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เรียกว่า Phosphorus Accumulating Organisms (PAOs) ที่สามารถนำฟอสฟอรัสเข้าไปเก็บสะสมภายในเซลล์สูงกว่าความต้องการเพื่อการเจริญของเซลล์ ระบบอาจสามารถนำฟอสฟอรัสเข้าไปสะสมในเซลล์สูงถึงร้อยละ 4-12 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งโดยทั่วไป อาจพบเพียงประมาณร้อยละ 3-6 (น้ำหนักแห้ง) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2001) ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจำเป็นต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์กลุ่ม PAOs เจริญเติบโตได้ดี โดยต้องมีสภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic Conditions) สลับกับสภาวะแอโรบิก (Aerobic Conditions) และมีสารอินทรีย์อยู่ในรูปของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น (Short Chain Volatile Fatty Acids, VFAs) เพียงพอในสภาวะแอนแอโรบิก โดยสภาวะแอนแอโรบิกซึ่งเป็นสภาวะไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs (เนื่องจากไม่มีออกซิเจน) กรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นเหล่านี้จึงถูกนำไปเก็บสะสมเป็น

แหล่งพลังงานภายในเซลล์ของ PAOs ในรูปพีเอเอ (Polyhydroxyalkanoate, PHA) กระบวนการนี้จะมี การสลายสารโพลีฟอสเฟตที่สะสมอยู่ในเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป ATP ไปเป็น ADP เพื่อให้ได้ พลังงานออกมาใช้ในการสะสมสาร PHA ดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการคายฟอสฟอรัสออกมาจากปฏิกิริยา ฟอสฟอรัสที่ได้จะถูกปล่อยออกมาจากเซลล์มาอยู่ในน้ำ ดังนั้น ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำจึงเพิ่ม สูงขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก ต่อมาที่สภาวะแอโรบิกหรือสภาวะแอกซิก จุลชีพกลุ่ม PAOs จะใช้พีเอเอ ที่สะสมภายในเซลล์เพื่อการเจริญเติบโตและได้พลังงานออกมา พลังงานที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการดึงเอา ฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำกลับเข้าไปในเซลล์เพื่อสร้างเป็นแหล่งพลังงาน ATP ใหม่ PAOs จะถูกหมุนเวียนอยู่ ระหว่าง 2 สภาวะนี้ต่อเนื่องกันไปในระบบบำบัดน้ำเสีย ฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในเซลล์จะถูกกำจัด ออกไปจากระบบบำบัดน้ำเสียพร้อมกับการทิ้งสลัดจ์ในแต่ละวัน

ปัญหาหนึ่งที่ได้จากการศึกษาวิจัยทางด้านการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น มักมีประสิทธิภาพลดลงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิของน้ำนั้นสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ เป็นเพราะระบบมีจุลชีพอีกกลุ่มหนึ่งที่ เจริญเติบโตอยู่ เรียกว่า Glycogen Accumulating Organisms (GAOs) จุลชีพกลุ่มนี้สามารถใช้ สารอินทรีย์ที่สภาวะแอนแอโรบิกได้เช่นเดียวกันกับจุลชีพกลุ่ม PAOs กระบวนการใช้สารอินทรีย์ของจุลชีพ กลุ่ม GAOs จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ดังนั้น เมื่อระบบบำบัดน้ำเสียมี สภาวะที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพกลุ่มนี้ เช่น ที่สภาวะอุณหภูมิสูง ก็จะทำให้จุลชีพกลุ่มนี้มีอยู่ในระบบ ปริมาณที่สูง แต่ทำให้จุลชีพกลุ่ม PAOs ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเพราะต้องใช้พลังงานส่วนใหญ่ไปในการ บำรุงรักษาสภาพเซลล์ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้ง สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ถูกแย่งใช้ไปโดยจุลชีพกลุ่ม GAOs สุดท้ายจุลชีพกลุ่ม PAOs ก็จะหมดไปจากระบบ ส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียเกิดความล้มเหลวในการกำจัด ธาตุอาหารฟอสฟอรัส ดังนั้น ประเทศไทยจำเป็นต้องเริ่มมีกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสเพื่อให้ ได้น้ำทิ้งที่เป็นไปตามค่ามาตรฐานเพื่อการรักษาคุณภาพแหล่งน้ำที่ยั่งยืน การนำวิธีการกำจัดธาตุอาหาร ฟอสฟอรัสทางชีวภาพดังกล่าวมาใช้ในประเทศไทย ก็อาจมีประสิทธิภาพการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสได้ ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง อาจทำให้จำเป็นต้องไปใช้วิธีการ ทางเคมีในการกำจัดฟอสฟอรัส ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น และอัตราส่วนของประเภทกรด ไขมันที่ควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ GAOs
- เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และวิธีการส่งเสริมให้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการกำจัดธาตุ อาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ สามารถกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ อุณหภูมิสูง

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 20 30 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยในแต่ละอุณหภูมิการทดลอง ใช้ถึงปฏิกริยาในรูปแบบที่เรียกว่า Sequencing Batch RePrtror (SBR) จำนวน 2 ถึง เติระบบในชุดอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียได้ ถึงปฏิกริยาถึงที่ 1 (เรียกว่า Ac-reactor) เริ่มเติระบบโดยใช้น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่าย ลูกโซ่สั้นชนิดกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียวร่วมกับนิวเทรียนบรอต (nutrient broth) และถึงที่สองใช้น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นชนิดกรดโพรพิโอนิกแต่เพียงอย่างเดียวร่วมกับนิวเทรียนบรอต (เรียกว่า Pr-reactor) เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ แล้ว หลังจากนั้น จึงมีการเปลี่ยนอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นต่างประเภทกันในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยถึงที่ 1 ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกจาก 100:0 เป็น 75:25 และถึงที่ 2 ปรับอัตราส่วนจาก 0:100 เป็น 25:75 แล้วเติระบบเข้าสู่สถานะคงตัว และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับสถานะคงตัวครั้งที่ 2 นี้ จากนั้น จึงปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียเป็น 50:50 ทั้ง 2 ถึงปฏิกริยา แล้วเติระบบเข้าสู่สถานะคงตัวพร้อมทั้งวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ รายละเอียดการทดลองในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ E-1

ในการทดลองนี้ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดีรวมประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารนิวเทรียนบรอตเป็นแหล่งคาร์บอนร่วมกับกรดอะซิติกหรือกรดโพรพิโอนิก เพื่อลดปัญหาสลดจืดที่อาจเกิดขึ้นในกรณีที่น้ำเสียมีแหล่งคาร์บอนเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ ยังได้มีการเติมธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วย โดยเตรียมให้มีอัตราส่วน COD:N เท่ากับ 20 เพื่อให้เป็นธาตุอาหารเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์ใหม่ และ COD:P เท่ากับ 20 ซึ่งเป็นค่าแนะนำขั้นต่ำที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ รวมทั้งมีการเติมธาตุอาหารเสริมอื่นๆ รวมทั้งสภาพต่างเพื่อให้มีความเหมาะสมกับจุลชีพในระบบ

ตารางที่ E-1 รายละเอียดการทดลองในการศึกษานี้

การทดลองที่ 20°C		การทดลองที่ 30°C		การทดลองที่ 10°C	
ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr	ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr	ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr
Ac-1	100:0	Ac-4	100:0	Ac-7	100:0
Ac-2	75:25	Ac-5	75:25	Ac-8	75:25
Ac-3	50:50	Ac-6	50:50	Ac-9	50:50
Pr-1	0:100	Pr-4	0:100	Pr-7	0:100
Pr-2	25:75	Pr-5	25:75	Pr-8	25:75
Pr-3	50:50	Pr-6	50:50	Pr-9	50:50

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก

(1) การทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่ากรดไขมันระเหยง่ายและค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วและเกือบหมดไปภายในสภาวะแอนแอโรบิก และลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก แสดงถึงการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอาหารเป็นกรดไขมันระเหยง่ายถูกใช้สั่นจุลชีพสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ง่ายและย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ไม่ว่าจะเป็นถึงปฏิกรณ์ Ac ที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดอะซิติก ร่วมกับนิวเทรียนบรอต หรือถึงปฏิกรณ์ Pr ที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดโพรพิโอนิก ร่วมกับนิวเทรียนบรอต ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 90 ทุกการทดลอง สำหรับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกพบว่า ในถึงปฏิกรณ์ Ac มีฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะอยู่ในระดับ 1.5 – 1.7 เท่าของฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ ส่วนการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิก(มีการเติมอากาศ) มีพอสมควร โดยทำให้มีฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะอยู่ในช่วง 11 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกันทั้งสามการทดลอง (Ac-1, Ac-2 และ Ac-3) ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 57 53 และ 52 ตามลำดับ การสะสมฟิเอโซในเซลล์ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกพบสูงสุดร้อยละ 9.1 ในการทดลองอัตราส่วน 100:0 แล้วลดลงไปในการทดลองที่ใช้อัตราส่วนที่มีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสมเพิ่ม สำหรับกลัยโคเจนในเซลล์พบว่าเมื่อน้ำเสียมีส่วนของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้นพบพฤติกรรมของจุลชีพฟิเอโอ (PAOs) เพิ่มขึ้นมากกว่าในอัตราส่วน 100:0 เนื่องจากพบการสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกและการสังเคราะห์กลัยโคเจนกลับคืนในสภาวะแอโรบิกน้อยกว่า รวมทั้งพบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้ฟอสฟอรัสมากขึ้นเช่นกัน

ในถึงปฏิกรณ์ Pr พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกสูงกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac โดยมีฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกสูงกว่าในน้ำเสียที่ป้อนให้ 2 – 3 เท่า และยังพบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกมากกว่าเช่นกัน โดยพบฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะอยู่ในช่วง 5 – 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลอง Pr-1 และ Pr-2 ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 และ 78 ตามลำดับ ยกเว้นในการทดลอง Pr-3 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50) ที่พบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกน้อยกว่าอีกสองการทดลอง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 50 ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในถึงปฏิกรณ์ Ac กล่าวได้ว่าน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกมากกว่าหรือเท่ากับกรดโพรพิโอนิกทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยน้อยกว่า การสะสมฟิเอโซในเซลล์ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก พบค่อนข้างต่ำมากและต่ำกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac อย่างเห็นได้ชัดในทุกอัตราส่วน Ac:Pr ที่ใช้ ทั้งๆที่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ควรจะเป็นของจุลชีพกลุ่มฟิเอโอ (ที่คาดว่าน่าจะมีมากกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac) อาจเป็นผลเนื่องจากค่าฟิเอโซในน้ำ เนื่องจากน้ำเสียที่เตรียมโดยมีกรดโพรพิโอนิก มากกว่ากรดอะซิติกจะมีค่าฟิเอโซในน้ำสูงกว่าน้ำเสียที่มี

กรดอะซิติกมากกว่ากรดโพรพิโอนิก ทำให้จุลชีพต้องใช้พลังงานในการดักจับไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์มากกว่า เป็นเหตุให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกจึงสูงกว่า (Smolders et al., 1994; Filipe et al., 2001) นอกจากนี้ Liu และคณะ (2007) ได้รายงานถึงการสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกที่ลดลงเมื่อค่าพีเอชในน้ำสูงขึ้น ทำให้ผลผลิตสารรีดิวซิง NADH ได้น้อยลง จนอาจส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์เกิดได้น้อยลง สำหรับสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ พบว่าในอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (หรือมีการดักจับอะซิติกเพิ่มมากขึ้น) มีสัดส่วนกลัยโคเจนมากกว่าอัตราส่วนอื่นในถังปฏิกรณ์นี้ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวได้ว่า ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่เริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่ไม่มีกรดอะซิติกมีลักษณะที่แสดงว่า มีจุลชีพกลุ่มฟิเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) และการเพิ่มสัดส่วนของกรดอะซิติกในน้ำเสียส่งผลให้ค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนแปลงในแนวทางลดต่ำลง (เป็นกรดมากขึ้น) ทำให้การสลายกลัยโคเจนและการสะสมพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการรายงานของ Zhang และคณะ (2007)

(2) การทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้ พบการกำจัดซีโอดีเกือบหมดภายในสภาวะแอนแอโรบิก แล้วลดลงอีกเล็กน้อยหรือแทบจะคงที่ในสภาวะแอโรบิก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 90 ทุกการทดลอง สำหรับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก ในถังปฏิกรณ์ Ac พบฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะประมาณเกือบ 2 เท่าของฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสีย เว้นแต่ในการทดลอง Ac-6 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50) ที่ไม่พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก (ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะมีค่าใกล้เคียงกับค่าฟอสฟอรัสในน้ำเสีย) อย่างไรก็ตาม พบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกพอสมควร โดยในการทดลอง Ac-4 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0) และ Ac-6 มีฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะในช่วง 13 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยมีเพียงร้อยละ 50 ในขณะที่การทดลอง Ac-5 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25) มีการจับใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าเล็กน้อยทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 62 สอดคล้องกับการสะสมพีเอชเอภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกที่อัตราส่วน 50:50 (มีการดักจับโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้น) พบน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นอีกสองการทดลองอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้ง ยังพบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์สูงกว่าอัตราส่วนอื่นทั้งในสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก โดยเฉพาะที่ปลายสภาวะแอโรบิกที่พบค่อนข้างสูงมาก กล่าวได้ว่าในการทดลองที่อัตราส่วน 50:50 อาจมีกลุ่มจุลชีพฟิเอโอ (PAOs) น้อยมาก เนื่องจากแทบจะไม่มีปลดปล่อยฟอสฟอรัส การดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ใช้พลังงานจากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์เป็นส่วนใหญ่ โดยไม่ได้เก็บสะสมแหล่งคาร์บอนในรูปของสารพีเอชเอมากนัก แต่สะสมในรูปกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิก มากกว่า

ในถังปฏิกรณ์ Pr พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac เช่นกัน ฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกพบสูงกว่าในน้ำเสียที่ป้อนให้ประมาณ 2 – 3 เท่า คล้ายกับ

ในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกมากกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac เช่นเดียวกัน โดยพบฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลือน้อยที่สุดในการทดลอง Pr-5 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 25:75) พบอยู่ในช่วง 5 – 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 78 ในขณะที่อีกสองการทดลองมีฟอสฟอรัสละลายน้ำอยู่ในช่วง 10 – 11 และ 13 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 64 และ 60 ในการทดลอง Pr-4 และ Pr-6 (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 และ 50:50) ตามลำดับ นอกจากนี้ พบการสะสมสารพีเอชเอในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างต่ำมากหรือแทบจะไม่มี การสะสมเพิ่มขึ้นเลย ยกเว้นการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 50:50 พบการสะสมพีเอชเอมากกว่าอัตราส่วนอื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่มีสัดส่วนฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ควรจะเป็นของจุลชีพกลุ่มฟีเอโอ เห็นได้ชัดจากการสะสมกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิก(เติมอากาศ)ที่พบค่อนข้างสูงมาก ใกล้เคียงกับในการทดลองอัตราส่วน 50:50 ในถึงปฏิกรณ์ Ac ดังนั้น ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้ ถึงแม้จะเป็นถึงปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดโปรพิโอนิก พบว่าอาจมีกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) เป็นกลุ่มสำคัญร่วมด้วย โดยน่าจะมากกว่าในการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า และมีแนวโน้มที่จุลชีพกลุ่มจีเอโอจะแข่งขันได้ดีกว่าจุลชีพฟีเอโอ กล่าวคือ การเดินระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้มีกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิสูงนี้ ควรเริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีกรดโปรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิดิก (หรืออัตราส่วน 0:100 และ 25:75 ในการศึกษา)

(3) การทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนี้ พบว่าเกือบทุกการทดลองทั้งในถึงปฏิกรณ์ Ac และถึงปฏิกรณ์ Pr สามารถกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายและค่าซีโอดีได้เกือบหมดภายในสภาวะแอนแอโรบิก ด้วยอัตราที่ค่อนข้างช้ากว่าในการทดลองก่อนหน้านี้ (ทั้ง 20 และ 30 องศาเซลเซียส) อย่างชัดเจน เว้นแต่ในถึงปฏิกรณ์ Ac อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 (มีแต่กรดอะซิดิกร่วมกับนิวเทรียนบรอต) ที่พบค่าซีโอดีเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกยังเหลืออยู่ประมาณ 104 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในสภาวะแอโรบิกพบการกำจัดซีโอดีจนเกือบหมดในทุกการทดลองเช่นเดียวกัน เนื่องจากสารอาหารเป็นกรดไขมันระเหยง่ายถูกใช้สิ้น จุลชีพสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ง่ายและย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 90 ทุกการทดลอง

สำหรับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกพบว่า ในถึงปฏิกรณ์ Ac มีฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะอยู่ในระดับ 3 – 4.5 เท่าของฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ โดยในการทดลองที่อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อยกว่าการทดลองอื่นในถึงปฏิกรณ์ Ac นี้ (ประมาณ 3 เท่าของฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสีย) สอดคล้องกับการดูดซึมสารอินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิกที่ค่อนข้างช้าและยังเหลือค่าซีโอดีที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก อาจเป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำนี้ เซลล์จำเป็นต้องสลายฟอสเฟตจากสาร ATP ในเซลล์มากกว่าที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการดึงสารอาหารแบบเดียวกันและปริมาณเท่ากันเพื่อนำเข้าสู่เซลล์ หรือเป็นไปได้ว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac ที่มีแต่กรดอะซิดิกไม่มีกรด

โพรพิโอนิก (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100) มีจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) น้อยกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) ทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสถานะแอนแอโรบิกน้อย แต่กลุ่มจีเอโอที่อาจมีมากกว่าทำงานได้ช้าที่อุณหภูมิต่ำ จึงดูดซึมสารอาหารได้ค่อนข้างช้ากว่าในการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ในสถานะแอนแอโรบิกที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส ของถังปฏิกรณ์ Ac นี้ พบการจับใช้ฟอสฟอรัสค่อนข้างมากภายใน 2 ชั่วโมงแรกหลังจากเริ่มเติมอากาศ และเมื่อสิ้นสุดสถานะเติมอากาศนี้พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลืออยู่ค่อนข้างต่ำ โดยในการทดลองอัตราส่วน 100:0 พบฟอสฟอรัสในช่วง 1.3 – 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 93 ในขณะที่อัตราส่วน 75:25 และ 50:50 (มีการดโพรพิโอนิกผสมร่วมด้วย) พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสถานะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วงต่ำใกล้เคียงกัน คือ 0.4 – 1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 97 สำหรับการสะสมพีเอชเอในเซลล์พบสูงที่สุดในอัตราส่วน 100:0 (ไม่มีการดโพรพิโอนิก) แสดงว่าในการทดลองนี้มีการดูดซึมสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์แล้วใช้ไปการสะสมพีเอชเอมากกว่าในการทดลองที่อัตราส่วนอื่นๆ แต่การสังเคราะห์สารพีเอชเอจำเป็นต้องได้สารรีดิวซิง NADH ที่ได้มาจากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ ซึ่งพลังงานที่ได้รับระหว่างการสลายกลัยโคเจนอาจถูกเก็บกลับไปอยู่ในรูป ATP ทำให้มีการดึงฟอสฟอรัสบางส่วนกลับจนอาจส่งผลให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสสุทธิ (net P released) ในสถานะแอนแอโรบิกต่ำลงได้ อย่างไรก็ตาม กลัยโคเจนในเซลล์ตลอดวัฏจักรการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนี้ มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก โดยเห็นการลดลงในช่วงสถานะแอนแอโรบิกเล็กน้อย แล้วกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกันในสถานะแอโรบิก

ในถังปฏิกรณ์ Pr พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในการทดลองนี้สูงกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้าและสูงที่สุดในการศึกษานี้ ทำให้ฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสถานะสูงกว่าในน้ำเสียที่ป้อนให้ประมาณ 3.5 – 6 เท่า โดยในการทดลองที่อัตราส่วน 25:75 และ 50:50 พบฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสถานะแอนแอโรบิกใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 151- 188 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วน 0:100 พบฟอสฟอรัสที่ปลายสถานะในช่วง 107 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสถานะแอโรบิกอย่างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงหลังจากเริ่มมีการเติมอากาศในการทดลองทุกอัตราส่วน Ac:Pr ที่ใช้ในถังปฏิกรณ์นี้ โดยพบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสถานะอยู่ในช่วง 0.4 – 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 91 – 95 ในถังปฏิกรณ์นี้ พบการสะสมสารพีเอชเอในสถานะแอนแอโรบิกค่อนข้างต่ำและผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วน Ac:Pr ก็คล้ายกับในการทดลองที่อุณหภูมิอื่น คือ พบการสะสมพีเอชเอต่ำที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วน 0:100 และสัดส่วนพีเอชเอเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงกลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr นี้ พบน้อยมากหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักร และแทบจะไม่แตกต่างกันเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Ac:Pr อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกรดอะซิติกเป็นส่วนผสมร่วมกับกรดโพรพิโอนิกทำให้การปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ Pr มีมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสมีการปลดปล่อยและจับใช้มากที่สุด อาจกล่าวได้ว่า บทบาทของจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าร้อยละ 90 ไม่ว่าน้ำเสียจะมีอัตราส่วน Ac:Pr เป็นเท่าใดในการศึกษานี้ แต่มีแนวโน้มว่า

ถ้าใช้น้ำเสียที่มีส่วนผสมร่วมกันทั้งกรดอะซิติกและกรดโพธิ์ไอโตนิก อาจช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น ให้ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่เหลือจากการถูกจับใช้ในสภาวะแอนโรบิกค่อนข้างต่ำ และมีความสม่ำเสมอมากกว่าน้ำเสียที่มีเพียงกรดอะซิติกหรือกรดโพธิ์ไอโตนิกอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง

4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

(1) ในถังปฏิกรณ์ Ac

จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิต่ำที่ 10 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยที่ดีที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพต่ำกว่าและไม่แตกต่างกันมากนัก แตกต่างจากงานของ Janssen และคณะ (2002) ที่สรุปว่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า 30 องศาเซลเซียสมาก (ระหว่างร้อยละ 94 และ 50 ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในการศึกษานี้ยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ต่ำลง การผสมกรดโพธิ์ไอโตนิกในน้ำเสียป้อนเข้าระบบ (ในอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น สำหรับสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์พบค่อนข้างสูงในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในการทดลองที่มีกรดโพธิ์ไอโตนิกเป็นส่วนผสมในน้ำเสีย (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 และ 50:50) อย่างไรก็ตาม สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ที่ต่ำกว่า (ร้อยละ 5.9) ของการทดลองที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 ที่อุณหภูมิต่ำนี้ ก็ยังใกล้เคียงหรือมากกว่าสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ของการทดลองในอุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสพบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำที่สุด ทั้งนี้ สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ส่งผลต่อความสามารถในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกมากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในภาพรวม

สำหรับการสะสมพีเอชเอในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก พบกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่ามีการสะสมสารพีเอชเอมากกว่า โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส มีการสะสมสารพีเอชเอมากเมื่อมีแต่กรดอะซิติกในน้ำเสีย (อัตราส่วน 100:0) อาจเป็นไปได้ว่าการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ (10 และ 20 องศาเซลเซียส) เมื่อใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกอาจทำให้มีจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) มากขึ้น จึงแสดงพฤติกรรมสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกเพื่อได้พลังงานดังกรดไขมันระเหยเข้าเซลล์ ทำให้มีสารรีดิวซิง NADH (ผลผลิตจากการสลายกลัยโคเจน) เพียงพอสำหรับการสังเคราะห์สารพีเอชเอ ส่งผลให้มีการสะสมพีเอชเอมากกว่า อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิต่ำ (10 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง พบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ทั้งในสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกต่ำกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า (20 และ 30 องศาเซลเซียส) ดังนั้น ถึงแม้จุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) จำเป็นต้องมีกลัยโคเจนเป็นองค์ประกอบของเซลล์ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส แต่สัดส่วนกลัยโคเจนที่มากขึ้นอาจเป็นข้อบ่งชี้ในอีกทางหนึ่งว่าเป็นของจุลชีพจีเอโอ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกลัยโคเจนร่วมกับพารามิเตอร์อื่นๆ ภายในถังปฏิกรณ์ Ac ไม่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันในแต่ละอุณหภูมิ

การทดลอง อาจเนื่องมาจากสัดส่วนกลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) และกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ที่แตกต่างกันไป เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับกลุ่มจุลชีพในแต่ละอุณหภูมิในการศึกษานี้ ในงานวิจัยของ Lopez-Vazquez และคณะ (2009) ได้ระบุว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กลุ่มจีเอโอมีแนวโน้มที่จะโดดเด่นกว่ากลุ่มพีเอโอ การปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกให้เป็น 75:25 ร่วมกับการควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้เป็น 7.5 สามารถยับยั้งการเจริญของจุลชีพกลุ่มจีเอโอได้

(2) ในถังปฏิกรณ์ Pr

เห็นได้ชัดเลยว่าในถังปฏิกรณ์ Pr ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อัตราส่วน Ac:Pr ในน้ำเสียไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ไม่ว่าจะเป็นถังปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดอะซิติกมากหรือกรดโพรพิโอนิกมากก็ตาม และให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด สำหรับกรณีอุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสนั้น พบว่าถังปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่า (ถังปฏิกรณ์ Pr) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า สำหรับสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ พบค่อนข้างสูงในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในการทดลองที่มีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสมในน้ำเสีย (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 และ 50:50) ในขณะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสมีสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงที่สุดเมื่อน้ำเสียมีแต่กรดโพรพิโอนิก (อัตราส่วน 0:100) สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก เช่นเดียวกันกับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำที่สุด เมื่อน้ำเสียมีอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส กล่าวได้ว่ากระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (20 และ 30 องศาเซลเซียส) มีจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ร่วมกับกลุ่มพีเอโอ (PAOs) เมื่อน้ำเสียมีส่วนผสมของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้น จึงช่วยส่งเสริมให้การทำงานของกลุ่มพีเอโอเพิ่มขึ้นหรือลดการทำงานของกลุ่มจีเอโอ สอดคล้องกับ Broughton และคณะ (2008) ที่ระบุว่ากรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ให้ประสิทธิภาพดีกว่ากรดอะซิติก

สำหรับการสะสมพีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr นี้ แทบจะไม่พบการสะสมสารพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิกหรือมีค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ เมื่อน้ำเสียมีกรดอะซิติกเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น พบการสะสมพีเอชเอที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิการทดลอง สอดคล้องกับการสะสมสารพีเอชเอในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า กล่าวคือ การสะสมพีเอชเอในเซลล์ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะเพิ่มมากขึ้นถ้ามีน้ำเสียมีกรดอะซิติกเป็นส่วนผสม อาจเนื่องจากการดอะซิติกมีโครงสร้างโมเลกุลเล็กกว่ากรดโพรพิโอนิกเมื่อเทียบกับโมลของคาร์บอนในน้ำเสีย และเป็นวัตถุดิบโดยตรงที่จุลชีพสามารถนำไปใช้สังเคราะห์สารพีเอชเอ ทั้งนี้ สัดส่วนของกรดอะซิติกในแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์ (Chang et al., 2012; Puig et al., 2008; Hu et al., 2005) อย่างไรก็ตาม จุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ก็แสดงพฤติกรรมทำนองเดียวกันคือ ดูดซึมกรดไขมันระเหยเข้าสู่เซลล์แล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารพีเอชเอ เพียงแต่ไม่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ซึ่งในการศึกษานี้ การสะสมพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิก

ได้ค่อนข้างสูงในน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติก แต่ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย และสัดส่วน ฟอสฟอรัสในเซลล์ไม่สูงตาม เป็นไปได้ว่าการสะสมพีเอเอสูงนี้จะเป็นการทำงานของจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) มากกว่ากลุ่มพีเอโอ (PAOs) สำหรับสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีสัดส่วนต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac เว้นแต่ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนกลัยโคเจนในถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr ใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะแอนแอโรบิกและสภาวะแอโรบิก ในกรณีที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบการสะสมกลัยโคเจนที่ปลายสภาวะแอโรบิกเพิ่มขึ้นค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในการทดลองอัตราส่วน 50:50

Oehmen และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) และพีเอโอ (PAOs) ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ และได้ระบุว่าถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบให้มีลักษณะการทำงานของจุลชีพกลุ่มจีเอโออย่างเด่นชัดและเรียกชื่อกลุ่มจุลชีพนี้ว่า Competibacter จะมีการดูดซึมกรดโพรพิโอนิกได้น้อยกว่า ในขณะที่ระบบที่มีกลุ่มพีเอโออย่างเด่นชัดและเรียกชื่อกลุ่มจุลชีพนี้ว่า Accumulibacter สามารถดูดซึมทั้งกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกได้รวดเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด Chen และคณะ (2005) ได้เสนอข้อสรุปที่คล้ายคลึงกันว่า ถึงแม้จะเป็นกลุ่มพีเอโอในระบบที่ใช้ น้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกมาก่อนก็ตาม เมื่อป้อนกรดโพรพิโอนิกให้ กลุ่มจุลชีพในระบบก็ยังสามารถดูดซึมกรดโพรพิโอนิกได้ในอัตราเร็วใกล้เคียงกับการดูดซึมกรดอะซิติกที่เคยชินมาก่อน และถึงแม้จะเป็นกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) ที่คุ้นชินกับน้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิกมาก่อน เมื่อได้รับน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกก็สามารถใช้กรดอะซิติกได้รวดเร็วกว่าการใช้กรดโพรพิโอนิกที่คุ้นชิน นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่รายงานถึงการใช้กรดโพรพิโอนิกเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนช่วยในการเดินระบบอีบีอาร์ (EBPR) ให้ประสบความสำเร็จ (Pijuan และ คณะ, 2004; Thomas และ คณะ, 2003) ดังนั้น เมื่อน้ำเสียมีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสม จุลชีพกลุ่มพีเอโอมีโอกาสที่จะโดดเด่นกว่ากลุ่มจีเอโอเนื่องจากดูดซึมสารอาหาร(กรดโพรพิโอนิก)ได้เร็วกว่า

5. สรุปผลการทดลอง

ประเภทของกรดไขมันระเหยง่ายโซ่สั้น (short chain volatile fatty acid, SCVFA) ในการศึกษา นี้ ได้แก่ กรดโพรพิโอนิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) มีผลต่อกลุ่มจุลชีพในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยน้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอสส่งผลให้มีการทำงานของกลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) ปัจจัยเรื่องอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพชัดเจนที่สุด โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพดีกว่า โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูง (มากกว่าร้อยละ 90) ในทุกอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้กรดโพรพิโอนิกมากกว่าหรือเท่ากับกรดอะซิติก มีแนวโน้มทำให้มีการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ทุกอุณหภูมิการทดลอง สำหรับปัจจัยเรื่องอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) ที่แตกต่างกันส่งผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ แต่ผลกระทบแตกต่างกันระหว่างถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr และแตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิการทดลองด้วย กล่าวคือ

- ในกรณีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่ต่างกันทั้งในถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม การมีส่วนผสมของกรดทั้ง 2 ชนิดในน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนใด (75:25 50:50 และ 25:75) ล้วนทำให้สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงกว่า สัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์มีแนวโน้มต่ำกว่า การทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า แต่อัตราส่วน Ac:Pr ที่ปรับเปลี่ยนไม่ส่งผลชัดเจนต่อสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์
- สำหรับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าถังปฏิกรณ์ Ac มีพฤติกรรมของจุลชีพกลุ่มพีเอโอมากขึ้น เมื่อมีสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียมากขึ้น และในถังปฏิกรณ์ Pr เมื่อใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิก พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูง ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูง
- สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ Ac พบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกไม่สามารถสรุปแนวทางได้อย่างชัดเจนนัก ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแตกต่างกันมากนัก แต่ในถังปฏิกรณ์ Pr พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac แต่การเพิ่มสัดส่วนกรดอะซิติกในน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ Pr มีแนวโน้มที่อาจทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีประสิทธิภาพน้อยลง กลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) มีบทบาทน้อยลง ในขณะที่กลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) น่าจะมีเพิ่มมากขึ้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
Executive summary.....	ฉ
สารบัญ	ด
สารบัญตาราง	ถ
สารบัญภาพ	ท
บทที่ 1 : บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 : การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	5
2.2 จุลชีพกลุ่มที่สะสมโพลีฟอสเฟต (Polyphosphate Accumulating Organisms, PAOs).....	6
2.3 จุลชีพกลุ่มที่สะสมกลัยโคเจน (Glycogen Accumulating Organisms, GAOs)	7
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการแข่งขัน PAOs และ GAOs	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 : วิธีการวิจัย	15
3.1 แผนการทดลอง	15
3.2 น้ำเสียสังเคราะห์	17
3.3 ถังปฏิกริยาแบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch rePrtor, SBR)	18
3.4 การเดินระบบ SBR	19
3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	20

	หน้า
บทที่ 4 : ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	22
4.1 การทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	23
4.2 การทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	51
4.3 การทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส	76
4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพธิ์โอนิก	95
4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ	117
บทที่ 5 : สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	127
เอกสารอ้างอิง	130
ภาคผนวก.....	134

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์	17
ตารางที่ 3.2 วัฏจักรการทำงานของระบบ SBR	20
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และวิธีการตรวจวัดตัวอย่าง	21
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดลองในการศึกษา	22

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ขอบเขตงานวิจัยและลำดับแผนการทดลอง	4
รูปที่ 2.1	การสร้างและการสลาย พีเอชเอ กลัยโคเจน และ โพลีฟอสเฟตของจุลชีพกลุ่ม PAOs.....	7
รูปที่ 2.2	การสร้างและการสลาย พีเอชเอ และกลัยโคเจนของจุลชีพกลุ่ม GAOs.....	8
รูปที่ 3.1	รายละเอียดและลำดับการทดลอง.....	16
รูปที่ 3.2	รายละเอียดถึงปฏิกิริยาในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส	18
รูปที่ 3.3	รายละเอียดถึงปฏิกิริยาในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	19
รูปที่ 3.4	ผังการทำงานของระบบเอสปีอาร์แบบแอนโอบิก/แอโรบิก.....	20
รูปที่ 4.1-1	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)	23
รูปที่ 4.1-2	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)	24
รูปที่ 4.1-3	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0).....	24
รูปที่ 4.1-4	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)....	25
รูปที่ 4.1-5	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)	25
รูปที่ 4.1-6	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)	26
รูปที่ 4.1-7	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0).....	26
รูปที่ 4.1-8	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)	27
รูปที่ 4.1-9	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)	28
รูปที่ 4.1-10	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)	29
รูปที่ 4.1-11	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25).....	29
รูปที่ 4.1-12	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)....	30
รูปที่ 4.1-13	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)	30
รูปที่ 4.1-14	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)	31
รูปที่ 4.1-15	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25).....	31
รูปที่ 4.1-16	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)	32
รูปที่ 4.1-17	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	33

รูปที่ 4.1-18	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	34
รูปที่ 4.1-19	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	34
รูปที่ 4.1-20	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)....	35
รูปที่ 4.1-21	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	35
รูปที่ 4.1-22	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	36
รูปที่ 4.1-23	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	36
รูปที่ 4.1-24	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	37
รูปที่ 4.1-25	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100).....	38
รูปที่ 4.1-26	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)	39
รูปที่ 4.1-27	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)	39
รูปที่ 4.1-28	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)....	40
รูปที่ 4.1-29	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100).....	40
รูปที่ 4.1-30	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)	41
รูปที่ 4.1-31	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100).....	41
รูปที่ 4.1-32	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)	42
รูปที่ 4.1-33	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75).....	43
รูปที่ 4.1-34	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)	43
รูปที่ 4.1-35	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)	44
รูปที่ 4.1-36	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)....	45
รูปที่ 4.1-37	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75).....	45
รูปที่ 4.1-38	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)	45
รูปที่ 4.1-39	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75).....	46
รูปที่ 4.1-40	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)	46
รูปที่ 4.1-41	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	47
รูปที่ 4.1-42	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	47
รูปที่ 4.1-43	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	48

รูปที่ 4.1-44	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	49
รูปที่ 4.1-45	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	49
รูปที่ 4.1-46	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)	49
รูปที่ 4.1-47	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	50
รูปที่ 4.1-48	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50).....	50
รูปที่ 4.2-1	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)	51
รูปที่ 4.2-2	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)	52
รูปที่ 4.2-3	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0).....	52
รูปที่ 4.2-4	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)....	53
รูปที่ 4.2-5	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)	53
รูปที่ 4.2-6	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)	54
รูปที่ 4.2-7	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0).....	55
รูปที่ 4.2-8	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)	55
รูปที่ 4.2-9	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)	56
รูปที่ 4.2-10	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)	56
รูปที่ 4.2-11	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25).....	57
รูปที่ 4.2-12	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)....	58
รูปที่ 4.2-13	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)	58
รูปที่ 4.2-14	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)	58
รูปที่ 4.2-15	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25).....	59
รูปที่ 4.2-16	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)	59
รูปที่ 4.2-17	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	60
รูปที่ 4.2-18	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	60
รูปที่ 4.2-19	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50).....	61
รูปที่ 4.2-20	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)....	62
รูปที่ 4.2-21	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	62

รูปที่ 4.2-22	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	62
รูปที่ 4.2-23	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	63
รูปที่ 4.2-24	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	63
รูปที่ 4.2-25	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	64
รูปที่ 4.2-26	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	64
รูปที่ 4.2-27	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	65
รูปที่ 4.2-28	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	65
รูปที่ 4.2-29	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	66
รูปที่ 4.2-30	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	66
รูปที่ 4.2-31	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	67
รูปที่ 4.2-32	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)	67
รูปที่ 4.2-33	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	68
รูปที่ 4.2-34	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	68
รูปที่ 4.2-35	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	69
รูปที่ 4.2-36	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	69
รูปที่ 4.2-37	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	70
รูปที่ 4.2-38	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	70
รูปที่ 4.2-39	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	71
รูปที่ 4.2-40	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)	71
รูปที่ 4.2-41	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	72
รูปที่ 4.2-42	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	72
รูปที่ 4.2-43	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	73
รูปที่ 4.2-44	ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	73
รูปที่ 4.2-45	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	74
รูปที่ 4.2-46	ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	74
รูปที่ 4.2-47	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)	75

รูปที่ 4.2-48	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50).....	75
รูปที่ 4.3-1	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)	77
รูปที่ 4.3-2	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)	77
รูปที่ 4.3-3	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0).....	77
รูปที่ 4.3-4	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)	78
รูปที่ 4.3-5	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0).....	79
รูปที่ 4.3-6	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)	79
รูปที่ 4.3-7	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)	80
รูปที่ 4.3-8	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)	80
รูปที่ 4.3-9	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25).....	81
รูปที่ 4.3-10	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)	82
รูปที่ 4.3-11	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25).....	82
รูปที่ 4.3-12	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)	82
รูปที่ 4.3-13	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)	83
รูปที่ 4.3-14	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)	84
รูปที่ 4.3-15	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	84
รูปที่ 4.3-16	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)	84
รูปที่ 4.3-17	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	85
รูปที่ 4.3-18	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)	85
รูปที่ 4.3-19	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)	86
รูปที่ 4.3-20	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)	86
รูปที่ 4.3-21	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)	87
รูปที่ 4.3-22	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100).....	87
รูปที่ 4.3-23	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100).....	88
รูปที่ 4.3-24	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)	88
รูปที่ 4.3-25	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)	89

รูปที่ 4.3-26	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)	89
รูปที่ 4.3-27	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)	90
รูปที่ 4.3-28	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75).....	90
รูปที่ 4.3-29	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75).....	91
รูปที่ 4.3-30	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75).....	91
รูปที่ 4.3-31	ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	92
รูปที่ 4.3-32	ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	92
รูปที่ 4.3-33	ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)	93
รูปที่ 4.3-34	ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	93
รูปที่ 4.3-35	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	94
รูปที่ 4.3-36	ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50).....	94
รูปที่ 4.4-1	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	95
รูปที่ 4.4-2	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	96
รูปที่ 4.4-3	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	97
รูปที่ 4.4-4	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	98
รูปที่ 4.4-5	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	99
รูปที่ 4.4-6	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	100
รูปที่ 4.4-7	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	101
รูปที่ 4.4-8	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C	102
รูปที่ 4.4-9	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	103
รูปที่ 4.4-10	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	104
รูปที่ 4.4-11	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	105
รูปที่ 4.4-12	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	105
รูปที่ 4.4-13	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	106
รูปที่ 4.4-14	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	107
รูปที่ 4.4-15	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	108

รูปที่ 4.4-16	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C	109
รูปที่ 4.4-17	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	110
รูปที่ 4.4-18	ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	111
รูปที่ 4.4-19	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	112
รูปที่ 4.4-20	ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	112
รูปที่ 4.4-21	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	113
รูปที่ 4.4-22	พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	114
รูปที่ 4.4-23	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	115
รูปที่ 4.4-24	กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C	116
รูปที่ 4.5-1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยในถังปฏิกรณ์ Ac	117
รูปที่ 4.5-2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยในถังปฏิกรณ์ Pr	118
รูปที่ 4.5-3	เปรียบเทียบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac	120
รูปที่ 4.5-4	เปรียบเทียบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr	121
รูปที่ 4.5-5	เปรียบเทียบสัดส่วนพีเอชเอในเซลล์(*สภาวะแอนแอโรบิก)ในถังปฏิกรณ์ Ac	122
รูปที่ 4.5-6	เปรียบเทียบสัดส่วนพีเอชเอในเซลล์(*สภาวะแอนแอโรบิก)ในถังปฏิกรณ์ Pr	123
รูปที่ 4.5-7	เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic) ในถังปฏิกรณ์ Ac	124
รูปที่ 4.5-8	เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอโรบิก (aerobic) ในถังปฏิกรณ์ Ac	125
รูปที่ 4.5-9	เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic) ในถังปฏิกรณ์ Pr	126
รูปที่ 4.5-10	เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอโรบิก (aerobic) ในถังปฏิกรณ์ Pr	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

น้ำเสียชุมชนมักมีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปะปนอยู่ในน้ำเสีย สาเหตุมาจากกิจกรรมการใช้น้ำต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การขับถ่ายของมนุษย์ที่มีธาตุอาหารไนโตรเจน การใช้สารซักฟอกต่างๆ ที่มีธาตุอาหารฟอสฟอรัส น้ำเสียเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ธาตุอาหารทั้งสองจะถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพราะว่าจุลินทรีย์มีองค์ประกอบของเซลล์ที่เป็นไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ประมาณร้อยละ 8-12 และ 1.0-2.5 (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) อย่างไรก็ตาม ธาตุอาหารทั้งสองที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชนมักมีปริมาณเกินกว่าความต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ธาตุอาหารส่วนเกินเหล่านี้เมื่อถูกปล่อยให้ออกจากระบบบำบัดสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้งธรรมชาติ โดยเฉพาะแหล่งรองรับน้ำที่เป็นแหล่งน้ำปิด เช่น ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ อาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือเป็นสภาวะที่แหล่งน้ำอุดมไปด้วยธาตุอาหาร ทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วมีปริมาณหนาแน่นในแหล่งน้ำ เมื่อพืชน้ำและสาหร่ายตายลงก็จะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดความจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำนั้นอย่างมาก เป็นผลให้น้ำเกิดการเน่าเสียได้จนกลายเป็นปัญหาคูณภาพของแหล่งน้ำนั้น จากการศึกษาของศาสตราจารย์ Randall (1992) พบว่า ธาตุอาหารฟอสฟอรัสปริมาณ 1 กิโลกรัมสามารถกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในปริมาณ 111 กิโลกรัมชีวมวล เทียบเท่ากับ 138 กิโลกรัมในรูปของซีโอดี ส่วนธาตุอาหารไนโตรเจนปริมาณ 1 กิโลกรัม จะทำให้เกิดสาหร่ายปริมาณ 16 กิโลกรัมชีวมวล เทียบเท่ากับปริมาณซีโอดี 20 กิโลกรัมในรูปของซีโอดี โดยสมมติว่าสูตรโครงสร้างของสาหร่ายเป็น $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ โดยปกติ น้ำเสียชุมชนของประเทศสหรัฐอเมริกามีค่าซีโอดีประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรและธาตุอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจนประมาณ 6 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้น ปริมาณธาตุอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเหล่านี้ เมื่อปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะก่อให้เกิดสาหร่ายเทียบเท่าสารอินทรีย์ 828 และ 600 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ปริมาณซีโอดีที่เกิดจากธาตุอาหารทั้งสองมีค่าสูงกว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในน้ำเสียชุมชนเสียอีก ดังนั้น กลุ่มประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรป จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่เกี่ยวข้องกับธาตุอาหารดังกล่าวอย่างชัดเจนและเข้มงวด เพื่อลดปัญหาที่เกิดมาจากธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

สำหรับประเทศไทยนั้น กรมควบคุมมลพิษเพิ่งมีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเมื่อปี 2553 โดยกำหนดค่าไนโตรเจนทั้งหมดไม่เกิน 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ถึงแม้ว่าธาตุอาหารฟอสฟอรัสอาจก่อให้เกิดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีมากกว่าธาตุอาหารไนโตรเจนก็ตาม แต่ค่า

มาตรฐานฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของประเทศไทยนี้ ยังเข้มงวดน้อยกว่าบางประเทศที่กำหนดให้ฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งไม่เกิน 1 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังไม่พร้อมรองรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ทั้งนี้ คาดว่าประเทศไทยอาจมีมาตรฐานที่เข้มงวดเช่นเดียวกับประเทศอื่นในอนาคตต่อไปเพื่อการรักษาคุณภาพแหล่งน้ำที่ยั่งยืนต่อไป อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานครตามมาตรการแก้ไขปัญหาระยะยาว ในปัจจุบันได้เริ่มมีการออกแบบให้ครอบคลุมการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพไว้ด้วย เช่น โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม โรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ (สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, 2552)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กำจัดธาตุอาหารทั้งสองทางด้านชีวภาพ (Biological Nutrient Removal, BNR) ทำได้โดยการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เพื่อให้มีศักยภาพในการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพสูงกว่าระดับที่ใช้ในการเจริญเติบโตโดยทั่วไป ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพ (Biological Nitrogen Removal) และกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (Biological Phosphorus Removal หรือ BPR) สำหรับกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น ระบบจะทำงานโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เรียกว่า Phosphorus Accumulating Organisms (PAOs) ที่สามารถนำฟอสฟอรัสเข้าไปเก็บสะสมภายในเซลล์สูงกว่าความต้องการเพื่อการเจริญของเซลล์ ระบบอาจสามารถนำฟอสฟอรัสเข้าไปสะสมในเซลล์สูงถึงร้อยละ 4-12 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งโดยทั่วไป อาจพบเพียงประมาณร้อยละ 3-6 (น้ำหนักแห้ง) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจำเป็นต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์กลุ่ม PAOs เจริญเติบโตได้ดี โดยต้องมีสภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic Conditions) สลับกับสภาวะแอโรบิก (Aerobic Conditions) และมีสารอินทรีย์อยู่ในรูปของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น (Short Chain Volatile Fatty Acids, VFAs) เพียงพอในสภาวะแอนแอโรบิก โดยสภาวะแอนแอโรบิกซึ่งเป็นสภาวะไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs (เนื่องจากไม่มีออกซิเจน) กรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นเหล่านี้จึงถูกนำไปเก็บสะสมเป็นแหล่งพลังงานภายในเซลล์ของ PAOs ในรูปพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA) กระบวนการนี้จะมีการสลายสารโพลีฟอสเฟตที่สะสมอยู่ในเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป ATP ไปเป็น ADP เพื่อให้ได้พลังงานออกมาใช้ในการสะสมสาร PHA ดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการคายฟอสฟอรัสออกมาจากปฏิกิริยา ฟอสฟอรัสที่ได้จะถูกปล่อยออกมาจากเซลล์มาอยู่ในน้ำ ดังนั้น ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก ต่อมาที่สภาวะแอโรบิกหรือสภาวะแอนอกซิก จุลินทรีย์กลุ่ม PAOs จะใช้พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอตเพื่อการเจริญเติบโตและได้พลังงานออกมา พลังงานที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการดึงเอาฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำกลับเข้าไปในเซลล์เพื่อสร้างเป็นแหล่งพลังงาน ATP ใหม่ PAOs จะถูกหมุนเวียนอยู่ระหว่าง 2 สภาวะนี้ต่อเนื่องกันไปในระบบบำบัดน้ำเสีย ฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในเซลล์จะถูกกำจัดออกไปจากระบบบำบัดน้ำเสียพร้อมกับการทิ้งสลัดจ์ในแต่ละวัน

ปัญหาหนึ่งที่พบได้จากการศึกษาวิจัยทางด้านการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น มักมีประสิทธิภาพลดลงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิของน้ำนั้นสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ เป็นเพราะระบบมีจุลชีพอีกกลุ่มหนึ่งที่เจริญเติบโตอยู่ เรียกว่า Glycogen Accumulating Organisms (GAOs) จุลชีพกลุ่มนี้สามารถใช้สารอินทรีย์ที่สภาวะแอนแอโรบิกได้เช่นเดียวกับจุลชีพกลุ่ม PAOs กระบวนการใช้สารอินทรีย์ของจุลชีพกลุ่ม GAOs จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ดังนั้น เมื่อระบบบำบัดน้ำเสียมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพกลุ่มนี้ เช่น ที่สภาวะอุณหภูมิสูง ก็จะทำให้จุลชีพกลุ่มนี้มีอยู่ในระบบปริมาณที่สูง แต่ทำให้จุลชีพกลุ่ม PAOs ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเพราะต้องใช้พลังงานส่วนใหญ่ไปในการบำรุงรักษาสภาพเซลล์ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้ง สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ถูกแย่งใช้ไปโดยจุลชีพกลุ่ม GAOs สุดท้ายจุลชีพกลุ่ม PAOs ก็จะหมดไปจากระบบ ส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียเกิดความล้มเหลวในการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัส ดังนั้น ประเทศไทยจำเป็นต้องเริ่มมีกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่เป็นไปตามค่ามาตรฐานเพื่อการรักษาคุณภาพแหล่งน้ำที่ยั่งยืน การนำวิธีการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพดังกล่าวมาใช้ในประเทศไทย ก็อาจมีประสิทธิภาพการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง อาจทำให้จำเป็นต้องไปใช้วิธีการทางเคมีในการกำจัดฟอสฟอรัส ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

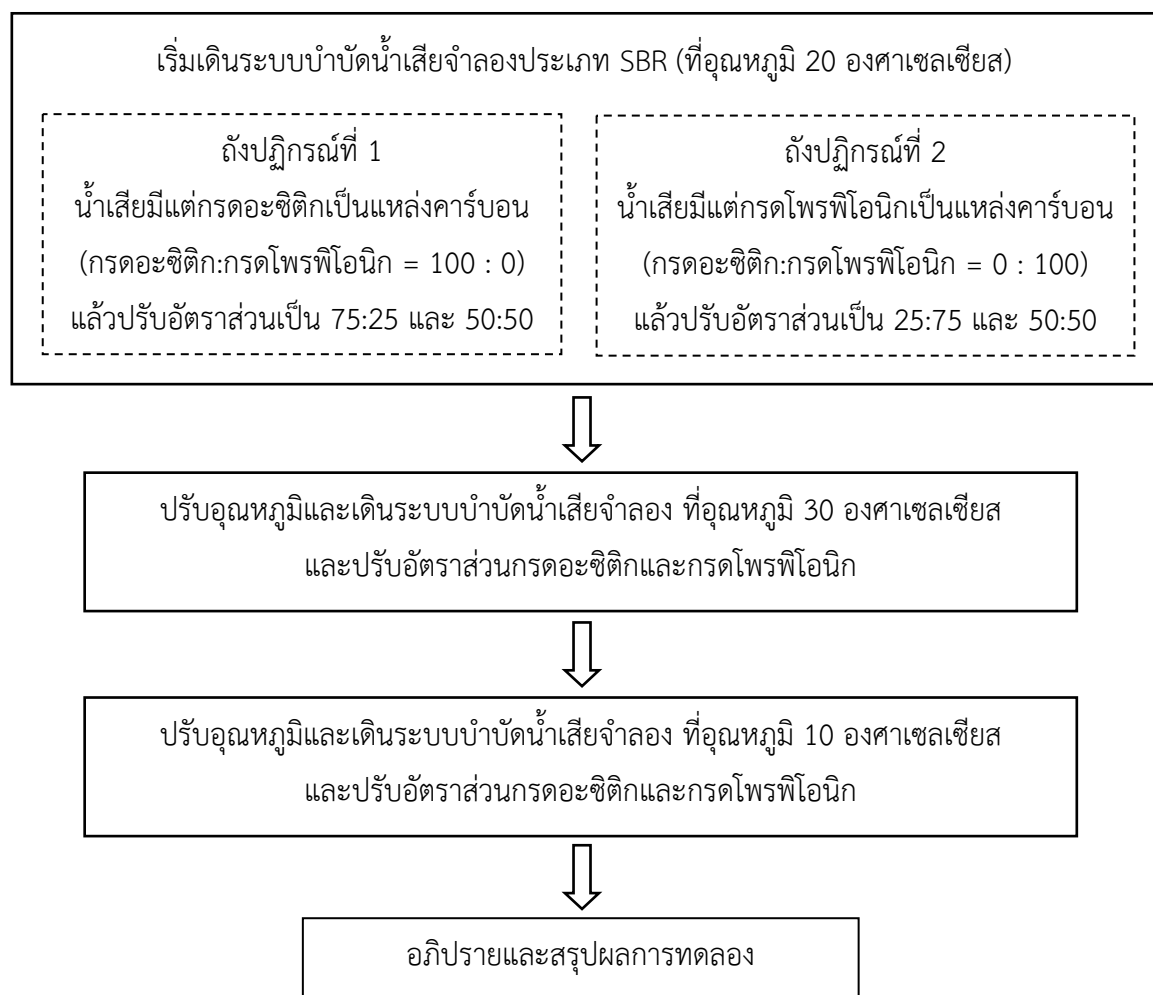
- เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น และอัตราส่วนของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นที่ควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีพ GAOs
- เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และวิธีการส่งเสริมให้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียจำลองประเภท Sequencing Batch RePrtor (SBR) จำนวน 2 ระบบ ระบบทั้งสองจะถูกเดินระบบในชุดอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียได้ ระบบแรกจะใช้น้ำเสียที่มีประเภทกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว ระบบที่สองจะใช้น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกแต่เพียงอย่างเดียว อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองเป็น 20 องศาเซลเซียส เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่แล้ว จะมีการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ของระยะการทดลองนั้นอย่างน้อย 3 ชุด หลังจากนั้น จะมีการเพิ่มอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นต่างประเภทกันตามอัตราส่วนที่กำหนด หลังจากครบทุกอัตราส่วนแล้ว การทดลองจะปรับอุณหภูมิเป็น 30 องศาเซลเซียส และแบ่งเชื้อจากระบบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสแยกเก็บรักษาไว้เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นสำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ

10 องศาเซลเซียสต่อไป โดยแต่ละอุณหภูมิจะมีการทดลองที่ทุกๆ อัตราส่วนเหมือนกับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ลำดับแผนการทดลองแสดงในรูปที่ 1

ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ที่สนใจในการศึกษาของโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ ประเภทของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น อัตราส่วนผสมของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น และอุณหภูมิ โดยระดับ (Level) ของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น มี 2 ระดับ คือ กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก สำหรับระบบที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว ใช้ระดับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก 100:0, 75:25 และ 50:50 ส่วนระบบที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดโพรพิโอนิกเพียงอย่างเดียว ใช้ระดับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก 0:100, 25:75 และ 50:50 ส่วนตัวแปรที่เป็นอุณหภูมิมี 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.1 ขอบเขตงานวิจัยและลำดับแผนการทดลอง

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่ปะปนอยู่ในแหล่งน้ำ ถ้ามีปริมาณมากเพียงพอพร้อมกับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม จะก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้นๆ การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากน้ำเสียชุมชน หรือน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อลดปริมาณการระบายฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำมากเกินไป วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสในโรงบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (Enhanced biological phosphorus removal, EBPR) เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจและศึกษาอย่างแพร่หลาย การทำงานของระบบนี้ต้องควบคุมให้เป็นสภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic conditions) สลับกับสภาวะแอโรบิก (Aerobic conditions) ซึ่งเป็นสภาวะที่คัดเลือกให้จุลชีพกลุ่มที่สะสมโพลีฟอสเฟต (Polyphosphate Accumulating organisms, PAOs) เจริญได้ดีกว่ากลุ่มจุลชีพอื่น (Seviour และคณะ, 2003) โดยในสภาวะแอนแอโรบิก จุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถจับใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น (Short chain volatile fatty acids, VFAs) เข้าสู่ภายในเซลล์แล้วเปลี่ยนรูปเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในรูปของสารโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตหรือพีเอชเอ (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) เก็บสะสมไว้ภายในเซลล์ ในกระบวนการนี้ จำเป็นต้องมีการสลายสารโพลีฟอสเฟตที่สะสมอยู่ภายในเซลล์ เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการดึงกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นเข้าสู่เซลล์ ทำให้เกิดการคายฟอสเฟตออกนอกเซลล์มาอยู่ในน้ำ ดังนั้น ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก (มีออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย) หรือสภาวะแอนอกซิก (มีไนโตรเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย) จุลชีพกลุ่ม PAOs จะสลายพีเอชเอซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนที่สะสมไว้ภายในเซลล์ร่วมกับสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย เพื่อการเจริญของเซลล์และเก็บสะสมพลังงานในรูป ATP ไว้ภายในเซลล์ต่อไป ในระหว่างกระบวนการสร้างสาร ATP จะมีการจับใช้ฟอสเฟตที่อยู่ในน้ำกลับเข้าไปในเซลล์ โดยจุลชีพกลุ่ม PAOs จะมีความสามารถในการจับใช้ฟอสเฟตได้มากกว่าปริมาณที่คายออกมาในสภาวะแอนแอโรบิก จึงทำให้ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำลดลงจากเดิม ทั้งนี้ สลัดจ์ของจุลชีพกลุ่ม PAOs จะถูกหมุนเวียนอยู่ระหว่าง 2 สภาวะนี้ต่อเนื่องกันไป ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกไปจากระบบบำบัดน้ำเสียพร้อมกับการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินในแต่ละวัน

2.1.1 สภาวะแอนแอโรบิก

ในสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีออกซิเจนหรือไนโตรเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนสุดท้าย แบคทีเรียกลุ่มแพคคัลเทียที่จะสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กจำพวกกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสและกระบวนการสร้างกรด จุลชีพในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถนำสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจำพวกกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น (VFAs) ไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ได้เลย เช่นเดียวกัน จุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถจับใช้กรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นได้เลยโดยส่งผ่านเซลล์เมมเบรนและเก็บสะสมเป็นแหล่งคาร์บอนในเซลล์ในรูปของพืเอชเอ ชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งสามารถเข้าสู่กระบวนการสร้างพืเอชเอในเซลล์ได้ทันที ในระหว่างกระบวนการนี้ จะมีการสลายสารโพลีฟอสเฟตและกลัยโคเจนที่สะสมไว้ในเซลล์ เกิดการเปลี่ยนรูปสาร ATP ไปเป็น ADP ทำให้ได้พลังงานออกมาใช้ในการจับใช้สารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ ส่งผลให้เกิดการคายฟอสเฟตออกมาจากปฏิกิริยาและถูกปล่อยออกนอกเซลล์มาอยู่ในน้ำ ดังนั้น ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก

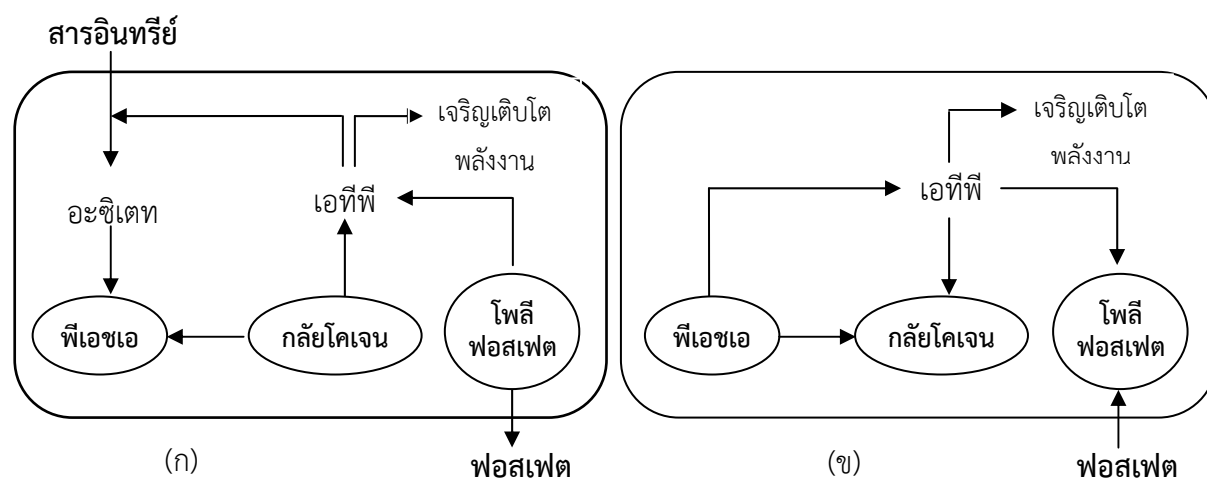
2.1.2 สภาวะแอนแอโรบิก/แอนอกซิก

ในสภาวะแอนแอโรบิก/แอนอกซิก เมื่อมีสารรับอิเล็กตรอนสุดท้ายประเภทออกซิเจนหรือไนโตรเจนในระบบ จุลชีพกลุ่ม PAOs จะสลายพืเอชเอที่สะสมไว้ในเซลล์ เพื่อให้ได้แหล่งคาร์บอนที่จะใช้ในกระบวนการหายใจ ในสภาวะนี้เซลล์จะจับใช้สารจำพวกออร์โธฟอสเฟตในน้ำเข้าภายในเซลล์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเปลี่ยนรูปสาร ADP ให้เป็นสาร ATP ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ต่อไป ในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องไม่มีแหล่งคาร์บอนจากภายนอกเซลล์ การจับใช้ฟอสเฟตจากน้ำเข้าสู่เซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก/แอนอกซิกนี้ มักจะมีอัตราที่มากกว่าการคายฟอสเฟตในสภาวะแอนแอโรบิกก่อนหน้านี้ จึงทำให้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำได้ กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเกี่ยวข้องเป็นสำคัญกับแหล่งคาร์บอนและพลังงานภายในเซลล์ของจุลชีพกลุ่ม PAOs 3 แหล่ง ได้แก่ พืเอชเอ โพลีฟอสเฟต และ กลัยโคเจน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันระหว่างสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก เมื่อกลุ่มจุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถเจริญได้ดีในระบบจะทำให้กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีประสิทธิภาพดี ส่งผลให้มีการสะสมสารโพลีฟอสเฟตในเซลล์สูงเช่นเดียวกัน (Sperling และคณะ, 2005)

2.2 จุลชีพกลุ่มที่สะสมโพลีฟอสเฟต (Polyphosphate Accumulating Organisms, PAOs)

กลุ่มจุลชีพที่มีความสำคัญในระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) เป็นอย่างมาก คือจุลชีพกลุ่ม PAOs ที่สามารถจับใช้สารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก โดยนำเข้ามาสะสมไว้ในเซลล์อยู่ในรูปพืเอชเอ ส่งผลให้ในสภาวะแอนแอโรบิกมีการคายฟอสเฟตออกมาในน้ำ

ต่อมาในสภาวะแอโรบิกจะมีการสลายแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ พร้อมทั้งมีการจับใช้ฟอสเฟตเข้าไปในเซลล์ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสร้างและการสลาย พีเอชเอ กลัยโคเจน และ โพลีฟอสเฟตของจุลชีพกลุ่ม PAOs

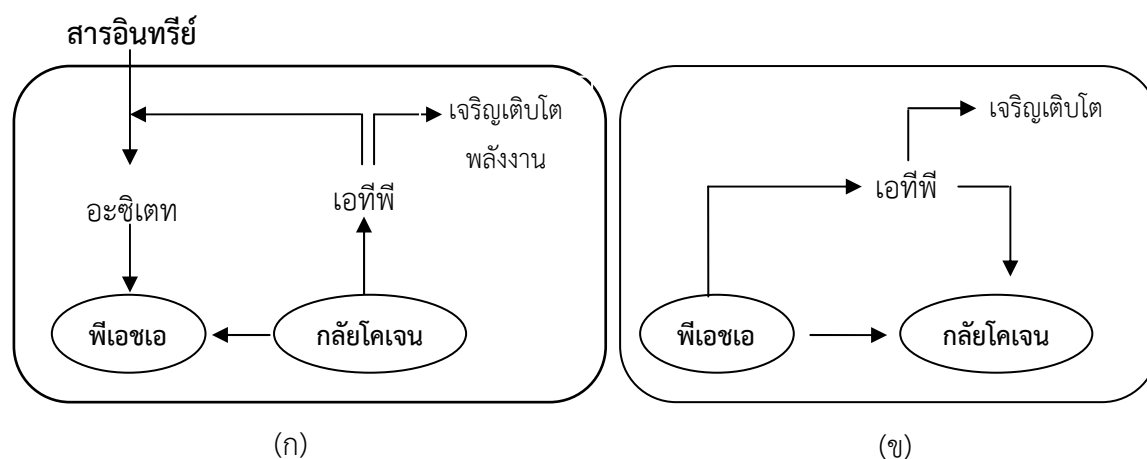
(ก) สภาวะแอโรบิก และ (ข) แอโรบิก (ปรับปรุงมาจาก Zhu และคณะ., 2011)

2.3 จุลชีพกลุ่มที่สะสมกลัยโคเจน (Glycogen Prcumulating Organisms, GAOs)

กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) ที่ล้มเหลวมักพบว่ามักมีกลุ่มจุลชีพที่สะสมกลัยโคเจน (Glycogen Prcumulating organisms ,GAOs) เจริญอยู่ในระบบจำนวนมาก ซึ่งเป็นคู่แข่งกับจุลชีพกลุ่ม PAOs ในการจับใช้สารอินทรีย์ในสภาวะแอโรบิก โดยจุลชีพกลุ่ม GAOs สามารถจับใช้สารอินทรีย์ประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น แล้วเก็บสะสมอยู่ในรูปของพีเอชเอได้เช่นเดียวกัน แต่แหล่งพลังงานในการจับใช้สารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์มาจากการสลายกลัยโคเจนที่สะสมไว้ในเซลล์ (Filipe และคณะ, 2001; Zeng และคณะ, 2003) ทั้งนี้ กลัยโคเจนเป็นแหล่งพลังงานเพียงแหล่งเดียวในการจับใช้สารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ รวมทั้งยังเป็นแหล่งให้สารรีดิวซ์ที่ร่วมกันทำหน้าที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นเป็นพีเอชเอ โดยไม่จำเป็นต้องสลายสารโพลีฟอสเฟตในเซลล์ดังแสดงในรูป 2.2 ส่วนในสภาวะแอโรบิก สารพีเอชเอในเซลล์จะถูกออกซิไดส์เพื่อการเจริญของเซลล์ แล้วสังเคราะห์กลัยโคเจนกลับมาใหม่เพื่อเก็บสะสมไว้ในเซลล์ โดยไม่จำเป็นต้องจับใช้ฟอสเฟตในปริมาณมากแบบเดียวกับจุลชีพกลุ่ม PAOs ดังนั้น จุลชีพกลุ่ม GAOs จึงเป็นคู่แข่งในการจับใช้สารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ของจุลชีพกลุ่ม PAOs แต่ไม่ทำให้มีการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้

ความสามารถในการแข่งขันเพื่อจับใช้กรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นของจุลชีพทั้ง 2 กลุ่มที่แตกต่างกันเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษากระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) เป็นอย่างมาก การศึกษาในหลายงานวิจัยพบว่าจุลชีพกลุ่ม CompetibPrter สามารถจับใช้กรดอะซิติกได้ดี แต่ยังไม่สามารถจับใช้กรดโพรพิโอนิก (Oehmen และคณะ, 2004) ส่วน alphaproteobPrterial GAOs

สามารถจับใช้ได้ทั้งกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก ส่วนจุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถจับใช้ได้ทั้งกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกในช่วงแอนแอโรบิกได้ดี (Pijuan และคณะ, 2004) อย่างไรก็ตาม พบว่า alphaproteobacterial GAOs เป็นคู่แข่งกับจุลชีพกลุ่ม PAOs ที่สำคัญกว่า Competibacter นอกจากนี้ยังรายงานว่าการกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกไม่ได้ขึ้นกับการสลายพีเอชเอเป็นสำคัญ แต่ยังขึ้นกับการสะสมกลัยโคเจนด้วย



รูปที่ 2.2 การสร้างและการสลาย พีเอชเอ และกลัยโคเจนของจุลชีพกลุ่ม GAOs
(ก) สภาวะแอนแอโรบิก และ (ข) แอนแอโรบิก (ปรับปรุงมาจาก Zhu และคณะ, 2011)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการแข่งขัน PAOs และ GAOs

ในการเดินระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลชีพกลุ่ม PAOs ในระบบ แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อมีจุลชีพกลุ่ม GAOs เจริญขึ้นในระบบ มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการแข่งขันการจับใช้กรดไขมันระเหยง่ายของจุลชีพกลุ่ม PAOs และ GAOs ทั้งนี้ จุลชีพกลุ่ม GAOs เป็นกลุ่มจุลชีพที่ไม่ต้องการให้เจริญเติบโตในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน ปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมของจุลชีพกลุ่ม PAOs และ GAOs เช่น อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส แหล่งคาร์บอน อุณหภูมิ แคลซิออน พีเอช (pH) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และ ไนโตรเจน

2.4.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส (COD/P)

อัตราส่วน COD/P หมายถึงสัดส่วนสารอินทรีย์เมื่อเทียบกับฟอสฟอรัส ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงจะส่งผลต่อการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs ในการสะสมโพลีฟอสเฟตอย่างจำกัด (เพราะมีฟอสฟอรัสต่ำเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์) ส่งผลให้จุลชีพกลุ่ม GAOs สามารถเจริญขึ้นได้มากในระบบ เพราะสามารถจับใช้

สารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์โดยไม่เกี่ยวข้องกับการสะสมโพลีฟอสเฟตในเซลล์ พบว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs จะเจริญได้ดีที่อัตราส่วน COD/P ในระดับ 10-20 mg COD/mg P โดยจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) สูงขึ้น (Oehmen และคณะ, 2007) การรายงานนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Broughton และคณะ (2008) ที่พบว่าในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนที่มีน้ำเสียความเข้มข้นสูง (ความเข้มข้นซีโอดีจากกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่มีค่าอัตราส่วน COD/P ต่ำ (13:1) สามารถกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำได้เกือบทั้งหมด เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Chuang และคณะ (2011) ที่รายงานประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงถึงร้อยละ 98 เมื่ออัตราส่วน COD/P อยู่ในช่วง 18 – 20

2.4.2 แหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกันมีผลต่อการแข่งขันระหว่างจุลชีพกลุ่ม PAOs และ GAOs โดย Oehmen และคณะ (2007) ได้ศึกษาการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs พบว่าสามารถใช้ทั้งกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนด้วยอัตราที่ใกล้เคียงกัน ในทางตรงกันข้าม จุลชีพกลุ่ม GAOs จับใช้กรดโพรพิโอนิกด้วยอัตราที่ช้ามาก ในปี 2006 Kong และคณะรายงานว่าจุลชีพกลุ่ม GAOs ในระบบสามารถจับใช้สารอินทรีย์ได้ทั้ง อะซิเตท ไพรูเวท โพรพิโอเนท และกรดอะมิโนบางชนิดได้ แต่สามารถแข่งการใช้โพรพิโอเนทได้น้อยกว่าอะซิเตท การใช้แหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกันเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลชีพกลุ่ม GAOs การปรับเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนให้เป็นกรดโพรพิโอนิกหรือโพรพิโอเนทสามารถส่งเสริมการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs ให้ดีขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งสามารถช่วยกำจัดจุลชีพกลุ่ม GAOs ได้ (Lu และคณะ, 2006) นอกจากนี้ Lopez-Vazquez และคณะ (2009) ได้ศึกษาแบบจำลองทางเมตาบอลิซึมเมื่อใช้กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าที่อุณหภูมิสูง จุลชีพกลุ่ม GAOs เจริญได้น้อยกว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs

2.4.3 อุณหภูมิ

ผลการศึกษาวิจัยด้านการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่ผ่านมา พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ได้รับการยืนยันค่อนข้างแน่นอนนั้นก็ด้วยเหตุที่ว่า ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีจุลชีพกลุ่ม GAOs เจริญเติบโตร่วมอยู่ในระบบ (Cech and Hartman, 1993; Liu et al., 1996; Satoh et al., 1994) และสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่ากลุ่มจุลชีพ PAOs ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 20 องศาเซลเซียส) จุลชีพกลุ่มนี้สามารถใช้สารอินทรีย์ประเภทกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นในน้ำเสียได้เช่นเดียวกันกับจุลชีพกลุ่ม PAOs และยังมีกระบวนการทางเมตาโบลิซึมคล้ายคลึงกันกับกลุ่ม PAOs ในสภาวะแอนแอโรบิก และสามารถสะสม PHA ภายในเซลล์

ได้โดยไม่ต้องปล่อยฟอสเฟตออกมาจากเซลล์ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิก อีกทั้ง จะไม่จับใช้ฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์ในช่วงสภาวะแอโรบิกของระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย รายงานผลของการศึกษาจากหลายคณะวิจัยสรุปได้ว่า อุณหภูมินี้มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่ม GAOs และ PAOs และทำให้มีสัดส่วนของปริมาณจุลชีพทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันในระบบบำบัดน้ำเสีย (Lopez-Vazquez และคณะ, 2009; 2007; Erdal และคณะ, 2006; 2003; Whang and Park, 2002; 2006; Panswad และคณะ, 2003;) เหตุผลที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของจุลชีพทั้งสองนี้ที่อุณหภูมิต่ำและสูงนั้นคือ จุลชีพกลุ่ม PAOs นั้นจัดอยู่ในพวก Psychrophilic แต่กลุ่ม GAOs จัดอยู่ในพวก Mesophilic ดังนั้น ที่อุณหภูมิสูง จุลชีพกลุ่ม PAOs จำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อการรักษาสภาพเซลล์สูงกว่ากลุ่ม GAOs ทำให้พลังงานที่เหลือใช้เพื่อการเจริญมีน้อยกว่า จึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่ม PAOs ต่ำลง ส่งผลให้กลุ่ม GAOs เจริญได้ดีกว่าและกลายเป็นกลุ่มจุลชีพส่วนใหญ่ได้

Janssen และคณะ (2002) รายงานว่าอุณหภูมิมีผลต่อสัจฉิในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์หลายด้าน เช่น เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี การตกตะกอน ลักษณะของสลัดจ์ รวมทั้ง สัดส่วนของจุลชีพกลุ่ม PAOs มีการศึกษาจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ซึ่งผลการศึกษามีทั้งที่เป็นทางบวกและทางลบต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ Worakatamas (2008) ได้ศึกษากระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) ด้วยถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ถัง ที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส พบว่าที่ 20 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงถึงร้อยละ 94 ในขณะที่การสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์สูงถึงร้อยละ 11 ในขณะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสและการสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำกว่า คือ ร้อยละ 50 และ 8 ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่า การแข่งขันระหว่างจุลชีพกลุ่ม PAOs และกลุ่ม GAOs ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงจะพบการเจริญของจุลชีพกลุ่ม GAOs มากกว่า หรือกล่าวได้ว่ากระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนจะทำงานได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำ (5–20 องศาเซลเซียส) (Tykesson, 2005) สอดคล้องกับสถานการณ์ที่หลายประเทศที่อยู่ในเขตอบอุ่นและช่วงฤดูร้อน จะพบปัญหาในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน เนื่องจากจุลชีพกลุ่ม GAOs สามารถเจริญในระบบมาแข่งกับ PAOs ได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Oehmen และคณะ, 2007)

2.4.4 แคทไอออน

โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) มีส่วนสำคัญในกระบวนการชีวเคมีของฟอสฟอรัส สารโพลีฟอสเฟตมีหมู่ฟอสเฟตซึ่งมีประจุลบท้ายสายโซ่ ดังนั้นต้องการประจุบวกเพื่อให้สารมีความเสถียร โดยต้องการ K^+ หรือ Mg^{2+} การขนส่งทั้งโพแทสเซียมและแมกนีเซียม กับเมตาบอลิซึมของฟอสเฟตมีความสำคัญในการสะสมสารโพลีฟอสเฟตในเซลล์ ถ้าขาดโพแทสเซียมและแมกนีเซียมในสารอาหารพบว่าการทำงานระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนจะลดลง ซึ่งความเข้มข้นโพแทสเซียมที่ต้องการต้องไม่มากเกินไป หรือโดยประมาณ ร้อยละ 1 ของชีวมวล

2.4.5 การควบคุมพีเอช (pH Control)

การติดตามการทำงานของระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) ต้องมีการตรวจวัดค่าพีเอช เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน การคายฟอสเฟต การจับใช้ฟอสเฟต ล้วนต้องการช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสม ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันต้องการค่าพีเอชที่เหมาะสมในช่วง 7.5–9.0 (Surampalli และคณะ, 1997) ส่วนปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันต้องการค่าพีเอชในช่วง 7.5–8.0 (Metcalf และคณะ, 1991) จุลชีพกลุ่ม GAOs สามารถจับใช้กรดอะซิติกได้เร็วกว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs เมื่อมีค่าพีเอชในระบบสูงขึ้น (Tykesson, 2005; Oehmen และคณะ, 2005) ส่วนในสภาวะแอโรบิก ถ้าค่าพีเอชอยู่ในช่วงต่ำจะพบการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs น้อยลง ส่งผลให้อัตราการจับใช้ฟอสเฟตและการสลายพีเอชเอนน้อยลงด้วย จากผลทดลองในระบบ SBR ในห้องปฏิบัติการที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการจับใช้ฟอสเฟตในสภาวะแอโรบิกของจุลชีพกลุ่ม PAOs ควรอยู่ในช่วง 6.6–8.4 และการจับใช้ฟอสเฟตในสภาวะแอโรบิกจะลดลงถ้าค่าพีเอชลดต่ำกว่า 6.2 นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะล้มเหลวเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 5.4 สรุปได้ว่าช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนในถังปฏิกริยาแบบ SBR ควรอยู่ในช่วง pH 7.5–8.0

2.4.6 DO/ Nitrogen

กิจกรรมของสัลเฟอร์ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูน (EBPR) เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาออกซิเดชันคาร์บอนและไนตริฟิเคชัน จึงควรมีออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในสภาวะแอโรบิกไม่น้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Louzero และคณะ, 2002) ส่วนในสภาวะแอนแอโรบิก ต้องควบคุมไม่ให้มีออกซิเจนละลายน้ำหรือมีอยู่ในช่วง 0.0–0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะการมีออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะแอนแอโรบิกจะไปรบกวนการออกซิไดซ์สารภายในเซลล์ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อการแข่งขันระหว่างจุลชีพกลุ่ม PAOs และ GAOs Griffiths และคณะ (2002) รายงานว่าพบการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs ในปริมาณมากเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 2.5–3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบการเจริญของจุลชีพกลุ่ม TFOs มีมากกว่าเมื่อความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 4.5–5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร Lemaire และคณะ (2006) ทำการศึกษาในระบบ SBR พบว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs เป็นจุลชีพหลักและเพิ่มจำนวนขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง ในขณะที่จุลชีพกลุ่ม GAOs มีจำนวนลดลงตลอดการทดลอง เมื่อพยายามควบคุมค่าออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะแอนแอโรบิกไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้ สารไนไตรท์จะรบกวนการจับใช้ฟอสเฟตในสภาวะแอโรบิกหรือแอนอกซิก ซึ่งมักพบความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของจุลชีพกลุ่ม GAOs กับการเพิ่มขึ้นของไนไตรท์ในช่วงแอนอกซิก กล่าวได้ว่าไนไตรท์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้จุลชีพกลุ่ม GAOs เจริญได้ดีกว่ากลุ่ม PAOs หรืออีกนัยหนึ่ง Saito และคณะ (2004) ได้ระบุว่าไนไตรท์ที่ความเข้มข้นในระดับหนึ่งอาจไปยับยั้งการเจริญของจุลชีพกลุ่ม PAOs ได้ ทั้งนี้ การศึกษาของ Zeng และคณะ (2011) พบว่าไนไตรท์ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ได้

ยับยั้งการจับใช้หรือการคายฟอสฟอรัส แต่พบว่าประสิทธิภาพของระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนจะลดต่ำลงเมื่อปรากฏไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 แหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอนที่แตกต่างมีผลต่อการแข่งขันระหว่างจุลชีพกลุ่ม PAOs และ GAOs ในโรงบำบัดน้ำเสียทั่วไปมักพบปริมาณกรดอะซิติกมากที่สุด รองลงมาเป็นกรดโพรพิโอนิกประมาณร้อยละ 25–45 นอกจากนี้ อาจพบกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่นได้บ้าง เช่น กรดบิวทิริก กรดวาเลอริก ในปริมาณเล็กน้อย การศึกษาเกี่ยวกับระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่ มักจะใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกรดอะซิติก ซึ่งต่อมาก็เริ่มมีการศึกษาที่มุ่งสนใจใช้กรดโพรพิโอนิกและแหล่งคาร์บอนชนิดอื่นมากขึ้น มีหลายการศึกษาที่รายงานว่าระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนที่ใช้กรดโพรพิโอนิก มักจะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ดีกว่าระบบที่ใช้กรดอะซิติก ดังเช่นผลการศึกษาของ Vilata (2004) ที่พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงเมื่อใช้กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอน จุลชีพกลุ่ม PAOs เจริญได้มากโดยไม่พบจุลชีพกลุ่ม GAOs ในสลัดจ์ ในขณะที่เมื่อใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน พบจุลชีพกลุ่ม PAOs เจริญได้เล็กน้อยในขณะที่กลุ่ม GAOs สามารถเจริญได้ดี จึงเป็นสาเหตุให้ระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนล้มเหลว แม้แต่ Oehmen และคณะ (2007) ก็ยังระบุว่าระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน มักจะมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสไม่คงที่และในบางครั้งกลับมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากจุลชีพกลุ่ม GAOs ที่สามารถเจริญแข่งขันกับกลุ่ม PAOs ในระบบได้

นอกจากนั้น Oehmen และคณะ (2006) ได้ทดลองใช้สารอินทรีย์ประเภทกรดไขมันระเหยง่าย ลูกโซ่สั้นที่เป็นกรดอะซิติกหรือกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งของคาร์บอนเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ เพื่อศึกษาผลของประเภทสารอินทรีย์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพ PAOs และ GAOs ผลการศึกษา พบว่า จุลชีพกลุ่ม GAOs นั้นไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันประเภทโพรพิโอนิก ทำให้มีปริมาณจุลชีพ PAOs มากกว่า GAOs ในระบบ แต่เมื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นประเภทกรดอะซิติก พบว่า ระบบจะมีปริมาณจุลชีพประเภท GAOs มากกว่า PAOs ทำให้ระบบล้มเหลวในการกำจัดฟอสฟอรัส ทั้งนี้ คณะวิจัยฯ ยังได้ทดลองเติมเชื้อจุลชีพที่มีจุลชีพทั้งสองกลุ่มลงไปในพื้นที่ที่มีกรดไขมันประเภทโพรพิโอนิก พบว่า เมื่อเดินระบบไปไ้ระยะหนึ่ง จุลชีพกลุ่ม GAOs ได้หายไปจากระบบ ส่งผลให้ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี Lu และคณะ (2006) ได้ศึกษาการเจริญของจุลชีพกลุ่มที่สะสมฟอสเฟตในถังปฏิกิริยาที่มีการเติมแหล่งคาร์บอนสลับไปมาระหว่างกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก ในทุกๆ รอบ 1–2 อายุสลัดจ์ พบการเจริญของจุลชีพกลุ่มที่สะสมฟอสเฟต (PAOs) ได้ดี มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูง และถึงแม้ว่าจะมีการเติมจุลชีพ

กลุ่ม GAOs ให้อย่างมาก แต่เมื่อเดินระบบด้วยการเติมแหล่งคาร์บอนสลับกันดังกล่าว พบว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs ก็กลับมาเจริญเพิ่มจำนวนได้ดี ในขณะที่กลุ่ม GAOs ค่อยๆ ลดจำนวนจนหายไปจากระบบได้

อย่างไรก็ตาม ในเวลาต่อมา Dai และคณะ (2007) ได้ใช้เชื้อจุลชีพ *Defluviicoccus vanus* ซึ่งเป็นจุลชีพในกลุ่ม GAOs เพื่อศึกษากระบวนการเมตาโบลิซึมของจุลชีพกลุ่มนี้ในสภาวะแอนแอโรบิกเมื่อใช้กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งของคาร์บอนอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว หรือทั้งสองอย่าง ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเพื่อกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัส พบว่า จุลชีพกลุ่มนี้ที่ถูกละเลียงด้วยกรดอะซิติกมาก่อนแล้ว มีความสามารถในการใช้กรดโพรพิโอนิกได้สูงกว่าอัตราการใช้กรดอะซิติกถึงร้อยละ 50 (จุลชีพไม่ได้ถูกปรับตัวมาก่อน) และเมื่อน้ำเสียมีกรดทั้งสองชนิดภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก จุลชีพกลุ่มนี้จะเลือกใช้กรดโพรพิโอนิกก่อนกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังพบว่าจุลชีพกลุ่มนี้หากได้รับการกระตุ้นด้วยกรดอะซิติกก่อน จะทำให้มีอัตราการใช้กรดโพรพิโอนิกสูงกว่าจุลชีพที่ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยกรดอะซิติกถึงร้อยละ 60

2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการแข่งขันระหว่างจุลชีพกลุ่ม PAOs และกลุ่ม GAOs Panswad และคณะ (2003) ศึกษากระบวนการ SBR ที่ป้อนด้วยกรดอะซิติก พบว่าจุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่าเท่านั้น ในขณะที่กลุ่ม GAOs สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 25.0 – 32.5 องศาเซลเซียส และพบว่าจุลชีพกลุ่ม GAOs สามารถเจริญแข่งกับกลุ่ม PAOs ได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Erdal และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 20 แล้วลดลงถึง 5 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนในรูปแบบ UCT (University of Cape Town) ซึ่งลำดับของถังปฏิกิริยาเป็นแบบ แอนแอโรบิก-แอนอ็อกซิก-แอโรบิก ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ชีวเคมี และเคมี ของเซลล์ อีกทั้ง จุลชีพกลุ่ม PAOs อาจถูกชะล้างออกจากระบบได้ถ้าอายุสลัดจ์ (SRT) สั้นเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ จุลชีพกลุ่ม PAOs สามารถเจริญได้ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้นด้วย

Lopez-Vazquez และคณะ (2009) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในระยะยาวต่อจุลชีพกลุ่ม GAOs โดยเดินระบบที่อุณหภูมิ 10 ถึง 40 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เมตาบอลิซึมในช่วงแอนแอโรบิกของจุลชีพกลุ่ม GAOs จะถูกยับยั้ง ในขณะที่จุลชีพกลุ่ม GAOs นี้จะสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 30–40 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าจุลชีพกลุ่ม GAOs ไม่สามารถเจริญแข่งกับกลุ่ม PAOs ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราการจับใช้กรดอะซิติกและการสร้างเซลล์ต่ำกว่า เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส อัตราการจับใช้กรดอะซิติกของจุลชีพกลุ่ม GAOs สูงกว่าทำให้สามารถเจริญแข่งกับจุลชีพกลุ่ม PAOs ได้

ในปี 2010 Li และคณะ ได้ทดลองเดินระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ SBR ที่อุณหภูมิ 5 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยส่วนใหญ่เป็นการนำฟอสเฟตไปเก็บสะสมไว้ในเซลล์ นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสยังถูกกำจัดแบบภายนอกเซลล์ (extra-cellular polymeric substance, EPS) ด้วย พบว่าการสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์สูงสุดที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (18.2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส/วัฏจักร) เพราะน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้น ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสภายนอกเซลล์ (extra-cellular polymeric substance, EPS) สามารถกำจัดได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส (2.4 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส/วัฏจักร) จากประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดร้อยละ 90% ในขณะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 83 นอกจากนี้ ยังพบการสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

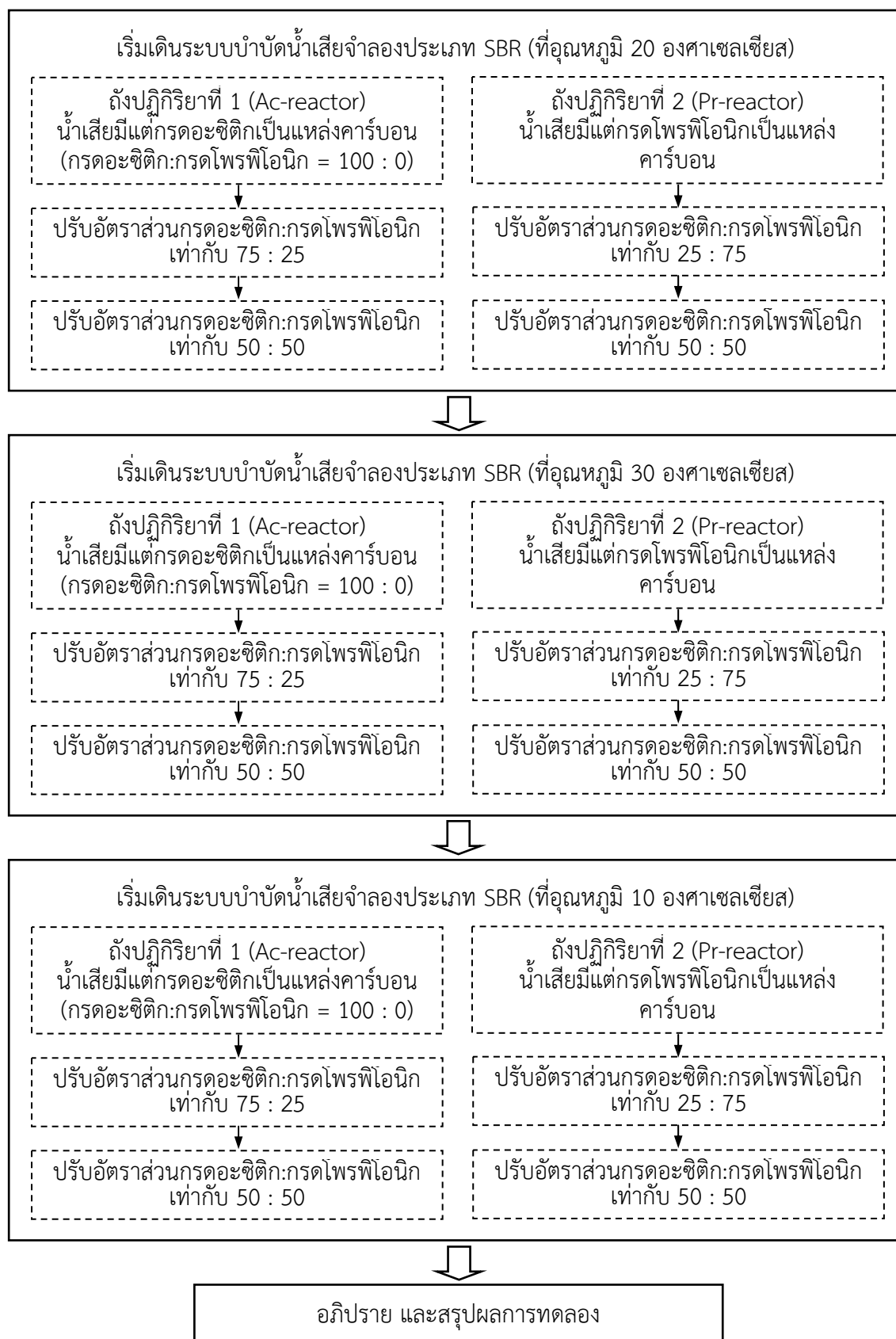
บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

การศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง ที่ใช้ถังปฏิกรณ์ในรูปแบบที่เรียกว่า Sequencing Batch RePrtor (SBR) จำนวน 2 ถัง เติ่นระบบในชุดอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียได้ โดยเริ่มทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นอันดับแรก เพราะคาดว่าจะ เป็นอุณหภูมิที่ทำให้จุลชีพประเภทสะสมและจับใช้ฟอสฟอรัสเจริญได้ดี ถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 (เรียกว่า Ac-reactor) ใช้น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นชนิดกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียวร่วมกับ nutrient broth และถังที่สองใช้น้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นชนิดกรดโพรพิโอนิกแต่เพียงอย่างเดียว ร่วมกับ nutrient broth (เรียกว่า Pr-reactor) ในการเริ่มเดินระบบ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) แล้ว จึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ หลังจากนั้น จึงมีการเปลี่ยนอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นต่างประเภทกันในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยถังที่ 1 ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกจาก 100:0 เป็น 75:25 และถังที่ 2 ปรับอัตราส่วนจาก 0:100 เป็น 25:75 แล้วเดินระบบเข้าสู่สถานะคงตัวอีกครั้ง ก่อนที่จะมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับสถานะคงตัวครั้งที่ 2 นี้ จากนั้น จึงปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียเป็น 50:50 ทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ แล้วเดินระบบเข้าสู่สถานะคงตัวพร้อมทั้งวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

เมื่อเดินระบบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำเสียครบทุกอัตราส่วนที่กำหนดไว้แล้ว จึงปรับอุณหภูมิการทดลองเป็น 30 องศาเซลเซียส และดำเนินการทดลองแบบเดียวกันกับการทดลองที่อุณหภูมิ ก่อนหน้า สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ใช้สไลด์จากการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่แบ่งเก็บไว้เป็นหัวเชื้อในการเริ่มเดินระบบ ทั้งนี้ การปรับอุณหภูมิน้ำในถังปฏิกรณ์จะทยอยปรับอุณหภูมิขึ้นหรือลงวันละไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส เพื่อให้จุลชีพในถังปฏิกรณ์สามารถปรับตัวตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ ลำดับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รายละเอียดและลำดับการทดลอง

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อให้ง่ายแก่การควบคุมลักษณะของน้ำเสียให้คงที่ และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่เป็นกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นและอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายลูกโซ่สั้นที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ เดิมกำหนดใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีและความเข้มข้นฟอสฟอรัส ประมาณ 300 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ ปรีดา เหล่ารุจิจินดา (2541) และ อภิรดี ดวงใจ (2543) ที่ค่าความเข้มข้นดังกล่าวสามารถเดินระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพแบบเพิ่มพูนได้อย่างเหมาะสม และความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชน แต่ระหว่างขั้นตอนการเริ่มเดินระบบพบปัญหาปริมาณสลัดจ์เกิดใหม่ค่อนข้างต่ำและพบปัญหาสลัดจ์ไม่สามารถตกตะกอนได้ดี มีแนวโน้มที่จะเกิดสภาพสลัดจ์อัด (sludge bulking) ระบบไม่สามารถเข้าสู่สถานะคงตัวได้ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้เริ่มเดินระบบใหม่รวมทั้งปรับน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าซีโอดีรวมเป็นประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ nutrient broth เป็นแหล่งคาร์บอนร่วมกับกรดอะซิติกหรือกรดโพรพิโอนิกเพื่อป้องกันปัญหาสลัดจ์อัดที่อาจเกิดขึ้น

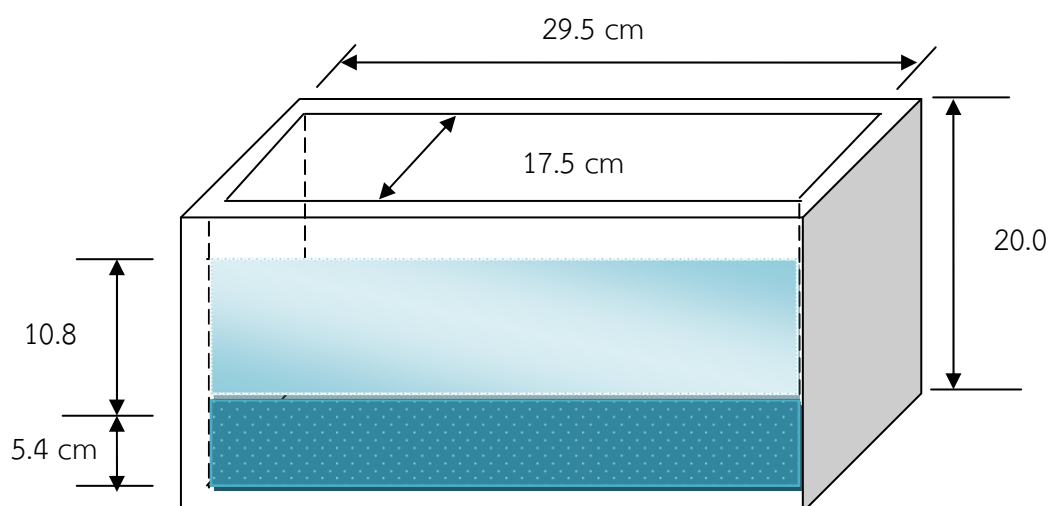
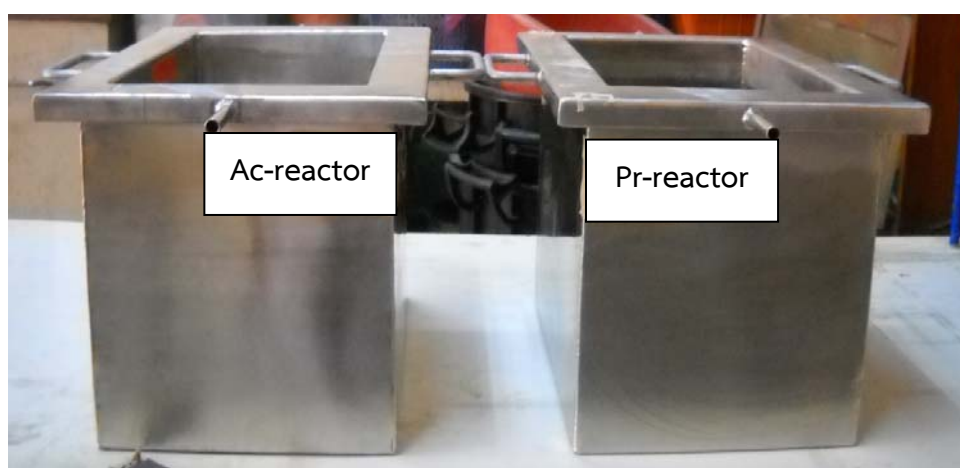
นอกจากนี้ ยังได้มีการเติมธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วย โดยเตรียมให้มีระดับความเข้มข้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นซีโอดี คือ COD:N เท่ากับ 20 เพื่อให้เป็นธาตุอาหารเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์ใหม่ และ COD:P เท่ากับ 20 ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำขั้นต่ำที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ สำหรับธาตุอาหารเสริมอื่นๆ รวมทั้งสภาพต่างที่เติมให้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์

สารที่ใช้	ความเข้มข้นสุดท้าย (มก./ล.)
CH ₃ COOH or CH ₃ CH ₂ COOH	440 มก.ซีโอดี/ล.
Nutrient broth	160 มก.ซีโอดี/ล.
TKN (จาก Nutrient broth)	15 มก.ไนโตรเจน/ล.
NH ₄ Cl	15 มก.ไนโตรเจน/ล.
KH ₂ PO ₄ + K ₂ HPO ₄	30 มก.ฟอสฟอรัส/ล.
NaHCO ₃	400 มก.หินปูน/ล.
MgSO ₄ ·7H ₂ O	5.76 มก.แมกนีเซียม/ล.
FeCl ₃ ·6H ₂ O	3 มก.เหล็ก/ล.
CPrL ₂	19.2 มก.แคลเซียม/ล.
COD:N:P:Fe	100:5:5:0.5
P:Ca:Mg:K	1:0.5:0.25:0.24 (ในหน่วยโมล)

3.3 ถังปฏิกิริยาแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch rePrtor, SBR)

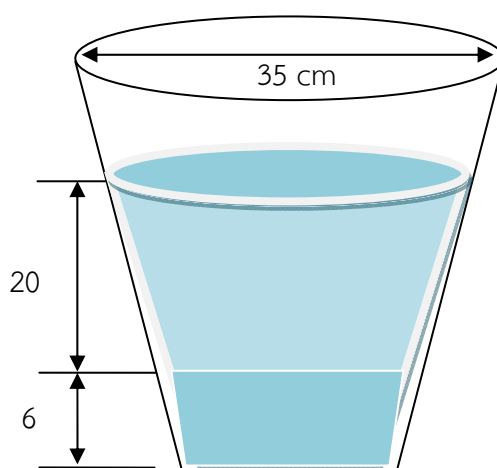
ถังปฏิกิริยา SBR ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส ทำจากวัสดุสแตนเลสสองชั้น มีขนาดภายในถึงเท่ากับ 17.5x29.5x20 เซนติเมตร (รูปที่ 3.2) ความสูงของระดับน้ำในถังประมาณ 16.2 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำในถังเท่ากับ 8.4 ลิตร ชั้นสแลตจ์คงค้างในถังกำหนดไว้ที่ระดับความสูงจากกันถึง 5.4 เซนติเมตร หรือประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาตรน้ำในถัง ระหว่างผนังทั้ง 2 ชั้นเป็นช่องว่างยอมให้น้ำเย็นไหลผ่านได้เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาให้คงที่ที่ 10 หรือ 20 องศาเซลเซียสได้ โดยน้ำเย็นผลิตขึ้นจากเครื่องทำน้ำเย็นดัดแปลงที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและเครื่องสูบน้ำ เพื่อป้อนน้ำเข้าสู่ช่องว่างระหว่างผนังของถัง แล้วไหลหมุนเวียนผ่านถังปฏิกิริยาก่อนกลับไปเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อรักษาความเย็นให้คงที่



รูปที่ 3.2 รายละเอียดถังปฏิกิริยาในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 และ 20 องศาเซลเซียส

สำหรับถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ถังน้ำพลาสติกทรงกระบอกก้นถึงสอบเข้าเล็กน้อย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ความสูง 38 เซนติเมตร และความสูง

น้ำในถังเท่ากับ 26 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำในถังประมาณ 16.8 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 การควบคุมอุณหภูมิให้ได้ 30 องศาเซลเซียสทำโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) แบบที่ใช้กันในตู้เลี้ยงปลา ประกอบติดไว้กับถังตลอดเวลา อุปกรณ์ให้ความร้อนนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิในถังให้คงที่ได้เป็นอย่างดีตลอดการทดลอง นอกจากนี้ ยังต้องมีอุปกรณ์กวนผสม เครื่องเติมอากาศ และอุปกรณ์ตั้งเวลาเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกได้ตามที่ต้องการ

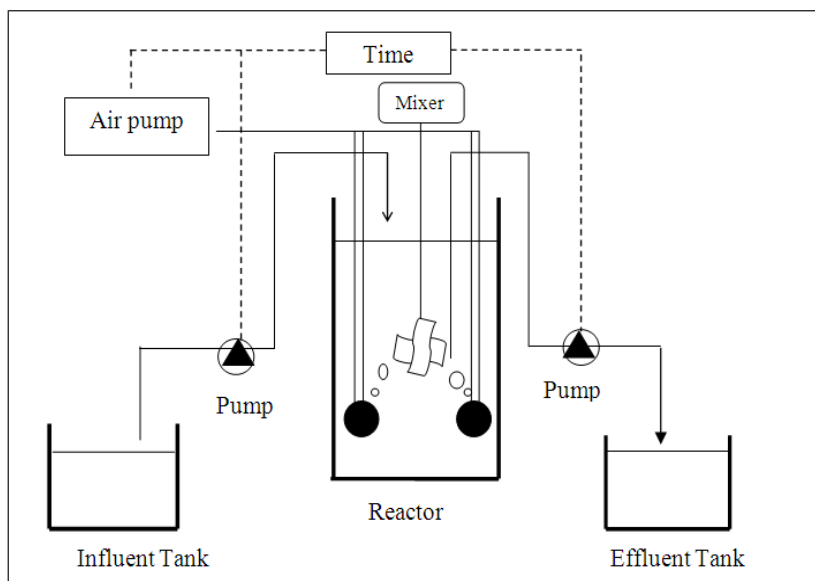


รูปที่ 3.3 รายละเอียดถึงปฏิบัติการในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

3.4 การเดินระบบ SBR

การติดตั้งระบบ SBR มีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.4 เริ่มเดินระบบด้วยการเติมสลัดจ์หัวเชื้อให้มีความเข้มข้น MLSS อยู่ในช่วง 3000 – 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสลัดจ์ในถังปฏิบัติการขึ้นกับน้ำเสียในระดับหนึ่งแล้ว จึงเริ่มระบายสลัดจ์ส่วนเกินในช่วงท้ายของสภาวะแอรโรบิกเพื่อควบคุมอายุสลัดจ์ให้คงที่ที่ 15 วัน ควบคุมค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสภาวะแอรโรบิกให้อยู่ในช่วง 3 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

และไม่ให้เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตรในระหว่างสภาวะแอนแอโรบิก และควบคุมค่าพีเอชที่ประมาณ 7.0
 วัฏจักรการทำงานของระบบ SBR ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 ผังการทำงานของระบบเอสบีอาร์แบบแอนโอบิก/แอโรบิก

ตารางที่ 3.2 วัฏจักรการทำงานของระบบ SBR

ขั้นตอนการทำงานของระบบ	ระยะเวลา
ช่วงเติมน้ำเสีย	5 นาที
ช่วงแอนแอโรบิก	4 ชั่วโมง 50 นาที
ช่วงแอโรบิก	6 ชั่วโมง
ช่วงระบายสลัดจ์ส่วนเกิน	ช่วงปลายขั้นตอนแอโรบิก
ช่วงตกตะกอน	1 ชั่วโมง
ช่วงระบายน้ำใส	10 นาที
รวมระยะเวลาใน 1 วัฏจักร	12 ชั่วโมง

3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในน้ำตัวอย่างทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำส่วนใส ทั้งจากขั้นตอนสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกเพื่อใช้ในการประเมินผลการศึกษา ได้แก่ COD, VFAs, total Phosphorus, soluble phosphorus, MLSS, TKN, nitrate, nitrite ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามที่ระบุไว้ใน Standard Methods (APHA และคณะ, 2012) โดยตัวอย่างน้ำที่ได้จะถูกกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ก่อนทำการวิเคราะห์ สำหรับพารามิเตอร์ฟอสฟอรัสละลายน้ำ ทำการกรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองชนิดเมมเบรน

(ขนาดรูผ่าน 0.45 ไมครอน) ในระหว่างเดินระบบทำการตรวจสอบค่าออกซิเจนละลาย (DO) พีเอช (pH) อุณหภูมิ และตรวจวัดพารามิเตอร์ SV30 เป็นประจำ

สำหรับตัวอย่างสลัดจ์ของระบบ วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ (%P ใน TSS) ของสลัดจ์จากปลายขั้นตอนสถานะแอโรบิก โดยการย่อยสลัดจ์ด้วยกรดเข้มข้นที่อุณหภูมิสูงเพื่อสลายฟอสฟอรัสทั้งหมดในเซลล์ให้ออกมาอยู่ในสารละลาย จากนั้น วิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัสด้วยวิธีการเดียวกับฟอสฟอรัสละลายน้ำข้างต้นได้เป็นค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus) ดังนั้น ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ได้มาจากการคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหักด้วยปริมาณฟอสฟอรัสละลายน้ำ แล้วเทียบเป็นร้อยละของน้ำหนักสลัดจ์แห้ง (TSS)

ปริมาณสารพีเอชเอวิเคราะห์ด้วยวิธี methanolysis-GC ที่ปรับปรุงโดย Hart (1994) และปริมาณกลัยโคลเจนวิเคราะห์ด้วยวิธี anthrone สำหรับเซลล์ของสลัดจ์ทั้งจากปลายขั้นตอนสถานะแอนแอโรบิกและแอโรบิก รายละเอียดพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ดังระบุในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และวิธีการตรวจวัดตัวอย่าง

Parameters	Analysis methods
DO	DO meter
pH	pH meter
Temperature	Thermometer
SV ₃₀	Imhoff cone
SS	Filtration and Drying at 105 °C
MLSS	Filtration , Drying at 105 °C
MLVSS	Filtration , Drying at 550 °C
COD	Closed reflux titration method
TKN	Digestion, Distillation and Titration
Nitrate	Brucine method
Nitrite	Griess- llosvay Diazotization
Total Phosphorus	Nitric-Sulfuric digestion method and vanadomolybdate method
Soluble Phosphorus	Filtration, Nitric-Sulfuric digestion and Vanadomolybdate method
Volatile Fatty Acid	Titration
PHA	Methanolysis-GC (Hart, 1994)
Glycogen	Anthrone Method

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง ที่ใช้ถังปฏิกริยาในรูปแบบที่เรียกว่า Sequencing Batch Reactor (SBR) จำนวน 2 ถัง เริ่มเดินระบบด้วยการทำให้สลัดจ์คั่งขึ้นกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเชื้อเริ่มต้นได้มาจากสลัดจ์ส่วนเกินของโรงควบคุมคุณภาพน้ำชองนนทบุรี กรุงเทพมหานคร ความเข้มข้นสลัดจ์ที่ใส่ในถังปฏิกรณ์เริ่มต้นประมาณ 3000 – 4000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำหนดไว้สำหรับการเดินระบบตลอดการศึกษาวิจัยประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ระหว่างการเริ่มเดินระบบและทำให้สลัดจ์คั่งขึ้นกับน้ำเสีย ได้เริ่มป้อนน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีร้อยละ 25 ของค่าที่กำหนด แล้วขยับเพิ่มเป็นร้อยละ 50 75 และ 100 ตามลำดับ จนสลัดจ์ในระบบมีความคั่งขึ้นและสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้น จึงเดินระบบเข้าสู่เงื่อนไขของการทดลองตามที่กำหนด โดยเริ่มต้นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ที่ประยุกต์จากระบบอ่างควบคุมอุณหภูมิ (waterbath) ระหว่างผนังทั้ง 2 ชั้นของถังเป็นช่องว่างยอมให้น้ำเย็นไหลผ่านได้เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกริยาให้คงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส โดยน้ำเย็นผลิตขึ้นจากเครื่องทำน้ำเย็นดัดแปลงที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมสแตทควบคุมคู่กับระบบทำความเย็น แล้วใช้เครื่องสูบน้ำเพื่อป้อนน้ำเข้าสู่ช่องว่างระหว่างผนังของถัง แล้วไหลหมุนเวียนผ่านถังปฏิกริยาก่อนกลับไปเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อรักษาความเย็นให้คงที่ จากนั้นตามด้วยการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ใช้ถังให้ความร้อน (heater) จุ่มในถังปฏิกรณ์แบบที่นิยมใช้กันในตู้เลี้ยงปลาทั่วไป สำหรับการทดลองสุดท้ายที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ได้เดินระบบในถังปฏิกรณ์เดียวกับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้น ใน การศึกษาวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการทดลองทั้งหมดจำนวน 18 การทดลอง ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดลองในการศึกษานี้

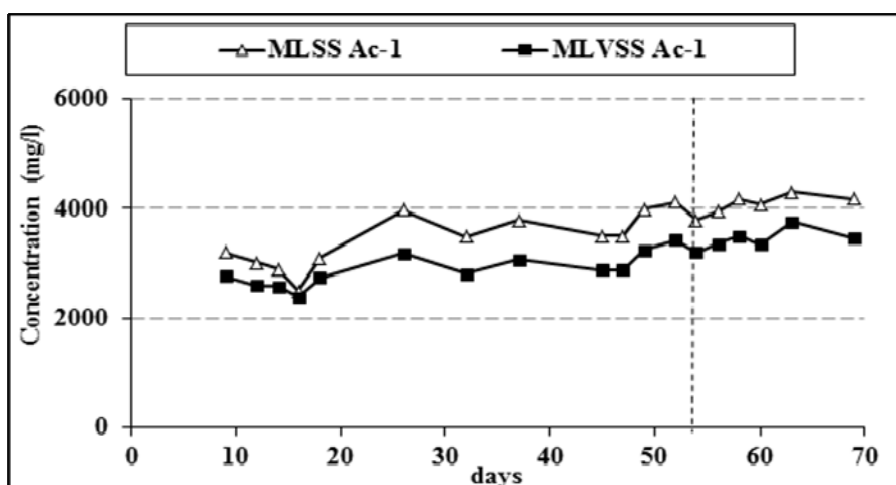
การทดลองที่ 20°C		การทดลองที่ 30°C		การทดลองที่ 10°C	
ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr	ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr	ชื่อการทดลอง	อัตราส่วน Ac:Pr
Ac-1	100:0	Ac-4	100:0	Ac-7	100:0
Ac-2	75:25	Ac-5	75:25	Ac-8	75:25
Ac-3	50:50	Ac-6	50:50	Ac-9	50:50
Pr-1	0:100	Pr-4	0:100	Pr-7	0:100
Pr-2	25:75	Pr-5	25:75	Pr-8	25:75
Pr-3	50:50	Pr-6	50:50	Pr-9	50:50

4.1 การทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์กระทำที่อุณหภูมิห้อง (27 – 28 องศาเซลเซียส) และเมื่อเติมเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ ระบบทำความเย็นของถังปฏิกรณ์สามารถลดอุณหภูมิของน้ำให้ลงมาถึง 20 ± 0.5 องศาเซลเซียสได้ภายในระยะเวลาไม่เกิน 20 นาที การทดลองทั้ง 6 การทดลองที่อุณหภูมินี้เดินระบบจนเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ทุกการทดลอง เก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบตลอดการทดลอง

4.1.1 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 (Ac-1)

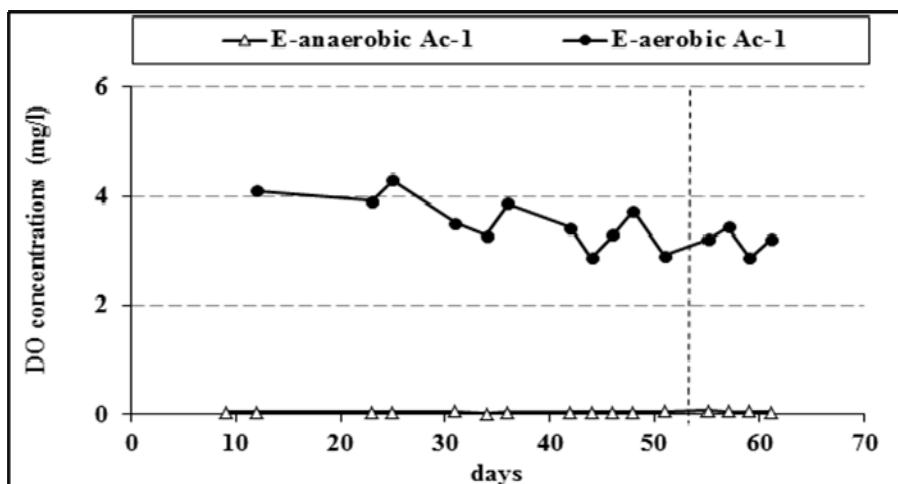
การทดลอง Ac-1 นี้ เมื่อระบบคุ้นชินกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) เท่ากับ 100:0 หรือมีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต ความเข้มข้นของสลัดจ์ (MLSS) ในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 3500 – 4300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นของแข็งระเหย (MLVSS) อยู่ในช่วง 3200 – 3800 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-1) โดยสลัดจ์มีสีน้ำตาลอ่อนตามปกติของสลัดจ์ในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์



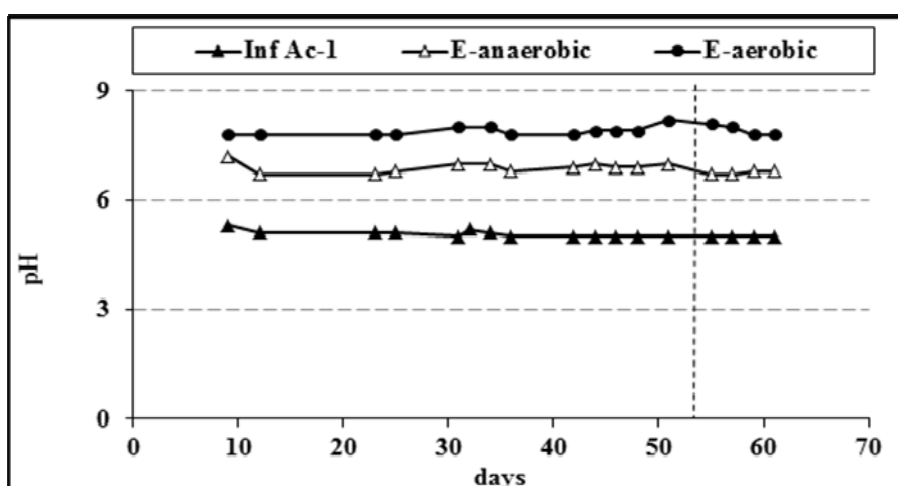
รูปที่ 4.1-1 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในช่วงปลายของสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic period) อยู่ในช่วง 0.04 – 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และในช่วงปลายของสภาวะแอโรบิก (aerobic period) อยู่ในช่วง 2.8 – 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-2) ค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมเท่ากับ 5.0 – 5.2 ซึ่งมีความเป็นกรดเล็กน้อยเนื่องจากมีกรดอะซิติกเป็นส่วนประกอบ สำหรับในช่วงปลายของสภาวะแอนแอโรบิกมีค่าพีเอชในช่วง 6.7 – 6.8 เนื่องจากการดูดซึมสารอาหาร(กรดอะซิติก เป็นต้น) เข้าสู่เซลล์ไปแล้ว และในช่วงปลายของสภาวะแอโรบิกมีค่าพีเอชในช่วง 7.8 – 8.1 เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำไปเกือบสมบูรณ์แล้ว(รูปที่ 4.1-3) นอกจากนี้ ค่าไออาร์พีในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกพบอยู่ในช่วง

-30 ถึง -60 มิลลิโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพไม่มีออกซิเจนของสภาวะในช่วงนี้ และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศพบค่าโออาร์พีในช่วง 150 - 220 มิลลิโวลต์



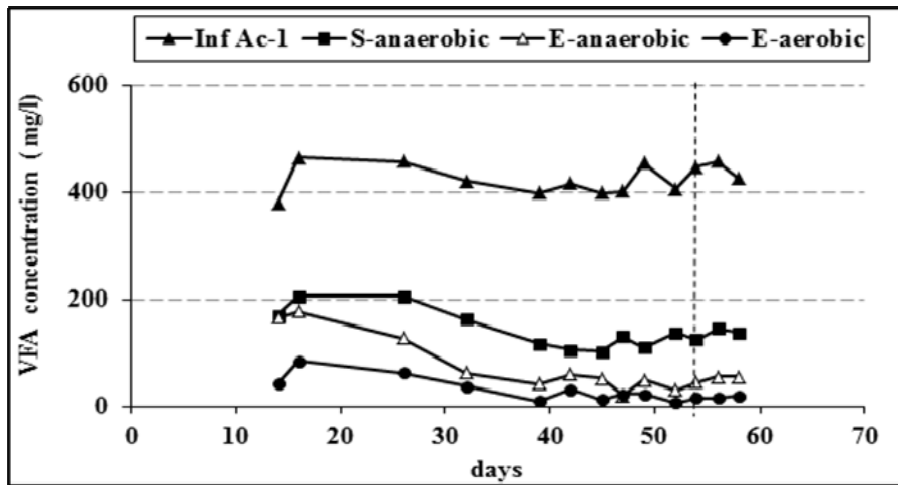
รูปที่ 4.1-2 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)



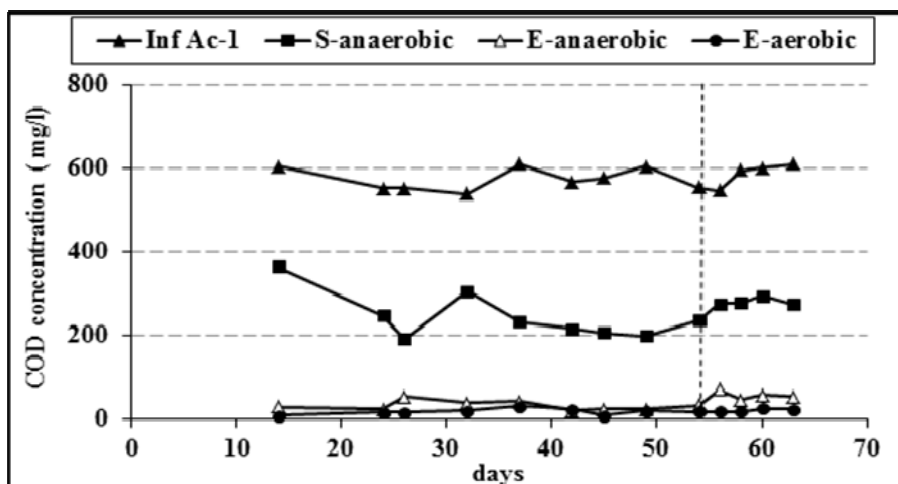
รูปที่ 4.1-3 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

ค่าความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid, VFA) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีกรดอะซิติกเป็นส่วนประกอบ พบอยู่ในช่วง 430 - 460 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของกรดอะซิติก (รูปที่ 4.1-4) แล้วลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากถูกดูดซึมเข้าเซลล์จุลินทรีย์ในระบบไป จนในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกเหลืออยู่ในช่วง 120 - 140 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของกรดอะซิติก จากนั้น ถูกย่อยสลายต่อในช่วงสภาวะแอโรบิกและเหลืออยู่ในช่วง 40 - 60 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของกรดอะซิติกที่ปลายสภาวะแอโรบิก สำหรับค่าซีไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 540 - 610 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าซีไอดีเหลือเพียง 30 - 70 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในน้ำเสียถูกดูดซึมเข้าเซลล์ไปในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกนี้ และในช่วงสภาวะแอโรบิกมีการย่อยสลาย

สารอินทรีย์ต่ออีกเล็กน้อย ทำให้น้ำทิ้งจากช่วงปลายแอโรบิกเหลือค่าซีไอดีอยู่ในช่วง 18 – 24 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-5)



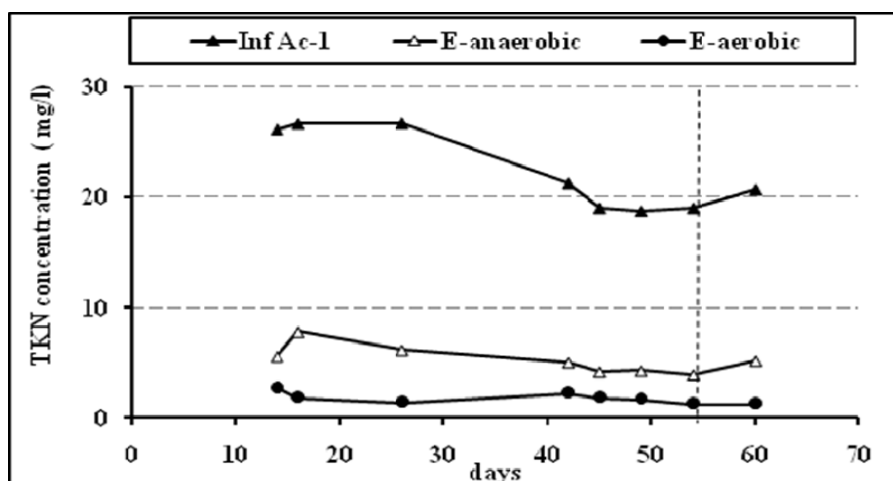
รูปที่ 4.1-4 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)



รูปที่ 4.1-5 ความเข้มข้นซีไอดี (COD) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

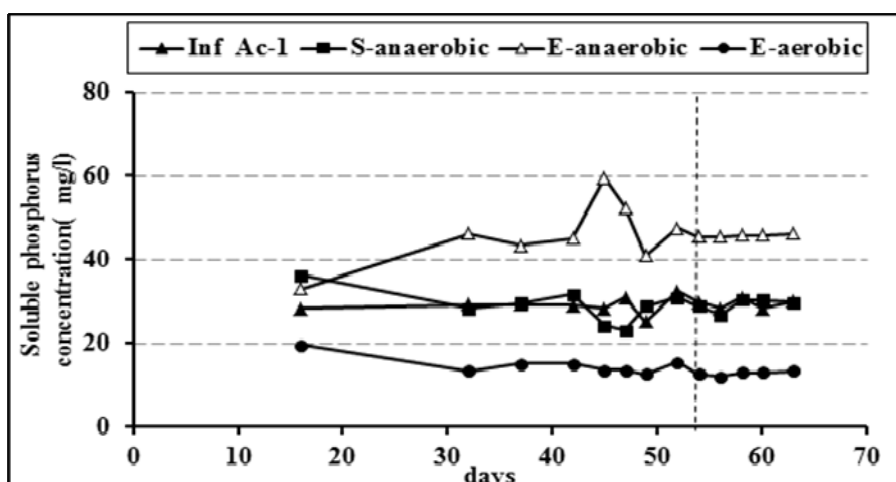
เนื่องจากน้ำเสียที่ป้อนให้กับระบบเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ทีเคเอ็นไนโตรเจน(ซึ่งหมายถึงผลรวมของอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน) ในระบบนี้จึงมีที่มาจากสารประกอบไนโตรเจนในนิวเทรียนบรอตและสารประกอบแอมโมเนียที่เติมให้ ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมอยู่ในช่วง 19 – 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิกค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 4 – 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.1-6) การลดลงของทีเคเอ็นไนโตรเจนในสภาวะแอนแอโรบิกนี้เกิดจากการเจือจางกับน้ำค้างถัง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้า และการดูดซึมไปใช้ในเซลล์อีกบางส่วน ในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ ทีเคเอ็นไนโตรเจนยังคงลดลงอีกโดยพบอยู่ในช่วง 1 – 2

มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรที่ปลายสภาวะแอโรบิก โดยอาจเกิดได้จากการเปลี่ยนรูปที่เคเอ็นเป็นไนเตรต (NO_3) และไนไตรต์ (NO_2) ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และการดูดซึมไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ อย่างไรก็ตาม กระบวนการไนตริฟิเคชันพบค่อนข้างน้อยเนื่องจากความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรต์ไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอโรบิกค่อนข้างต่ำ



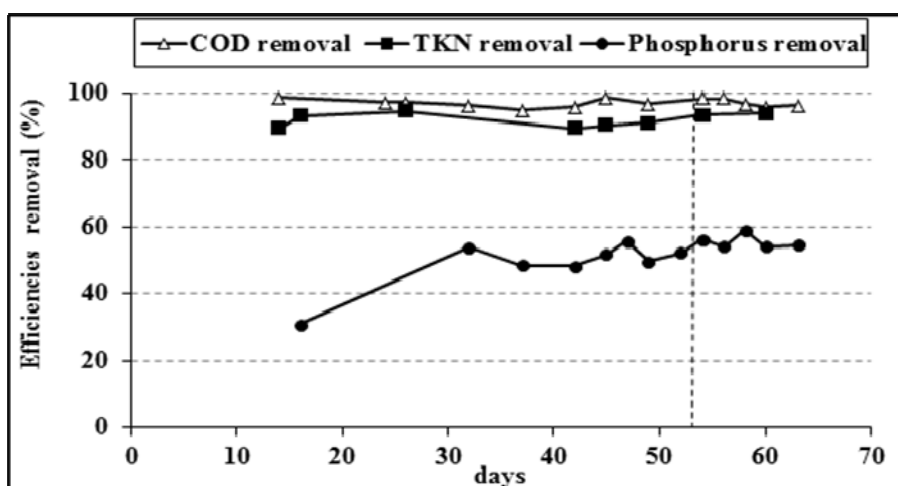
รูปที่ 4.1-6 ความเข้มข้นที่เคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

สำหรับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมมีอยู่ในช่วง 26 – 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิก พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์จุลินทรีย์ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45 – 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก พบการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำลดลงอยู่ในช่วง 12 – 13 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปลายสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-7) ทำให้มีการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้



รูปที่ 4.1-7 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

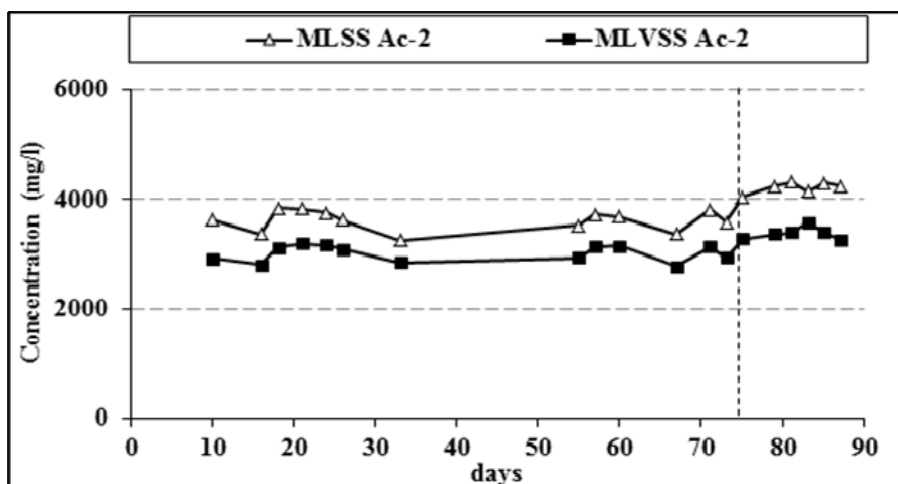
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสในภาพรวมของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.1-8 พบประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 97 เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ค่อนข้างง่าย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีค่อนข้างสูง สำหรับทีเคเอ็น พบประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างสูงเช่นกันคือเฉลี่ยร้อยละ 94 คาดว่าเกิดจากกลไกการดูดซึมเข้าเซลล์เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่มากกว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน เนื่องจากอัตราส่วนค่าซีโอดีต่อทีเคเอ็น (COD/TKN) มากกว่า 20 แสดงว่าทีเคเอ็นส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการดูดซึมเข้าเซลล์และกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ แต่สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัส ถึงแม้จะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก แต่การจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกไม่สูงมากนัก ยังคงมีฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลืออยู่พอสมควร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 57



รูปที่ 4.1-8 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-1 (20°C และ Ac:Pr = 100:0)

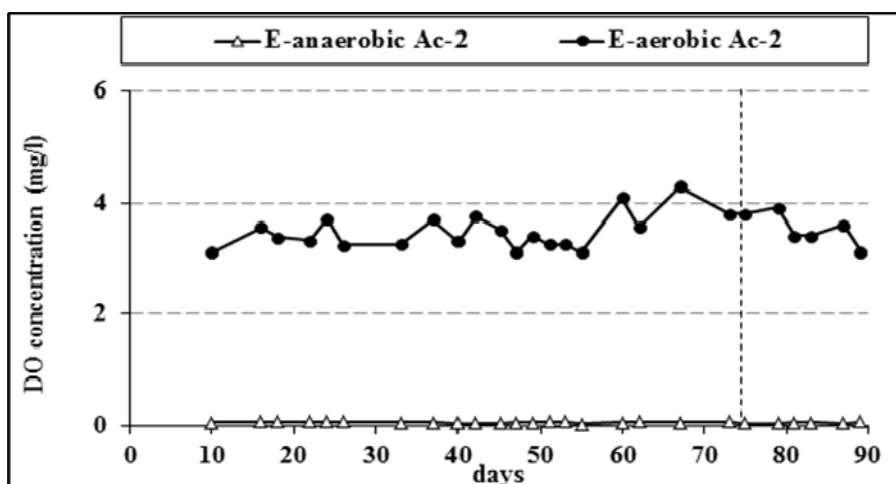
4.1.2 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 (Ac-2)

การทดลอง Ac-2 นี้เริ่มเดินระบบด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกในอัตราส่วน 75:25 (กรดอะซิติก:กรดโพรพิโอนิก) ร่วมกับนิวเทรียนบรอนเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 20 ± 0.5 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้พบความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในช่วง 4000 – 4400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นของแข็งระเหย (MLVSS) อยู่ในช่วง 3200 – 3600 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-9) ลักษณะสลัดจ์มีสีน้ำตาลอ่อนเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้

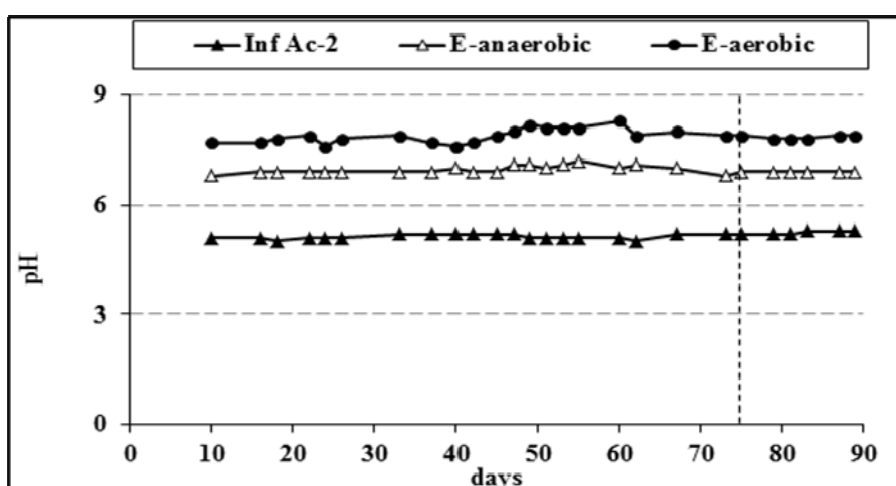


รูปที่ 4.1-9 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

ค่าออกซิเจนละลายที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.04 – 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และคงเหลืออยู่ในช่วง 3.1 – 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ในสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-10) ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมให้อยู่ในช่วง 5.2 – 5.3 เนื่องจากมีกรดอินทรีย์ (กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก) เป็นส่วนผสมหลัก เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ค่าพีเอชของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกมีค่าประมาณ 6.9 เนื่องจากกรดอินทรีย์ถูกใช้ไปทำให้ค่าพีเอชเป็นกรดน้อยลง และเมื่อเข้าสู่สภาวะเติมอากาศ ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยโดยอยู่ในช่วง 7.8 – 7.9 ที่ปลายสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-11) ค่าโออาร์พีในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -22 ถึง -64 มิลลิโวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 180 ถึง 220 มิลลิโวลต์ เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศ

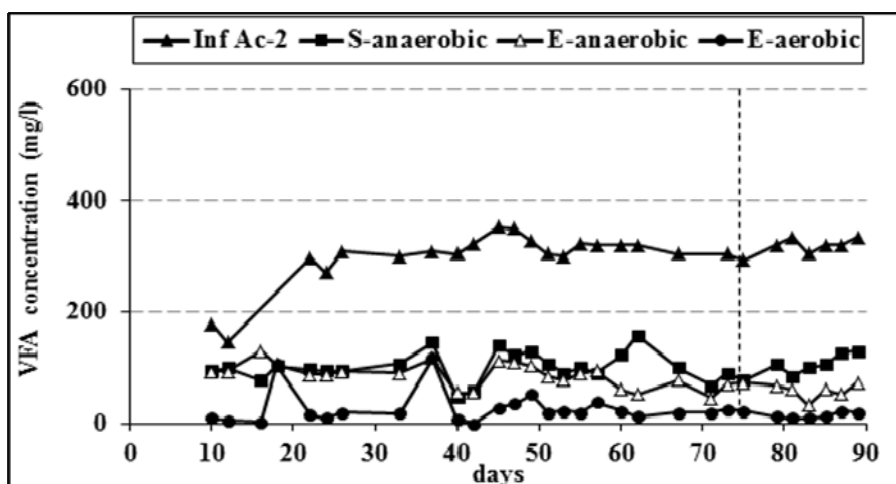


รูปที่ 4.1-10 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

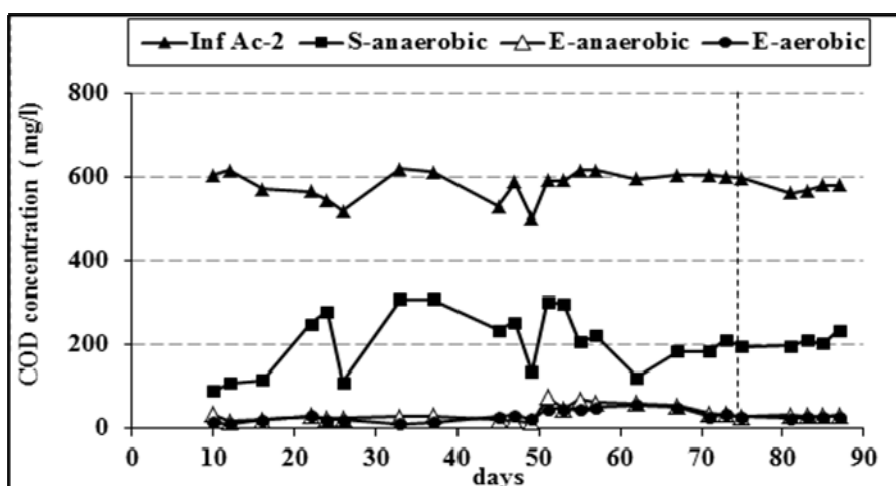


รูปที่ 4.1-11 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 360 – 410 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของ กรดอะซิติก (รูปที่ 4.1-12) ซึ่งอยู่ในช่วงต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อยถึงแม้ว่าจะควบคุมให้ค่าซีโอดีมี ค่าในระดับเดิม แต่เนื่องจากกรดโพรพิโอนิกซึ่งมีคาร์บอนต่อโมลสูงกว่ากรดอะซิติก แสดงความเป็นกรด ไขมันระเหยง่ายตามวิธีการวิเคราะห์ได้น้อยกว่ากรดอะซิติก เมื่อมีการดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายในช่วง สภาวะแอนแอโรบิกพบความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายในช่วง 50 – 90 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก และถูกใช้ต่ออีกเล็กน้อยในช่วงสภาวะแอโรบิกจนมีความเข้มข้นเหลือเพียง 10 – 23 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก สำหรับค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมตลอดการทดลอง อยู่ในช่วง 560 – 610 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าซีโอดีเหลือเพียง 20 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการดูดซึมสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในน้ำเสียไปในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกนี้ และย่อยสลาย ต่ออีกเล็กน้อยในช่วงที่มีการเติมอากาศจนค่าซีโอดีเหลืออยู่ในช่วง 16 – 28 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุด สภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-13)

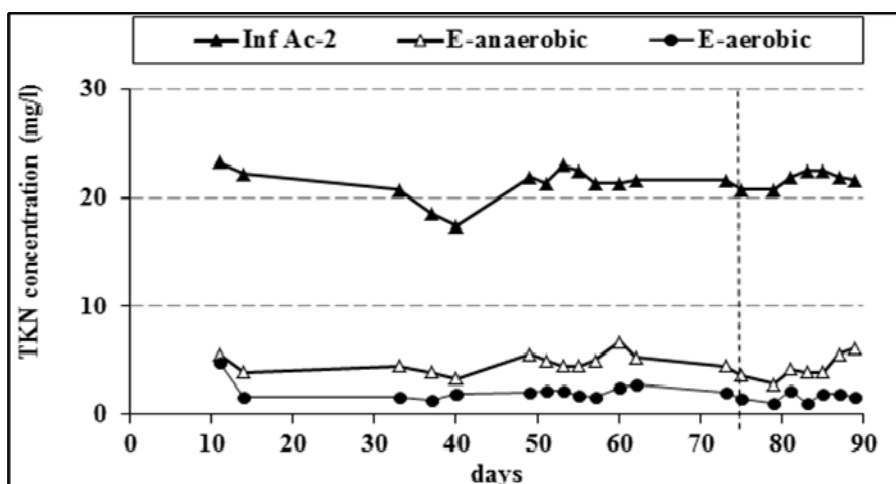


รูปที่ 4.1-12 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)



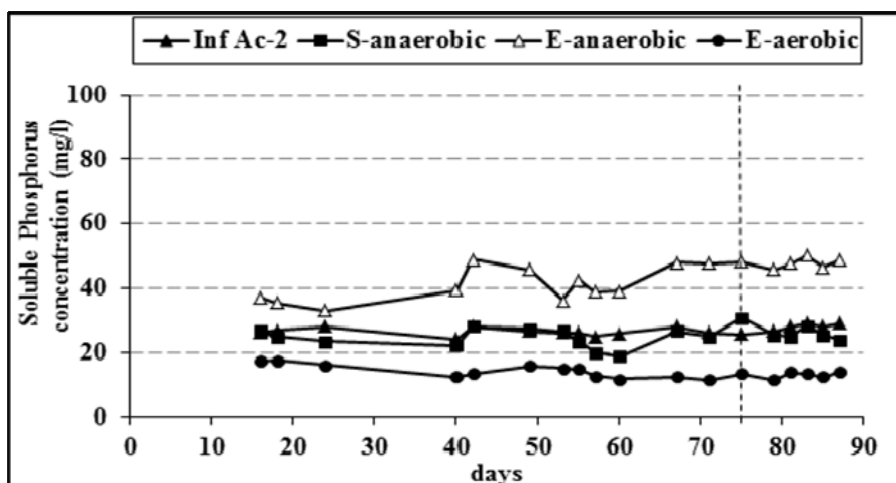
รูปที่ 4.1-13 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

ค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 20 - 22 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิกค่าที่เคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 2 - 6 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.1-14) ด้วยเหตุผลคล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ เนื่องจากยังคงควบคุมสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีในน้ำเสียที่ป้อนให้ด้วยความเข้มข้นระดับเดิมและปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ (ค่า MLSS) ยังคงใกล้เคียงเดิม ทำให้ความต้องการใช้ไนโตรเจนในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ควรคล้ายคลึงกับการทดลองก่อนหน้านี้ ร่วมกับการเจือจางกับน้ำค้ำถัง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้านี้ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศพบค่าที่เคเอ็นไนโตรเจนในช่วง 1 - 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ร่วมด้วยอีกเล็กน้อย แต่ระดับความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอโรบิกพบค่อนข้างต่ำ



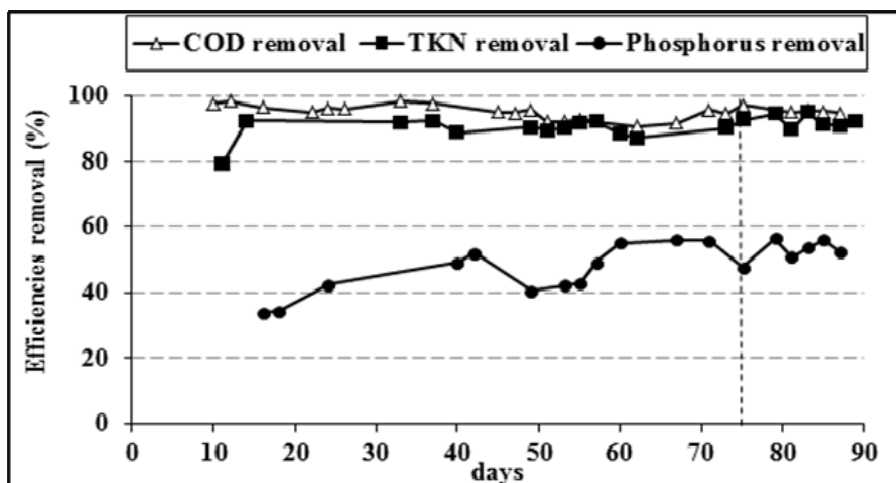
รูปที่ 4.1-14 ความเข้มข้นที่เคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำพบว่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตรในช่วงสภาวะแอนแอโรบิก โดยเพิ่มจากที่มีอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วง 25 – 29 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-15) เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องสลายแหล่งพลังงานในเซลล์แล้วปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในน้ำ เพื่อใช้เป็นพลังงานในการดำรงชีวิตใหม่ระเหยง่ายเข้าไปเก็บสะสมในเซลล์ในช่วงที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมออกซิเจนให้ จุลินทรีย์จึงจับใช้ฟอสฟอรัสในน้ำเข้าสู่เซลล์แล้วเก็บเป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ต่อไป ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำในช่วงปลายสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 11 – 13 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.1-15 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

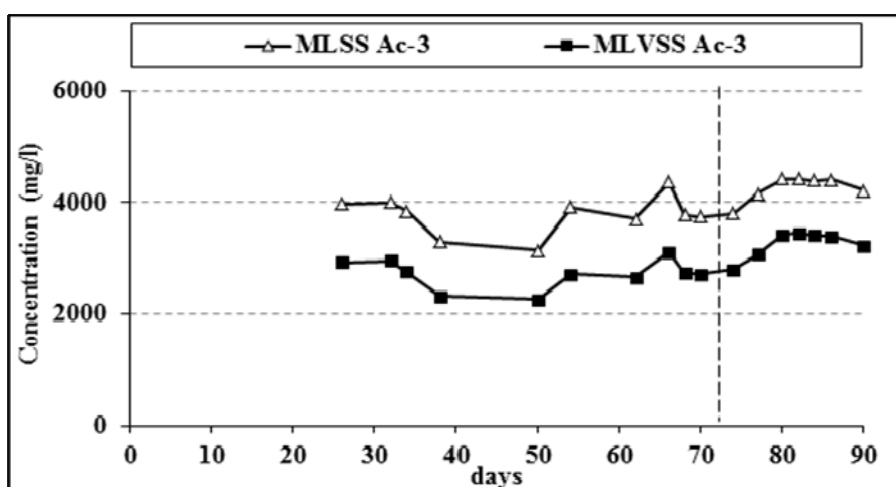
สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นในการทดลองนี้ค่อนข้างสูง คือ เฉลี่ยร้อยละ 96 และ 92 ตามลำดับ (รูปที่ 4.1-16) เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย สำหรับสารประกอบไนโตรเจนก็คาดว่าไม่มีเพียงพอสำหรับการสังเคราะห์เซลล์เท่านั้น ถึงแม้กระบวนการไนตริฟิเคชันจะไม่ปรากฏชัดเจน แต่ทีเคเอ็นในน้ำเสียที่เตรียมให้ได้ถูกใช้จนเกือบหมด ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นค่อนข้างสูง ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในการทดลองนี้เฉลี่ยร้อยละ 53 ซึ่งต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย (ร้อยละ 57)



รูปที่ 4.1-16 ประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลอง Ac-2 (20°C และ Ac:Pr = 75:25)

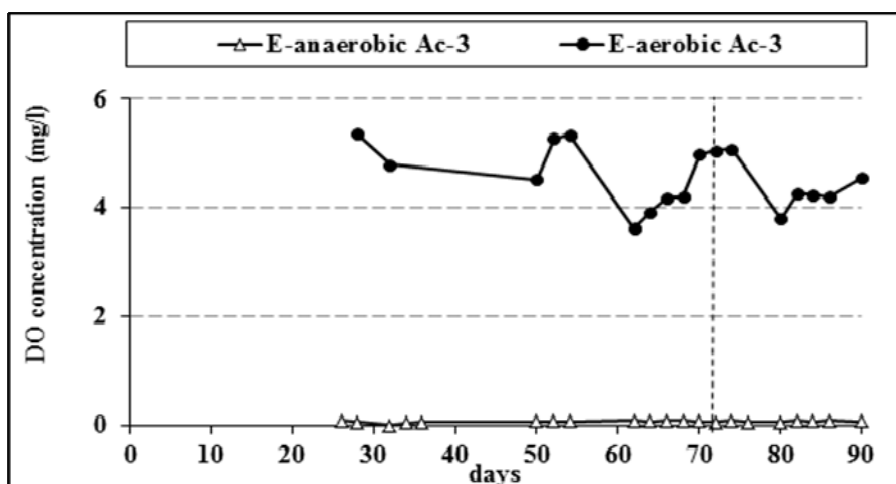
4.1.3 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Ac-3)

สำหรับการทดลองนี้เริ่มเดินระบบด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกในอัตราส่วน 50:50 ร่วมกับการเติมนิวเทรียนบรอต โดยยังควบคุมค่าซีไอดีในระดับคงเดิม และควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 0.5 องศาเซลเซียส ดังนั้น ความเข้มข้นสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ (ค่า MLSS) อยู่ในช่วง 3800 – 4500 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีของแข็งระเหยอยู่ในช่วง 3200 – 3600 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-17) ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ทั้ง 2 การทดลอง เนื่องจากระดับสารอินทรีย์หรือภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading) ยังคงเท่าเดิม

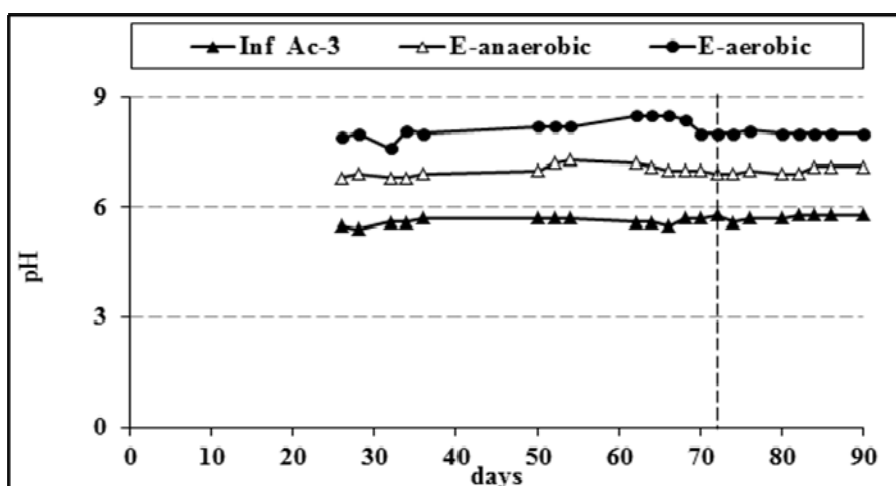


รูปที่ 4.1-17 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

ค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.06 – 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมอากาศในช่วงสภาวะแอโรบิก มีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 2.4 – 4.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-18) ค่าพีเอชในน้ำเสียอยู่ในช่วง 5.7 – 5.8 สูงกว่าน้ำเสียที่เตรียมในการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกซึ่งมีคาร์บอนต่อโมลสูงขึ้น (แต่ให้ไฮโดรเจนออกซิเจนต่อโมลน้อยกว่ากรดอะซิติก) ทำนองเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ คือ เมื่อมีการดูดซึมแหล่งคาร์บอนในน้ำไปใช้ตั้งแต่ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกทำให้กรดอินทรีย์ในน้ำเหลือน้อยลง ค่าพีเอชในน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกจึงเพิ่มขึ้นไปอยู่ในช่วง 6.9 – 7.1 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกและสารอินทรีย์ถูกใช้และย่อยสลายไปเกือบหมดแล้ว ค่าพีเอชในน้ำมีค่าประมาณ 8.0 (รูปที่ 4.1-19) โดยค่าโออาร์พีในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในระดับที่เหมาะสมคือ -20 ถึง -85 มิลลิโวลต์ และเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 110 ถึง 150 มิลลิโวลต์ในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมออกซิเจนให้

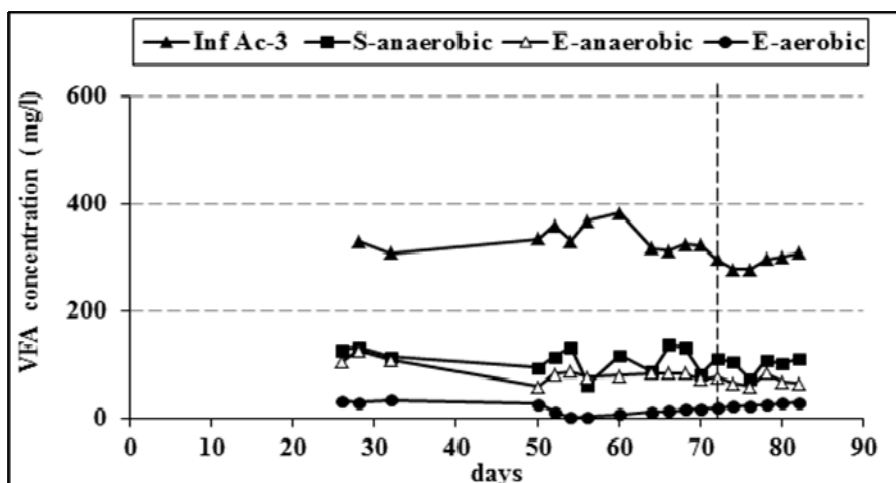


รูปที่ 4.1-18 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

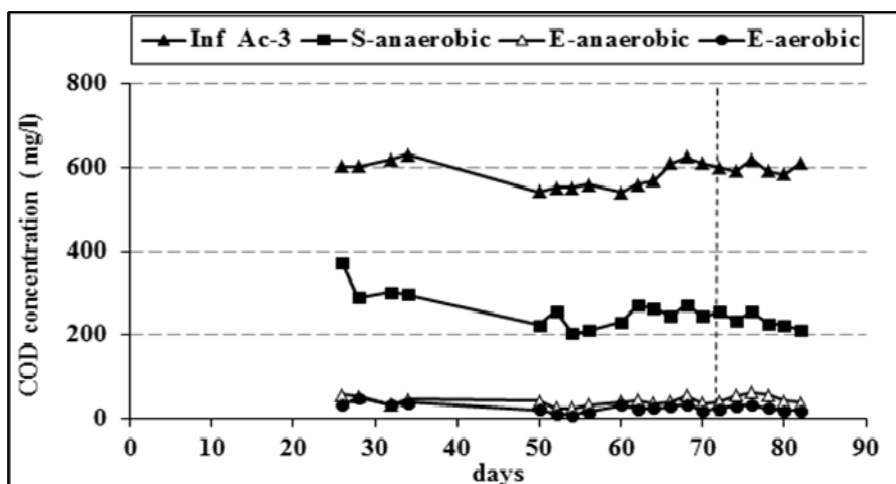


รูปที่ 4.1-19 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

สำหรับกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียสังเคราะห์ของการทดลองนี้อยู่ในช่วง 270 – 310 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ซึ่งลดลงไปจากการทดลองก่อนหน้านี้ทั้ง 2 การทดลอง เนื่องจากการปรับเพิ่มสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกดังที่กล่าวไปแล้ว จากนั้นถูกใช้ไปในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกเหลืออยู่ในช่วง 65 – 80 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก และถูกย่อยสลายต่อมาในช่วงสภาวะแอโรบิกจนเหลืออยู่ในน้ำเพียง 20 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก (รูปที่ 4.1-20) สอดคล้องกับค่าซีโอดี (รูปที่ 4.1-21) โดยในน้ำเสียมีค่าคงเดิมคืออยู่ในช่วง 560 – 610 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเดินระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ในสภาวะแอนแอโรบิกที่มีการดูดซึมแหล่งคาร์บอนในน้ำเข้าเซลล์ไปแล้ว ค่าซีโอดีคงเหลืออยู่ในช่วง 30 – 65 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มเติมทำให้ค่าซีโอดีคงเหลือเพียง 20 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก

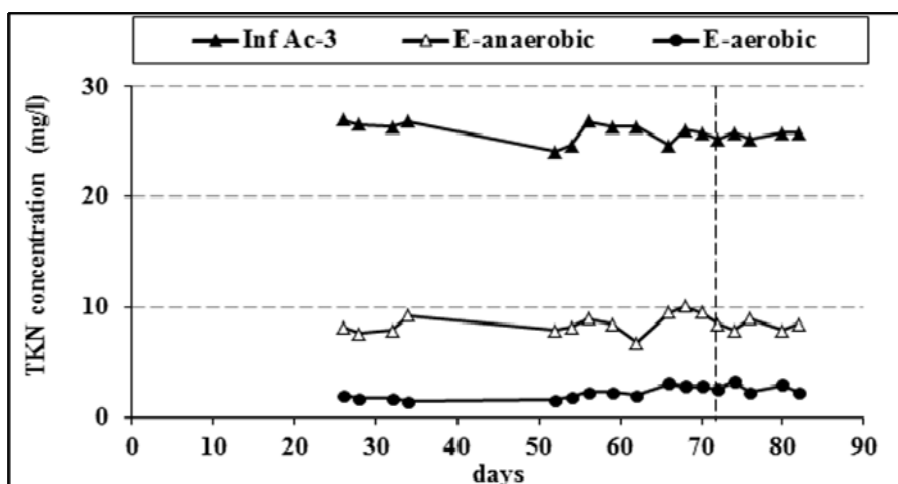


รูปที่ 4.1-20 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)



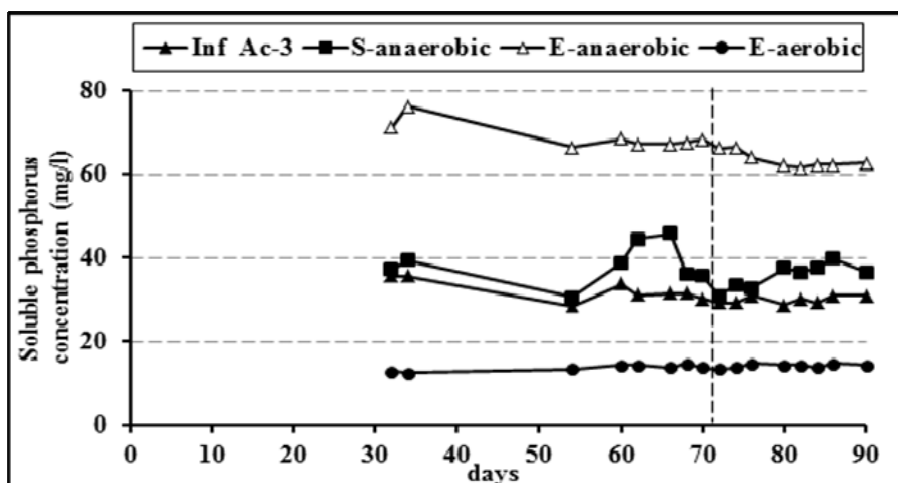
รูปที่ 4.1-21 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

ค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ยังคงรักษาระดับให้อยู่ในช่วง 19 – 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และค่าที่เคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 7 – 8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก (รูปที่ 4.1-22) และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศ พบค่าที่เคเอ็นไนโตรเจนในช่วงเหลือเพียง 2 – 3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ด้วยเหตุผลคล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ ที่การกำจัดที่เคเอ็นในระบบน่าจะเนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในเซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถึง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ ก่อนหน้า โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันไม่มีอิทธิพลชัดเจนในการกำจัดที่เคเอ็นของการทดลองนี้



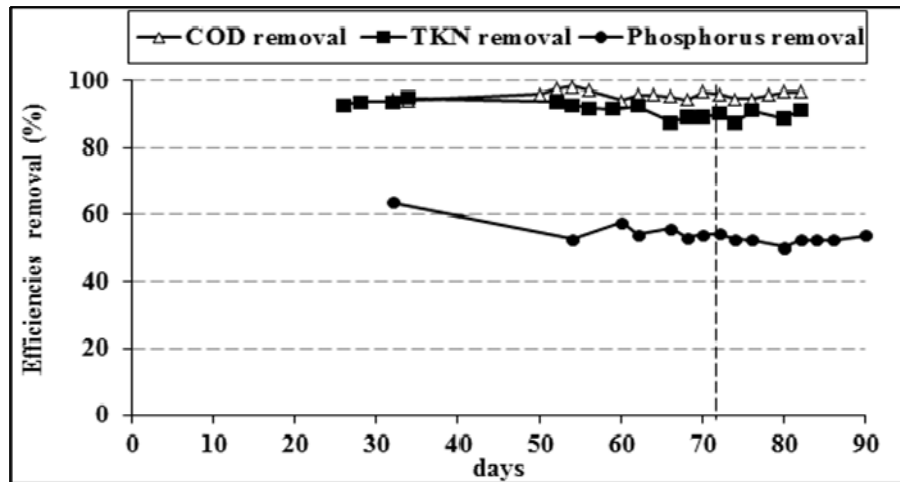
รูปที่ 4.1-22 ความเข้มข้นที่เคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสละลายน้ำในการทดลองนี้ ยังคงแสดงลักษณะของกระบวนการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ กล่าวคือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 61 – 63 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์ (28 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร) ประมาณ 2 เท่า แสดงถึงจุลินทรีย์สลายพันธะฟอสเฟตในเซลล์ออกมาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองก่อนหน้านี้ เมื่อมีการเติมอากาศทำให้มีการจับใช้ฟอสฟอรัสในน้ำเข้าสู่เซลล์จนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในช่วง 13 – 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ (รูปที่ 4.1-23)



รูปที่ 4.1-23 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

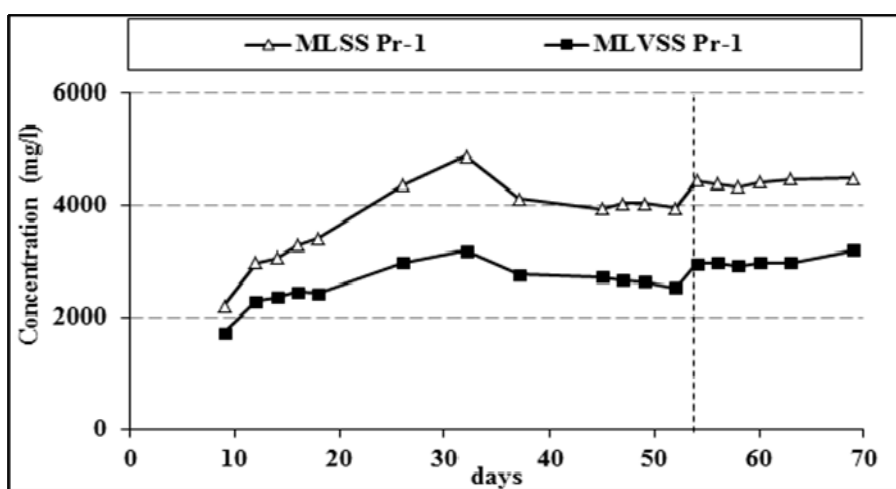
จากรูปที่ 4.1-24 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองนี้เฉลี่ยร้อยละ 96 เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นสารย่อยสลายง่ายทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้จนเกือบหมด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 90 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้คือเฉลี่ยร้อยละ 52



รูปที่ 4.1-24 ประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลอง Ac-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

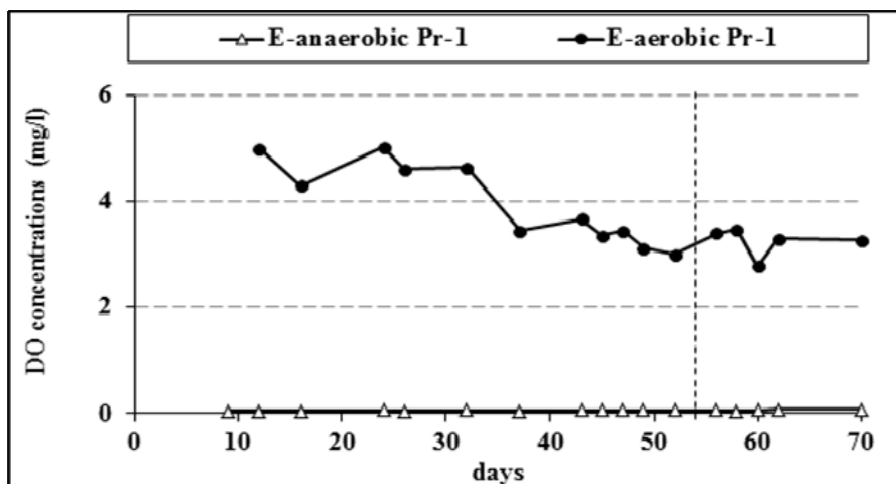
4.1.4 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 (Pr-1)

การทดลองนี้ยังคงควบคุมอุณหภูมิการเดินระบบที่ 20 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากนิวเทรียนบรอตร่วมกับกรดอินทรีย์เฉพาะกรดโพธิ์โอนิกเท่านั้น กล่าวคืออัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพธิ์โอนิกเท่ากับ 0:100 ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ยังคงอยู่ในระดับคล้ายเดิมกับที่ผ่านมาคืออยู่ในช่วง 4300 – 4500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีของแข็งระเหย (MLVSS) ในช่วง 2900 – 3200 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-25)

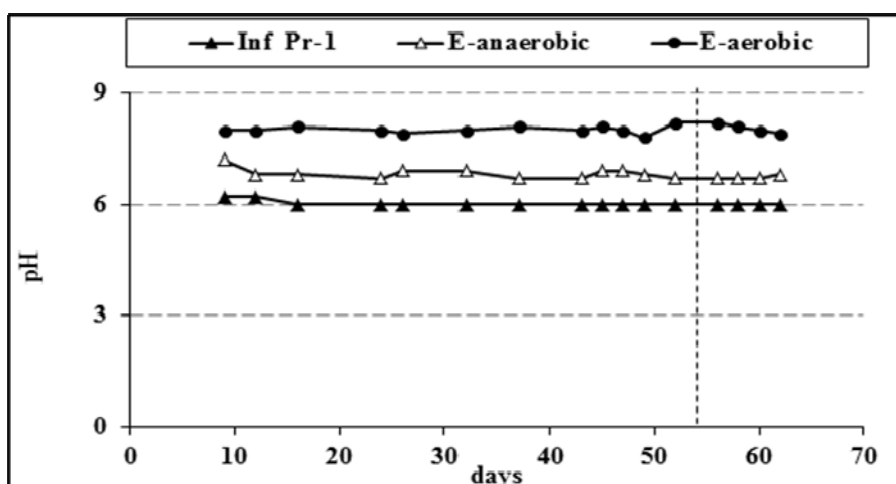


รูปที่ 4.1-25 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกยังคงแสดงสภาพไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนละลายต่ำมากที่ 0.04 – 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-26) ซึ่งสอดคล้องกับค่าโออาร์พีที่อยู่ในช่วงค่าติดลบคือ -30 ถึง -50 มิลลิโวลต์ และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก ค่าออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2.8 – 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับค่าโออาร์พีที่อยู่ในช่วงค่าบวกคือ 150 ถึง 215 มิลลิโวลต์ ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 6.0 – 6.1 ซึ่งมีค่าสูงกว่าในน้ำเสียที่เตรียมจากกรดอะซิติกอย่างเดียวร่วมกับนิวเทรียนบรอต เนื่องจากกรดโพธิ์โอนิกมีไฮโดรเจนอินทรีย์ต่อโมล ต่ำกว่ากรดอะซิติก ทำให้ได้ค่าพีเอชสูงกว่า (เป็นกรดน้อยกว่า) นั่นเอง และเมื่อกรดอินทรีย์ถูกดูดซึมในสภาวะแอนแอโรบิกไปทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นมาอยู่ในช่วง 6.7 – 6.8 และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 7.9 – 8.2 คล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ (รูปที่ 4.1-27)

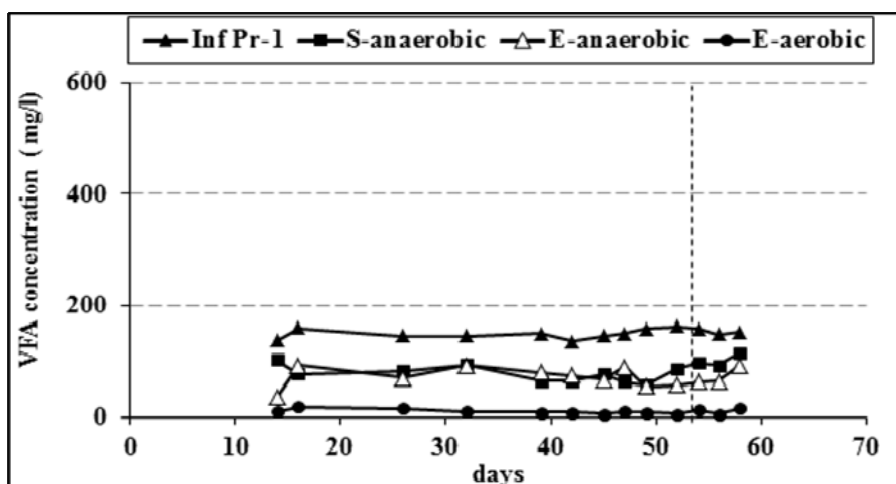


รูปที่ 4.1-26 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

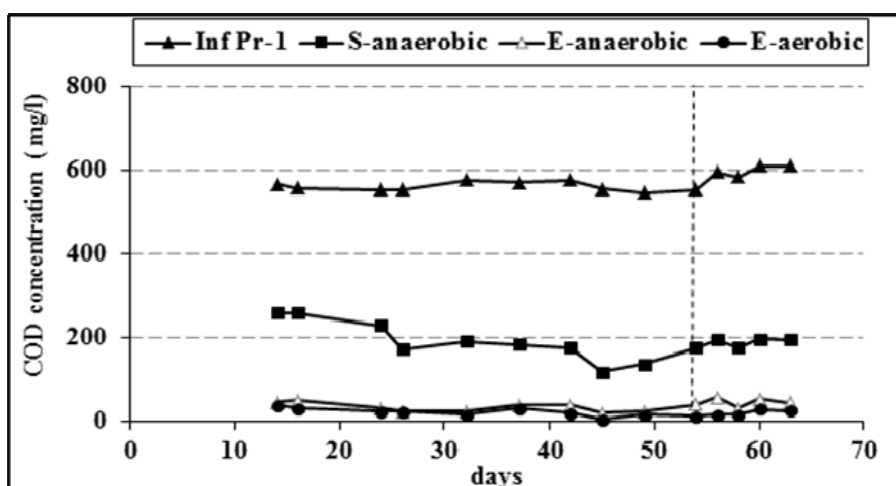


รูปที่ 4.1-27 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เตรียมพบอยู่ในช่วง 140 – 160 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียในการทดลอง Ac-1 ที่มีค่าซีโอดีเท่ากัน แต่ให้ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในช่วงที่สูงกว่า (430 – 460 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก) จะเห็นได้ว่ากรดโพรพิโอนิกให้ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่ำกว่ากรดอะซิติกเมื่อต้องการเตรียมน้ำเสียให้ได้ค่าซีโอดีเท่ากัน สอดคล้องกับค่าพีเอชข้างต้น อย่างไรก็ตาม กรดโพรพิโอนิกก็ถูกดูดซึมเข้าเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกและเหลืออยู่ในช่วง 60 – 90 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก จากนั้นถูกใช้และย่อยสลายต่อในช่วงสภาวะแอโรบิก เหลือเพียง 5 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-28) สำหรับค่าซีโอดีในน้ำเสียยังคงควบคุมให้อยู่ในระดับใกล้เคียงเดิมคือ 560 – 610 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบเหลืออยู่เพียง 30 – 44 มิลลิกรัมต่อลิตรในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก สอดคล้องกับกรดไขมันระเหยง่ายที่ลดลงไปในช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศนี้ และลดลงเหลือเพียง 12 – 28 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-29)

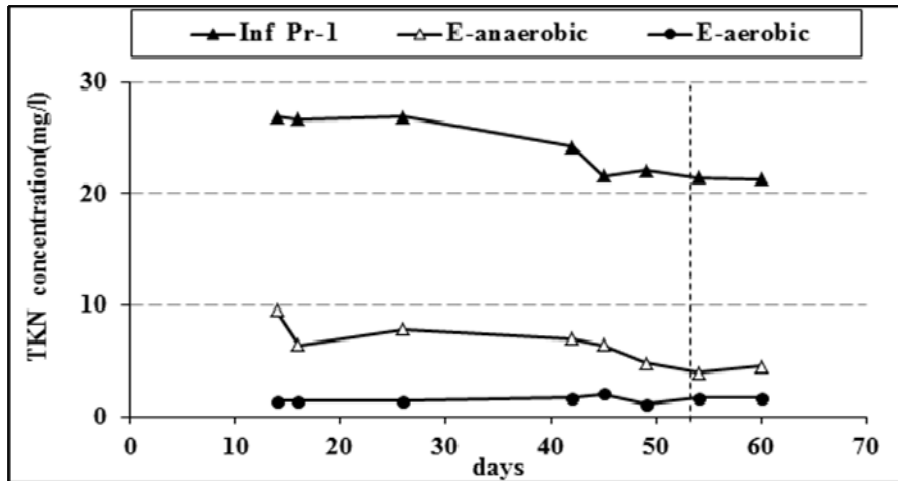


รูปที่ 4.1-28 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)



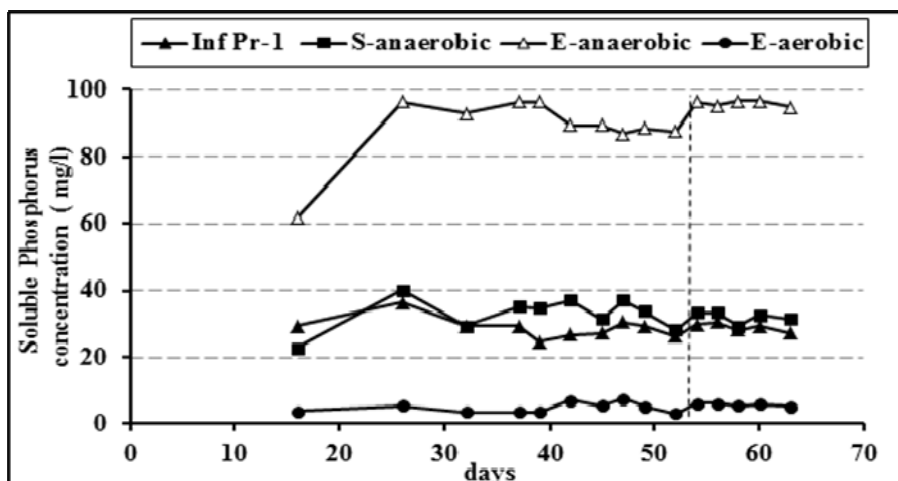
รูปที่ 4.1-29 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

ค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 20 – 22 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าที่เคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 2 – 6 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถึง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้า โดยเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอรอบิกพบค่าที่เคเอ็นเหลือเพียง 1 – 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.1-30) โดยไม่พบกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกลไกหลักในการลดที่เคเอ็นเนื่องจากความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอรอบิกพบค่อนข้างต่ำ

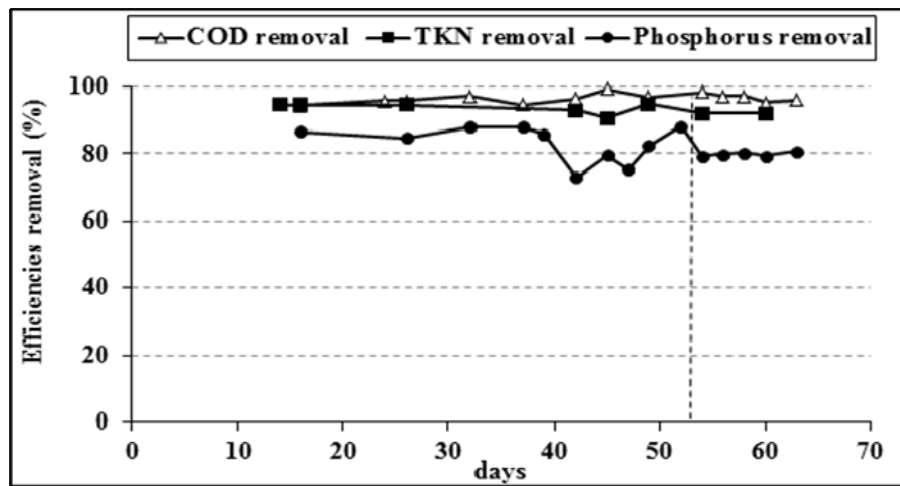


รูปที่ 4.1-30 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

สำหรับฟอสฟอรัสละลายน้ำในการทดลองนี้ พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างสูง คือ อยู่ในช่วง 95 – 96 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-31) ซึ่งมากกว่าฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์ (28 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถึงกว่า 3 เท่า แสดงว่าจุลินทรีย์ในการทดลองนี้สลายแหล่งพลังงานในเซลล์และปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าการทดลอง Ac-1 ที่มีแต่กรดอะซิติก หรือกล่าวได้ว่าการดึงกรดโพรพิโอนิกเข้าเซลล์จำเป็นต้องใช้พลังงานมากกว่ากรดอะซิติก และการทดลองนี้ยังพบว่า การจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกมีประสิทธิภาพดีกว่าการทดลอง Ac-1 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอโรบิกเหลือเพียง 5 – 6 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่า การทดลองนี้ยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นค่อนข้างสูง คือ เฉลี่ยร้อยละ 97 และ 92 ตามลำดับ คล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้เนื่องจากสารอินทรีย์ยังคงเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่าย และทีเคเอ็นถูกควบคุมให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการใช้ในเซลล์เท่านั้น แต่ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 80 (รูปที่ 4.1-32)



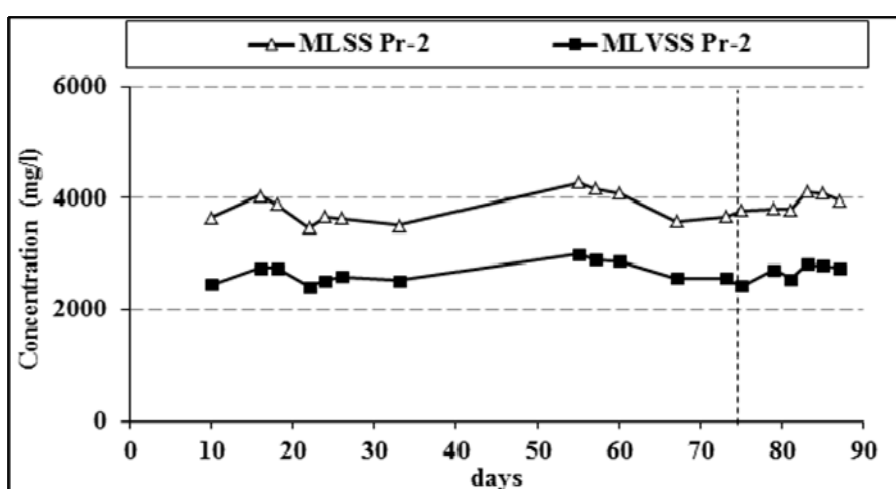
รูปที่ 4.1-31 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)



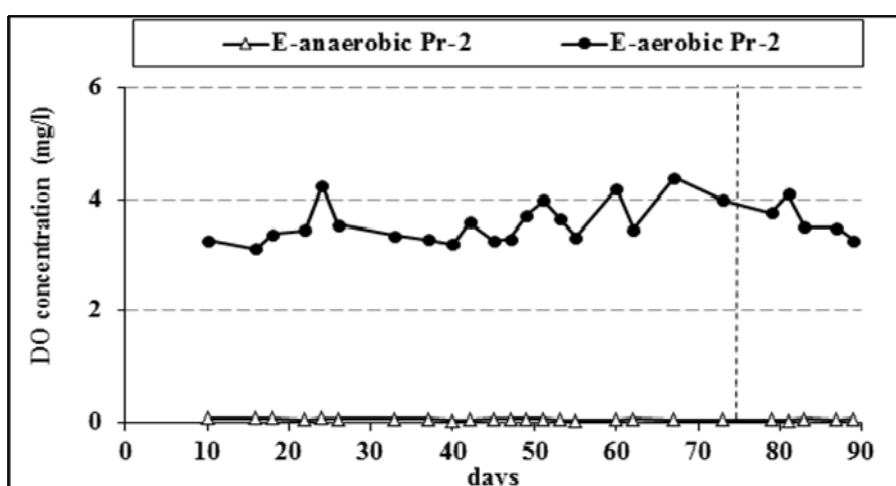
รูปที่ 4.1-32 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-1 (20°C และ Ac:Pr = 0:100)

4.1.5 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 25:75 (Pr-2)

การทดลองนี้เตรียมน้ำเสียโดยปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกให้เป็น 25:75 และยังคงเดินระบบที่อุณหภูมิ 20 ± 0.5 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) อยู่ในช่วง 3700 – 4200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีของแข็งระเหย (MLVSS) ในช่วง 2400 – 2900 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-33) ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนละลายต่ำอยู่ในช่วง 0.03 – 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 3.3 – 4.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-34) ค่าโออาร์พีในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -26 ถึง -45 มิลลิโวลต์ และอยู่ในช่วงค่าบวกในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศและมีออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นคือ 200 – 250 มิลลิโวลต์

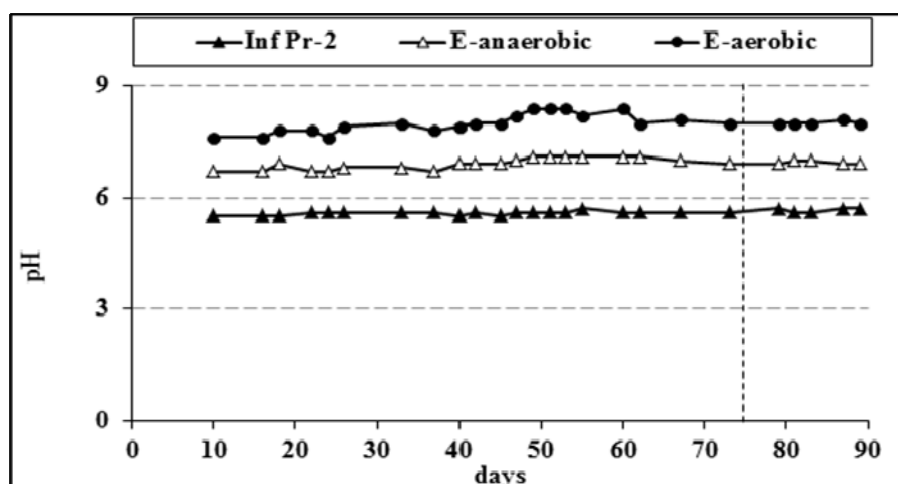


รูปที่ 4.1-33 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)



รูปที่ 4.1-34 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

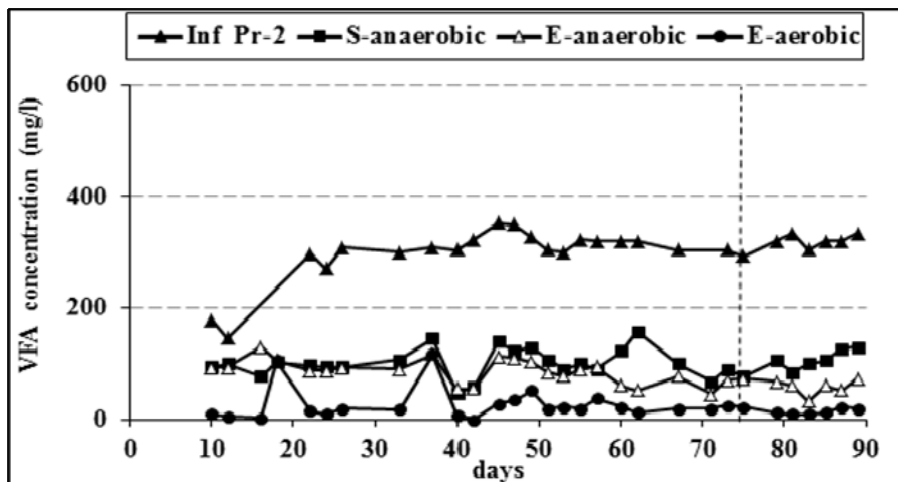
ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 5.6 – 5.7 มีค่าต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย เนื่องจากการเติมกรดอะซิติก ซึ่งมีอัตราส่วนไฮโดรเจนไอออนต่อโมลสูงกว่ากรดโพรพิโอนิก ส่งผลให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเป็นกรดมากกว่าแม้ว่าจะมีค่าซีโอดีเท่ากัน จากนั้นค่าพีเอชได้เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.9 – 7.0 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก และช่วง 8.0 – 8.1 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-35)



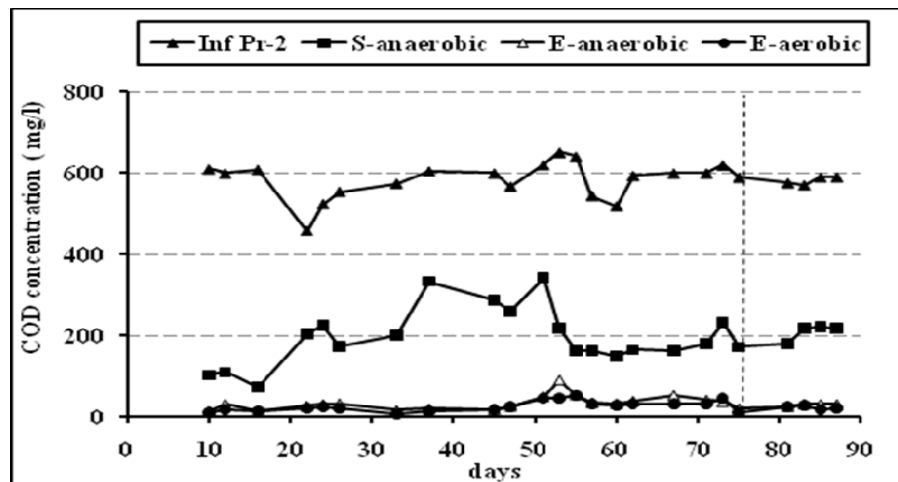
รูปที่ 4.1-35 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เตรียมพบอยู่ในช่วง 300 – 320 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองก่อนหน้านี้ (Pr-1) จะเห็นได้ว่าการเติมกรดอะซิติกแทนที่กรดโพรพิโอนิก บางส่วน ทำให้ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก กรดไขมันระเหยง่ายเหลือเพียง 30 – 73 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก และถูกใช้จนเกือบหมดในสภาวะแอโรบิกโดยเหลืออยู่เพียง 10 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-36) ส่วนค่าซีโอดีในน้ำเสียอยู่ในช่วง 570 – 590 มิลลิกรัมต่อลิตร และในสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าซีโอดีเหลือเพียง 20 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร และถูกย่อยสลายจนเกือบหมดในสภาวะแอโรบิก โดยมีค่าซีโอดีเหลือเพียง 12 – 28 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-37)

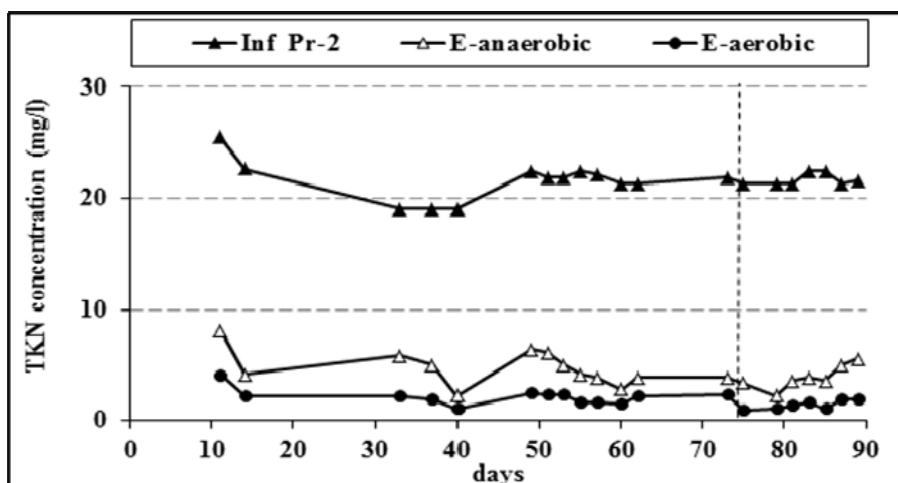
ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 21 – 22 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 2 – 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถัง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้า โดยเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบค่าทีเคเอ็นเหลือเพียง 1 – 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.1-38) โดยความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรต์ไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอโรบิกพบค่อนข้างต่ำ จึงกล่าวได้ว่าไม่พบกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกลไกหลักในการลดทีเคเอ็น



รูปที่ 4.1-36 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

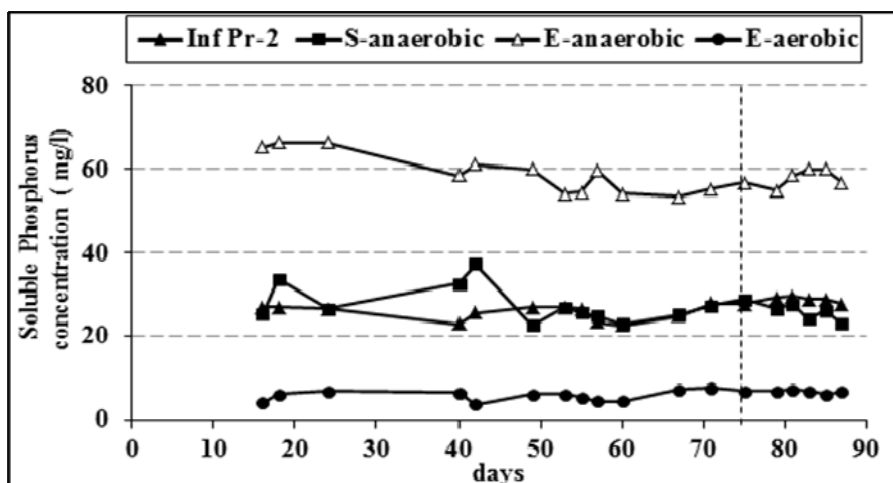


รูปที่ 4.1-37 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

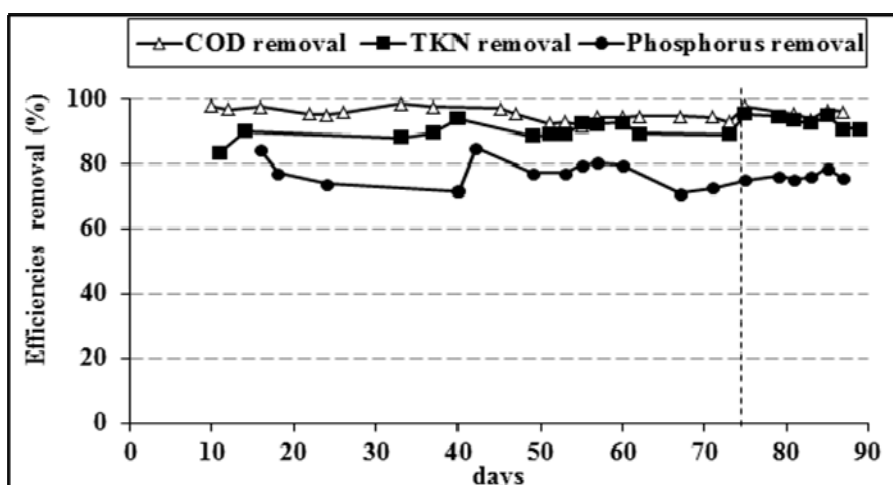


รูปที่ 4.1-38 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

สำหรับฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมให้อยู่ในช่วง 27 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก มีการปล่อยฟอสฟอรัสเพื่อสลายแหล่งพลังงานในเซลล์ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 54 – 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-39) จะเห็นได้ว่าการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกของการทดลองนี้ไม่สูงเท่ากับการทดลองก่อนหน้านี้ (การทดลอง Pr-1) เป็นไปได้ว่าการดูดซึมกรดอะซิติกเข้าสู่เซลล์ใช้พลังงานน้อยกว่ากรดโพรพิโอนิก อย่างไรก็ตาม การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกยังคงแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนและคุณภาพน้ำเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก พบความเข้มข้นฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้คืออยู่ในช่วง 6 – 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 76 (รูปที่ 4.1-40) ซึ่งต่ำกว่าในการทดลองก่อนหน้านี้ (ร้อยละ 80) เล็กน้อย โดยมีความสัมพันธ์กับการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกที่ต่ำกว่า กล่าวคือ การเพิ่มสัดส่วนกรดอะซิติกแทนกรดโพรพิโอนิกนั้น ส่งผลกระทบท่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ลดลงนี้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นยังคงค่อนข้างสูงเช่นเดิม คือ เฉลี่ยร้อยละ 96 และ 93 ตามลำดับ



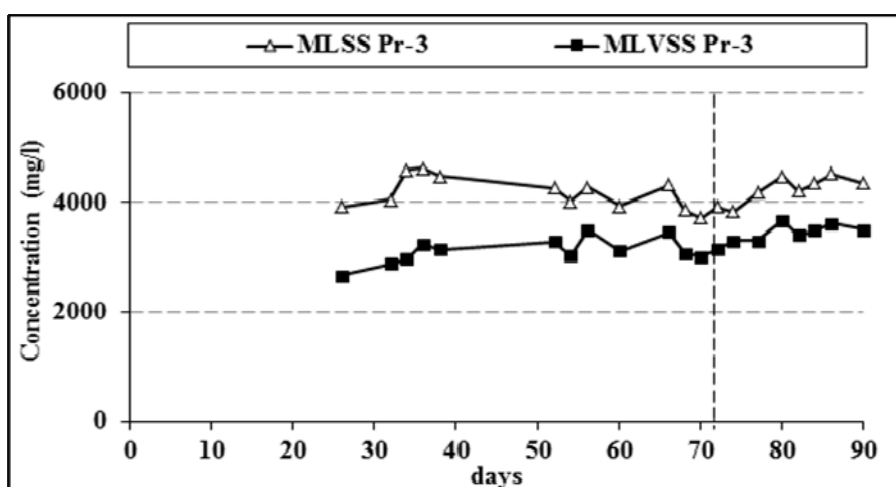
รูปที่ 4.1-39 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)



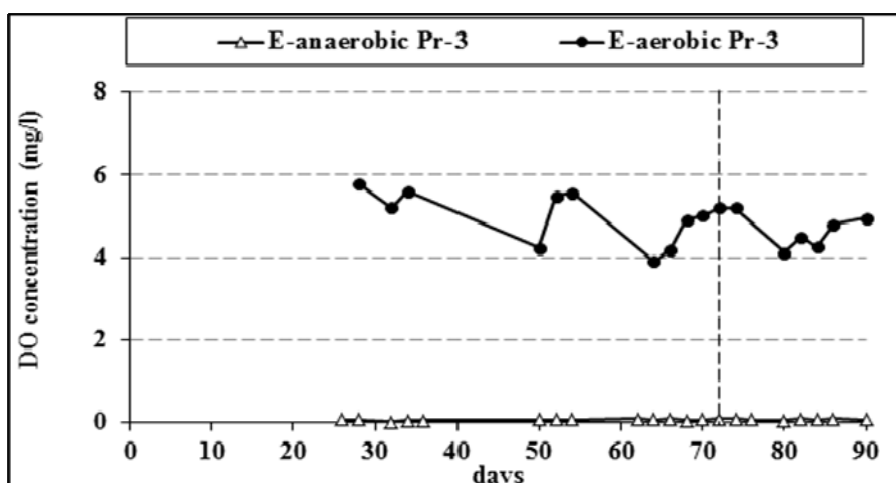
รูปที่ 4.1-40 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-2 (20°C และ Ac:Pr = 25:75)

4.1.6 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Pr-3)

การทดลองนี้ยังคงเดินระบบที่อุณหภูมิ 20 ± 0.5 องศาเซลเซียส แต่ปรับน้ำเสียที่เตรียมโดยใช้ อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเป็น 50:50 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) อยู่ในช่วง 3800 – 4500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีของแข็งระเหย (MLVSS) ในช่วง 2900 – 3200 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-41) ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกไม่มีการเติมอากาศอยู่ในช่วง 0.06 – 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้ ค่าออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 2.4 – 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-42) ค่าโออาร์พีในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -20 ถึง -80 มิลลิโวลต์ และอยู่ในช่วงค่าบวกในสภาวะแอโรบิกคือ 100 ถึง 150 มิลลิโวลต์

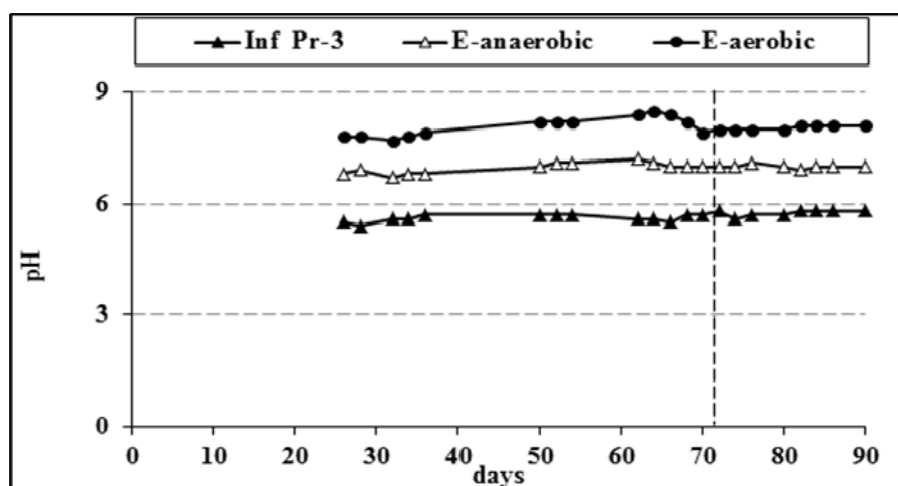


รูปที่ 4.1-41 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)



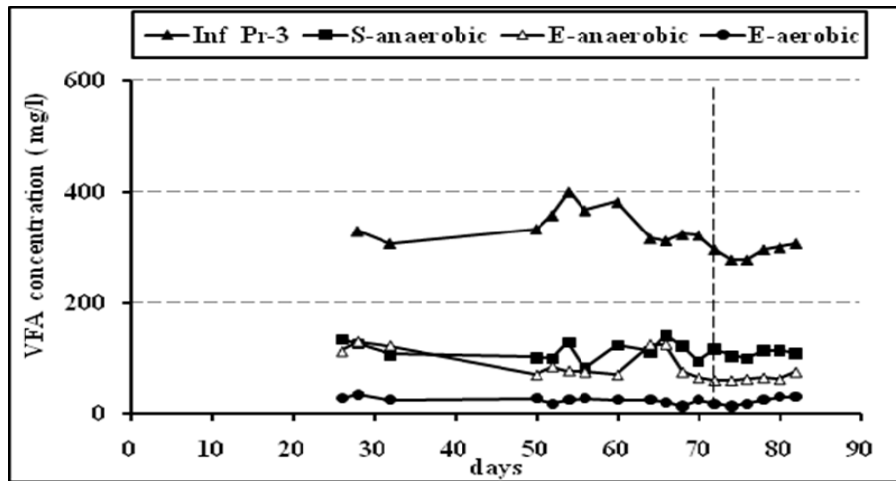
รูปที่ 4.1-42 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 5.6 – 5.7 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลอง Ac-3 ที่ต้องมี ส่วนผสมของน้ำเสียแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่าพีเอชก็กลับเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.9 – 7.0 ที่ปลายสภาวะ แอนแอโรบิกเนื่องจากมีการใช้กรดอินทรีย์ในน้ำไป และเมื่อมีการย่อยสลายต่อเนื่องในสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชในน้ำได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนอยู่ในช่วง 8.0 – 8.1 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-43) คล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้

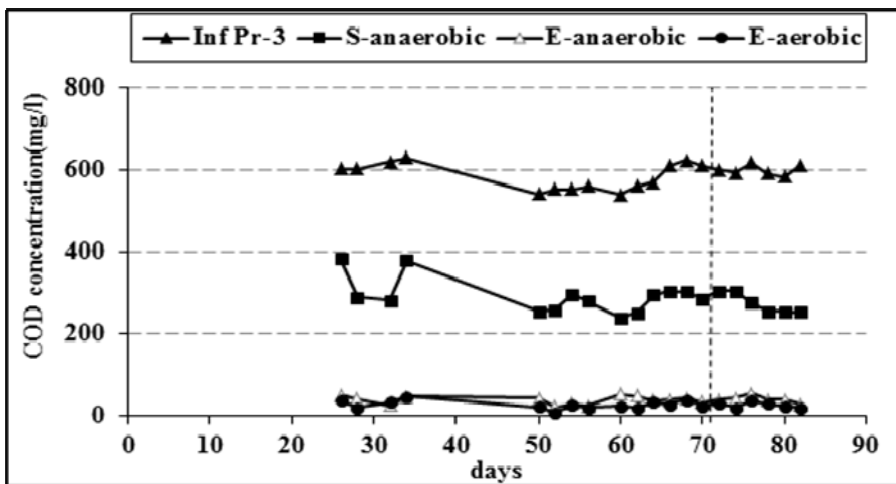


รูปที่ 4.1-43 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

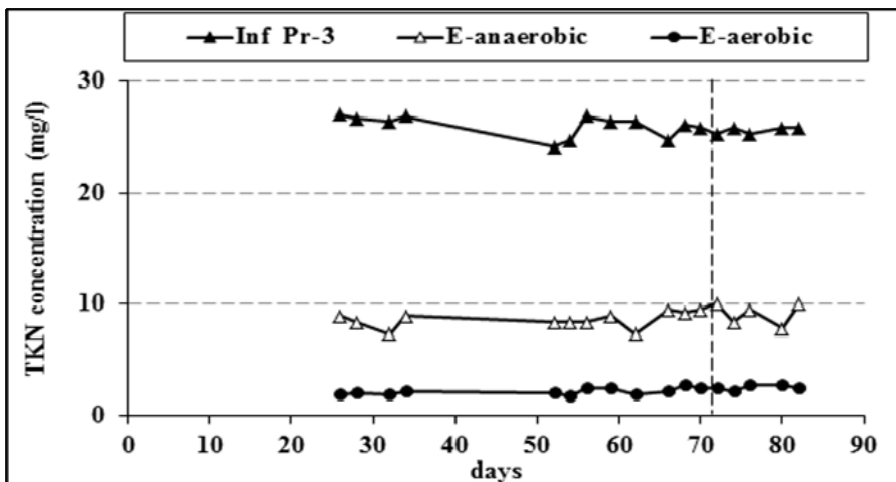
กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียนี้นพบอยู่ในช่วงเดียวกับการทดลอง Ac-3 ที่มีส่วนผสมของน้ำเสียใกล้เคียงกัน โดยมีกรดไขมันระเหยง่ายอยู่ในช่วง 270 – 310 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก (รูปที่ 4.1-44) แล้วลดลงในสภาวะแอนแอโรบิกเหลืออยู่ในช่วง 60 – 75 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก และลดลงต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกเหลือเพียง 25 – 26 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ทั้งนี้ ระดับความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายทั้งในสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกของการทดลองนี้ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง Ac-3 (คือ 65 – 80 และ 20 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ) ส่วนค่าซีโอดีของน้ำเสียยังคงอยู่ในช่วงที่ควบคุมไว้คือ 580 – 620 มิลลิกรัมต่อลิตร และถูกใช้จนเกือบหมดในสภาวะแอนแอโรบิกโดยค่าซีโอดีที่ปลายสภาวะจนเหลือเพียง 30 – 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการย่อยสลายต่อเนื่องในสภาวะแอโรบิกอีกเล็กน้อยจนเหลือค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 20 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.1-45) สำหรับค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 25 – 26 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร แล้วลดลงเหลืออยู่ในช่วง 7 – 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิก ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบค่าที่เคเอ็นในช่วง 2 – 3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.1-46)



รูปที่ 4.1-44 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

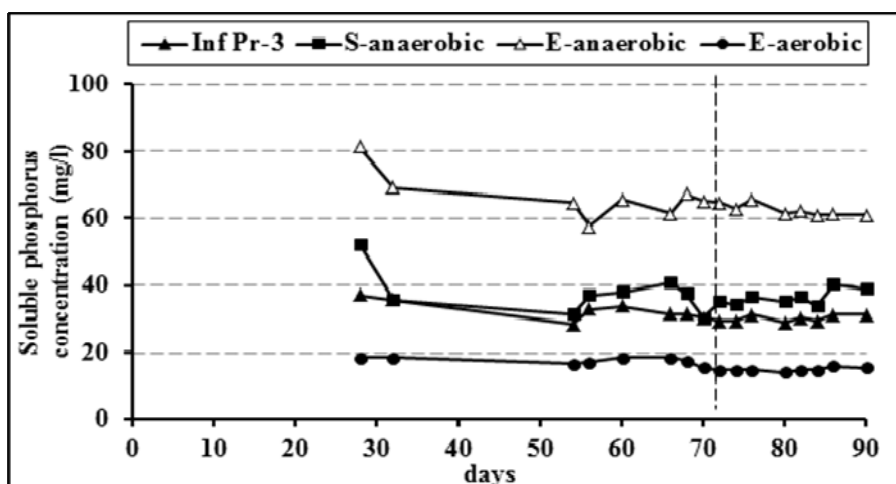


รูปที่ 4.1-45 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

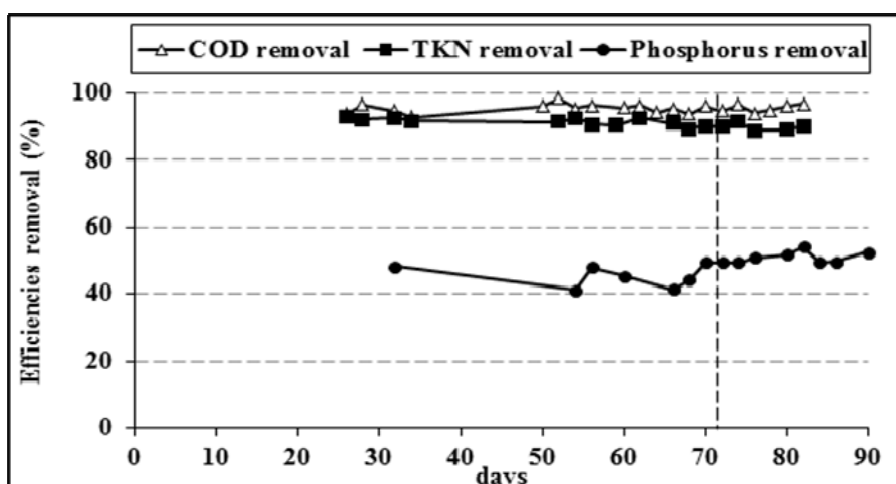


รูปที่ 4.1-46 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียอยู่ในช่วง 28 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร พบการปล่อยฟอสฟอรัสในสถานะแอนแอโรบิก โดยพบความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 60 – 62 มิลลิกรัมต่อลิตร (เพิ่มจากในน้ำเสียประมาณ 2 เท่า) จะเห็นว่าใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ (Pr-2) ที่มีการเติมกรดอะซิติกบางส่วน แต่ยังต่ำกว่าในการทดลอง Pr-1 (น้ำเสียไม่มีกรดอะซิติก) อย่างไรก็ตาม การจับใช้ฟอสฟอรัสในสถานะแอนแอโรบิกของการทดลองนี้ไม่สูงเท่ากับการทดลองก่อนหน้านี้ ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสถานะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 13 – 16 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1-47) ซึ่งสูงกว่าการทดลองก่อนหน้านี้ของถังปฏิกรณ์ Pr กล่าวคือประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของถังปฏิกรณ์ Pr ต่ำลงเมื่อมีการผสมกรดอะซิติกในน้ำเสียที่ป้อนให้ หรืออยู่ที่เฉลี่ยร้อยละ 50 เท่านั้น (รูปที่ 4.1-48) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสนี้ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac (Ac-1, Ac-2 และ Ac-3) จึงเป็นไปได้ว่ากรดอะซิติกอาจไม่ส่งเสริมกระบวนการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสได้ดีเท่ากรดโพรพิโอนิก อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นยังคงสูงกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกันในการทดลองอื่นก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.1-47 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)



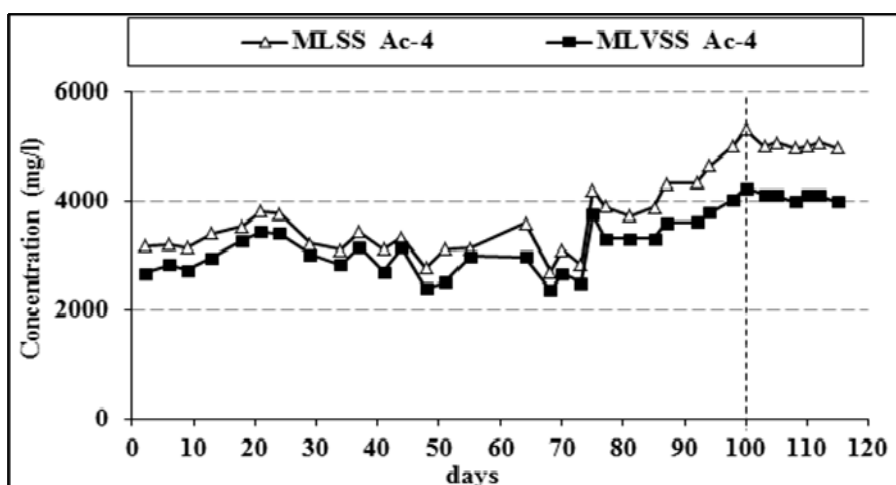
รูปที่ 4.1-48 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-3 (20°C และ Ac:Pr = 50:50)

4.2 การทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์กระทำที่อุณหภูมิห้อง (27 – 28 องศาเซลเซียส) และเมื่อเติมเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ อุปกรณ์ทำความร้อน (heater) ช่วงรักษาอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกรณ์ให้คงที่อยู่ที่ระดับ 30 ± 1 องศาเซลเซียส การทดลองทั้ง 6 การทดลองที่อุณหภูมินี้เดินระบบจนเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ทุกการทดลอง เก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบตลอดการทดลอง

4.2.1 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 (Ac-4)

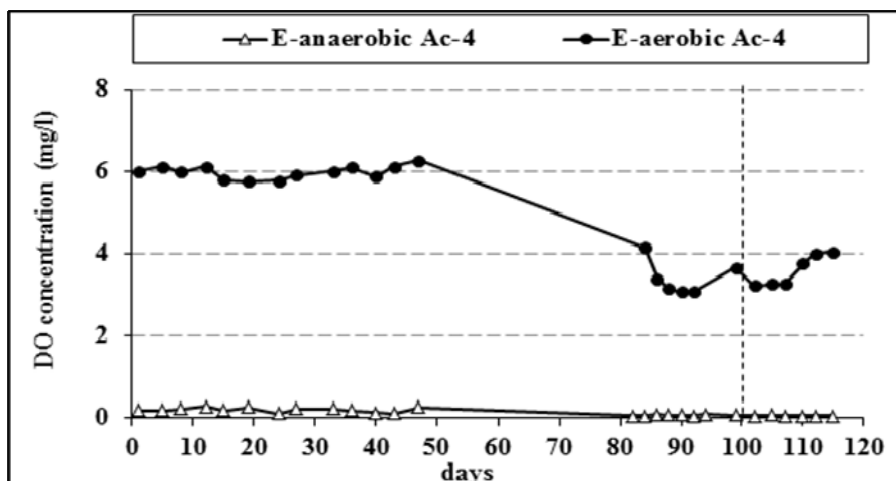
การทดลอง Ac-4 นี้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) เท่ากับ 100:0 เช่นเดียวกับการทดลอง Ac-1 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสลัดจ์ (MLSS) ในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 4900 – 5100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นของแข็งระเหย (MLVSS) อยู่ในช่วง 3900 – 4200 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-1) จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) สูงกว่าในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อีกทั้ง สลัดจ์มีสีน้ำตาลเข้มกว่าเล็กน้อยและมีกลิ่นสลัดจ์มากกว่า



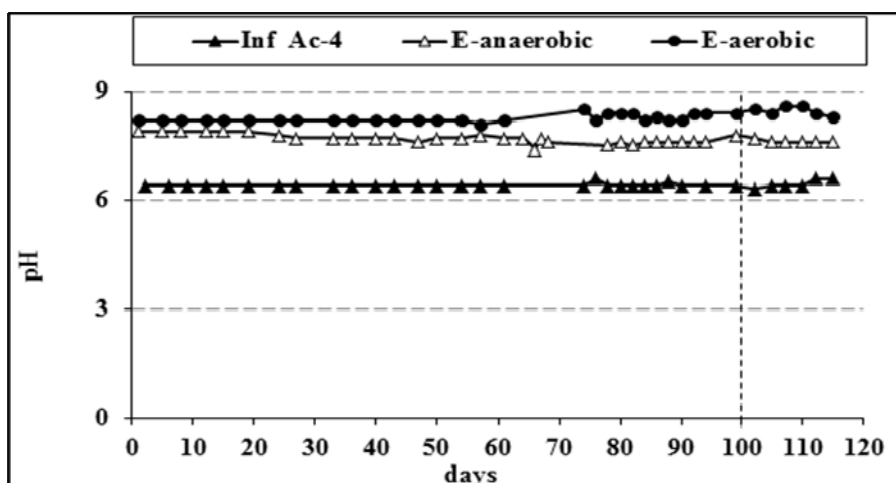
รูปที่ 4.2-1 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)

ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในช่วงปลายของสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic period) อยู่ในช่วง 0.04 – 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และในช่วงปลายของสภาวะแอโรบิก (aerobic period) อยู่ในช่วง 3.2 – 4.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-2) นอกจากนี้ ค่าโออาร์พีในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกพบอยู่ในช่วง -30 ถึง -60 มิลลิโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพไม่มีออกซิเจนของสภาวะในช่วงนี้ และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศพบค่าโออาร์พีในช่วง 70 – 140 มิลลิโวลต์ ค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมอยู่ในช่วง 5.4 – 5.5 เนื่องจากมีกรดอะซิติกเป็นส่วนประกอบหลัก สำหรับในช่วงปลายของสภาวะแอนแอ

โรวิกที่มีการใช้กรดอินทรีย์ (เช่น กรดอะซิติก) ไปบ้างแล้ว ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 7.6 – 7.7 และในช่วงปลายของสภาวะแอโรบิกมีค่าพีเอชในช่วง 8.2 – 8.6 เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำไปเกือบสมบูรณ์แล้ว(รูปที่ 4.2-3)



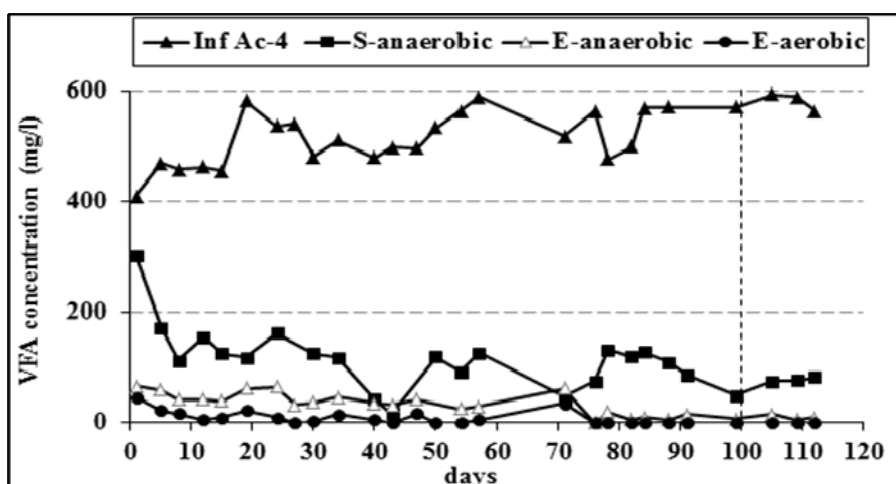
รูปที่ 4.2-2 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)



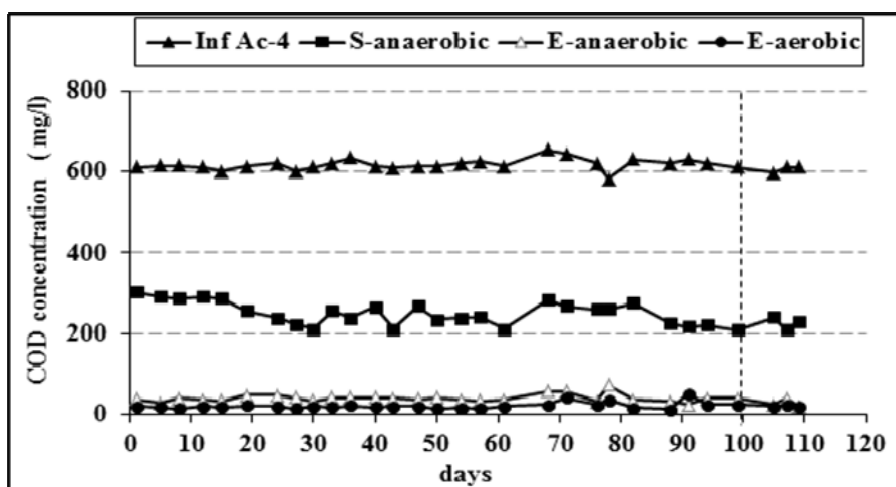
รูปที่ 4.2-3 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เตรียมพบอยู่ในช่วง 570 – 595 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ในช่วงเวลาเริ่มต้นของสภาวะแอนแอโรบิก หรือหลังจากที่เติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ น้ำค้างถึง (V_0) ได้เจือจางทำให้ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายลดลงอยู่ในระดับต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก กรดไขมันระเหยง่ายนี้ถูกใช้เป็นส่วนใหญ่ตั้งแต่สภาวะแอนแอโรบิกจนเกือบหมด โดยมีความเข้มข้นเหลืออยู่ต่ำมากในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก และในช่วงสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกก็แทบจะไม่มีกรดไขมันระเหยง่ายในระดับที่สามารถวิเคราะห์ได้ (non detection, ND) ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4 สำหรับค่าซีโอดีในน้ำเสียตลอดช่วงการทดลองนี้อยู่ในช่วง 590 – 620 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ ค่าซีโอดีมีความสอดคล้องกับการด

ไขมันระเหยง่ายอย่างชัดเจน โดยค่าซีไอดีในสถานะแอนแอโรบิกเหลือต่ำมากคือ 20 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเกือบจะไม่มีกรดย่อยสลายเพิ่มเติมในสถานะแอโรบิก เนื่องจากค่าซีไอดีเมื่อสิ้นสุดสถานะแอนแอโรบิกมีค่าใกล้เคียงกัน (20 – 25 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.2-5



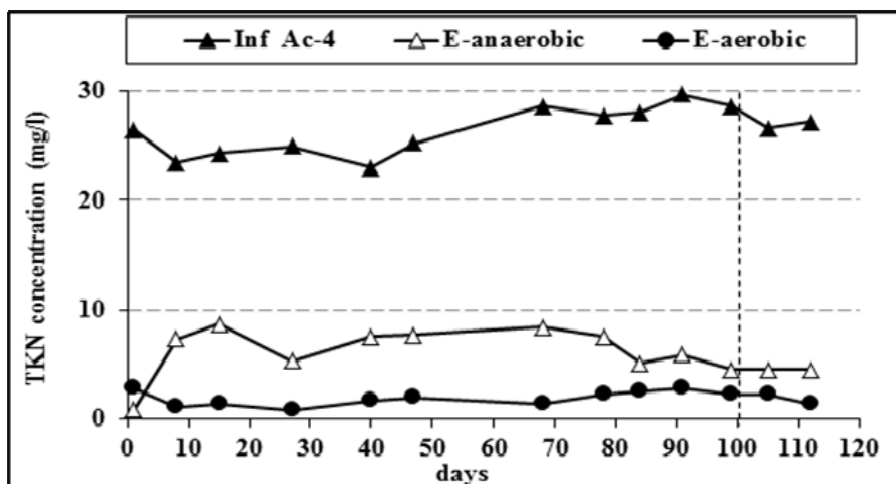
รูปที่ 4.2-4 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)



รูปที่ 4.2-5 ความเข้มข้นซีไอดี (COD) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)

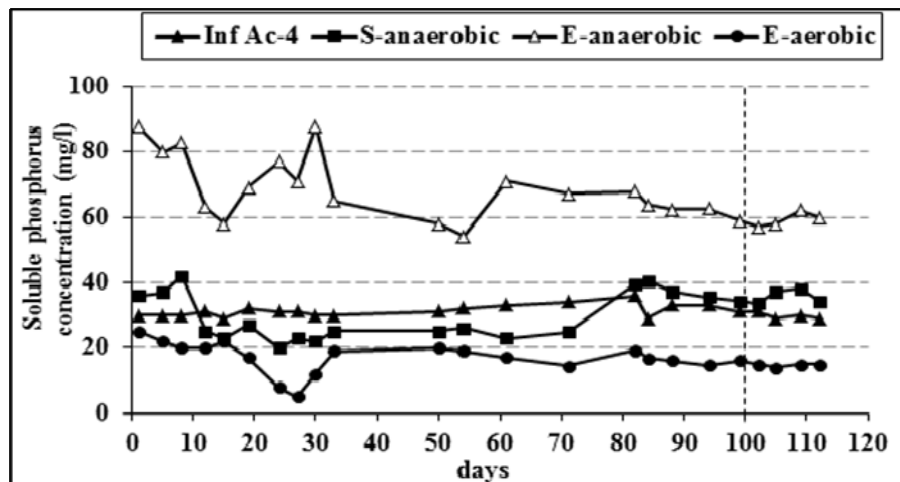
ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 26 – 29 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เพื่อควบคุมค่าทีเคเอ็นไม่ให้เหลือเกินพอสำหรับการใช้ภายในเซลล์ เมื่อเข้าสู่สถานะแอนแอโรบิกค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 2 – 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถัง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้า รูปที่ 4.2-6 แสดงให้เห็นว่า ในสถานะแอนแอโรบิก ค่าทีเคเอ็นลดลงจากช่วงแอนแอโรบิกอีกเล็กน้อยคือเหลือเพียง 1 – 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ไปในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์เป็นสำคัญ ถึงแม้การเดินระบบนี้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 28 องศาเซลเซียส ส่งเสริมให้กระบวนการไนตริฟิเคชันจะเกิดได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากความเข้มข้นไน

เตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนโตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอโรบิกพบค่อนข้างต่ำ จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันไม่ควรเป็นกลไกหลักในการลดทีเคเอ็นในสภาวะแอโรบิก

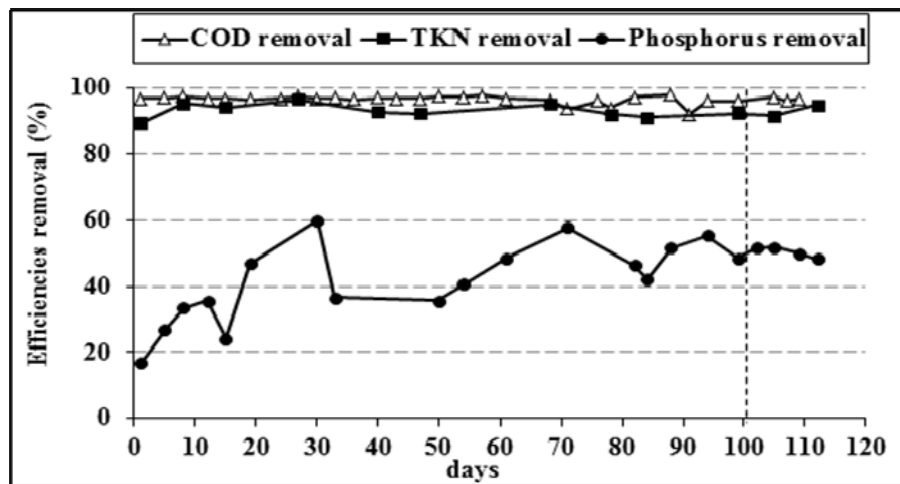


รูปที่ 4.2-6 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)

สำหรับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมมีอยู่ในช่วง 29 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์จุลินทรีย์ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกเช่นเดียวกัน ทำให้เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 55 – 63 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-7) ซึ่งสูงกว่าการปล่อยฟอสฟอรัสในการทดลอง Ac-1 (45 – 46 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr = 100:0 เช่นเดียวกับการทดลองนี้แต่ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนั้น แต่การปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ไม่ได้ทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกมีผลแตกต่างไปมากนัก โดยความเข้มข้นฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 14 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับในการทดลอง Ac-1 (12 – 13 มิลลิกรัมต่อลิตร) กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 50 ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.2-8) ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือเฉลี่ยร้อยละ 97 และ 93 ตามลำดับ



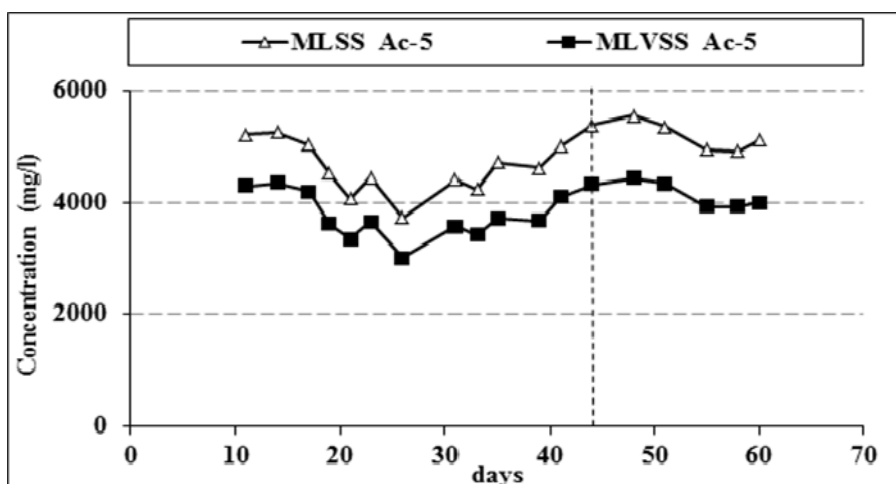
รูปที่ 4.2-7 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)



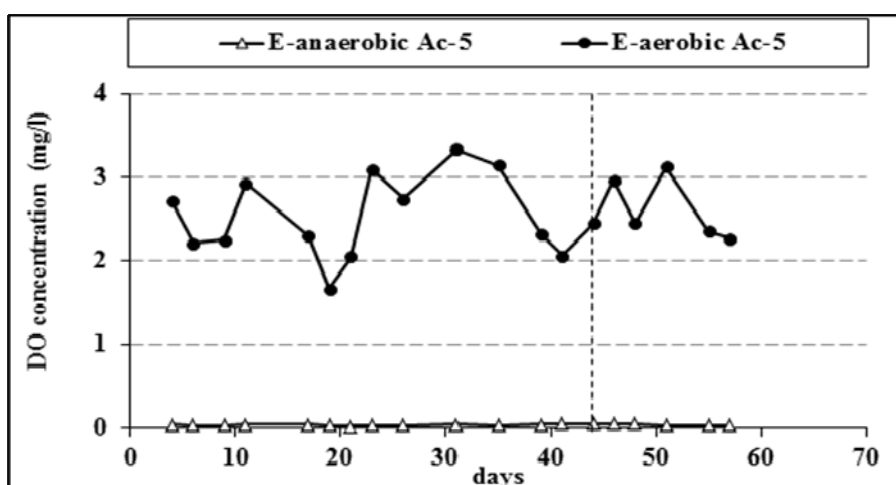
รูปที่ 4.2-8 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-4 (30°C และ Ac:Pr = 100:0)

4.2.2 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 (Ac-5)

การทดลองนี้ควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์อยู่ในระดับ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ด้วยอุปกรณ์ทำความร้อน (heater) แล้วปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) ให้เป็น 75:25 ร่วมกับนิวเทรียนบรอกเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับระบบ ความเข้มข้นสลัดจ์ (ค่า MLSS) อยู่ในช่วง 4900 – 5400 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าของแข็งระเหยในช่วง 3900 – 4500 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-9) คล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ (Ac-4) เพราะยังคงรักษาระดับค่าซีโอดีและภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไว้คงเดิม ค่าออกซิเจนละลายในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.03 – 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มเป็น 2.2 – 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปลายสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.2-10) ค่าโออาร์พีในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -10 ถึง -80 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าติดลบตามลักษณะที่ไม่มีออกซิเจนละลาย และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้ ค่าโออาร์พีจึงอยู่ในช่วงค่าบวก คือ 60 ถึง 170 มิลลิโวลต์

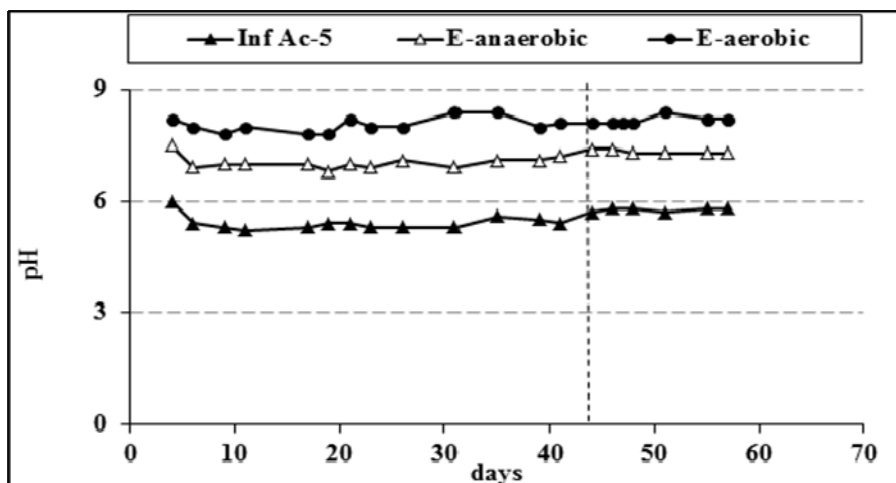


รูปที่ 4.2-9 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)



รูปที่ 4.2-10 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

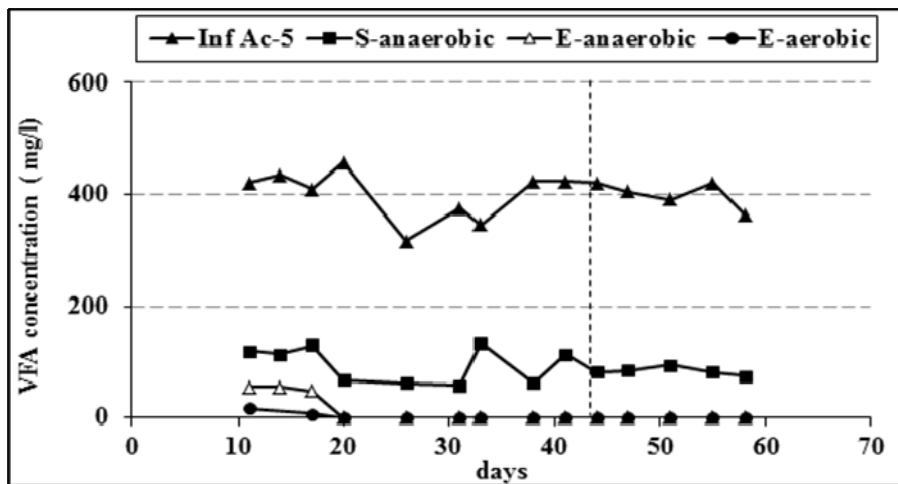
ค่าพีเอชของน้ำเสียที่เตรียมด้วยอัตราส่วนข้างต้นอยู่ในช่วง 5.7 – 5.8 แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 7.3 – 7.4 ในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก เนื่องจากกรดอินทรีย์ในน้ำถูกใช้ไปจากน้ำ และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก ที่การย่อยสลายสารอินทรีย์สมบูรณ์ ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยอยู่ในช่วง 8.1 – 8.4 (รูปที่ 4.2-11)



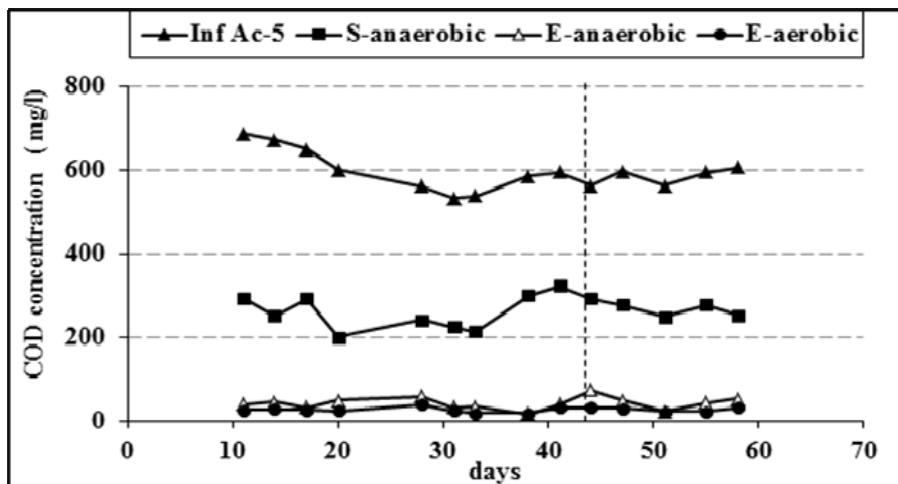
รูปที่ 4.2-11 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 390 – 420 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของกรดอะซิติก (รูปที่ 4.2-12) เนื่องจากมีการเติมกรดโพรพิโอนิกแทนกรดอะซิติกบางส่วน ทำให้ความเป็นกรดไขมันระเหยง่ายตามวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ค่าน้อยกว่าน้ำเสียที่มีแต่เพียงกรดอะซิติก และเช่นเดียวกับการทดลองที่อุณหภูมิระดับเดียวกันนี้ พบว่ากรดไขมันระเหยง่ายลดลงจนเกือบหมดตั้งแต่ปลายช่วงสภาวะแอนแอโรบิก และแทบจะวิเคราะห์หาค่าไม่ได้เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก สอดคล้องกับค่าซีไอที่แสดงในรูปที่ 4.2-13 ซึ่งค่าซีไอในน้ำเสียอยู่ในช่วง 560 – 610 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับการทดลองอื่นๆ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ค่าซีไอลดลงต่ำมากเหลือเพียง 20 – 75 มิลลิกรัมต่อลิตรตั้งแต่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก และแทบจะไม่ลดลงอีกเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกแล้วพบค่าซีไออยู่ในช่วง 20 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจกล่าวได้ว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในระดับเกือบ 30 องศาเซลเซียส การดูดซึมใช้สารอินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิกมีมากขึ้นกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

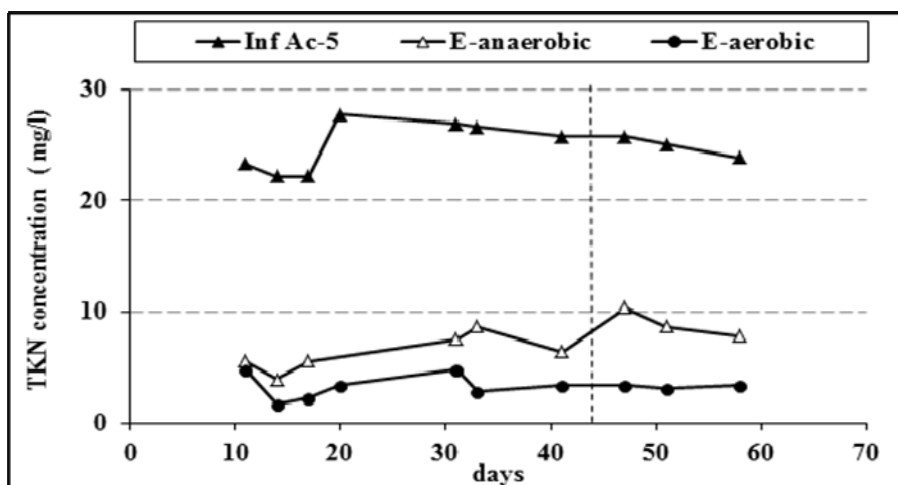
ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมอยู่ในช่วง 23 – 26 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิกค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 7 – 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.2-14) ซึ่งสูงกว่าในการทดลอง Ac-2 (2 – 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกัน (แต่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) อยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ค่าทีเคเอ็นลดลงต่อในช่วงสภาวะแอโรบิกจนเหลืออยู่ในช่วง 3 – 4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และพบความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ที่ปลายสภาวะแอโรบิกสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ก็ยังจัดว่าอยู่ในระดับต่ำ หรือมีกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นแต่ค่อนข้างน้อย



รูปที่ 4.2-12 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

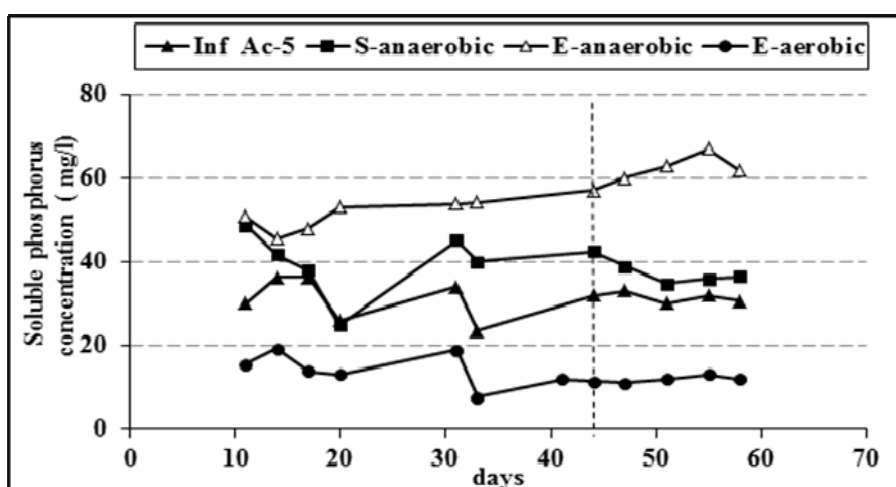


รูปที่ 4.2-13 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

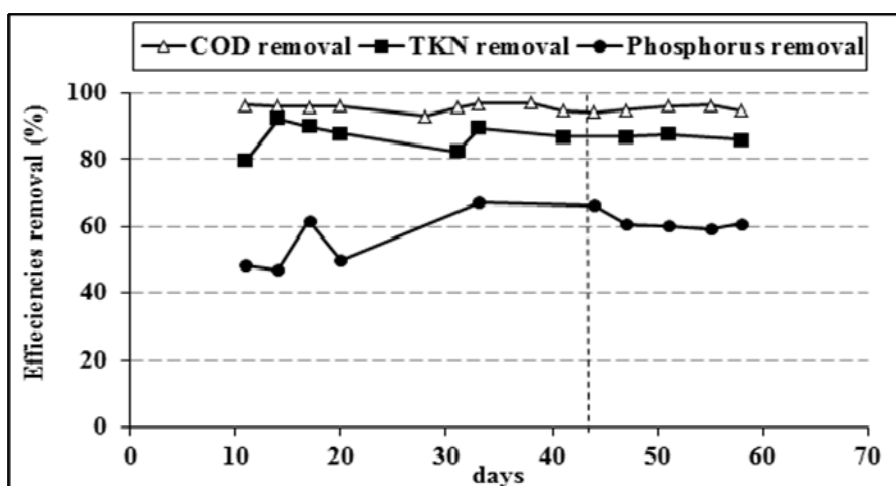


รูปที่ 4.2-14 ความเข้มข้นที่เคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

สำหรับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมมีอยู่ในช่วง 30 – 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิก พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์จุลินทรีย์ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 50 – 67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก ซึ่งสูงกว่าในการทดลอง Ac-1 (45 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกันแต่ต่างอุณหภูมิ และเช่นเดียวกันที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ปลายสภาวะแอโรบิก ยังคงพบอยู่ในช่วง 11 – 13 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-15) ทำให้มีการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 62 ซึ่งสูงกว่าในการทดลองก่อนหน้า (Ac-5) ที่มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 50 (รูปที่ 4.2-16) โดยยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 95 และทีเคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 87



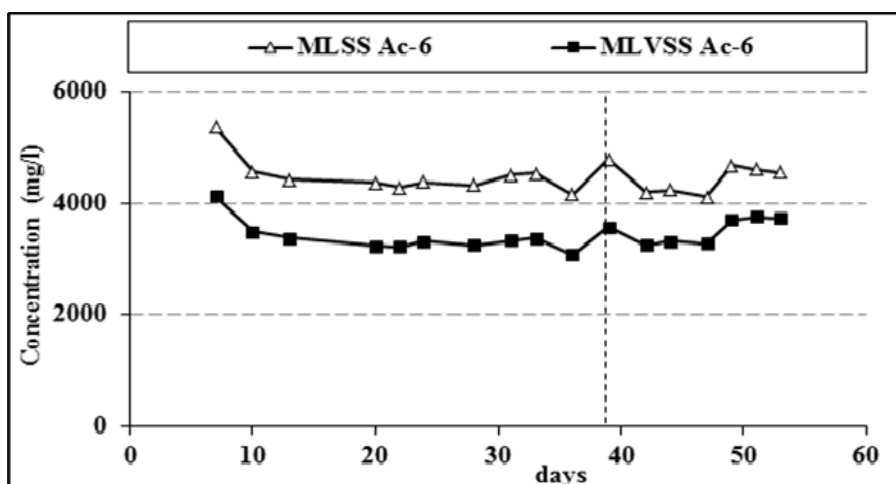
รูปที่ 4.2-15 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)



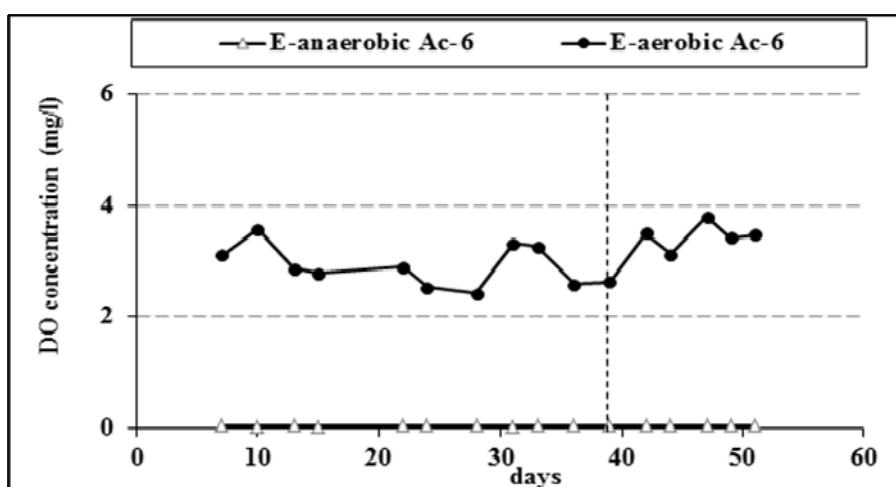
รูปที่ 4.2-16 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-5 (30°C และ Ac:Pr = 75:25)

4.2.3 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Ac-6)

การทดลองนี้เริ่มเดินระบบด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกในอัตราส่วน 50:50 ร่วมกับนิวเทรียนบรอก โดยยังควบคุมค่าซีไอดีในระดับคงเดิม และควบคุมอุณหภูมิที่ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส ดังนั้น ความเข้มข้นสลัดจ์ (ค่า MLSS) อยู่ในช่วง 4100 – 4600 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีของแข็งระเหยอยู่ในช่วง 3200 – 3800 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-17) ใกล้เคียงกับการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกันก่อนหน้านี้ทั้ง 2 การทดลอง เนื่องจากระดับสารอินทรีย์หรือภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading) ยังคงเท่าเดิม ค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.04 – 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2.6 – 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ (รูปที่ 4.2-18) ค่าโออาร์พีในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -20 ถึง -90 มิลลิโวลต์ แล้วเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 50 – 110 มิลลิโวลต์ในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมออกซิเจนให้

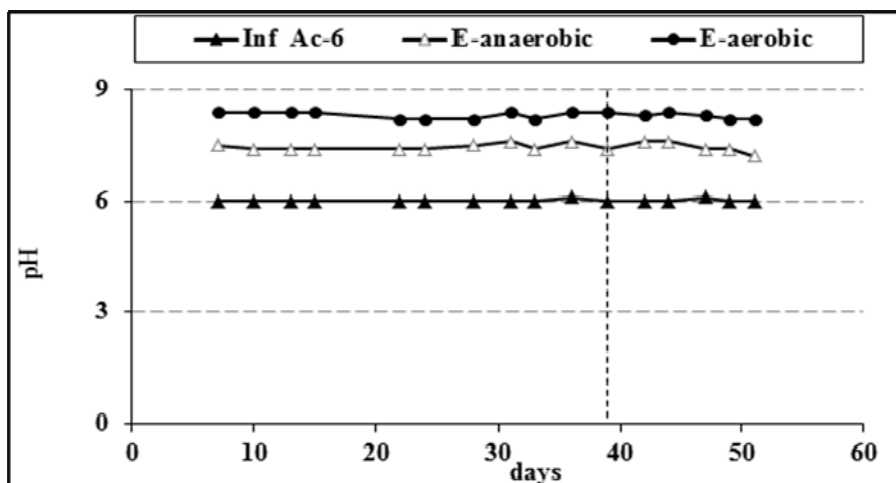


รูปที่ 4.2-17 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)



รูปที่ 4.2-18 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

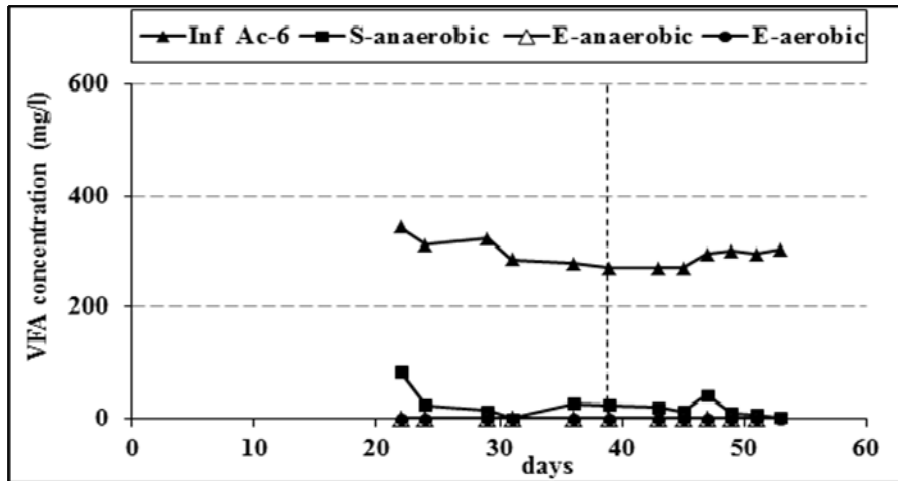
ค่าพีเอชในน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.0 – 6.1 สูงกว่าน้ำเสียที่เตรียมในการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย เนื่องจากมีการเพิ่มสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกซึ่งมีคาร์บอนต่อโมลสูงขึ้น (แต่ให้ไฮโดรเจนไอออนต่อมอลน้อยกว่ากรดอะซิติก) เมื่อมีการดูดซึมแหล่งคาร์บอนในน้ำไปใช้ตั้งแต่ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกทำให้กรดอินทรีย์ในน้ำเหลือน้อยลง ค่าพีเอชในน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกจึงเพิ่มขึ้นไปอยู่ในช่วง 7.2 – 7.6 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกและสารอินทรีย์ถูกใช้และย่อยสลายไปเกือบหมดแล้ว ค่าพีเอชในน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 8.2 – 8.4 (รูปที่ 4.2-19)



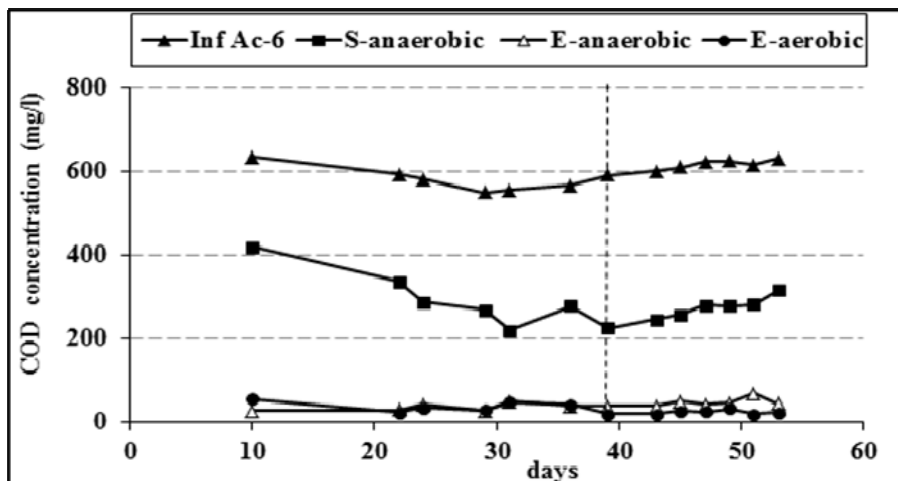
รูปที่ 4.2-19 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 นี้ พบอยู่ในช่วง 270 – 300 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก (รูปที่ 4.2-20) และเช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ อุณหภูมิเดียวกันที่พบการใช้กรดไขมันระเหยง่ายจนเกือบหมดตั้งแต่ในสภาวะแอนแอโรบิก และแทบจะไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าของกรดไขมันระเหยง่ายที่ต่ำมากเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกได้ ทั้งนี้ ค่าซีโอดีมีลักษณะสัมพันธ์กับกรดไขมันระเหยง่ายอย่างชัดเจน โดยในสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าซีโอดีต่ำมากอยู่ในช่วง 30 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือกล่าวได้ว่าถูกใช้ไปเกือบหมดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าซีโอดีในน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีในช่วง 570 – 630 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก การย่อยสลายสารอินทรีย์ค่อนข้างสมบูรณ์แล้ว พบค่าซีโอดีอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับสภาวะแอนแอโรบิกคือ 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-21)

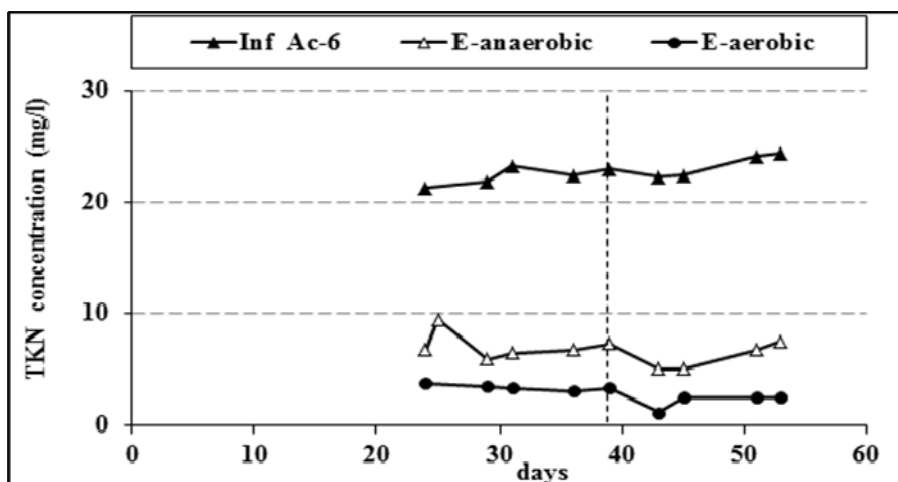
ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์ยังคงรักษาระดับให้อยู่ในช่วง 22 – 24 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 5 – 8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก (รูปที่ 4.2-22) และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศ พบค่าทีเคเอ็นไนโตรเจนในช่วงเหลือเพียง 1 – 3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ด้วยเหตุผลคล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ ที่การกำจัดทีเคเอ็นในระบบน่าจะเนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในเซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถึง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ ก่อนหน้า โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันไม่มีอิทธิพลชัดเจนในการกำจัดทีเคเอ็นของการทดลองนี้



รูปที่ 4.2-20 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

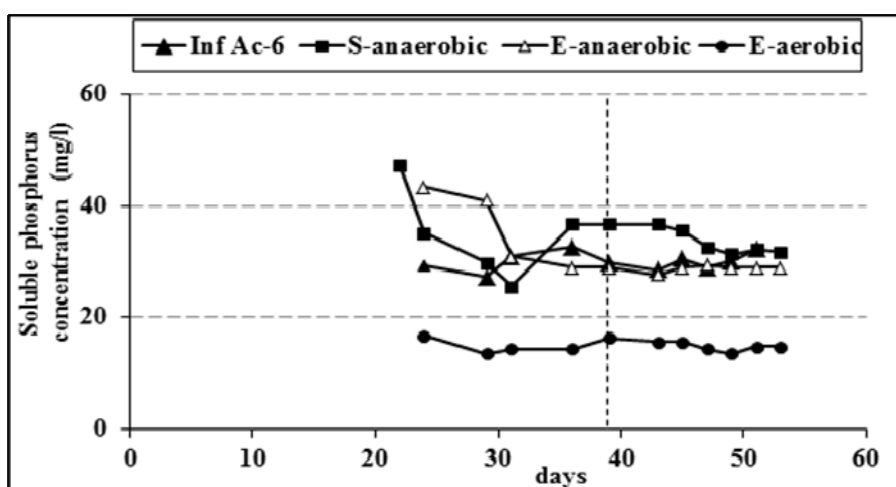


รูปที่ 4.2-21 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

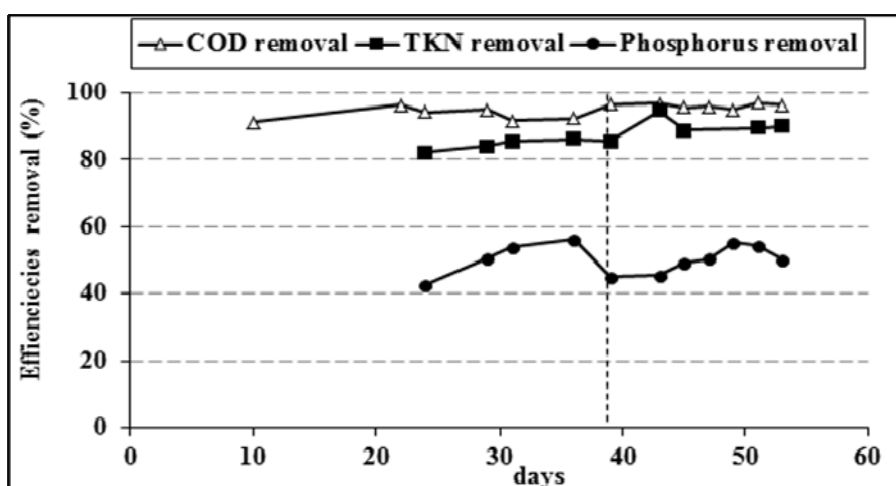


รูปที่ 4.2-22 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 28 – 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองนี้ แทบจะไม่พบการปล่อยฟอสฟอรัสออกนอกเซลล์ หรือมีแต่น้อยมาก โดยความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 27 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นระดับเดียวกับที่มีในน้ำเสีย อย่างไรก็ตามความเข้มข้นฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกพบอยู่ในช่วง 13 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-23) ใกล้เคียงกับการทดลองอื่นก่อนหน้านี้ แม้จะไม่พบการปล่อยฟอสฟอรัสชัดเจนมากนักแต่ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 50 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 96 และ 90 ตามลำดับ



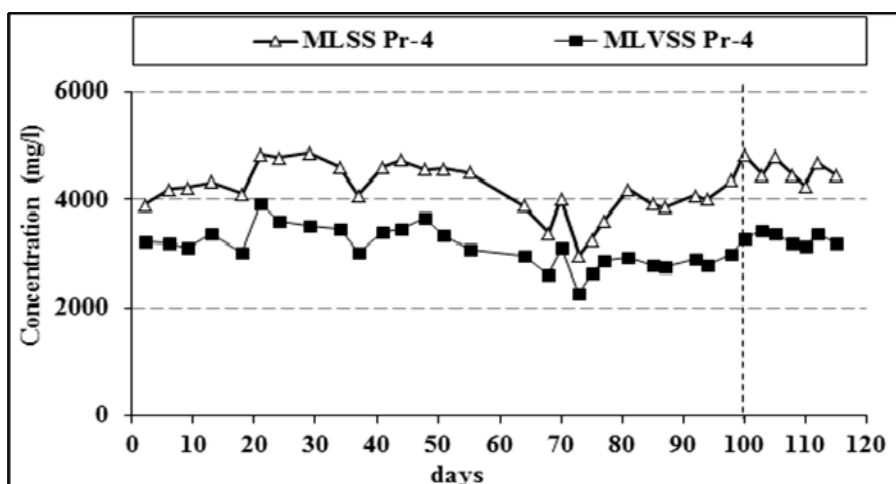
รูปที่ 4.2-23 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)



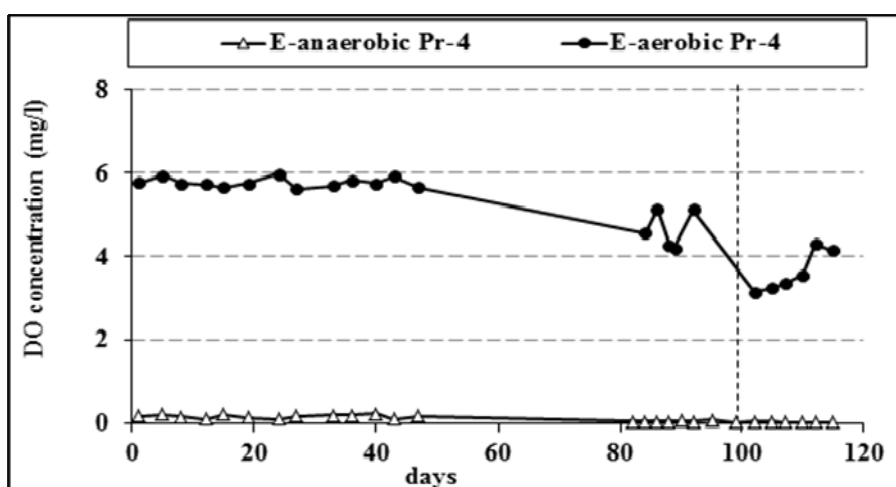
รูปที่ 4.2-24 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

4.2.4 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 (Pr-4)

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 0:100 หรือหมายถึงใช้เฉพาะกรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอก (ไม่เติมกรดอะซิติก) ความเข้มข้นสลัดจ์ในเทอมของ MLSS อยู่ในช่วง 4200 – 4700 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีของแข็งระเหย (MLVSS) อยู่ในช่วง 3100 – 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-25) ความเข้มข้นสลัดจ์นี้ค่อนข้างใกล้เคียงกับในการทดลอง Pr-1 ที่ใช้น้ำเสียส่วนผสมแบบเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่สลัดจ์มีสีน้ำตาลเข้มมากกว่า ค่าออกซิเจนละลายในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.03 – 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3.1 – 4.4 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้เหลือเพียงพอ (รูปที่ 4.2-26) สอดคล้องกับค่าโออาร์พีที่อยู่ในช่วงค่าติดลบคือ -30 ถึง -80 มิลลิโวลต์ เมื่ออยู่ในสภาวะแอนแอโรบิกหรือมีออกซิเจนละลายน้อย และอยู่ในช่วงค่าบวก คือ 70 ถึง 160 มิลลิโวลต์เมื่อมีการเติมอากาศในสภาวะแอโรบิก

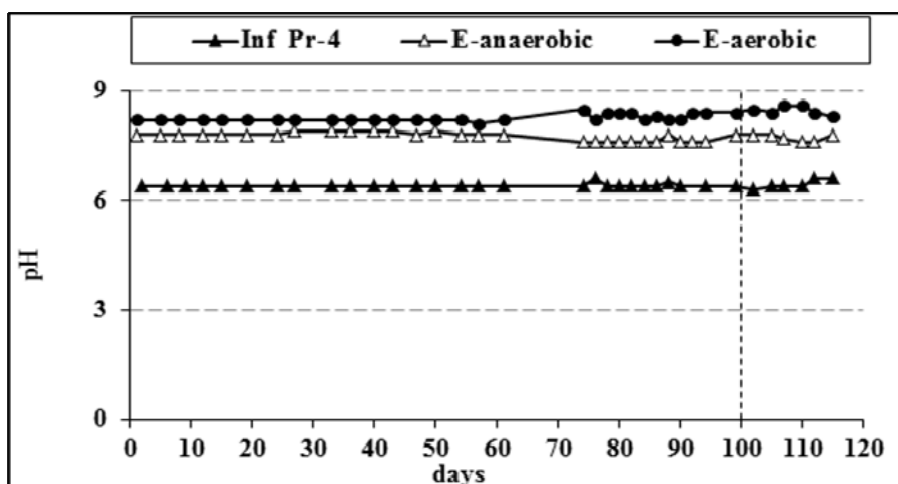


รูปที่ 4.2-25 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

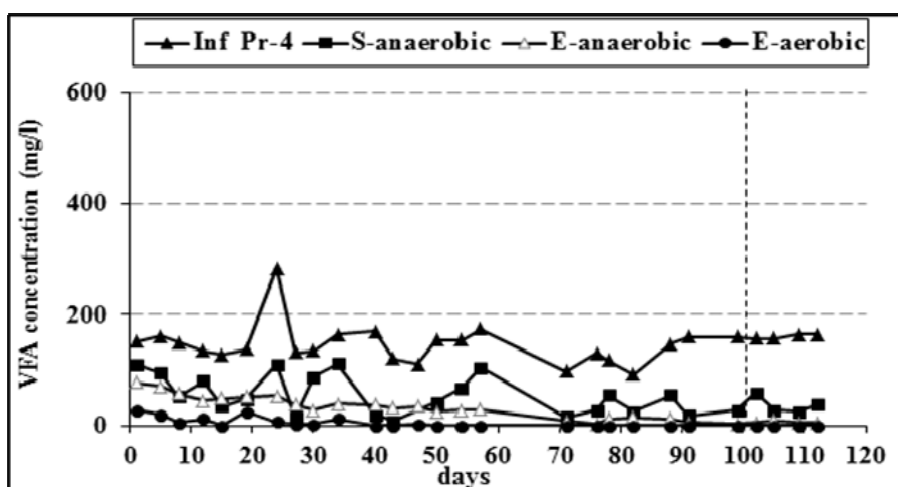


รูปที่ 4.2-26 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

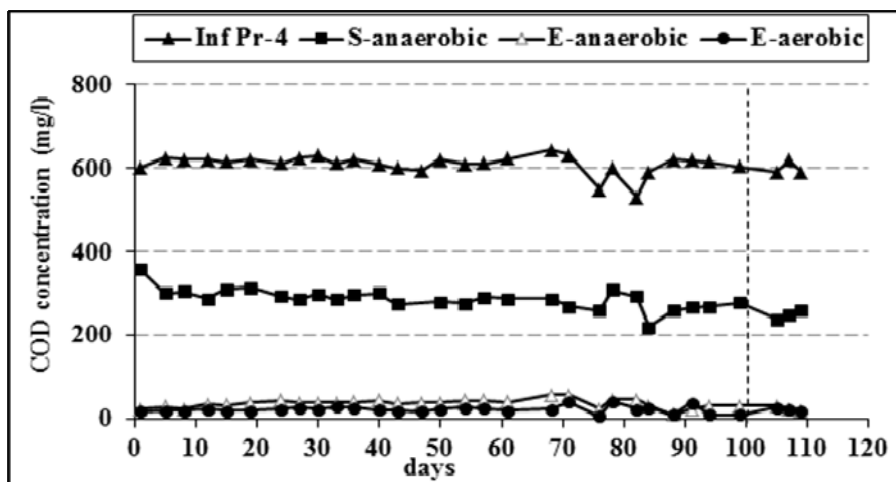
ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 6.4 – 6.5 แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 7.6 – 7.8 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกและมีการใช้กรดอินทรีย์ไปจากน้ำ ท้ายที่สุด เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชปรับเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยมาอยู่ในช่วง 8.3 – 8.6 (รูปที่ 4.2-27) สำหรับกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียอยู่ในช่วง 150 – 170 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก (รูปที่ 4.2-28) ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำเสียในการทดลอง Pr-1 ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกัน แต่น้อยกว่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกดังเหตุผลที่กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ และเช่นเดียวกันกับในถังปฏิกรณ์ Ac ที่อุณหภูมิระดับเดียวกันนี้ พบว่ากรดไขมันระเหยง่ายถูกใช้จนเกือบหมดตั้งแต่สภาวะแอนแอโรบิก และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก กรดไขมันระเหยง่ายมีน้อยมากจนแทบจะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ สำหรับค่าซีโอดีในน้ำเสียอยู่ในระดับเดิมคือ 590 – 620 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบเหลืออยู่เพียง 20 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตรในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก สอดคล้องกับกรดไขมันระเหยที่ลดลงไปมากในช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศนี้ และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าซีโอดีเปลี่ยนแปลงจากสภาวะแอนแอโรบิกก่อนหน้านี้น้อยมา คือ อยู่ในช่วง 20 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-29)



รูปที่ 4.2-27 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

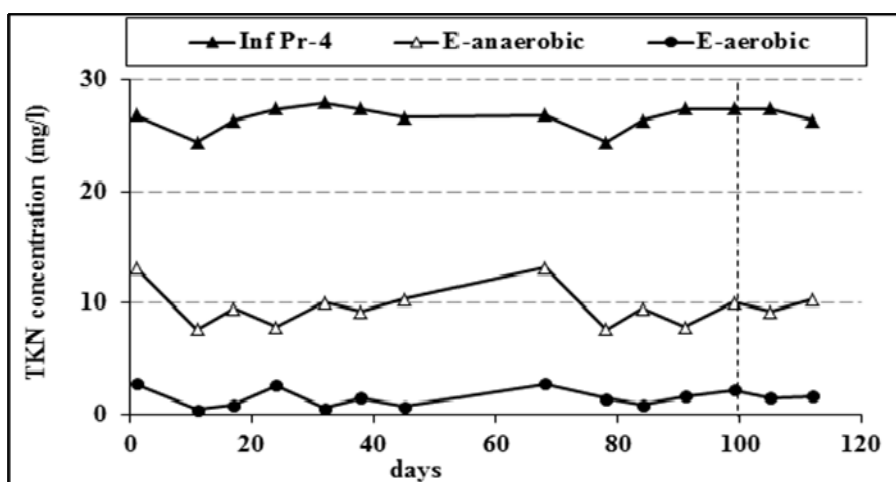


รูปที่ 4.2-28 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)



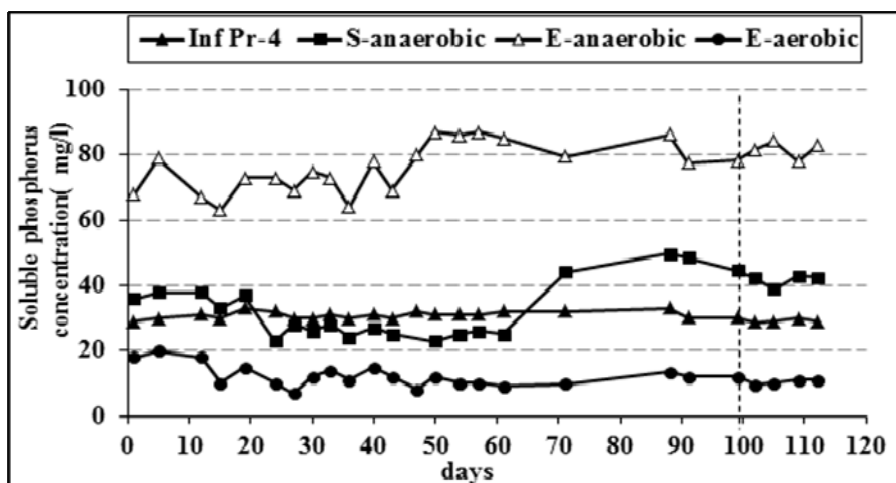
รูปที่ 4.2-29 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียอยู่ในช่วง 26 – 28 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 9 – 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องมาจากการดูดซึมไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์และการเจือจางกับน้ำค้างถัง (V_0) ของรอบการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ก่อนหน้า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Pr-1 ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (2 – 6 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) พบว่าค่าทีเคเอ็นที่เหลือเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกในการทดลองนี้สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกและมีการเติมอากาศ ค่าทีเคเอ็นได้ถูกกำจัดไปและเหลือเพียง 1 – 3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.2-30) โดยในการทดลองที่อุณหภูมินี้ พบความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิระดับ 20 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามในภาพรวมของความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และไนไตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ถือว่ามีค่าค่อนข้างต่ำและกระบวนการไนตริฟิเคชันไม่ได้เกิดอย่างชัดเจนหรือเป็นกลไกหลักในการลดทีเคเอ็น

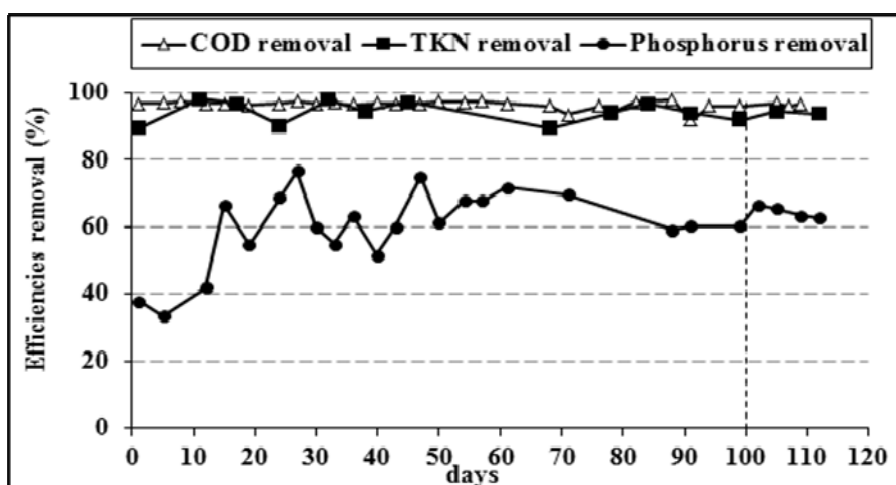


รูปที่ 4.2-30 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

ในการทดลองนี้ ฟอสฟอรัสละลายน้ำในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 29 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-31) เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิกพบการปล่อยฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 70 – 85 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า คล้ายกับในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่การทดลอง Pr-1 (น้ำเสีย Ac:Pr = 0:100) มีการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกสูงมากที่สุด และมีการจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกค่อนข้างมาก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในการทดลองนั้นสูงถึงร้อยละ 80 ได้ แต่ในการทดลองนี้ ถึงแม้ว่าจะมีการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างสูงแต่การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกยังไม่มากเท่ากับในการทดลอง Pr-1 จะเห็นได้จากความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 10 – 11 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสของการทดลองนี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 64 (รูปที่ 4.2-32) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (เฉลี่ยร้อยละ 96) และทีเคเอ็น (เฉลี่ยร้อยละ 93) ในการทดลองนี้ยังคงสูงกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า



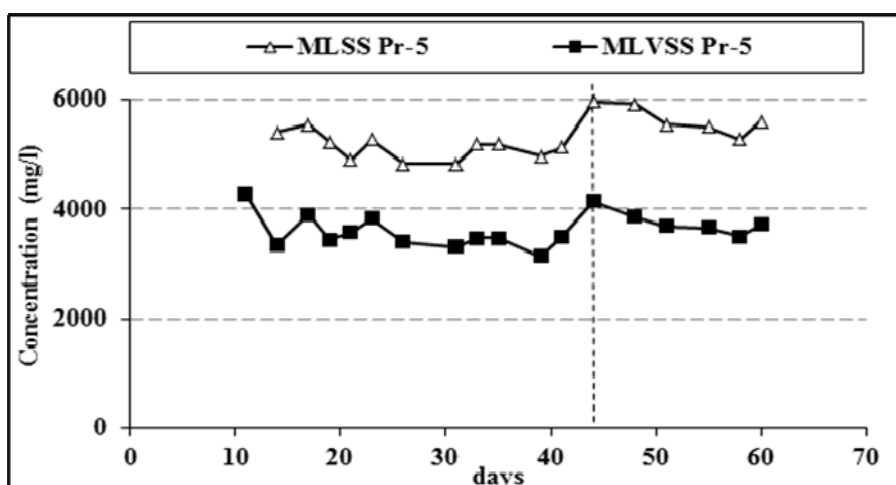
รูปที่ 4.2-31 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)



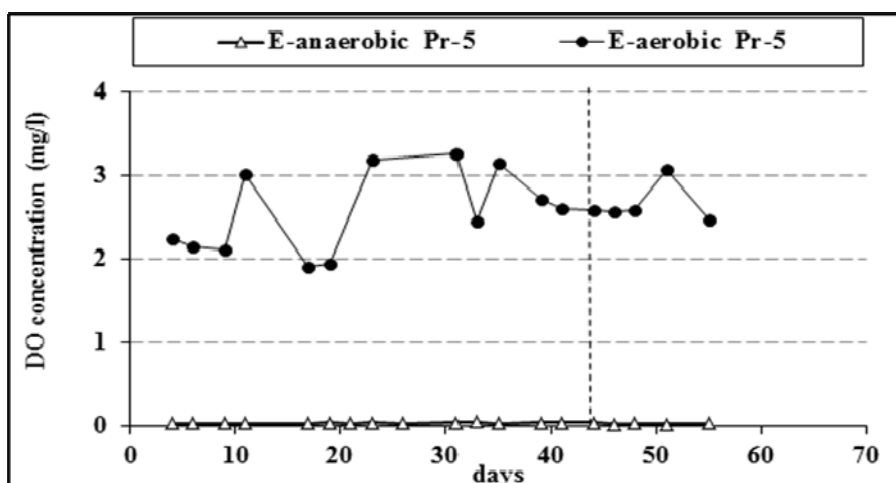
รูปที่ 4.2-32 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-4 (30°C และ Ac:Pr = 0:100)

4.2.5 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 25:75 (Pr-5)

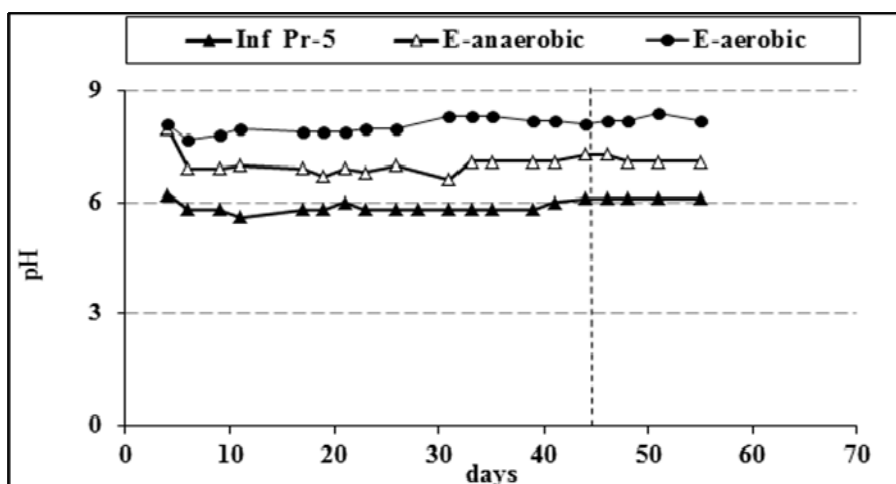
น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ปรับใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 25:75 และควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ที่ 29 ± 1 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสลัดจ์ (ในเทอมของ MLSS) อยู่ในช่วง 5200 – 6000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีของแข็งระเหยในช่วง 3500 – 4200 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-33) ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.03 – 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 2.5 – 3.4 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.2-34) ค่าโออาร์พีในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -20 ถึง -80 มิลลิโวลต์ และอยู่ในช่วงค่าบวกในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศและมีออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นคือ 90 ถึง 190 มิลลิโวลต์ ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.0 – 6.1 มีค่าต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย เนื่องจากมีการเติมกรดอะซิติก ซึ่งมีอัตราส่วนไฮโดรเจนไอออนต่อโมลสูงกว่ากรดโพรพิโอนิก ส่งผลให้มีค่าพีเอชเป็นกรดมากกว่าแม้ว่าจะมีค่าซีโอดีเท่ากัน จากนั้นค่าพีเอชได้เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 7.1 – 7.3 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก และ 8.1 – 8.4 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.2-35)



รูปที่ 4.2-33 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

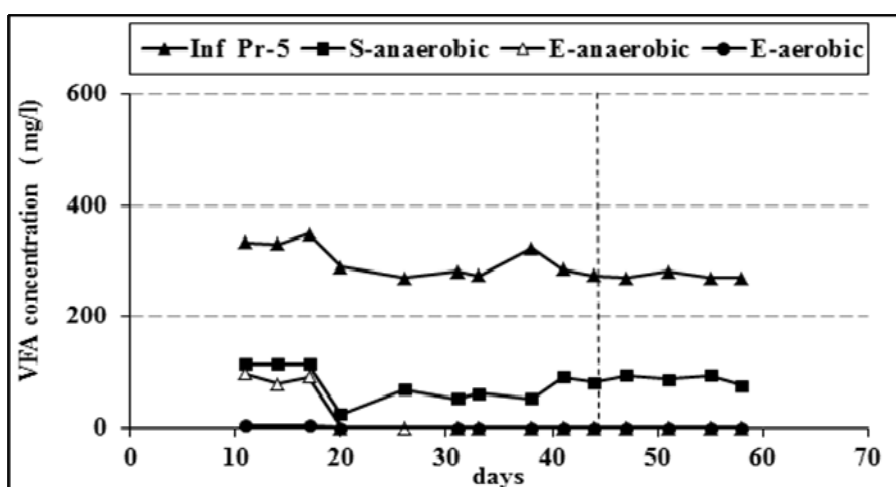


รูปที่ 4.2-34 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

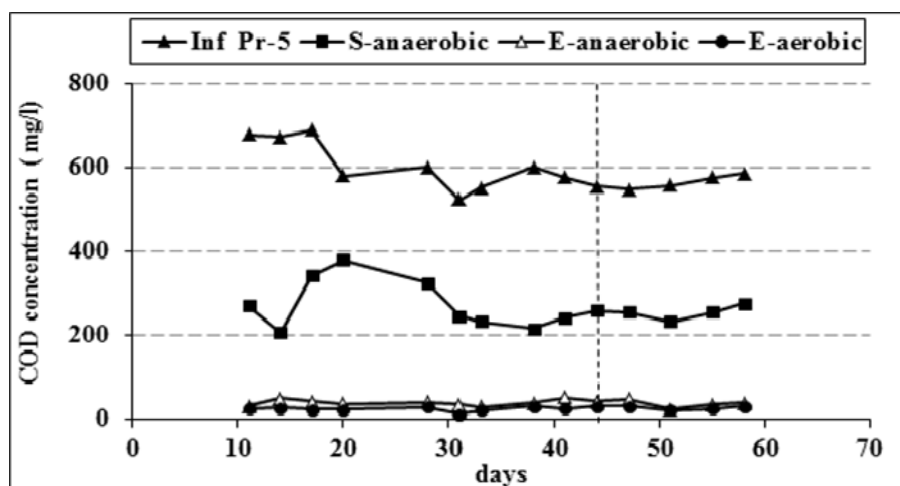


รูปที่ 4.2-35 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เตรียมพบอยู่ในช่วง 270 – 290 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ (Pr-5) จะเห็นได้ว่าการเติมกรดอะซิติกแทนที่กรดโพรพิโอนิกบางส่วน ทำให้ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว แล้วถูกใช้จนเกือบหมด ตั้งแต่ในสภาวะแอนแอโรบิก และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีน้อยมากจนแทบ จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (รูปที่ 4.2-36) ส่วนค่าซีโอดีในน้ำเสียอยู่ในช่วง 540 – 590 มิลลิกรัมต่อลิตร และสอดคล้องกับกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกใช้จนเกือบหมดในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าซีโอดีเมื่อสิ้นสุดสภาวะ แอนแอโรบิกมีค่าต่ำมากอยู่ในช่วง 20 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกค่าซีโอดีเกือบ คงที่เช่นเดิมโดยอยู่ในช่วง 20 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-37)

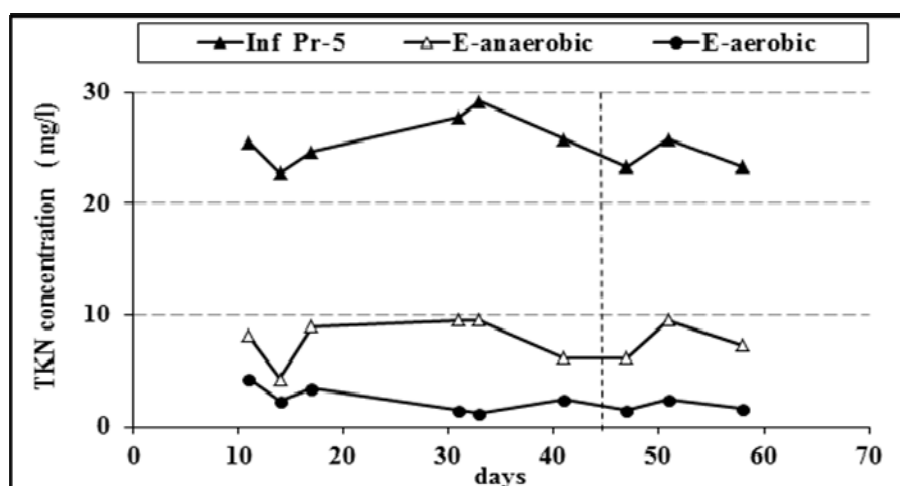


รูปที่ 4.2-36 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)



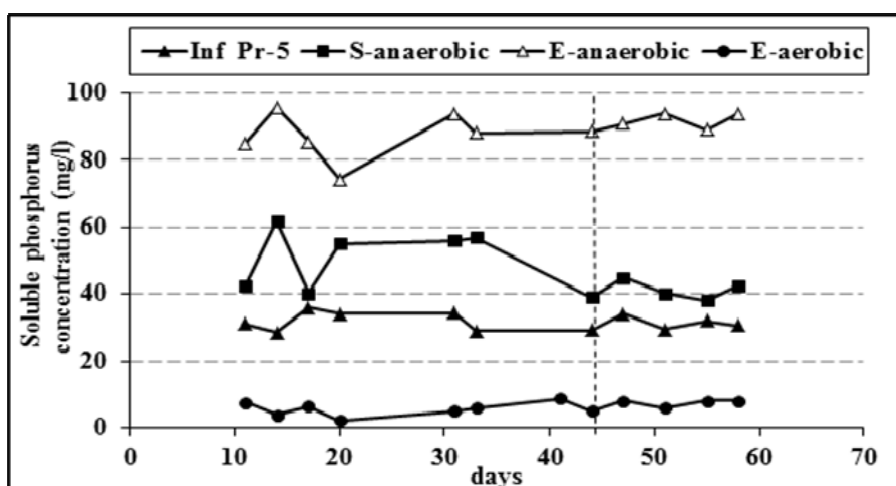
รูปที่ 4.2-37 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

ค่าทีเคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 23 – 26 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าทีเคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 6 – 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Pr-2 ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (2 – 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) พบว่าค่าทีเคเอ็นที่เหลือเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกในการทดลองนี้สูงกว่าเล็กน้อย และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบค่าทีเคเอ็นเหลือเพียง 1 – 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.2-38) โดยในการทดลองที่อุณหภูมินี้พบความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิระดับ 20 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม กระบวนการไนตริฟิเคชันไม่ได้เกิดอย่างชัดเจนหรือเป็นกลไกหลักในการลดทีเคเอ็นในการทดลองนี้

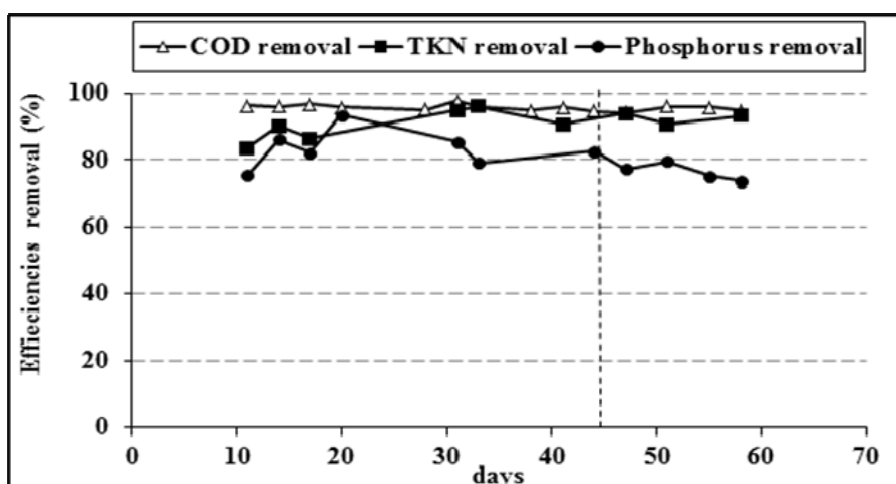


รูปที่ 4.2-38 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

สำหรับฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมให้อยู่ในช่วง 29 – 34 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก มีการปล่อยฟอสฟอรัสเพื่อสลายแหล่งพลังงานในเซลล์ค่อนข้างมาก ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มสูงถึง 85 – 95 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-39) จะเห็นได้ว่า การปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกของการทดลองนี้สูงกว่าการทดลองก่อนหน้า (Pr-4) ที่เดินระบบที่อุณหภูมิแบบเดียวกัน และยิ่งสูงกว่าการทดลอง Pr-2 ที่ใช้น้ำเสียแบบเดียวกันแต่เดินระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่า (20 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกยังมีมากกว่าการทดลองก่อนหน้าทั้ง 2 ที่กล่าวถึง ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกต่ำกว่า โดยอยู่ในช่วง 5 – 8 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 78 (รูปที่ 4.2-40) กล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมในน้ำเสียและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและทีเคเอ็นยังคงค่อนข้างสูงเช่นเดิม คือ เฉลี่ยร้อยละ 95 และ 93 ตามลำดับ



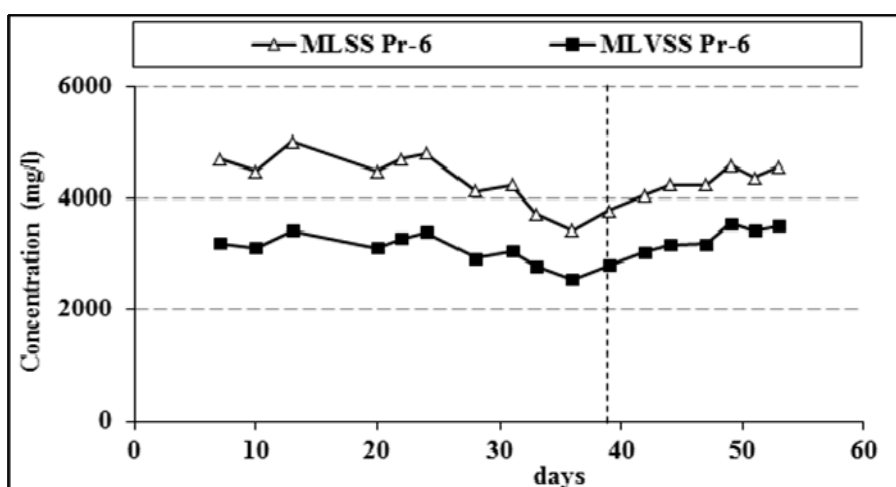
รูปที่ 4.2-39 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)



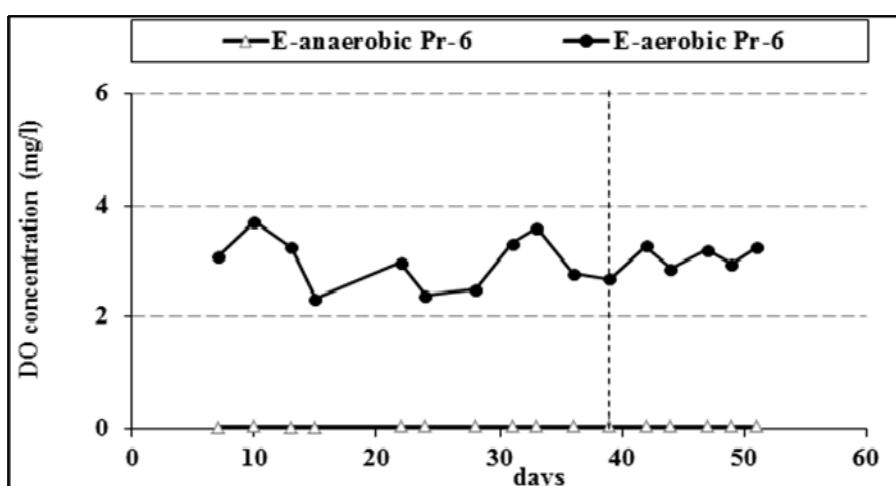
รูปที่ 4.2-40 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-5 (30°C และ Ac:Pr = 25:75)

4.2.6 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Pr-6)

การทดลองนี้ยังคงเดินระบบที่อุณหภูมิ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ป้อนให้กับระบบเตรียมโดยใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเป็น 50:50 ความเข้มข้นสลัดจ์ (ในเทอมของ MLSS) อยู่ในช่วง 4000 – 4600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีของแข็งระเหย (MLVSS) ในช่วง 2700 – 3600 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-41) ค่าออกซิเจนละลายในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.04 – 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้ ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2.3 – 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-42) ค่าโออาร์พีในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง -20 ถึง -90 มิลลิโวลต์ และอยู่ในช่วงค่าบวกในสภาวะแอโรบิกคือ 140 ถึง 160 มิลลิโวลต์

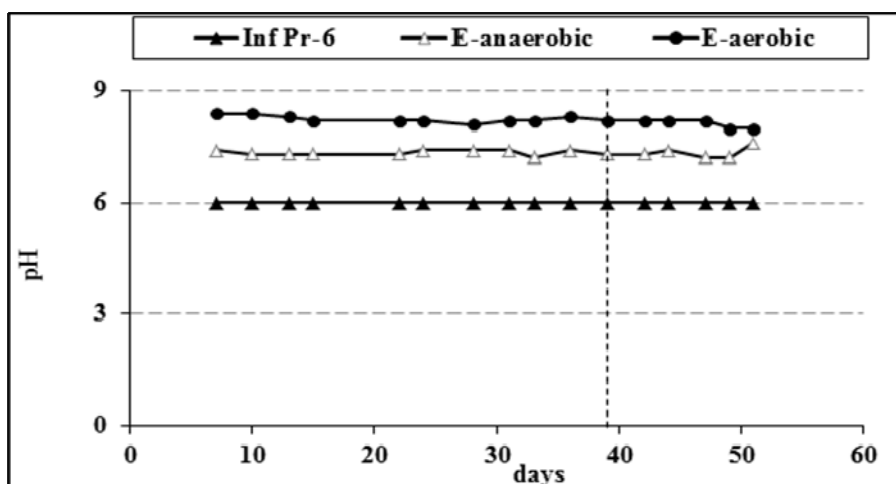


รูปที่ 4.2-41 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS, MLVSS) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

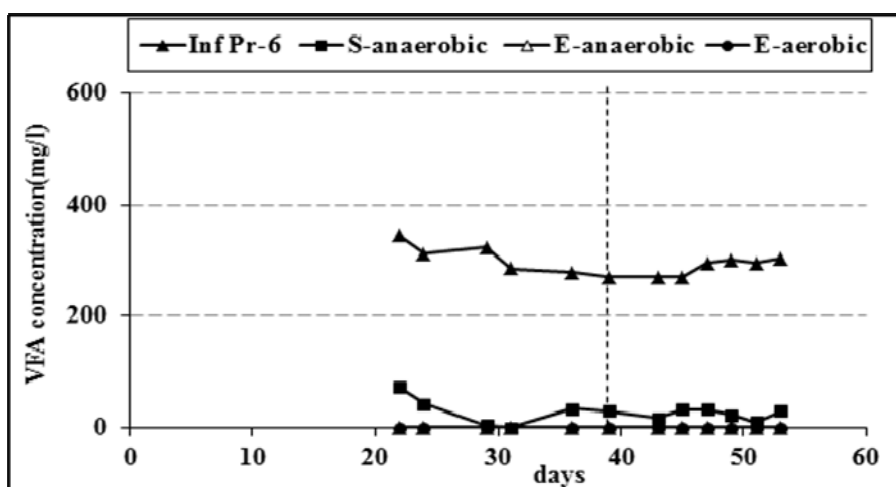


รูปที่ 4.2-42 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

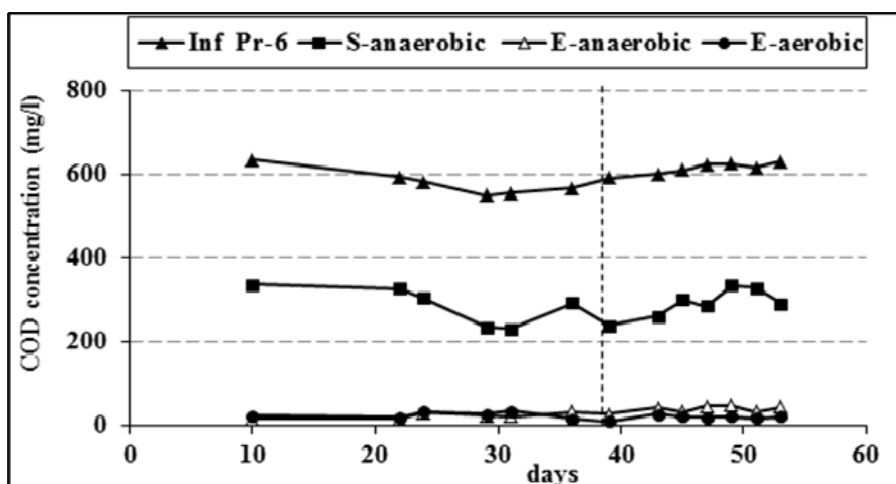
ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 6.0 – 6.1 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลอง Ac-6 ที่ต้องมีส่วนผสมของน้ำเสียแบบเดียวกัน จากนั้น ค่าพีเอชได้เพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 7.2 – 7.6 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกเนื่องจากการใช้กรดอินทรีย์ในน้ำไป และเมื่อมีการย่อยสลายต่อเนื่องในสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชในน้ำได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนอยู่ในช่วง 8.0 – 8.2 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.2-43) คล้ายกับการทดลองก่อนหน้านี้ สำหรับกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียนี้นพบอยู่ในช่วง 270 – 310 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก (รูปที่ 4.2-44) ใกล้เคียงกับการทดลอง Ac-3 และ Ac-6 ที่มีส่วนผสมของน้ำเสียแบบเดียวกัน แล้วลดลงจนเกือบหมดตั้งแต่ในสภาวะแอนแอโรบิก ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่ายต่ำมากทั้งปลายสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก สำหรับค่าซีโอดีของน้ำเสียอยู่ในช่วงที่ควบคุมไว้คือ 590 – 630 มิลลิกรัมต่อลิตร และถูกใช้จนเกือบหมดในสภาวะแอนแอโรบิก โดยค่าซีโอดีที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกเหลือค่าซีโอดีเพียง 30 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และในสภาวะแอโรบิกค่าซีโอดีลดลงอีกเล็กน้อยจนเหลืออยู่แค่เพียง 10 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.2-45)



รูปที่ 4.2-43 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

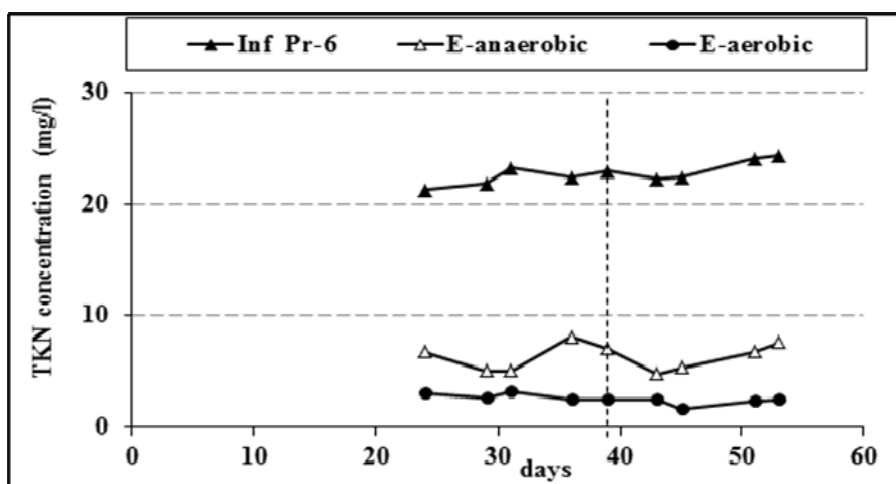


รูปที่ 4.2-44 ความเข้มข้นกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)



รูปที่ 4.2-45 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

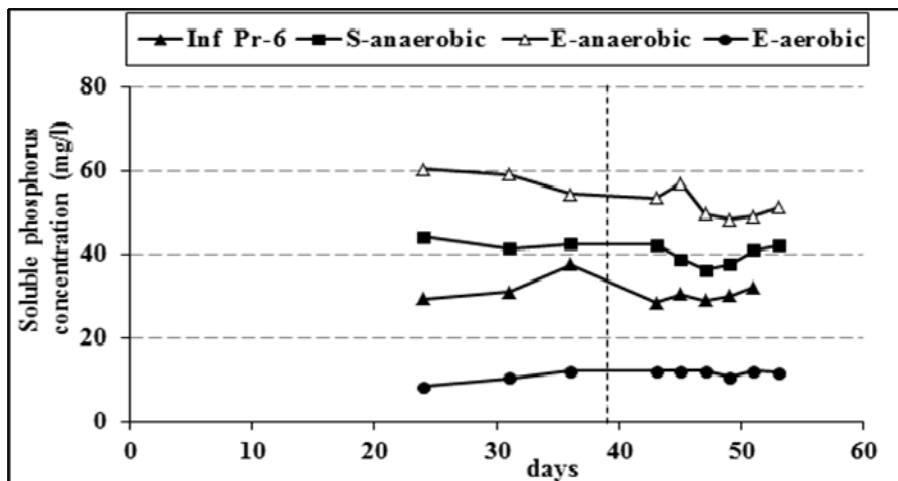
สำหรับค่าที่เคเอ็นในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 22 – 24 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าที่เคเอ็นลดลงเหลืออยู่ในช่วง 4 – 8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าที่เคเอ็นในช่วง 1 – 3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (รูปที่ 4.2-46)



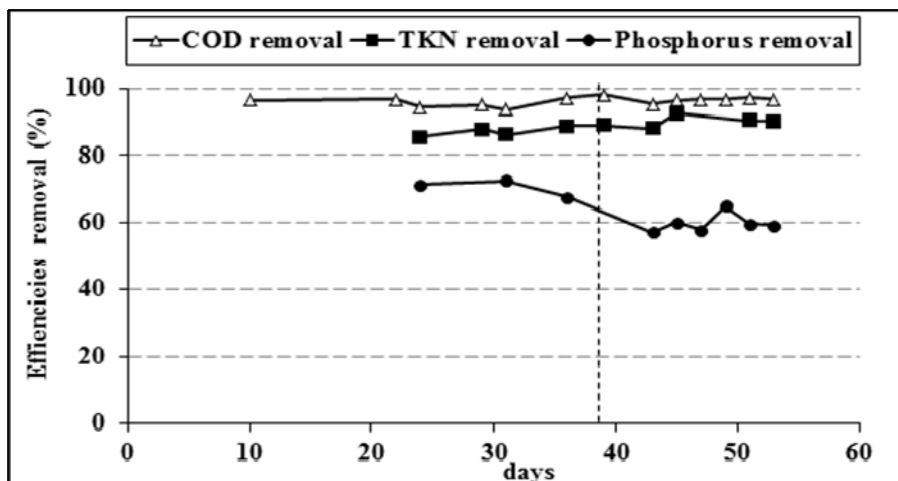
รูปที่ 4.2-46 ความเข้มข้นทีเคเอ็น (TKN) ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 28 – 32 มิลลิกรัมต่อลิตร พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์จุลินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิก โดยพบความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 48 – 58 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก (เพิ่มจากที่มีในน้ำเสียประมาณ 1.5 – 2 เท่า) จะเห็นว่าต่ำกว่าในการทดลอง Pr-3 (60 – 62 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่มีน้ำเสียแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกของการทดลองนี้ไม่สูงเท่ากับการทดลองก่อนหน้า (Pr-5) ทำให้ความ

เข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 13 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.2-47) ซึ่งสูงกว่าการทดลองก่อนหน้านี้ (Pr-4 และ Pr-5) โดยในการทดลองนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 60 (รูปที่ 4.2-48) ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของถังปฏิกรณ์ Pr ที่เดินระบบที่อุณหภูมิระดับ 30 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสมกรดอะซิติกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนให้สำหรับประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีและทีเคเอ็นยังคงสูงกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกันในการทดลองอื่นก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.2-47 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)



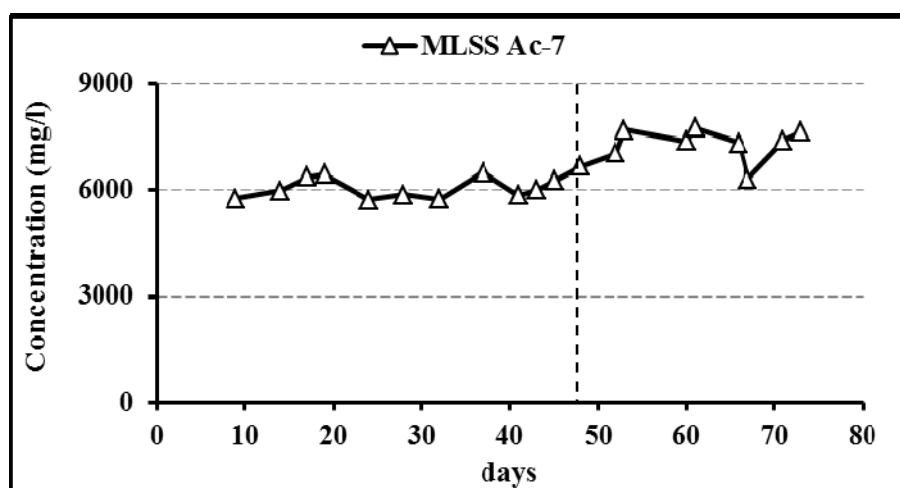
รูปที่ 4.2-48 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-6 (30°C และ Ac:Pr = 50:50)

4.3 การทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้ ควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ให้เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสโดยใช้ถังปฏิกรณ์และระบบทำน้ำเย็นเช่นเดียวกับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์กระทำโดยใช้น้ำประปาที่สำรองและเก็บไว้ที่อุณหภูมิใกล้เคียง 10 องศาเซลเซียสเหมาะสมกับสโตคน้ำเสียเข้มข้นเพื่อป้องกันให้กับถังปฏิกรณ์ทุกรอบของวัฏจักรเดินระบบ (ไม่เตรียมน้ำเสียทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องนานเกินไป) การทดลองทั้ง 6 การทดลองที่อุณหภูมินี้เดินระบบจนเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ทุกการทดลอง เก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบตลอดการทดลอง

4.3.1 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 (Ac-7)

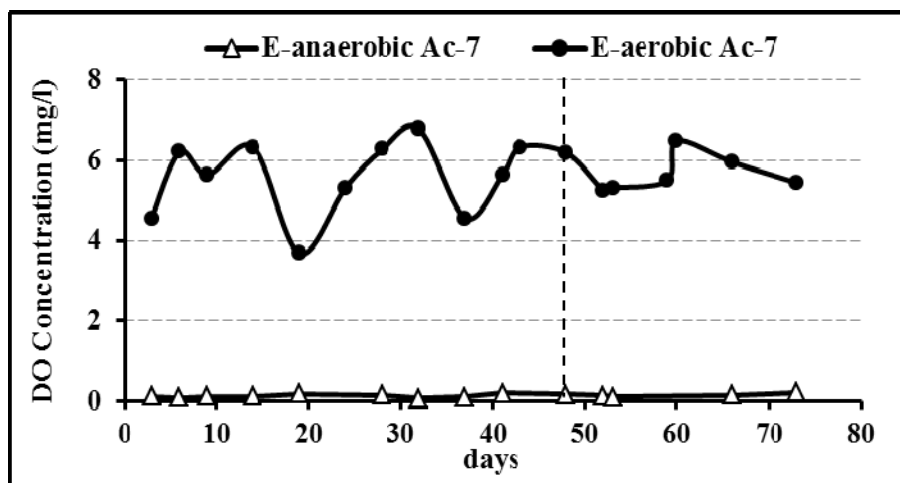
น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ปรับใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 100:0 ร่วมกับการเติมนิวเทรียนบรอนเช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้ และควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ได้ที่ 10.3 ± 0.3 องศาเซลเซียส เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นสลัดจ์ (ในเทอมของ MLSS) อยู่ในช่วง 6330 – 7760 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 7262 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3-1) ซึ่งค่อนข้างสูงกว่าการทดลองก่อนหน้านี้ (ที่อุณหภูมิสูงกว่า) ทั้งที่มีการควบคุมอายุสลัดจ์ที่ 15 วันเท่ากัน



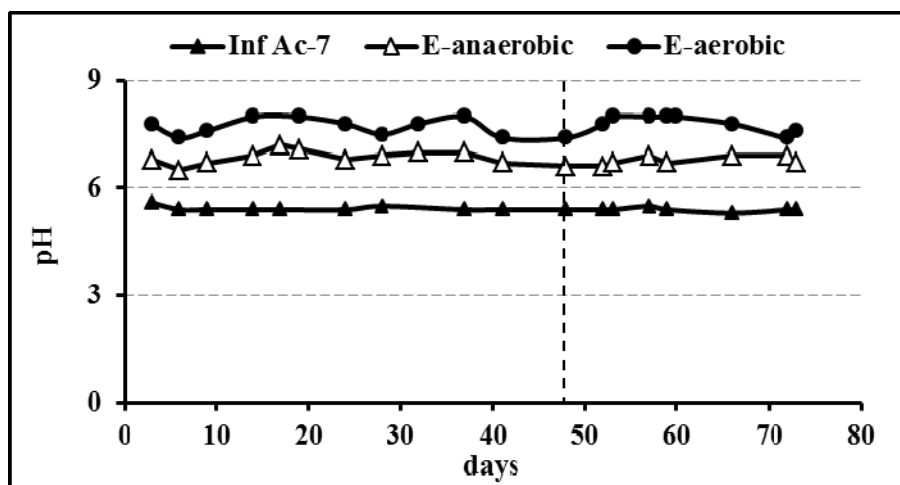
รูปที่ 4.3-1 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)

ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนละลายต่ำ มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 – 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองที่ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 3.7 – 6.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-2) ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 5.3 – 5.6 ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำเสียในอัตราส่วนเดียวกันนี้ในการ

ทดลองอุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสก่อนหน้านี้ เนื่องจากมีกรดอะซิติกเป็นส่วนประกอบหลักแบบเดียวกัน จากนั้นค่าพีเอชได้เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.5 – 7.2 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยอยู่ในช่วง 7.4 – 8.0 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-3)

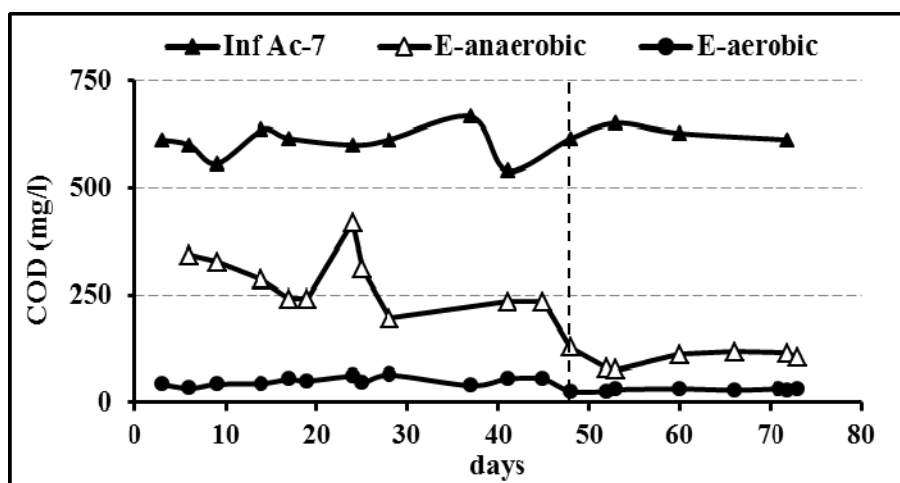


รูปที่ 4.3-2 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)



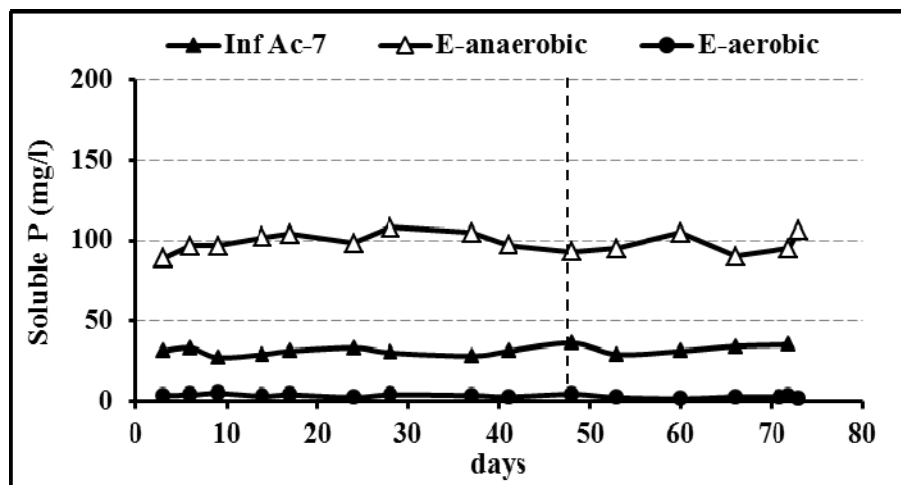
รูปที่ 4.3-3 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)

ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เตรียมในการทดลองนี้ ได้ควบคุมให้อยู่ในระดับเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 540 – 667 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยที่ 612 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ค่าซีโอดีในช่วงท้ายของสภาวะแอนแอโรบิกมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 76 – 129 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 105 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าซีโอดีลดลงอยู่ในช่วง 25 – 31 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 31 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากมีการใช้กรดอินทรีย์และแหล่งคาร์บอนไปเกือบทั้งหมดแล้ว (รูปที่ 4.3-4)

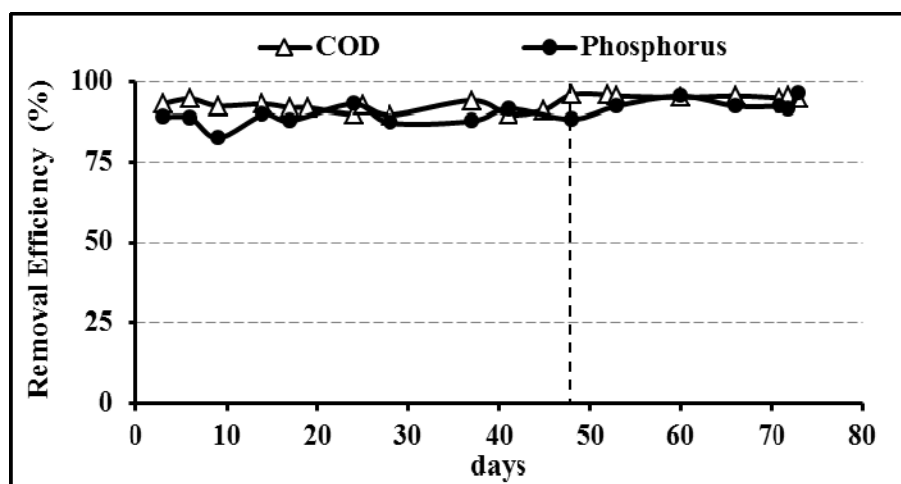


รูปที่ 4.3-4 ความเข้มข้นซีไอดี (COD) ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)

สำหรับฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมให้อยู่ในช่วง 27 – 36 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกมีค่าเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นที่มีในน้ำเสียที่ป้อนให้ เนื่องจากเป็นกลไกสลายพลังงานภายในเซลล์เพื่อจับใช้กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียเข้าสู่ภายในเซลล์ โดยในการทดลองนี้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในช่วงท้ายสภาวะแอนแอโรบิกพบอยู่ในช่วง 90 – 106 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 97 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-5) (สูงกว่าในน้ำเสียประมาณ 3 เท่า) นอกจากนี้การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกมีอย่างโดดเด่น โดยทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในช่วงท้ายสภาวะแอโรบิกค่อนข้างต่ำมากโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.3 – 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าค่อนข้างสูงคืออยู่ในช่วงร้อยละ 88 – 96 (เฉลี่ยร้อยละ 93) ดังแสดงในรูปที่ 4.3-6 รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้เนื่องจากแหล่งคาร์บอนเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 95



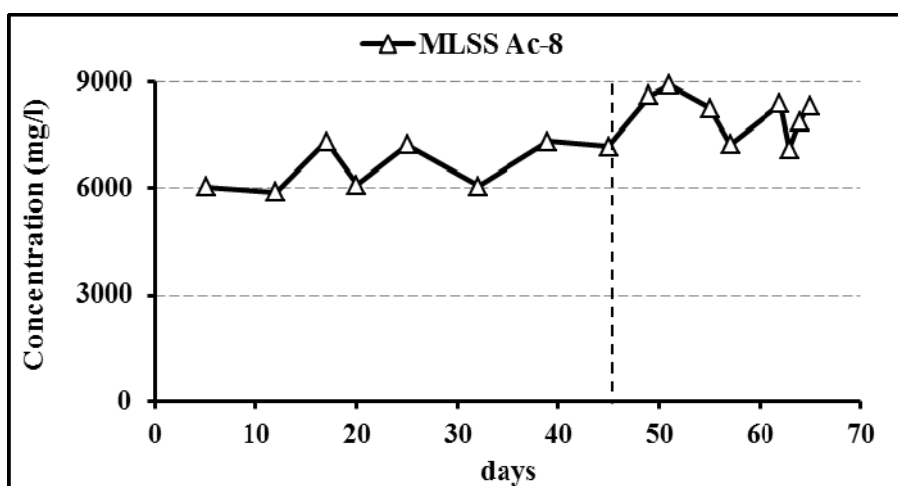
รูปที่ 4.3-5 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)



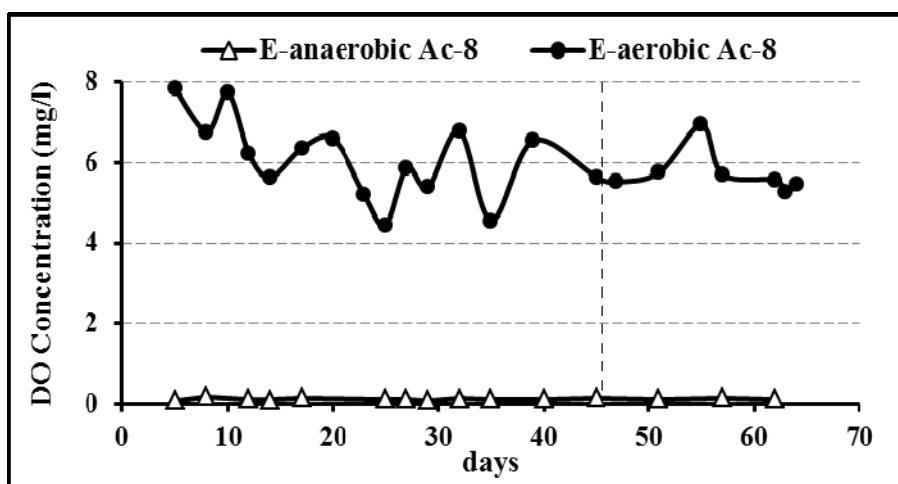
รูปที่ 4.3-6 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-7 (10°C และ Ac:Pr = 100:0)

4.3.2 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 (Ac-8)

การทดลองนี้ได้ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) ให้เป็น 75:25 ร่วมกับนิวเทรียนบรอตเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับระบบ ถึงปฏิกิริยาและระบบทำน้ำเย็นสามารถควบคุมอุณหภูมิในถังให้อยู่ในช่วง 10.4 ± 0.6 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสลัดจ์ในทอมของค่า MLSS เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวมีค่าอยู่ในช่วง 7115 – 8930 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 8004 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-7) ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ เพราะยังคงรักษาระดับค่าซีโอดีและภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไว้คงเดิม ค่าออกซิเจนละลายในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.08 – 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเพิ่มมาอยู่ในช่วง 4.4 – 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปลายสภาวะแอโรบิก (เฉลี่ย 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-8)

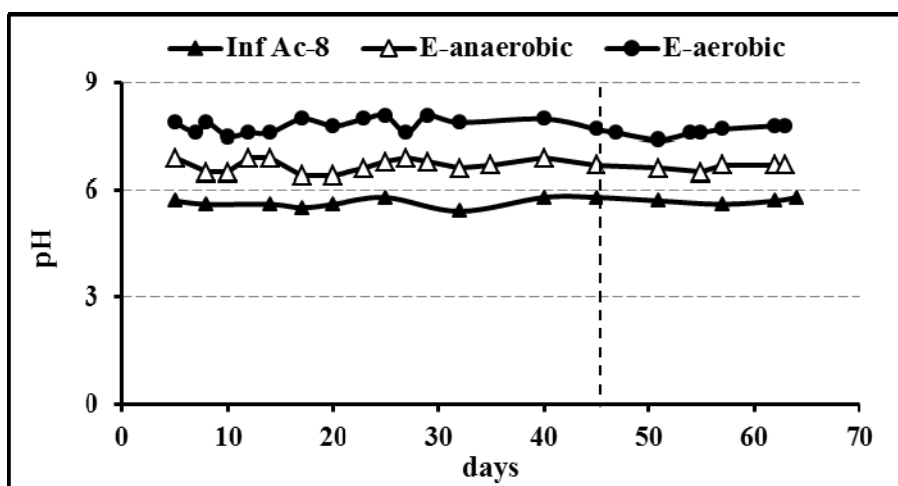


รูปที่ 4.3-7 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)



รูปที่ 4.3-8 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)

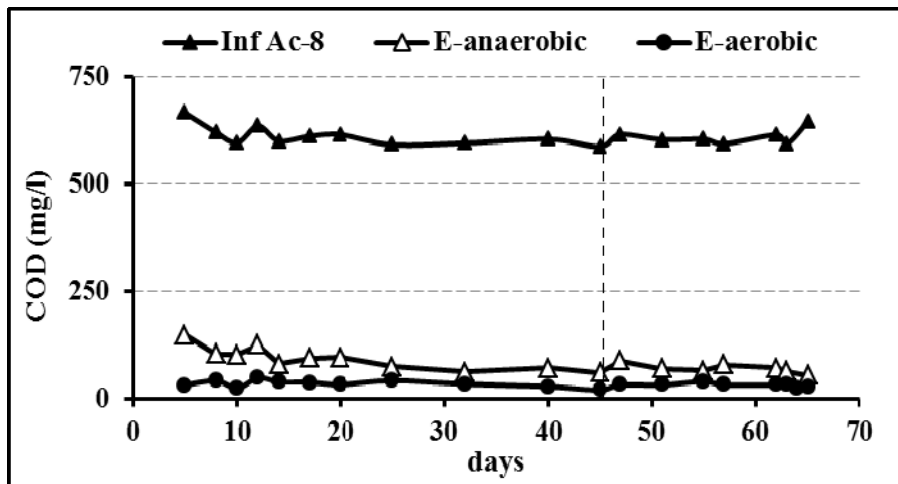
สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียที่เตรียมด้วยอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้นอยู่ในช่วง 5.4 – 5.8 แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 6.4 – 6.9 ในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก เนื่องจากมีการใช้กรดอินทรีย์ในน้ำโดยถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกที่การย่อยสลายสารอินทรีย์สมบูรณ์ ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยอยู่ในช่วง 7.4 – 8.1 (รูปที่ 4.3-9)



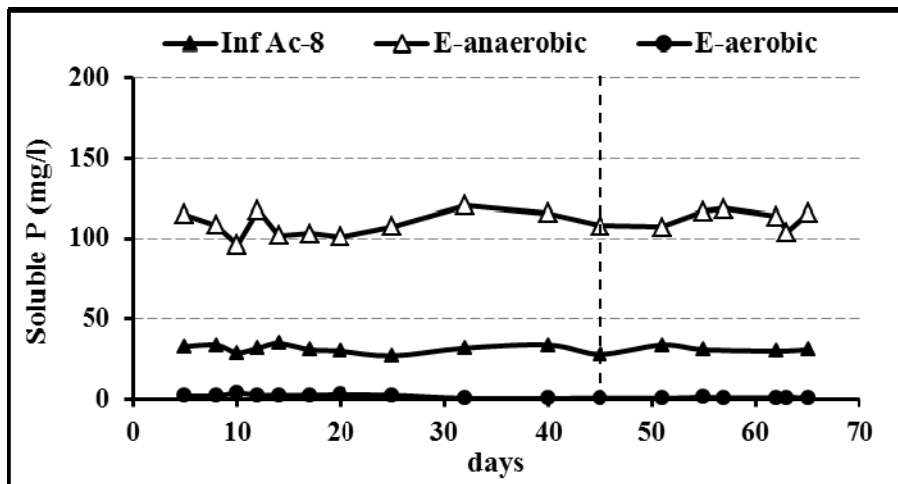
รูปที่ 4.3-9 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)

ค่าซีไอดีดังแสดงในรูปที่ 4.3-10 ซึ่งค่าซีไอดีในน้ำเสียอยู่ในช่วง 588 – 667 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 611 มิลลิกรัมต่อลิตร) คล้ายคลึงกับการทดลองอื่นๆ เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ค่าซีไอดีในช่วงท้ายสภาวะแอนแอโรบิกพบอยู่ในช่วง 55 – 89 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 69 มิลลิกรัมต่อลิตร) เนื่องจากมีการดูดซึมสารอินทรีย์ในน้ำเข้าสู่เซลล์ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้อย่างเพียงพอและมีการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยสมบูรณ์ ค่าซีไอดีลดลงอยู่ในช่วง 21 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อลิตร)

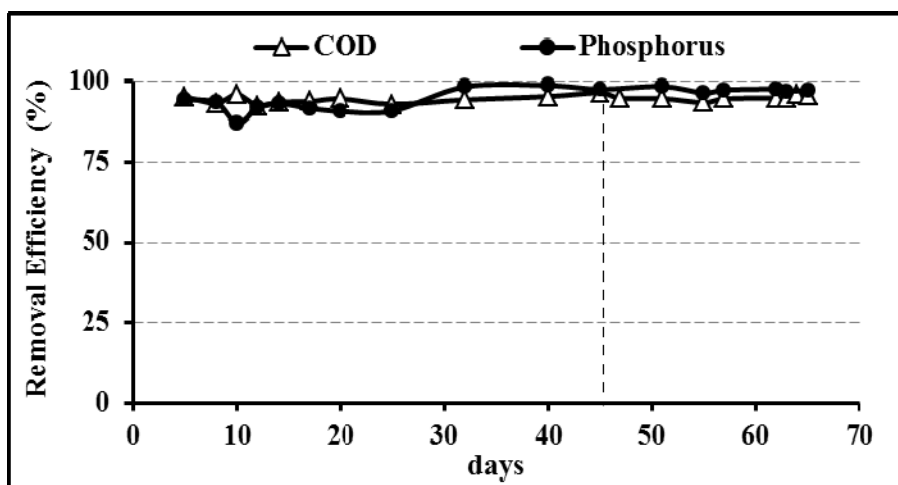
สำหรับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมอยู่ในช่วง 27 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3-11) เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว ในช่วงท้ายสภาวะแอนแอโรบิกพบการปล่อยฟอสฟอรัสค่อนข้างสูงมาก คือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 104 – 119 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 112 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งสูงกว่าการทดลอง Ac-7 (เฉลี่ย 97 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่น้ำเสียมีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต กล่าวได้ว่า น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนประกอบร่วมกับกรดอะซิติก มีผลทำให้การปล่อยฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และในช่วงสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศพบว่าระบบสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสในน้ำได้เกือบทั้งหมด ความเข้มข้นฟอสฟอรัสช่วงท้ายสภาวะแอโรบิกพบอยู่ในช่วงต่ำมากคือ 0.5 – 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้การทดลองนี้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 96 – 99 (เฉลี่ยร้อยละ 97) และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 95 เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า (รูปที่ 4.3-12)



รูปที่ 4.3-10 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)



รูปที่ 4.3-11 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)

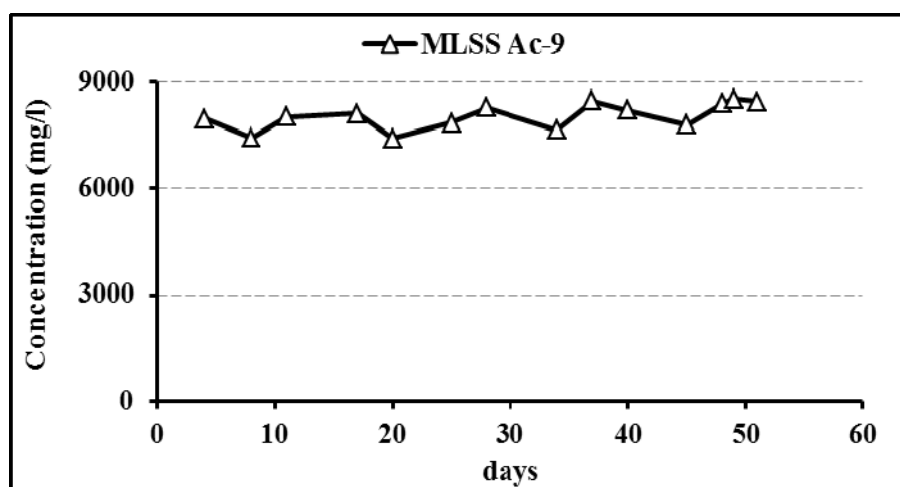


รูปที่ 4.3-12 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-8 (10°C และ Ac:Pr = 75:25)

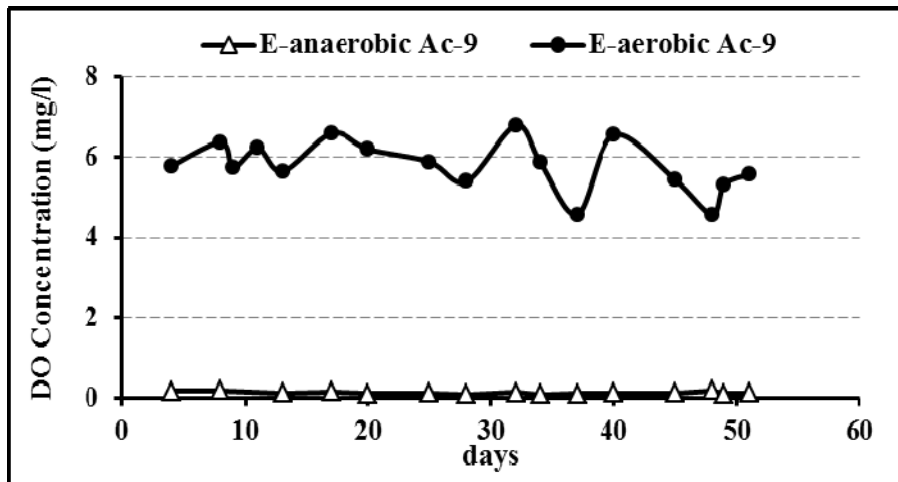
4.3.3 ถึงปฏิกิริยาที่ 1 (Ac-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Ac-9)

สำหรับการทดลองนี้เริ่มเดินระบบด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกในอัตราส่วน 50:50 ร่วมกับการเติมนิวเทรียนบรอต โดยยังคงควบคุมค่าซีโอดีในระดับคงเดิม และสามารถควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ได้ดีที่ 10.4 ± 0.2 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ (ค่า MLSS) อยู่ในช่วง 7660 – 8640 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 8226 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-13) ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้าทั้ง 2 การทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน สำหรับค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.07 – 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมอากาศในช่วงสภาวะแอโรบิกมีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 4.6 – 6.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-14) ค่าพีเอชในน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.0 – 6.4 สูงกว่าน้ำเสียที่เตรียมในการทดลองก่อนหน้าเล็กน้อย เนื่องจากมีการเพิ่มสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกซึ่งมีคาร์บอนต่อโมลสูงขึ้น (แต่ให้ไฮโดรเจนออกซิเจนต่อโมล น้อยกว่ากรดอะซิติก) และทำนองเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้า คือ เมื่อมีการดูดซึมแหล่งคาร์บอนในน้ำไปใช้ตั้งแต่ในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกทำให้กรดอินทรีย์ในน้ำเหลือน้อยลง ค่าพีเอชในน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกจึงเพิ่มขึ้นไปอยู่ในช่วง 6.4 – 7.4 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกและสารอินทรีย์ถูกใช้และย่อยสลายไปเกือบหมดแล้ว ค่าพีเอชในน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 7.5 – 8.2 (รูปที่ 4.3-15)

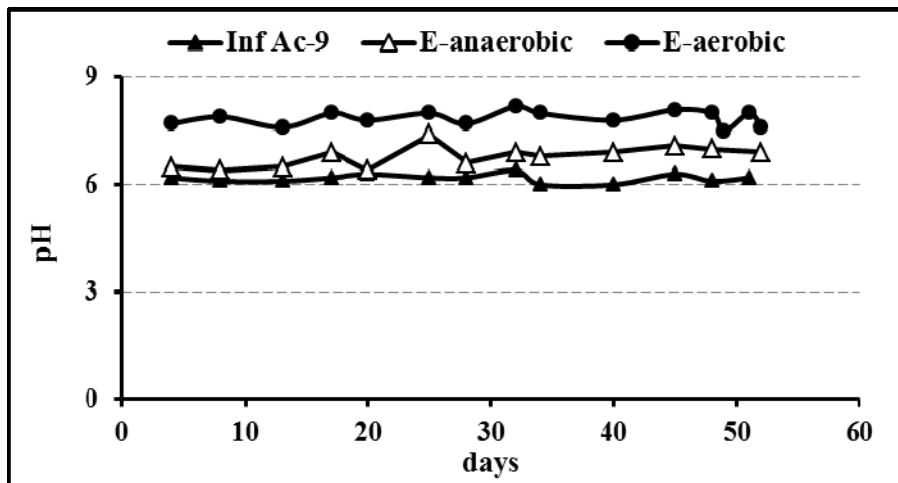
สำหรับค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เตรียมให้มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงเดิมคือ 590 – 630 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 612 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-16) เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว ในสภาวะแอนแอโรบิกที่มีการดูดซึมแหล่งคาร์บอนในน้ำเข้าเซลล์ไปแล้ว ค่าซีโอดีคงเหลือค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 43 – 51 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 46 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งค่อนข้างต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้าที่อุณหภูมิการทดลองแบบเดียวกัน จากนั้นมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มเติมอีกเล็กน้อยในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ ทำให้ค่าซีโอดีคงเหลืออยู่ในช่วง 23 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 28 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก



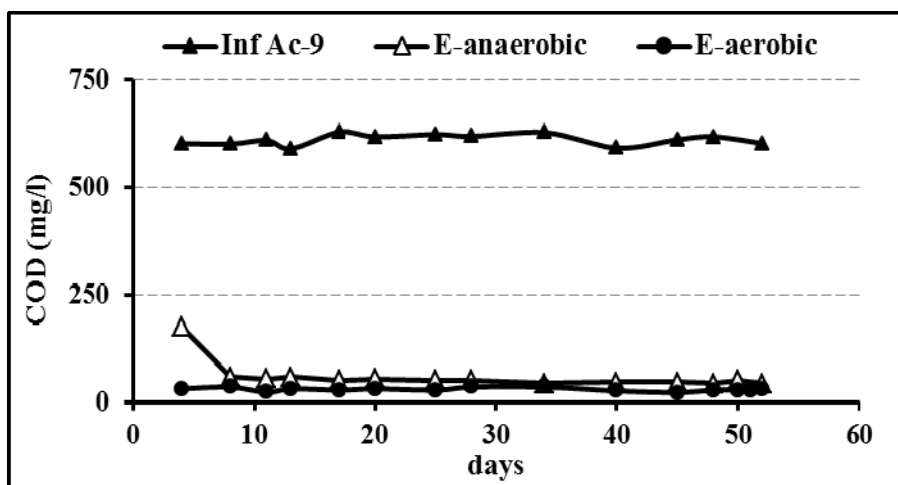
รูปที่ 4.3-13 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)



รูปที่ 4.3-14 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

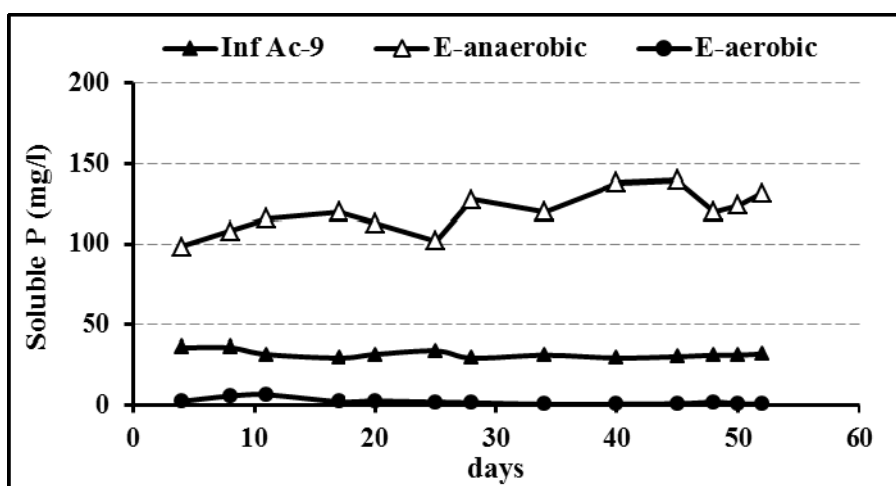


รูปที่ 4.3-15 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

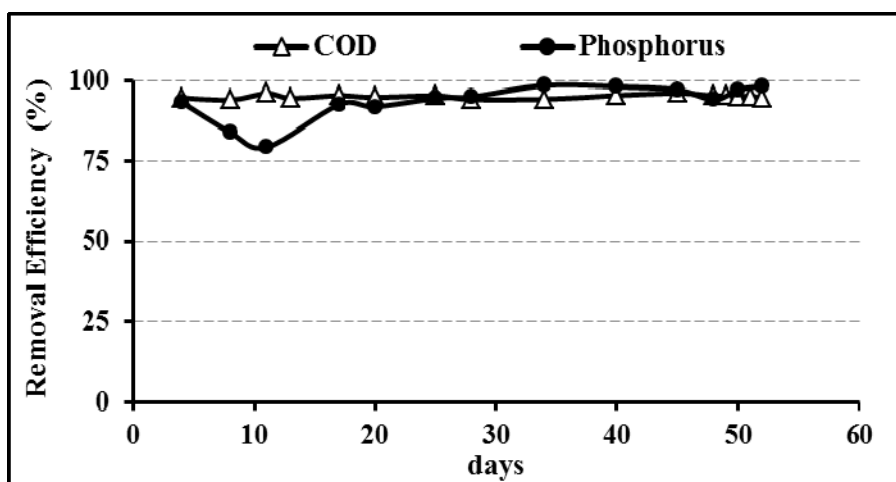


รูปที่ 4.3-16 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสละลายน้ำในการทดลองนี้ ยังคงแสดงลักษณะของกระบวนการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ กล่าวคือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 120 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 129 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-17) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์ (29 – 36 มิลลิกรัมต่อลิตร) ประมาณ 4 เท่า มีการสลายพันธะฟอสเฟตในเซลล์ออกมาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองก่อนหน้านี้ที่อุณหภูมิเดียวกัน (คือ 97 มิลลิกรัมต่อลิตรในการทดลอง Ac-7 และ 112 มิลลิกรัมต่อลิตรในการทดลอง Ac-8) เมื่อมีการเติมอากาศในสภาวะแอโรบิกทำให้มีการจับใช้ฟอสฟอรัสในน้ำเข้าสู่เซลล์อย่างมากมาย ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในช่วงท้ายสภาวะแอโรบิกพบอยู่ในช่วง 0.4 – 1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 94 – 99 (เฉลี่ยร้อยละ 97) ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 95 เช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.3-18)



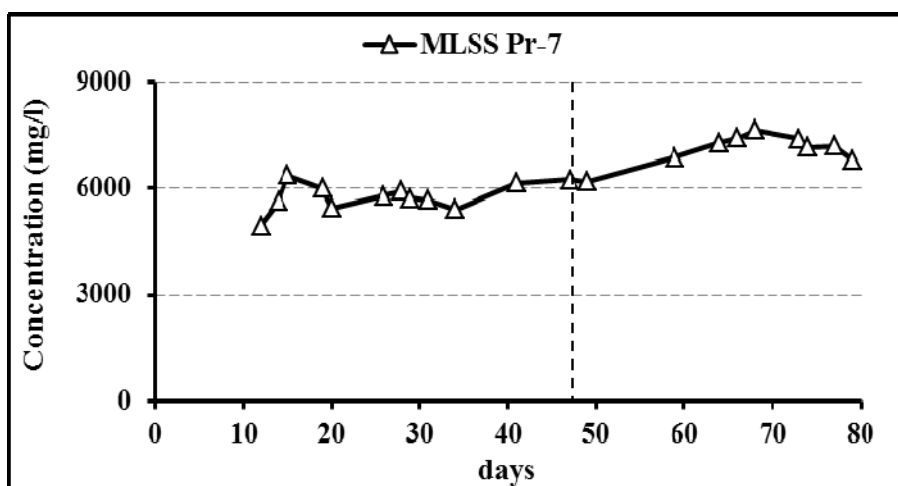
รูปที่ 4.3-17 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)



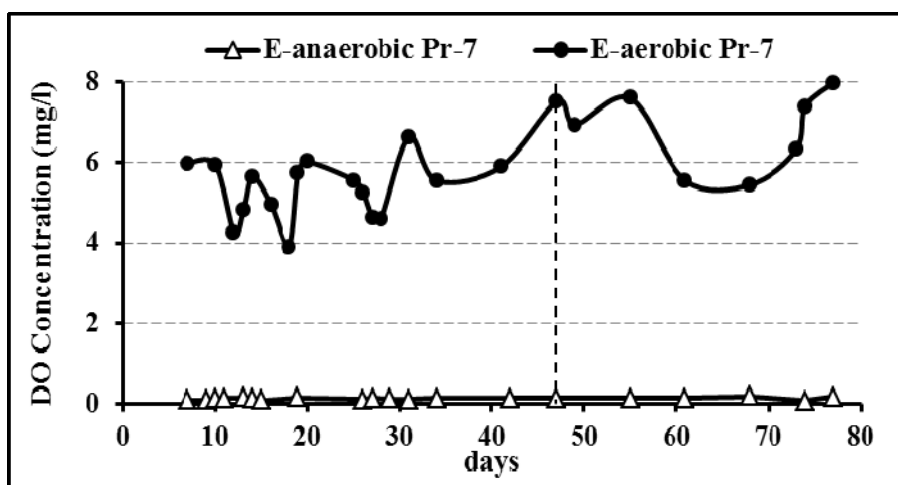
รูปที่ 4.3-18 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Ac-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

4.3.4 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 (Pr-7)

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 0:100 หรือหมายถึงใช้เฉพาะกรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอต (ไม่เติมกรดอะซิติก) โดยค่าซีโอดีหรือภาระบรรทุกสารอินทรีย์ยังคงอยู่ในระดับเดิม และสามารถควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ได้ที่ 10.4 ± 0.3 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นสลัดจ์ในเทอมของ MLSS อยู่ในช่วง 6190 – 7660 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 7034 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-19) ความเข้มข้นสลัดจ์นี้ค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองในอุณหภูมิเดียวกันก่อนหน้านี้ ค่าออกซิเจนละลายในสภาวะแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.07 – 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเพิ่มขึ้นในช่วง 3.9 – 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้เหลือเพียงพอ (รูปที่ 4.3-20)

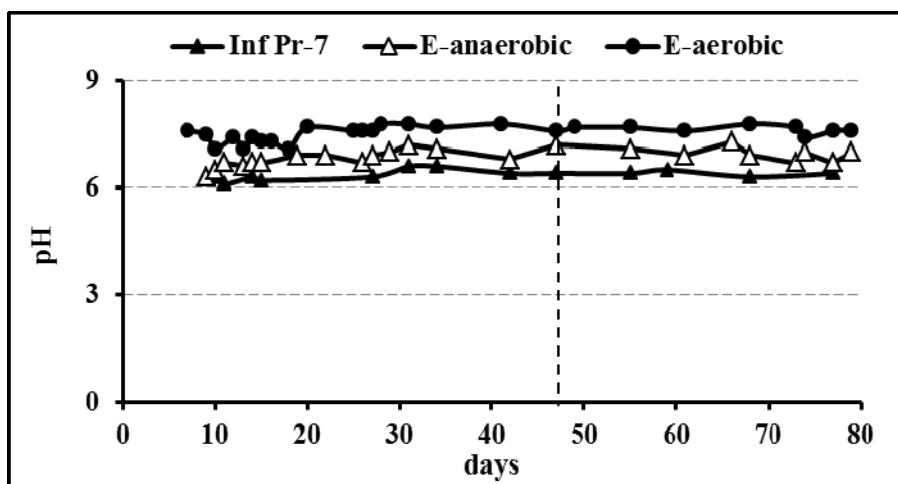


รูปที่ 4.3-19 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)



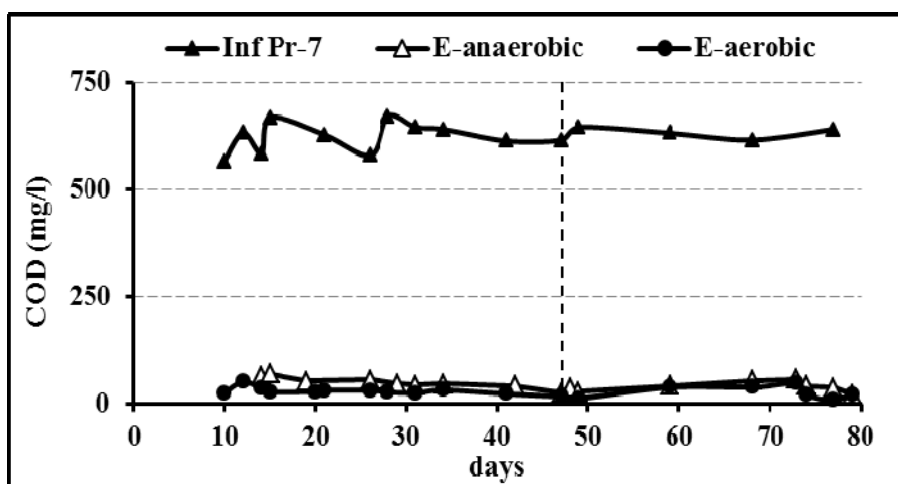
รูปที่ 4.3-20 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)

ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 6.1 – 6.6 แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 6.3 – 7.3 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกและมีการใช้กรดอินทรีย์ไปจากน้ำ ท้ายที่สุด เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยมาอยู่ในช่วง 7.1 – 7.8 (รูปที่ 4.3-21)



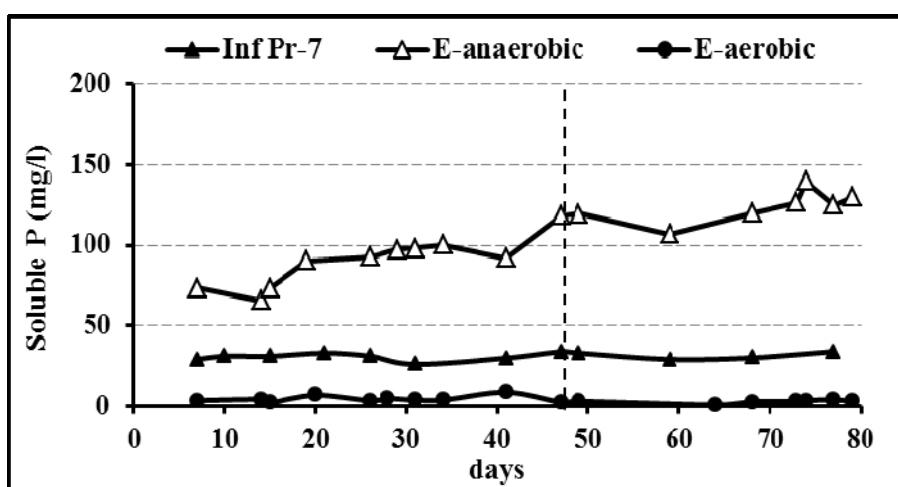
รูปที่ 4.3-21 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)

สำหรับค่าซีไอดีในน้ำเสียอยู่ในระดับเดิมคือ 567 – 672 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 626 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-22) เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว พบเหลืออยู่เพียง 23 – 58 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 38 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในช่วงปลายสภาวะแอนแอโรบิก อาจกล่าวได้ว่าการจับใช้สารอินทรีย์จากน้ำจนเกือบหมดในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกนี้ และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก ค่าซีไอดีคงเหลืออยู่ในช่วงใกล้เคียงกับสภาวะก่อนหน้าคืออยู่ในช่วง 8 – 48 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 26 มิลลิกรัมต่อลิตร)

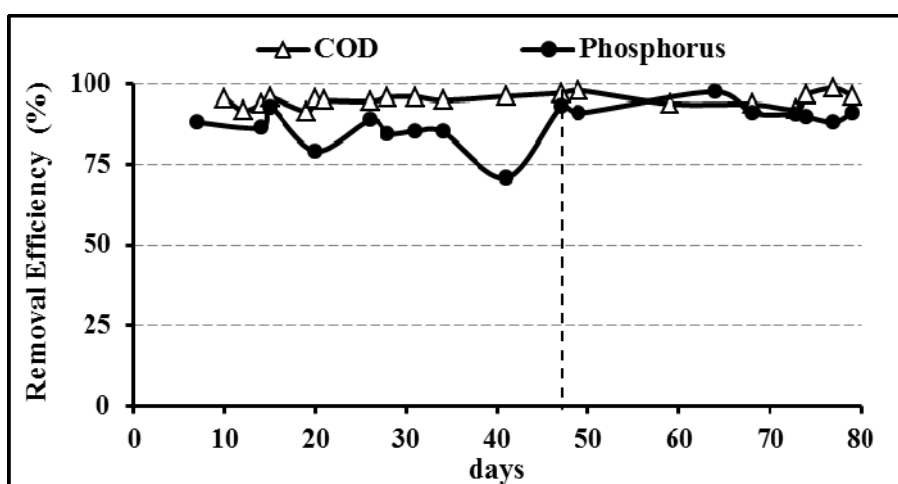


รูปที่ 4.3-22 ความเข้มข้นซีไอดี (COD) ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)

สำหรับฟอสฟอรัสละลายน้ำในการทดลองนี้ ในน้ำเสียมีค่าอยู่ในช่วง 26 – 34 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3-23) เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ในสภาวะแอนแอโรบิกพบการปล่อยฟอสฟอรัสค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 107 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 123 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อสิ้นสุดสภาวะ ซึ่งสูงกว่าการทดลอง Ac-7 (น้ำเสีย Ac:Pr = 100:0) ที่มีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอปเป็นแหล่งคาร์บอนอย่างเห็นได้ชัด และมีการจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกค่อนข้างดีมาก ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในช่วงท้ายสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.7 – 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 88 – 98 (เฉลี่ยร้อยละ 92) (รูปที่ 4.3-24) ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังคงอยู่ในระดับสูงเช่นเดิมคือเฉลี่ยร้อยละ 96



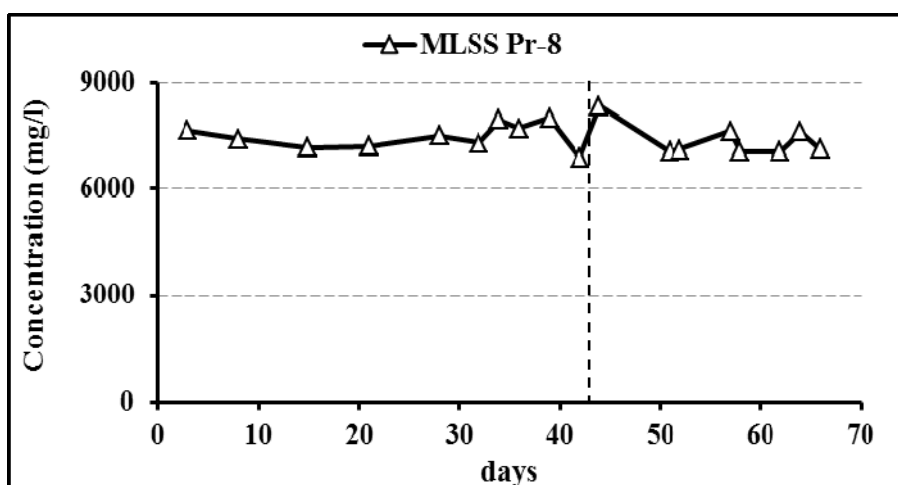
รูปที่ 4.3-23 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)



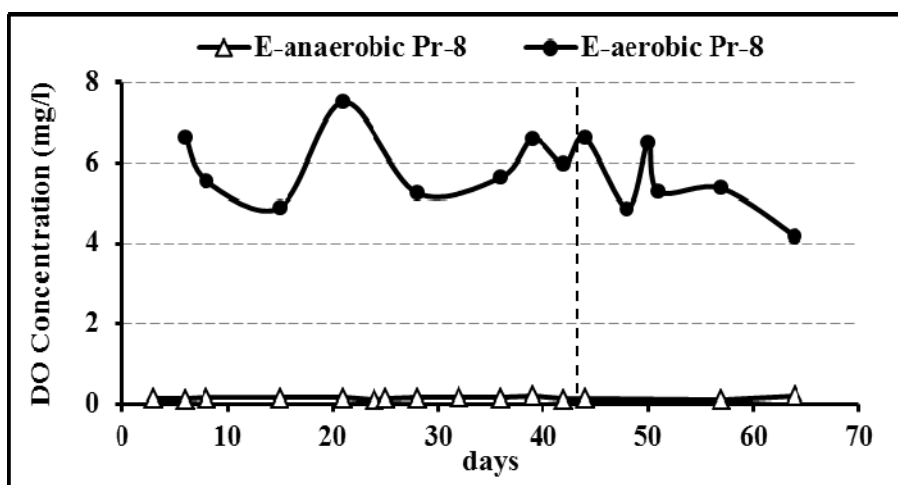
รูปที่ 4.3-24 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-7 (10°C และ Ac:Pr = 0:100)

4.3.5 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 25:75 (Pr-8)

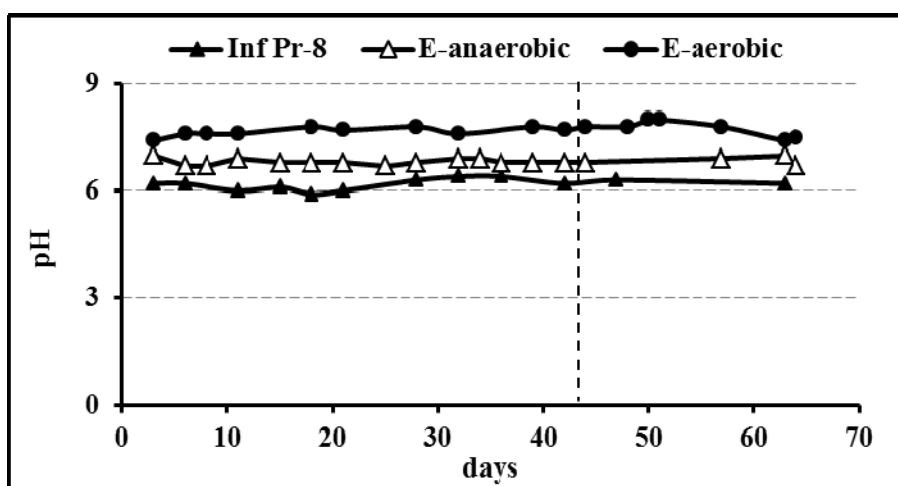
การทดลองนี้เตรียมน้ำเสียโดยปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกให้เป็น 25:75 และเดินระบบที่อุณหภูมิ 10.3 ± 0.4 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้ เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) อยู่ในช่วง 7050 – 8340 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 7376 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-25) ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนละลายต่ำอยู่ในช่วง 0.08 – 0.19 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 4.1 – 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-26) ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 5.9 – 6.4 มีค่าต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เล็กน้อย เนื่องจากการเติมกรดอะซิติก ซึ่งมีอัตราส่วนไฮโดรเจนไอออนต่อโมลสูงกว่ากรดโพรพิโอนิก ส่งผลให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเป็นกรดมากกว่า แม้ว่าจะมีค่าซีโอดีเท่ากัน จากนั้นค่าพีเอชได้เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.7 – 7.0 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก และช่วง 7.4 – 8.0 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-27)



รูปที่ 4.3-25 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)

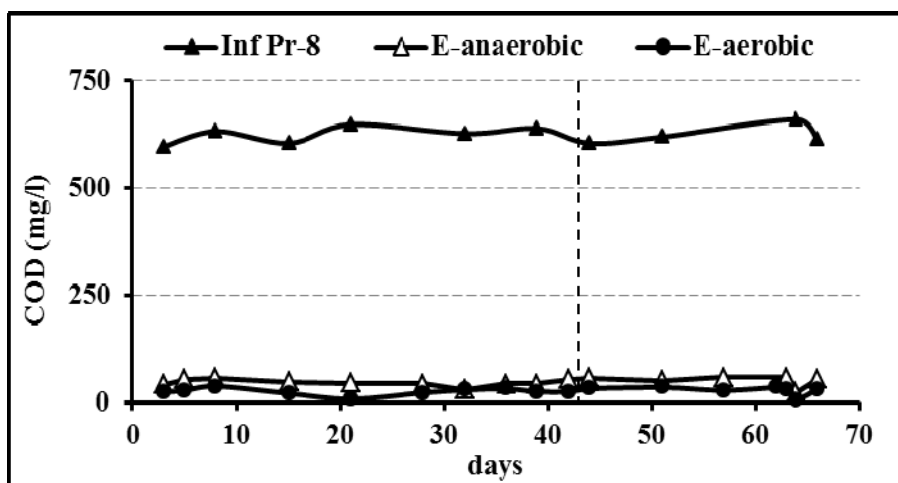


รูปที่ 4.3-26 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)



รูปที่ 4.3-27 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)

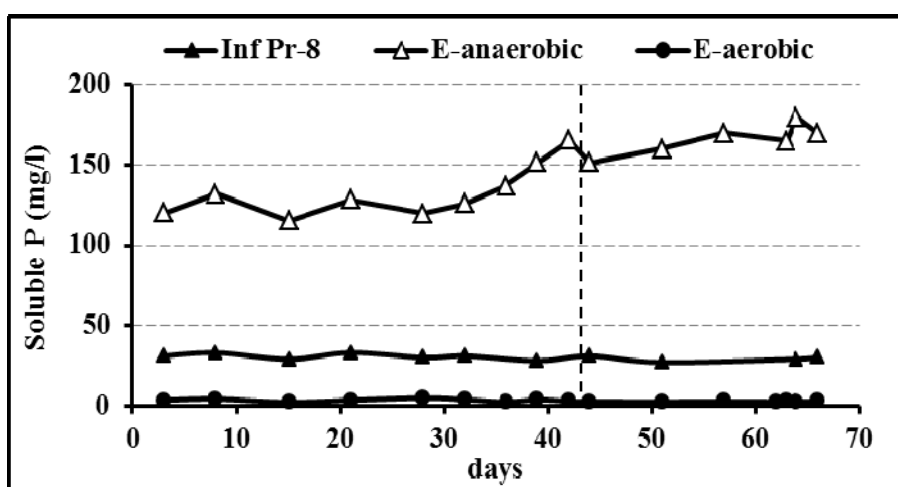
ค่าซีโอดีในน้ำเสียในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 597 – 661 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 625 มิลลิกรัมต่อลิตร) และในสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าซีโอดีเหลือเพียง 24 – 59 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 51 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ มีการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มเติมเล็กน้อย โดยค่าซีโอดีที่ปลายสภาวะเหลืออยู่ในช่วง 7 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 28 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-28)



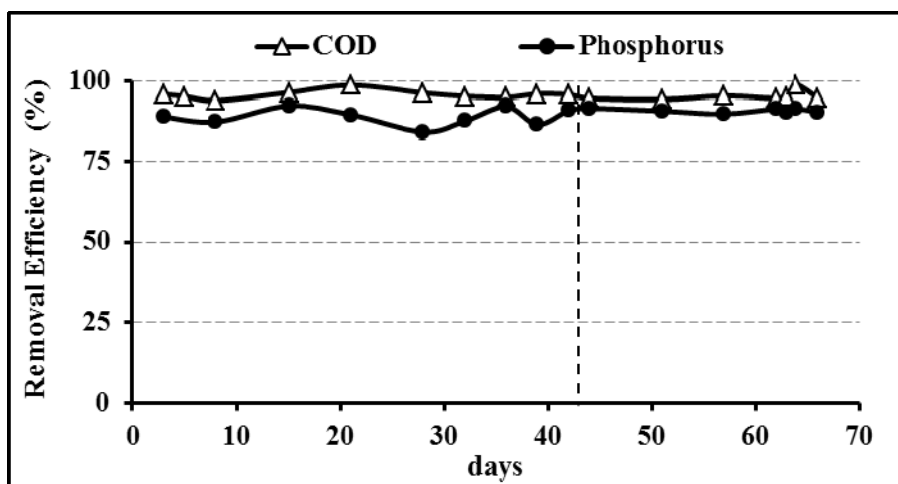
รูปที่ 4.3-28 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)

สำหรับฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมให้อยู่ในช่วง 27 – 33 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก มีการปล่อยฟอสฟอรัสเพื่อสลายแหล่งพลังงานในเซลล์ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากมาในการทดลองนี้ โดยพบความเข้มข้นฟอสฟอรัสละลายอยู่ในช่วง 151 – 180 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 166 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-29) จะเห็นได้ว่า การปล่อย

ฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก ของการทดลองนี้สูงกว่าการทดลองก่อนหน้านี้ (การทดลอง Pr-7) ที่มีแต่กรดโพรพิโอนิก อาจกล่าวได้ว่า ถึงแม้ว่ากรดโพรพิโอนิกจะส่งผลให้การปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกสูงกว่ากรดอะซิติก แต่การมีส่วนผสมของกรดทั้ง 2 ชนิด อาจส่งผลให้มีการปล่อยฟอสฟอรัสได้มากขึ้น นอกจากนี้ การจับใช้ฟอสฟอรัสในช่วงสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศในการทดลองนี้ก็เพิ่มขึ้น สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสที่สูงขึ้นนี้ได้จนเกือบหมด และทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอโรบิกยังคงอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ คือ อยู่ในช่วง 2.5 – 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 90 – 92 (เฉลี่ยร้อยละ 91) (รูปที่ 4.3-30) สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 95



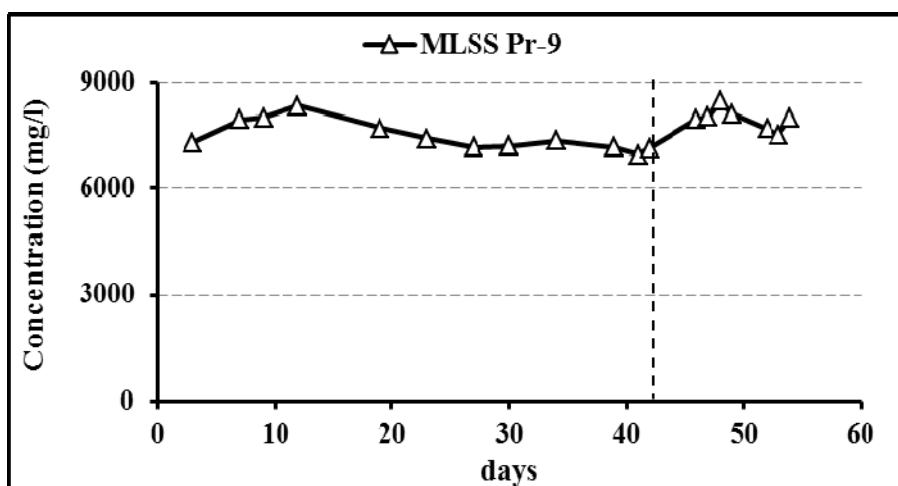
รูปที่ 4.3-29 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)



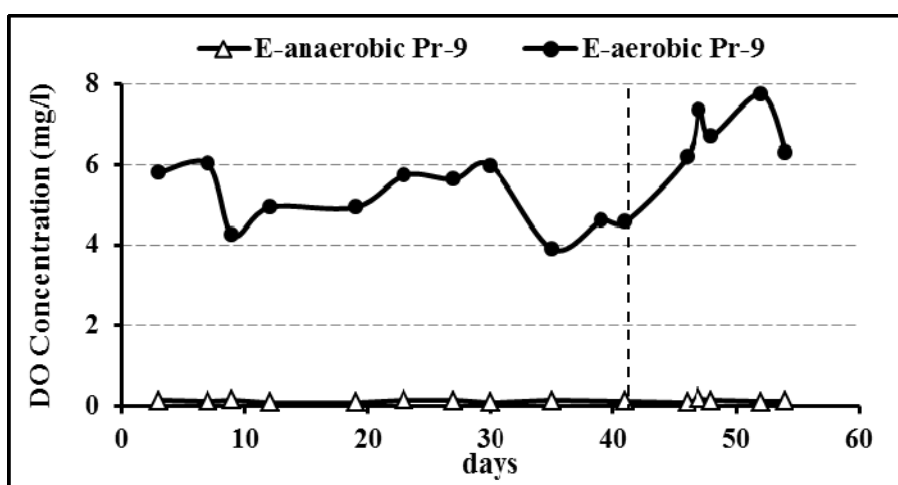
รูปที่ 4.3-30 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-8 (10°C และ Ac:Pr = 25:75)

4.3.6 ถึงปฏิกิริยาที่ 2 (Pr-reactor) อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 (Pr-9)

การทดลองนี้เดินระบบที่อุณหภูมิ 10.4 ± 0.4 องศาเซลเซียส และปรับน้ำเสียที่เตรียมโดยใช้ อัตราส่วนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกเป็น 50:50 เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) อยู่ในช่วง 6960 – 8480 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ย 7772 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3-31) ความเข้มข้นสลัดจ์นี้ยังคงอยู่ในระดับเดียวกับการทดลองอื่นๆ ในอุณหภูมิเดียวกัน ค่าออกซิเจนละลายในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีการเติมอากาศอยู่ในช่วง 0.09 – 0.19 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร) และในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศให้ ค่าออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 3.9 – 7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 5.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.3-32

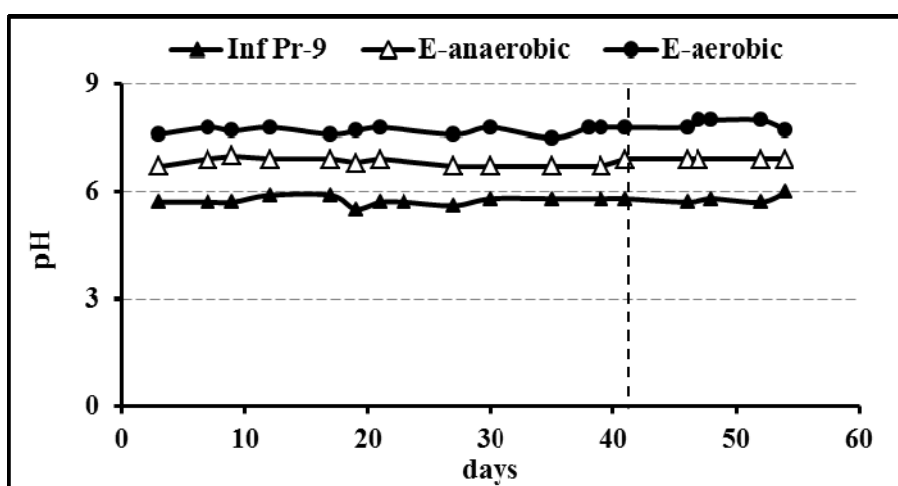


รูปที่ 4.3-31 ความเข้มข้นสลัดจ์ (MLSS) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)



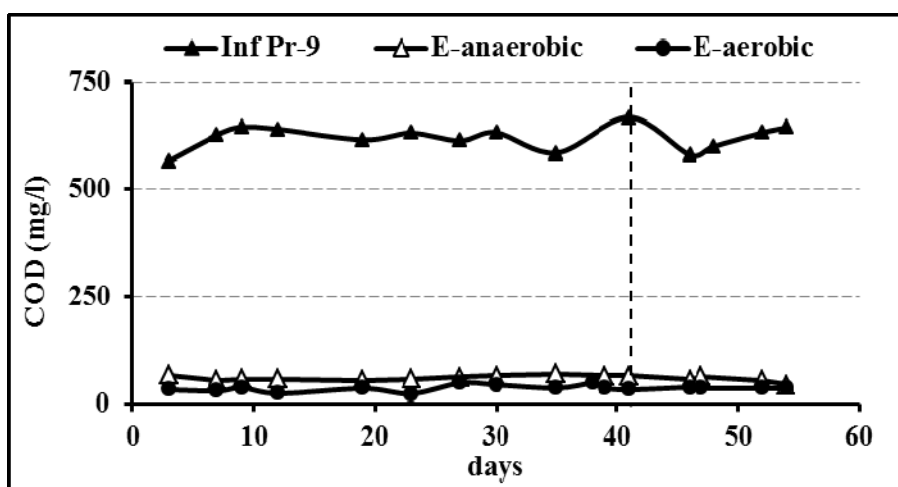
รูปที่ 4.3-32 ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

ส่วนค่าพีเอชในน้ำเสียเตรียมอยู่ในช่วง 5.5 – 6.0 ซึ่งต่ำกว่าการทดลองก่อนหน้า (Pr-8) เนื่องจากมีปริมาณกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว อย่างไรก็ตาม ค่าพีเอชก็กลับเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.7 – 7.0 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกเนื่องจากมีการใช้กรดอินทรีย์ในน้ำไป และเมื่อมีการย่อยสลายต่อเนื่องในสภาวะแอโรบิก ค่าพีเอชในน้ำได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนอยู่ในช่วง 7.5 – 8.0 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-33)



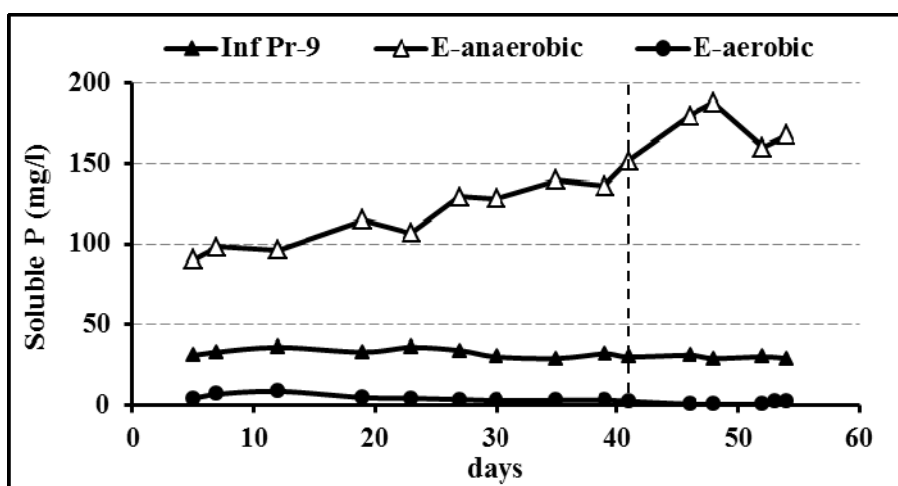
รูปที่ 4.3-33 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

ส่วนค่าซีโอดีของน้ำเสียยังคงอยู่ในช่วงที่ควบคุมไว้คือ 567 – 669 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 621 มิลลิกรัมต่อลิตร) และถูกใช้ไปค่อนข้างมากในสภาวะแอนแอโรบิก จนที่ปลายสภาวะมีค่าซีโอดีเหลืออยู่ในช่วง 43 – 65 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 57 มิลลิกรัมต่อลิตร) และพบการย่อยสลายต่อเนื่องในสภาวะแอโรบิกอีกเล็กน้อยจนเหลือค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 32 – 38 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 35 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก (รูปที่ 4.3-34)

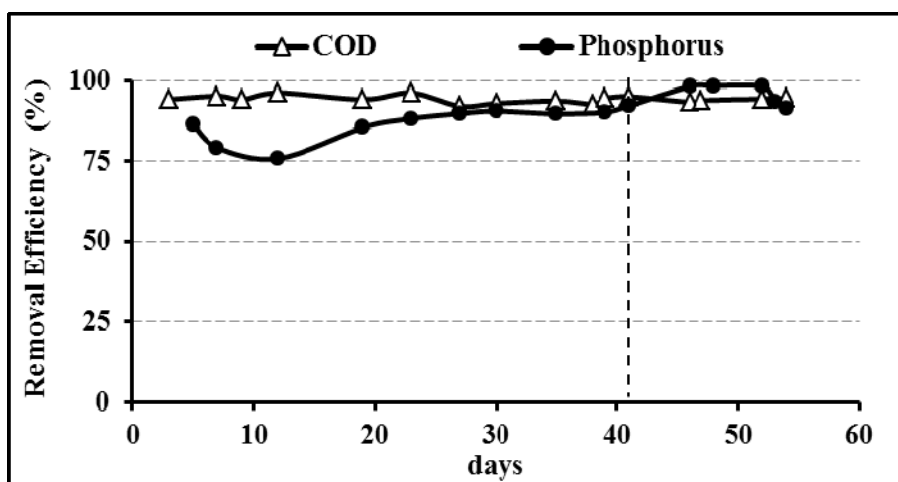


รูปที่ 4.3-34 ความเข้มข้นซีโอดี (COD) ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เตรียมอยู่ในช่วง 29 – 36 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 32 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบการปล่อยฟอสฟอรัสจากเซลล์จุลินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิก โดยพบความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอย่างมากจนอยู่ในช่วง 152 – 188 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 170 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก (เพิ่มจากที่มีในน้ำเสียประมาณ 5 เท่า) จะเห็นว่าใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้ (Pr-2) ที่มีการเติมกรดอะซิติกบางส่วน และสูงกว่าการทดลอง Pr-7 ที่ส่วนผสมน้ำเสียไม่มีกรดอะซิติก การจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกของการทดลองนี้มากกว่าการทดลองก่อนหน้านี้เพียงเล็กน้อย ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะแอโรบิกอยู่ในช่วง 0.4 – 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (เฉลี่ย 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร) (รูปที่ 4.3-35) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของการทดลองนี้อยู่ในช่วงร้อยละ 91 – 99 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 95 (รูปที่ 4.3-36) ซึ่งมากกว่าการทดลองอื่นๆ ของชุดถังปฏิกรณ์ Pr เล็กน้อย โดยยังคงมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการกำจัดซีโอดีคือเฉลี่ยร้อยละ 94



รูปที่ 4.3-35 ความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)



รูปที่ 4.3-36 ประสิทธิภาพการกำจัด ในการทดลอง Pr-9 (10°C และ Ac:Pr = 50:50)

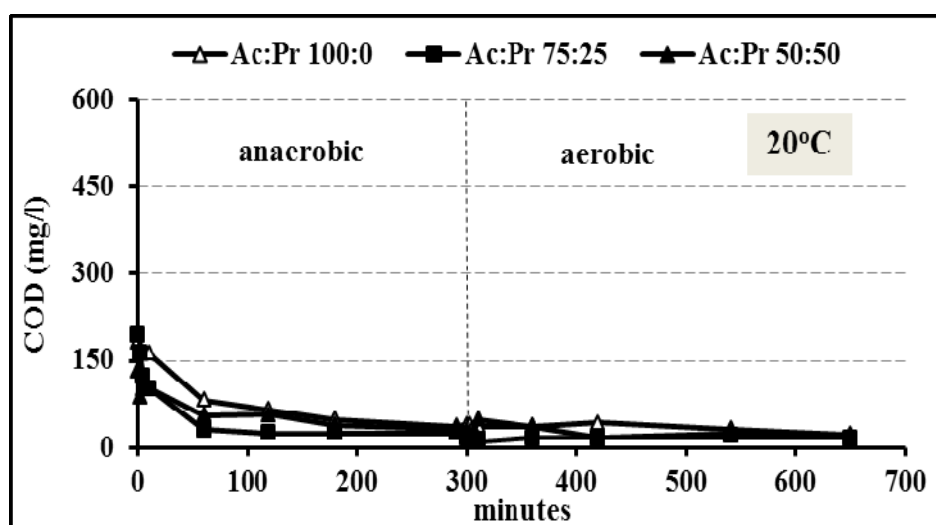
4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก

เมื่อการเดินระบบในแต่ละการทดลองเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ได้ทำการตรวจวัดผลการทำงานของระบบตามเวลาในรอบวัฏจักรของการทำงาน 12 ชั่วโมง โดยมีการเก็บตัวอย่างอย่างน้อยจำนวน 16 ตัวอย่างต่อรอบวัฏจักร (สภาวะแอนแอโรบิก 8 ตัวอย่าง และสภาวะแอโรบิก 8 ตัวอย่าง) วิเคราะห์พารามิเตอร์ ซีโอดี ฟอสฟอรัส ในน้ำตัวอย่าง รวมทั้งวิเคราะห์พีเอชเอ และ กลัยโคเจนในเซลล์แบคทีเรีย

4.4.1 การทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

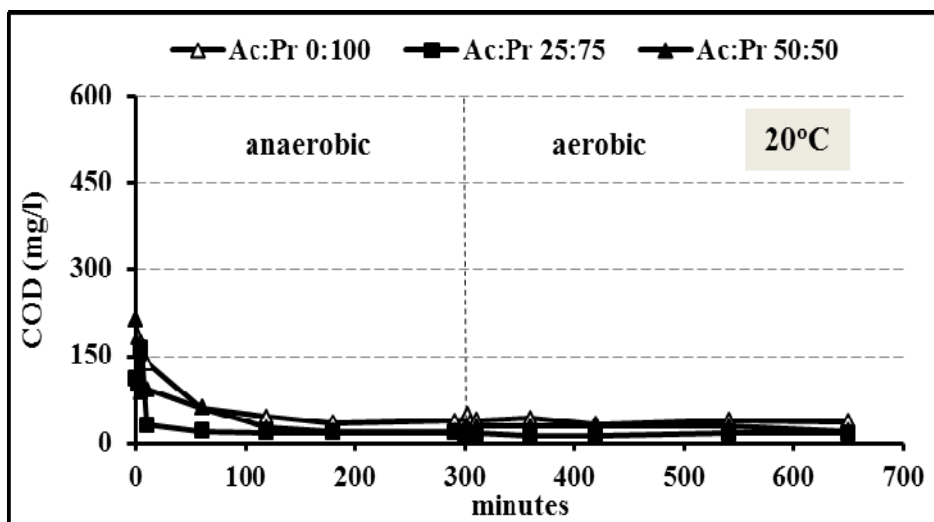
(1) ซีโอดี (COD)

การเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีตามเวลาในรอบวัฏจักรเดินระบบ เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 4.4-1 จะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีส่วนใหญ่ถูกกำจัดภายในสภาวะแอนแอโรบิกโดยมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาทีแรกของการเดินระบบ ทุกอัตราส่วน Ac:Pr ที่ทำการทดลอง เนื่องจากแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียที่เติมให้เป็นสารอินทรีย์ประเภทย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย โดยกรดไขมันระเหยง่ายที่เป็นส่วนผสมในน้ำเสีย (กรดอะซิติกและ/หรือกรดโพรพิโอนิก) ถูกดูดซึมเข้าเซลล์ภายในสภาวะแอนแอโรบิกแล้วเปลี่ยนรูปเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ โดยอาจอยู่ในรูปของสารกลุ่มโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) โดยกลุ่มจุลชีพที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ และคาดว่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ถูกใช้จนเกือบหมดภายใน 120 นาทีแรกของสภาวะแอนแอโรบิก จากนั้น ค่าซีโอดีลดลงในช่วงสภาวะแอโรบิกอีกเพียงเล็กน้อย หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงจนสิ้นสุดการทำงานในรอบวัฏจักร



รูปที่ 4.4-1 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

สำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์ Pr ที่เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 25:75 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 4.4-2 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า คือ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกกำจัดหรือถูกใช้ไปภายในสภาวะแอนแอโรบิก การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) ไม่ส่งผลให้ค่าซีไอดีเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ จุลชีพในระบบสามารถใช้ได้เกือบทั้งหมด



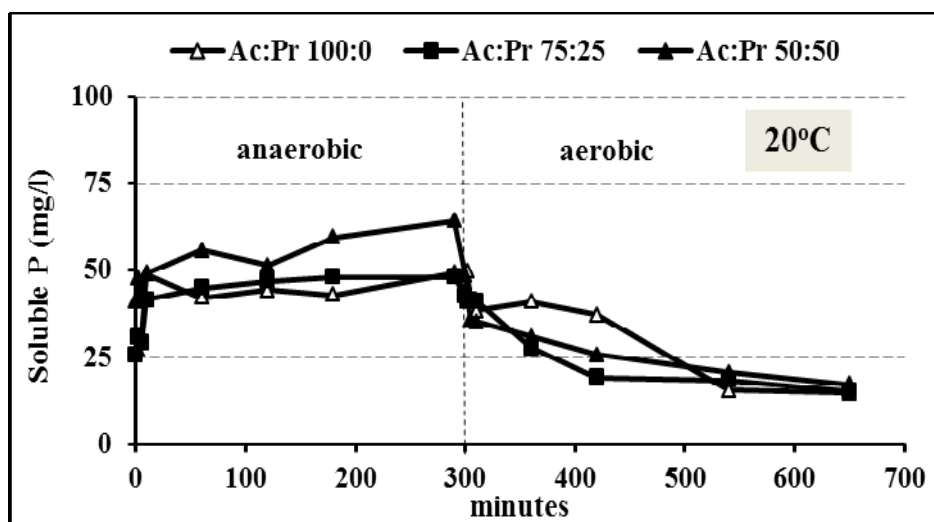
รูปที่ 4.4-2 ค่าซีไอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

(2) ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (soluble phosphorus)

ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น จุลชีพที่มีบทบาทสำคัญในการกำจัดฟอสฟอรัสคือ กลุ่มพีเอโอ (polyphosphate accumulating organisms, PAOs) ซึ่งมักจะแสดงพฤติกรรมอันเป็นลักษณะเฉพาะคือ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์หรือแหล่งคาร์บอนที่เป็นสารอาหารแต่ไม่มีออกซิเจนเพียงพอที่จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายในกระบวนการสันดาปสารอินทรีย์ จะพยายามดูดซึมสารอาหารที่มีอยู่เข้าเซลล์แล้วเปลี่ยนรูปภายในเซลล์เก็บไว้เป็นแหล่งคาร์บอนสำรองของเซลล์ ในขั้นตอนนี้มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อทำปฏิกิริยาดังกล่าว เซลล์จึงทำการสลายพันธะฟอสเฟตในแหล่งพลังงานของเซลล์ที่อยู่ในรูป ATP เพื่อให้ได้พลังงานนำไปใช้ดูดซึมสารอาหารเข้าเซลล์ดังที่กล่าว เป็นผลให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในสภาวะแอนแอโรบิกนี้ การปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมามากแสดงว่ามีการใช้พลังงานเพื่อดึงสารอาหารเข้าเซลล์มาก ซึ่งควรสอดคล้องกับค่าซีไอดีในน้ำที่ควรลดลงอย่างมากในสภาวะแอนแอโรบิกนี้เช่นกัน ในสภาวะแอโรบิกที่มีออกซิเจนเพียงพอสำหรับการสันดาปอาหาร จุลชีพกลุ่มพีเอโอใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ที่สะสมไว้โดยเฉพาะที่อยู่ในรูปพีเอชเอ (PHAs) เป็นแหล่งคาร์บอนและจับใช้ฟอสฟอรัสในน้ำเพื่อสะสมพลังงานอยู่ในรูปของสาร ATP ต่อไป เป็นผลให้ฟอสฟอรัสในน้ำควรมี

ค่าลดลงในสภาวะเดิมอากาศนี้ โดยจุลชีพกลุ่มฟีเอโอไน้มักจะจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกได้มากกว่าที่ปลดปล่อยออกมาในสภาวะแอนแอโรบิก ทำให้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำได้

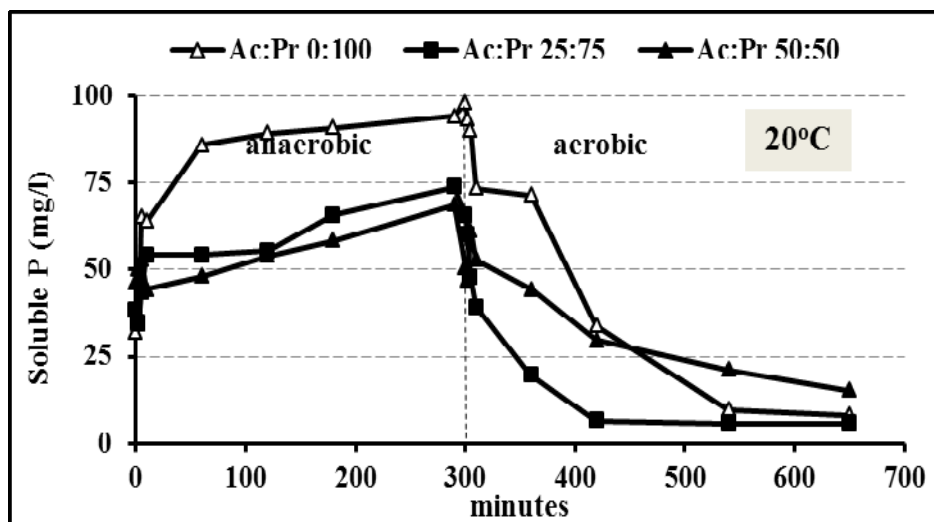
การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Ac:Pr ในถังปฏิกรณ์ Ac เท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 ส่งผลต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ Ac ดังแสดงในรูปที่ 4.4-3 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วน 100:0 และ 75:25 ซึ่งมีกรดอะซิติกมากกว่ากรดโพรพิโอนิก พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกใกล้เคียงกัน (49 และ 48 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ในขณะที่อัตราส่วน 50:50 พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด (64 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก พบว่าที่อัตราส่วน 100:0 มีการจับใช้ฟอสฟอรัสมากขึ้นช้าๆโดยใช้เวลาเกือบ 4 ชั่วโมง หลังจากเริ่มสภาวะแอโรบิก (หรือประมาณนาที่ที่ 540 ของวัฏจักร) จึงพบการลดลงของค่าฟอสฟอรัสในน้ำอย่างชัดเจน ในขณะที่อัตราส่วนอื่น (75:25 และ 50:50) พบการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์รวดเร็วกว่า คือ ตั้งแต่ภายใน 1-2 ชั่วโมงแรกของสภาวะแอโรบิก (นาที่ที่ 300 - 420 ของวัฏจักร) แต่เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบความเข้มข้นฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลืออยู่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน (14.7 15.4 และ 17.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ)



รูปที่ 4.4-3 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 25:75 และ 50:50 พบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Ac:Pr ในน้ำเสียที่ป้อนให้ ส่งผลต่อการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสดังแสดงในรูปที่ 4.4-4 กล่าวคือ ในอัตราส่วน 0:100 ที่มีเพียงกรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอตพบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากที่สุด คือ เพิ่มขึ้นถึง 94 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วน 25:75 และ 50:50 มีค่าฟอสฟอรัสละลายที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกเท่ากับ 74 และ 69 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะเห็นได้ว่า น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติกทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้การจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกที่ค่อนข้างรวดเร็วและมากกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac โดยค่าฟอสฟอรัส

ละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอโรบิกของการทดลองที่อัตราส่วน 0:100 และ 25:75 เท่ากับ 8 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วน 50:50 มีการจับใช้ฟอสฟอรัสน้อยกว่า ทำให้ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอโรบิกเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับในถังปฏิกรณ์ Ac



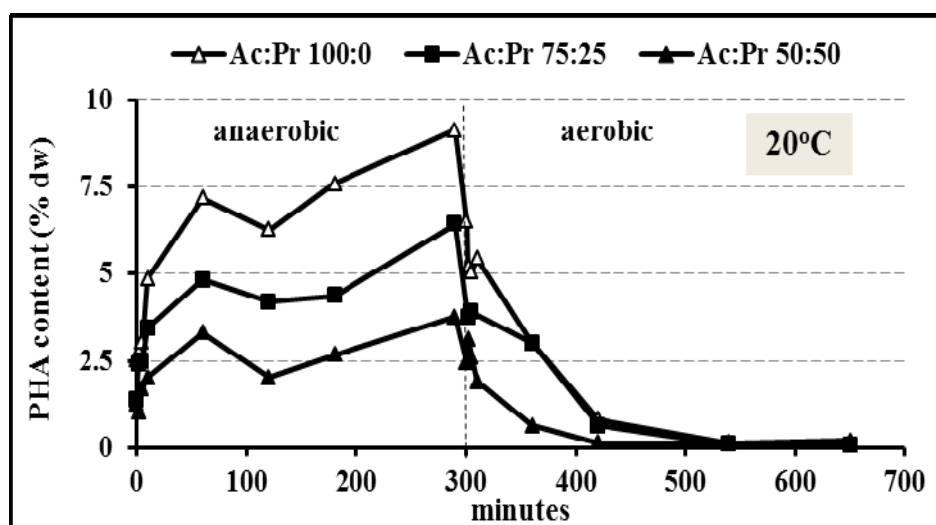
รูปที่ 4.4-4 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

(3) พีเอชเอ (polyhydroxyalkanoates, PHAs)

ในสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำเพียงพอสำหรับการสันดาปอาหาร จุลชีพกลุ่มพีเอโอ ดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์แล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารพีเอชเอ (โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต) เก็บเป็นแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ โดยพลังงานที่ใช้ในการดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์ได้มาจากการสลายฟอสเฟตจากสาร ATP ทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกนอกเซลล์ดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับกระบวนการสังเคราะห์สารพีเอชเอจำเป็นต้องใช้สารรีดิวซิง NADH จากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ สารพีเอชเอนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ จับใช้ฟอสฟอรัสจากน้ำเข้าสู่เซลล์เพื่อเก็บสะสมเป็นแหล่งพลังงานในเซลล์ในรูป ATP ต่อไป รวมทั้งสังเคราะห์สารกลัยโคเจนบางส่วนกลับคืนให้กับเซลล์

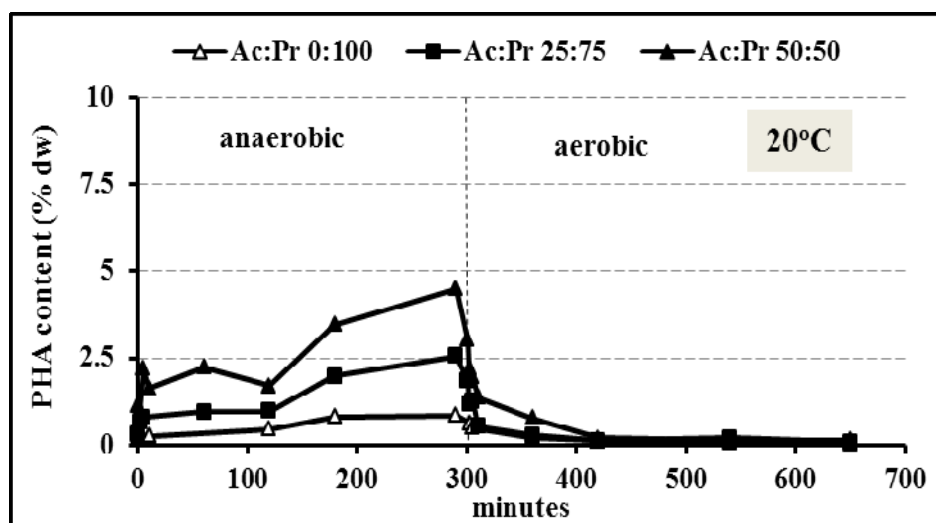
เมื่อเปรียบเทียบการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac ที่ใช้น้ำเสียที่มีอัตราส่วน Ac:Pr แตกต่างกัน 3 อัตราส่วนคือ 100:0 75:25 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 4.4-5 จะเห็นได้ว่าการสะสมสารพีเอชเอเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 นาทีแรกของสภาวะแอนแอโรบิกหลังจากป้อนน้ำเสียให้ และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก การทดลองที่ใช้อัตราส่วน 100:0 พบการสะสมสารพีเอชเอในเซลล์เพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีสารพีเอชเอในเซลล์ร้อยละ 9.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในขณะที่อีก 2 การทดลองพบสารพีเอชเอในเซลล์น้อยลงคือ ร้อยละ 6.4 และ 3.7 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามลำดับ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ อัตราส่วน 100:0 และ 75:25 พบสารพีเอชเอในเซลล์ถูกใช้ไป

ค่อนข้างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงหลังจากมีการเติมอากาศ ในขณะที่อัตราส่วน 50:50 มีการใช้สารพีเอชเอค่อนข้างช้ากว่า แต่เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบสารพีเอชเอในเซลล์เหลือเพียงร้อยละ 0.1 – 0.2



รูปที่ 4.4-5 พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr พบว่ามีการสะสมสารพีเอชเอในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างต่ำมาก (รูปที่ 4.4-6) โดยพบพีเอชเอร้อยละ 0.8 2.6 และ 4.5 ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 0:100 25:75 และ 50:50 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติก แม้ว่าจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac แต่กลับพบการสะสมพีเอชเอต่ำกว่า ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ควรจะเป็นของจุลินทรีย์กลุ่มฟิเอโอ อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยฟอสฟอรัสเกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์และค่าพีเอชในน้ำ เนื่องจากน้ำเสียที่เตรียมโดยมีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติกจะมีค่าพีเอชในน้ำสูงกว่าน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกมากกว่ากรดโพรพิโอนิก ทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้พลังงานในการดึงกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์มากกว่า เป็นเหตุให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกจึงสูงกว่า (Smolders et al., 1994; Filipe et al., 2001) นอกจากนี้ การสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์จำเป็นต้องใช้สารรีดิวซิง NADH ที่มักจะได้มาจากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ โดย Liu และคณะ (2007) ได้รายงานถึงการสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกที่ลดลงเมื่อค่าพีเอชในน้ำสูงขึ้น ทำให้ผลิตสารรีดิวซิง NADH ได้น้อยลง จนอาจส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์เกิดได้น้อยลง เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศ สารพีเอชเอจึงถูกใช้ไปพร้อมกับการใช้ฟอสฟอรัสจนเหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง

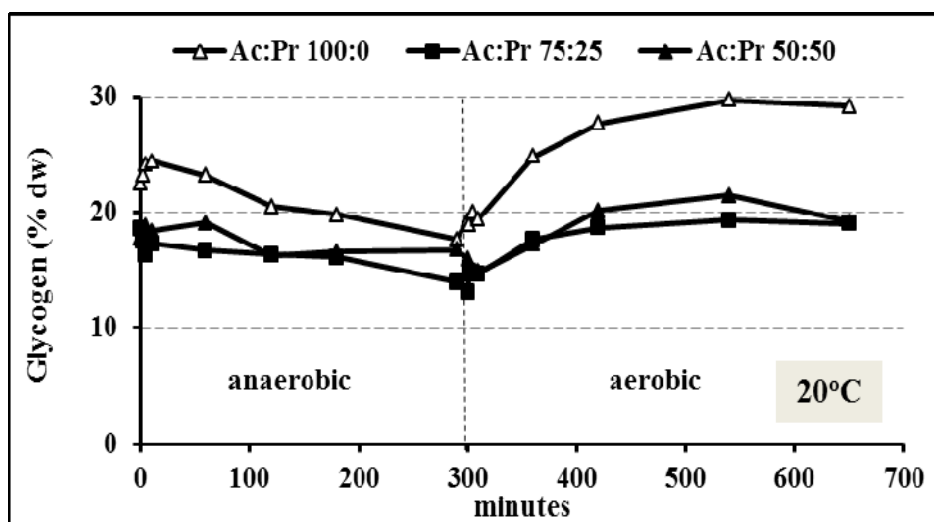


รูปที่ 4.4-6 พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20 °C

(4) กลัยโคเจน (glycogen)

กลัยโคเจนที่สะสมในเซลล์จุลชีพ เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ชี้บ่งสมรรถนะของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้ระดับหนึ่ง ดังที่กล่าวไปแล้วว่าจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) จะสลายฟอสเฟตจากสาร ATP เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการดึงสารอาหารเข้าสู่เซลล์เมื่ออยู่ในสภาวะไม่เหมาะสม หรือไม่มีออกซิเจนที่จะใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย (terminal electron acceptor) ในวัฏจักร TCA ส่งผลให้มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีจุลชีพอีกกลุ่มหนึ่งที่สามารถสลายกลัยโคเจนในเซลล์เพื่อให้ได้พลังงานในการดึงสารอาหารเข้าสู่เซลล์ได้เรียกว่าจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ทำให้มีการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ และยังมีสารรีดิวซิง(จากการสลายกลัยโคเจน) เพียงพอที่จะสังเคราะห์สารพีเอชเอเก็บไว้ในเซลล์ โดยไม่จำเป็นต้องพบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากสาร ATP ในเซลล์ และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ จุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) จึงย่อยสลายสารพีเอชเอในเซลล์เพื่อใช้ในการเจริญของเซลล์และการสังเคราะห์กลัยโคเจนกลับคืนให้กับเซลล์

จากรูปที่ 4.4-7 จะเห็นว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ที่ใช้น้ำเสียอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 (ไม่มีกรดโพรพิโอนิก) พบการลดลงของกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างชัดเจน แสดงว่ามีการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ของพวกจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) เป็นส่วนใหญ่ สอดคล้องกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกที่ค่อนข้างน้อย (จากประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำเสียที่ป้อน เป็นประมาณ 49 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก ดังแสดงในรูปที่ 4.4-3) และกลัยโคเจนที่สลายนั้นนอกจากจะให้พลังงานกับจุลชีพในการดึงสารอาหารเข้าสู่เซลล์แล้ว ยังให้สารรีดิวซิง NADH ที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์ สอดคล้องกับการสะสมสารพีเอชเอเพิ่มขึ้นในสภาวะแอนแอโรบิก (รูปที่ 4.4-5)

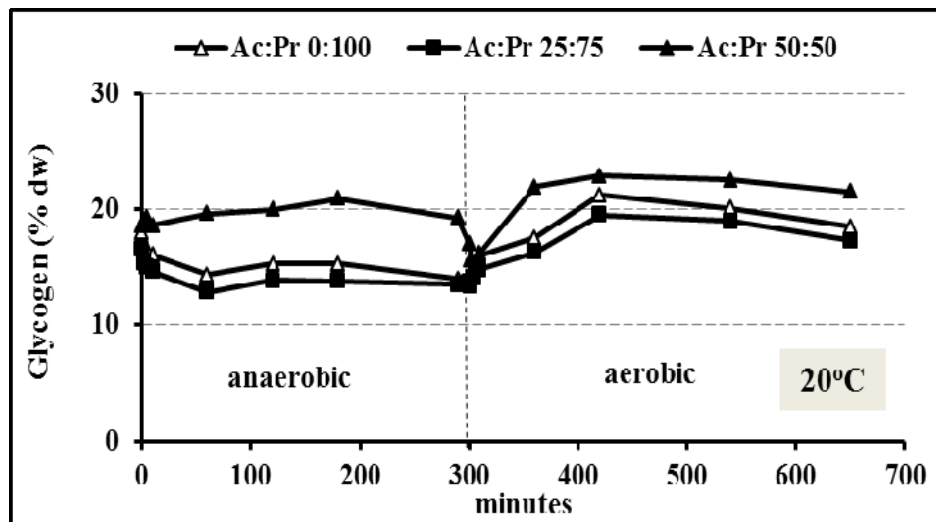


รูปที่ 4.4-7 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

อีกทั้ง ในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศพบการสะสมกลัยโคเจนในเซลล์เพิ่มขึ้นมากกว่าอีก 2 การทดลองอย่างเห็นได้ชัด กล่าวได้ว่า น้ำเสียป้อนเข้าสู่ระบบที่มีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต ทำให้ถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นคู่แข่งกับจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) ส่งผลให้การกำจัดฟอสฟอรัสไม่ดีมากเท่าที่ควร สำหรับการทดลองที่ใช้ น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกผสมอยู่ด้วย ทั้งในอัตราส่วน 75:25 และ 50:50 พบการลดลงของกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกเล็กน้อย และสัดส่วนของกลัยโคเจนในเซลล์ระหว่าง 2 การทดลองนี้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสารพีเอชเอในรูปที่ 4.4-5 ที่มีสัดส่วนสารพีเอชเอในเซลล์ใกล้เคียงกัน กล่าวได้ว่า ที่อุณหภูมิการทดลอง 20 องศาเซลเซียส ถึงปฏิกรณ์ Ac ที่เริ่มป้อนน้ำเสียให้ระบบด้วยน้ำเสียที่ไม่มีกรดโพรพิโอนิก เมื่อน้ำเสียมีส่วนของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้น (ร่วมกับกรดอะซิติกและนิวเทรียนบรอต) พบพฤติกรรมของจุลชีพพีเอโอ (PAOs) เพิ่มขึ้นมากกว่าในอัตราส่วน 100:0 เนื่องจากพบการสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกและการสังเคราะห์กลัยโคเจนกลับคืนในสภาวะแอโรบิกน้อยกว่า รวมทั้งพบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้ฟอสฟอรัสมากขึ้นเช่นกัน

สำหรับในถังปฏิกรณ์ Pr เมื่อนำน้ำเสียที่อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 และ 25:75 พบการสลายสารกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกเช่นกัน โดยมีสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ค่อนข้างใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.4-8 แต่ต่ำกว่าในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 75:25 และ 50:50 ในถังปฏิกรณ์ Ac เล็กน้อย สอดคล้องกับการสะสมพีเอชเอในเซลล์ (รูปที่ 4.4-6) ที่น้อยกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ ในถังปฏิกรณ์ Pr นี้ มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกและจับใช้ในสภาวะแอโรบิกมากกว่าในถัง Ac อย่างเห็นได้ชัด กล่าวได้ว่าในถังปฏิกรณ์ Pr ที่เริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่ไม่มีกรดอะซิติกมีลักษณะที่แสดงว่า มีจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) และการเพิ่มสัดส่วนของ

กรดอะซิติกในน้ำเสียส่งผลให้ค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนแปลงในแนวทางลดต่ำลง (เป็นกรดมากขึ้น) ทำให้การสลายกลัยโคเจนและการสะสมพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการรายงานของ Zhang และคณะ (2007)

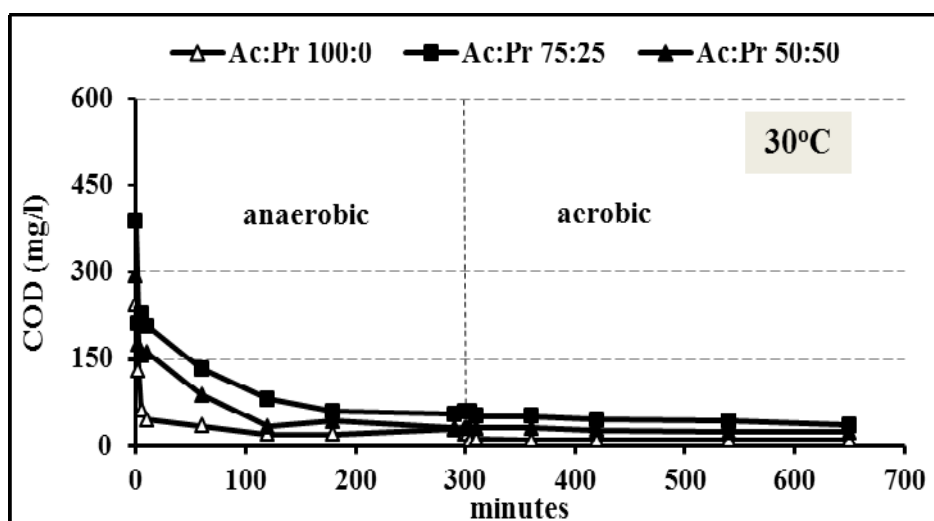


รูปที่ 4.4-8 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 20°C

4.4.2 การทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

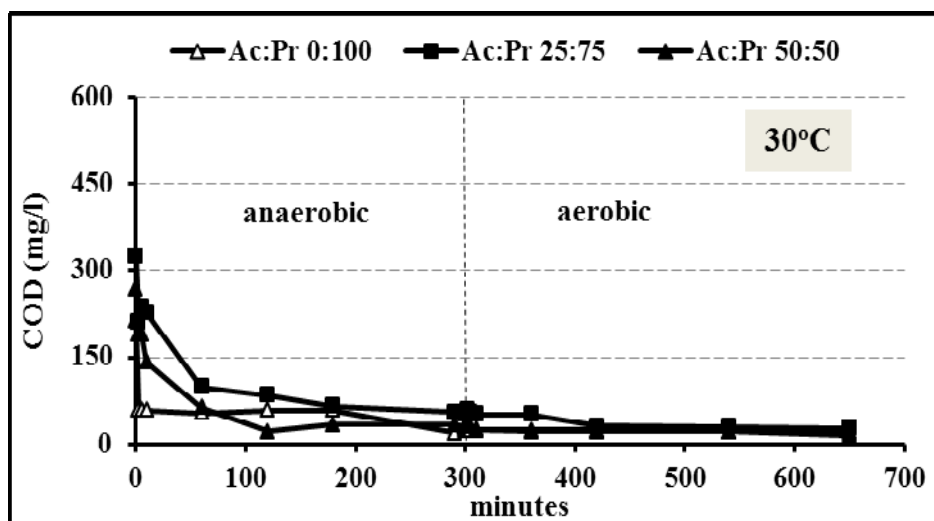
(1) ซีโอดี (COD)

การเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีตามเวลาในรอบวัฏจักรเดินระบบ เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 4.4-9 จะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีส่วนใหญ่ถูกกำจัดอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาทีแรกของสภาวะแอนแอโรบิกหรือหลังจากที่ป้อนน้ำเสียให้ คล้ายกันกับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสก่อนหน้านี้ เนื่องจากแหล่งคาร์บอนเป็นชนิดเดียวกันที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย และจะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดีถูกใช้จนเกือบหมดภายใน 120 นาทีของสภาวะแอนแอโรบิก ค่าซีโอดีที่ท้ายสภาวะแอนแอโรบิกเหลืออยู่ค่อนข้างต่ำมาก และเกือบจะใกล้เคียงกับค่าซีโอดีที่คงอยู่ในสภาวะแอโรบิกในลำดับต่อมาจนสิ้นสุดการทำงานในรอบวัฏจักร



รูปที่ 4.4-9 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

สำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์ Pr มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า กล่าวคือ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกใช้ไปภายในสภาวะแอนแอโรบิกจนเกือบหมดในทุกอัตราส่วน Ac:Pr (0:100 25:75 และ 50:50) ดังแสดงในรูปที่ 4.4-10 นั่นคือ การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr) ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ถัง เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพและจุลินทรีย์สามารถดูดซึมไปใช้ได้เกือบทั้งหมด



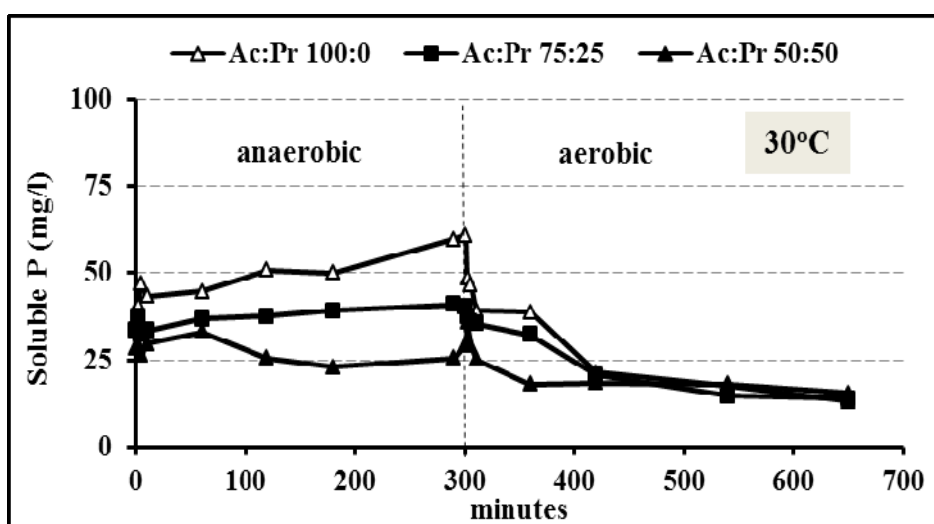
รูปที่ 4.4-10 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

(2) ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (soluble phosphorus)

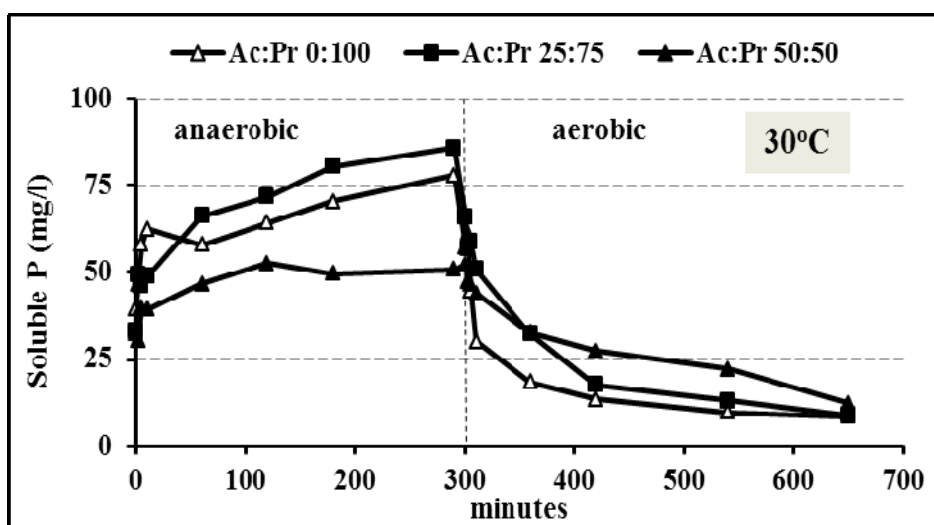
การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Ac:Pr ในถังปฏิกรณ์ Ac เท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 ที่อุณหภูมิการเดินระบบประมาณ 30 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ Ac ดังแสดงในรูปที่ 4.4-11 จะเห็นได้ว่า ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วนเท่ากับ 100:0 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอย่างเห็นได้ชัดโดยพบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกประมาณ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วน 75:25 พบค่าฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะประมาณ 41 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในระดับหนึ่งแต่น้อยกว่าอัตราส่วน 100:0 แต่ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 50:50 แทบจะไม่พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก ค่าฟอสฟอรัสที่ปลายสภาวะประมาณ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียที่ป้อนให้ ผลของอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้ให้ผลแตกต่างไปจากในการทดลองที่ 20 องศาเซลเซียสก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก พบว่าการจับใช้ฟอสฟอรัสค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่าฟอสฟอรัสลดต่ำลงมากภายใน 2 ชั่วโมงแรกของการเติมอากาศ (ประมาณนาที่ที่ 420 ของวัฏจักร) และเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบค่าฟอสฟอรัสประมาณ 13 14 และ 16 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ การทดลองที่ใช้อัตราส่วน 50:50 มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสประมาณร้อยละ 50 น้อยกว่าอีก 2 อัตราส่วนข้างเล็กน้อย

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 25:75 และ 50:50 ที่อุณหภูมิการทดลองประมาณ 30 องศาเซลเซียส พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างชัดเจนในทุกอัตราส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.4-12 กล่าวคือ ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 0:100 ที่มีเพียงกรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบร็อทพบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง มีค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกประมาณ 78 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การทดลองที่ใช้อัตราส่วน 25:75 พบการ

ปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงที่สุด มีค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกประมาณ 86 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วน 50:50 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อยที่สุด มีค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะประมาณ 51 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิก พบการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วโดยค่าฟอสฟอรัสลดลงต่ำมากภายใน 2 ชั่วโมงแรกของการเติมอากาศ (ประมาณนาทีที่ 420 ของวัฏจักร) และพบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะแอโรบิกประมาณ 8 9 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำให้ถึงปฏิกรณ์ Pr นี้มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าร้อยละ 60 ซึ่งสูงกว่าในถึงปฏิกรณ์ Ac อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.4-4) จะเห็นว่า ที่อัตราส่วน 0:100 และ 50:50 ของการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียสมีการปล่อยฟอสฟอรัสน้อยกว่าที่ 20 องศาเซลเซียส อาจกล่าวได้ว่า การทำงานของจุลชีพกลุ่มฟิเอโอ (PAOs) ทำงานหรือมีบทบาทน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



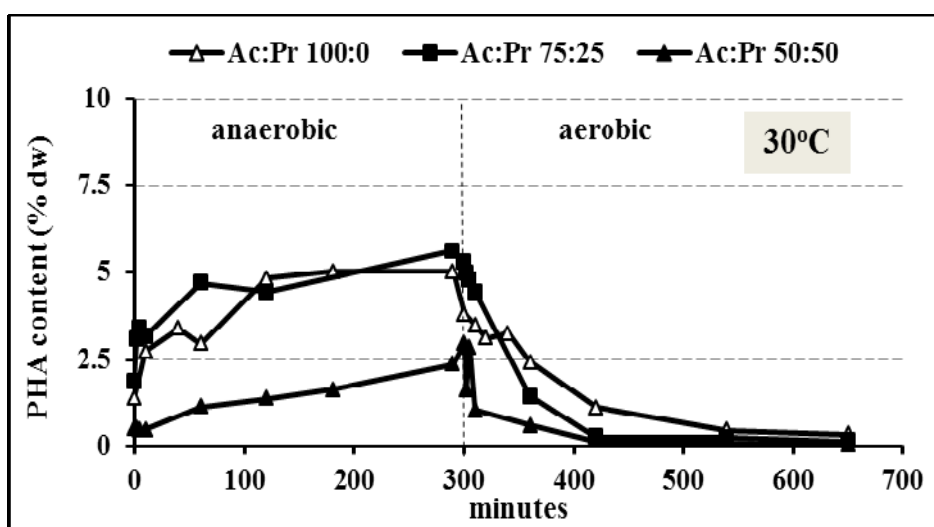
รูปที่ 4.4-11 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถึงปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C



รูปที่ 4.4-12 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถึงปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

(3) พีโอเอ (polyhydroxyalkanoates, PHAs)

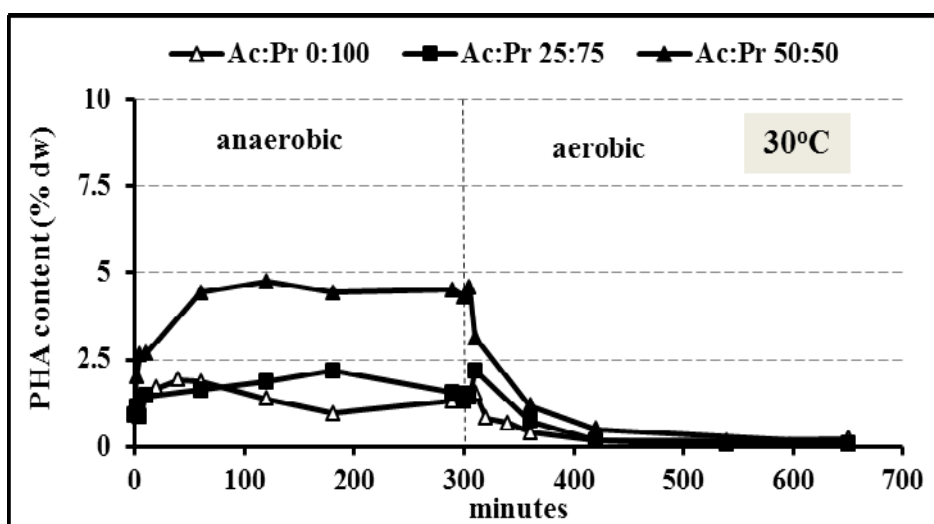
ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ Ac พบการสะสมสารพีโอเอเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 นาทีแรกของสภาวะแอนแอโรบิกหลังจากป้อนน้ำเสียให้ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 100:0 และ 75:25 และมีการสะสมเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกพบการสะสมพีโอเอค่อนข้างใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 5.0 และ 5.6 ตามลำดับ) แต่ในอัตราส่วน 50:50 พบการสะสมพีโอเอค่อนข้างน้อยและช้ากว่าอีก 2 การทดลอง (ร้อยละ 2.4) ดังแสดงในรูปที่ 4.4-13 อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ การสะสมพีโอเอในการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.4-5) จะเห็นได้ว่า การสะสมพีโอเอในสภาวะแอนแอโรบิกที่การทดลองอุณหภูมิสูงกว่ามีน้อยกว่า ทั้งที่ การสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกไม่ได้ลดลงอย่างชัดเจนนัก(ดังจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป) เป็นไปได้ที่สารรีดิวซิง NADH และพลังงานที่ได้จากการสลายกลัยโคเจนอาจถูกใช้เพื่อกิจกรรมอื่นของเซลล์นอกเหนือจากใช้ในการสังเคราะห์พีโอเอ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถสะสมพีโอเอได้มากเท่ากับการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่าก่อนหน้านี้ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ พบการใช้สารพีโอเอค่อนข้างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงหลังจากมีการเติมอากาศ เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบสารพีโอเอร้อยละ 0.05 – 0.3



รูปที่ 4.4-13 พีโอเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 0:100 และ 25:75 พบการสะสมสารพีโอเอในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างต่ำมากหรือแทบจะไม่มี การสะสมเพิ่มขึ้นเลย (รูปที่ 4.4-14) โดยสัดส่วนพีโอเอในเซลล์ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกเพียงร้อยละ 1.3 และ 1.6 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติก แม้ว่าจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าการทดลองในถังปฏิกรณ์ Ac แต่กลับพบการสะสมพีโอเอต่ำกว่า นอกจากนี้ การทดลองที่ใช้อัตราส่วน 50:50 พบการสะสมพีโอเอมากกว่าอัตราส่วนอื่นอย่างเห็นได้ชัด มีสัดส่วนพีโอเอในเซลล์ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิก

โพรพิโอนิกร้อยละ 4.5 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง แต่กลับมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น (รูปที่ 4.4-12) ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่ควรจะเป็นของจุลชีพกลุ่มพีเอโอ ดังนั้น ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้ นอกจากกลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) แล้ว อาจมีกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) เป็นกลุ่มสำคัญมากขึ้นกว่าที่การทดลองอุณหภูมิต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าในการทดลองที่น้ำเสียมีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติกเป็นผลมาจากค่าพีเอชในน้ำเสียที่สูงกว่า ทำให้จุลชีพต้องใช้พลังงานในการดึงกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์มากกว่า ส่วนการสะสมพีเอชเอในเซลล์ที่ค่อนข้างต่ำอาจเป็นผลจากการสลายกลัยโคเจนน้อยลงทำให้มีสารรีดิวซิง NADH น้อยสำหรับการสังเคราะห์พีเอชเอ เมื่อเข้าสู่สภาวะเติมอากาศ สารพีเอชเอจึงถูกใช้ไปพร้อมกับการจับใช้ฟอสฟอรัสจนเหลือเพียงร้อยละ 0.06 – 0.2 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง

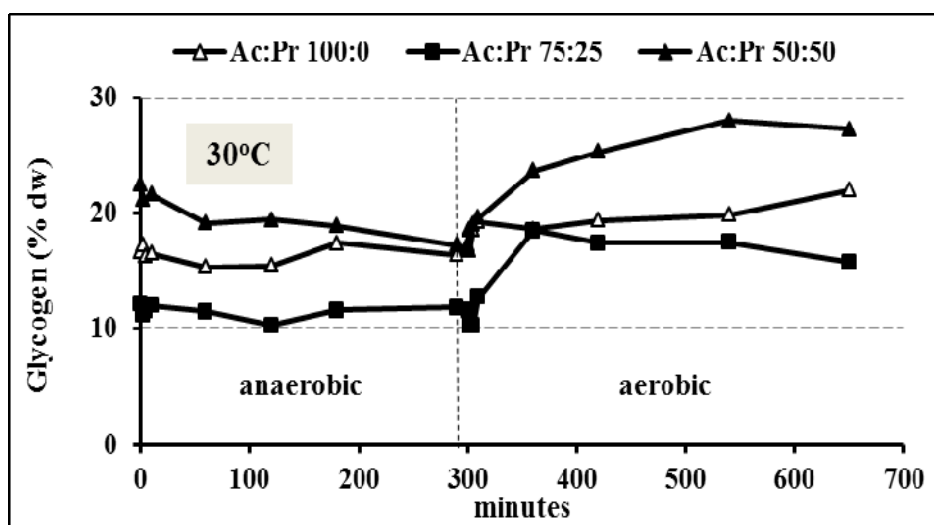


รูปที่ 4.4-14 พีเอชเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

(4) กลัยโคเจน (glycogen)

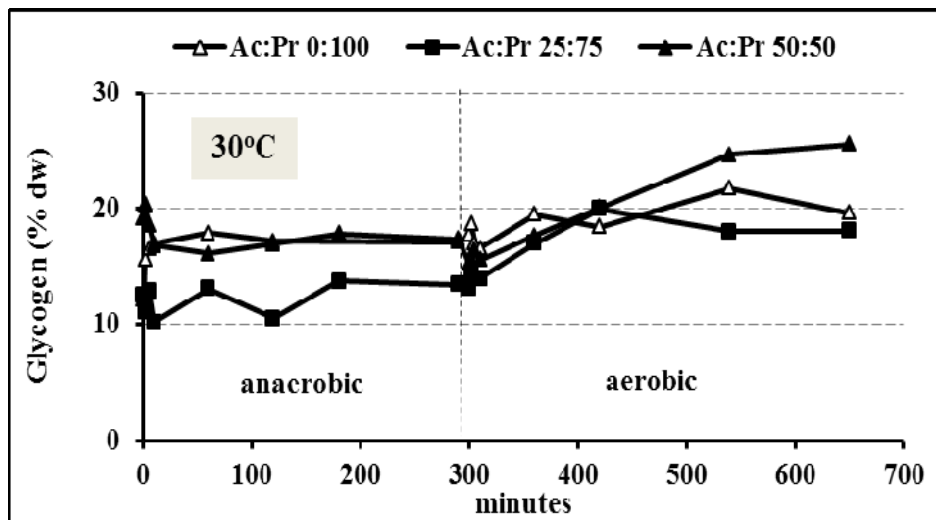
จากรูปที่ 4.4-15 จะเห็นได้ว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ที่ใช้อัตราส่วน 100:0 และ 75:25 แนวโน้มการลดลงของกลัยโคเจนในระหว่างสภาวะแอนแอโรบิกไม่ชัดเจนนักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้ แต่พบการลดลงของกลัยโคเจนชัดเจนมากขึ้นในอัตราส่วน 50:50 อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของกลัยโคเจนในเซลล์ของการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 75:25 พบต่ำที่สุด และพบสูงที่สุดในอัตราส่วน 50:50 นอกจากนี้ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ พบการสะสมกลัยโคเจนในอัตราส่วน 50:50 สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาร่วมกับการสะสมพีเอชเอที่ต้องการสารรีดิวซิง NADH (จากการสลายกลัยโคเจน) ไปใช้ในการสังเคราะห์สารพีเอชเอ พบว่าที่อัตราส่วน 50:50 มีการสะสมสารพีเอชเอในเซลล์ต่ำที่สุด (4.4-13) จึงอาจกล่าวได้ว่า ในการทดลองนี้ (อัตราส่วน 50:50) มีการสะสมพีเอชเอน้อยเนื่องจากมีกลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) น้อย เนื่องจากแทบจะไม่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส การดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ใช้พลังงาน

จากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์เป็นส่วนใหญ่ และไม่ได้เก็บสะสมแหล่งคาร์บอนในรูปของสารพืเอชเอมากนัก แต่มีการสะสมกลัยโคเจนกลับในสภาวะแอโรบิกค่อนข้างมาก โดยการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ไม่ได้มีโดดเด่นแบบกลุ่มจุลชีพพืเอโอ (PAOs) ดังนั้น สำหรับถังปฏิกรณ์ Ac ที่เริ่มเดินระบบด้วยอัตราส่วน 100:0 (ไม่มีกรดโพรพิโอนิก) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นแต่ในสัดส่วนที่ยังน้อยกว่ากรดอะซิติก ยังทำให้มีกลุ่มจุลชีพพืเอโอ (PAOs) ทำงานในระบบอยู่อย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนเป็น 50:50 กลับส่งเสริมการทำงานของกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) ให้โดดเด่นมากกว่าแตกต่างจากการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 100:0 พบการทำงานของกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) มากที่สุด



รูปที่ 4.4-15 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

สำหรับในถังปฏิกรณ์ Pr ในการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนแปลงในระหว่างสภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างน้อย และที่อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 25:75 พบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ต่ำที่สุด (รูปที่ 4.4-16) และพบสัดส่วนกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกสูงที่สุดในอัตราส่วน 50:50 กล่าวได้ว่าในถังปฏิกรณ์ Pr ที่เริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่ไม่มีกรดอะซิติก (Ac:Pr เท่ากับ 0:100) หรือมีในอัตราส่วนที่น้อยกว่า (25:75) พบลักษณะของจุลชีพกลุ่มพืเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) เนื่องจากมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าในอัตราส่วน 50:50 อย่างเห็นได้ชัด แต่แหล่งคาร์บอนที่ดูดซึมเข้าเซลล์เปลี่ยนรูปเป็นสารพืเอชเอได้น้อย อาจเนื่องมาจากผลลัพธ์ของการสลายกลัยโคเจนให้สารรีดิวซิง NADH ไม่มากพอ กล่าวโดยสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิก 50:50 ทำให้กลุ่มจุลชีพพืเอโอ (PAOs) ทำงานน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสไม่สูงเท่าที่ควร

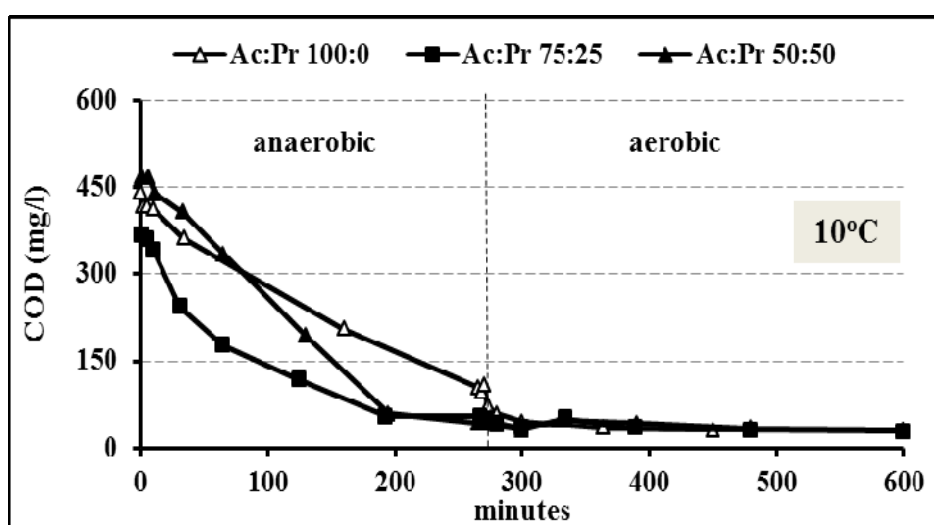


รูปที่ 4.4-16 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C

4.4.3 การทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

(1) ซีโอดี (COD)

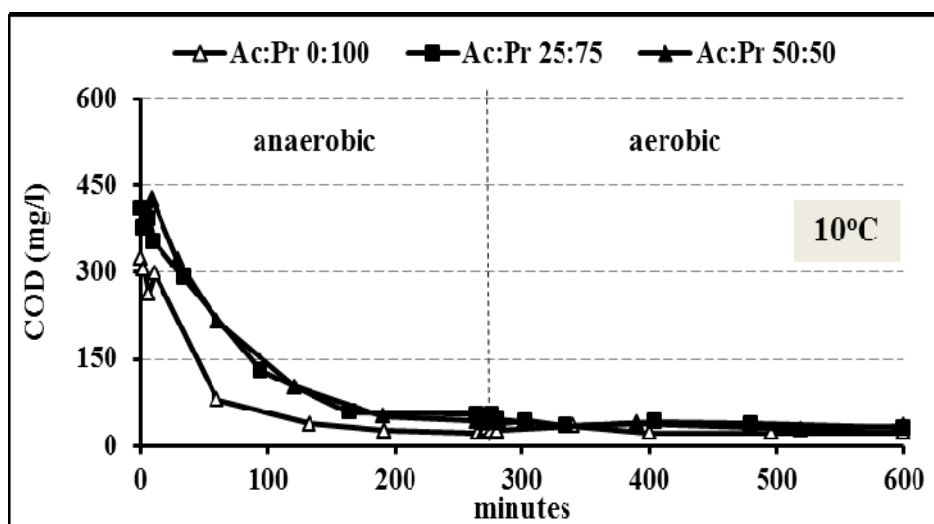
ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 4.4-17 จะเห็นว่าค่าซีโอดีส่วนใหญ่ถูกกำจัดภายในสภาวะแอนแอโรบิกด้วยอัตราที่ค่อนข้างช้ากว่าในการทดลองก่อนหน้านี้ (ทั้ง 20 และ 30 องศาเซลเซียส) โดยในอัตราส่วน 100:0 (มีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก ยังพบค่าซีโอดีเหลืออยู่ประมาณ 104 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกมีการเติมอากาศ ค่าซีโอดีถูกกำจัดอย่างรวดเร็วจนเกือบหมดภายใน 10 – 30 นาทีแรกของการเติมอากาศ สำหรับการทดลองที่อัตราส่วน 75:25 และ 50:50 ค่าซีโอดีส่วนใหญ่ถูกกำจัดจนเกือบหมดได้ภายใน 3 ชั่วโมงของสภาวะแอนแอโรบิก (ประมาณเวลาที่ 180 ของรอบวัฏจักร) จากนั้นค่าซีโอดีลดลงอีกเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงจนสิ้นสุดการทำงานในรอบวัฏจักร จะเห็นได้ว่าการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่อุณหภูมิต่ำนี้ ใช้เวลานานกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า (20 และ 30 องศาเซลเซียส) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต พบว่าไม่สามารถดูดซึมได้หมดภายในสภาวะแอนแอโรบิก



รูปที่ 4.4-17 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

สำหรับการทดลองในถังปฏิกรณ์ Pr พบการกำจัดค่าซีโอดีส่วนใหญ่ในสภาวะแอนแอโรบิก โดยค่าซีโอดีลดลงค่อนข้างรวดเร็วภายใน 3 ชั่วโมงหลังจากป้อนน้ำเสียเข้าระบบ (ประมาณเวลาที่ 180 ของรอบวัฏจักร) เร็วกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า แต่ใช้เวลานานกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า (20 และ 30 องศาเซลเซียส) อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ อัตราส่วน 0:100 (มีแต่กรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอต) มีการกำจัดค่าซีโอดีเร็วกว่าอัตราส่วนอื่น (รูปที่ 4.4-18) การเพิ่มอัตราส่วนของกรดอะซิติกให้กับถังปฏิกรณ์

Pr ทำให้การดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ช้าลงเล็กน้อย แต่ทุกอัตราส่วนยังสามารถกำจัดค่าซีโอดีได้เกือบหมดภายในสภาวะแอนแอโรบิก และในสภาวะแอโรบิก ค่าซีโอดีลดลงอีกเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงจนสิ้นสุดการทำงานในรอบวัฏจักร

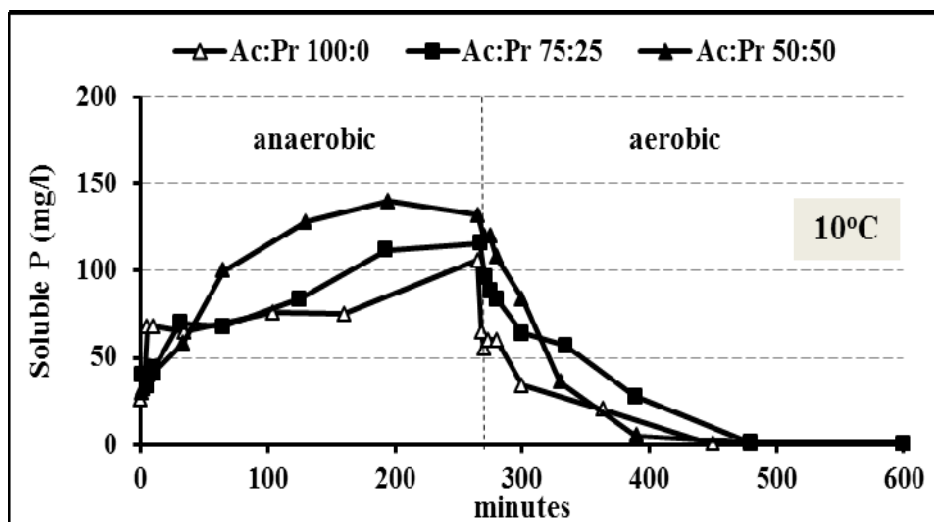


รูปที่ 4.4-18 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

(2) ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (soluble phosphorus)

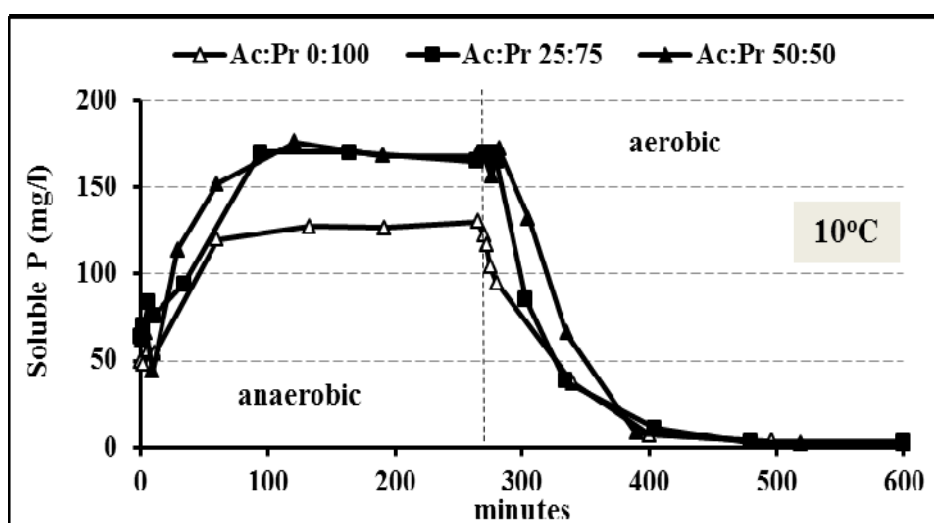
สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0 พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสรวดเร็วภายใน 5 นาทีแรกหลังจากป้อนน้ำเสียให้ (รูปที่ 4.4-19) จากนั้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำประมาณ 106 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วถูกจับใช้อย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่สภาวะที่มีการเติมอากาศ จนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิก มีฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วน 75:25 และ 50:50 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมากกว่าอัตราส่วน 100:0 จนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิก พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำสูงถึง 116 และ 132 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาประกอบกับค่าซีโอดีในสภาวะแอนแอโรบิกจะเห็นได้ว่า ในการทดลองที่อัตราส่วน 100:0 ที่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อยกว่าการทดลองที่อัตราส่วนอื่นๆ พบการกำจัดซีโอดีในสภาวะแอนแอโรบิกช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำนี้ เซลล์จำเป็นต้องสลายฟอสเฟตจากสาร ATP ในเซลล์มากกว่าที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการดึงสารอาหารแบบเดียวกันและปริมาณเท่ากันเพื่อนำเข้าสู่เซลล์ หรือเป็นไปได้ว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ที่มีแต่กรดอะซิติกไม่มีกรดโพรพิโอนิก (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100) มีจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) น้อยกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) ทำให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อย แต่กลุ่มจีเอโอที่อาจมีมากกว่าทำงานได้ช้าที่อุณหภูมิต่ำ จึงดูดซึมสารอาหารได้ค่อนข้างช้ากว่าในการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า สำหรับในสภาวะแอโรบิกพบการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างมากภายใน 2 ชั่วโมงแรกหลังจากเริ่มเติมอากาศ

และเมื่อสิ้นสุดสภาวะเติมอากาศนี้พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำเหลืออยู่ต่ำมาก (น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของการทดลองนี้สูงกว่าร้อยละ 90



รูปที่ 4.4-19 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 25:75 และ 50:50 ที่อุณหภูมิการทดลองประมาณ 10 องศาเซลเซียสนี้ พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกอย่างมากมาย และรวดเร็วภายใน 1 ชั่วโมงแรกหลังจากป้อนน้ำเสียให้ จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนเมื่อสิ้นสุดสภาวะแอนแอโรบิกพบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำประมาณ 130 165 และ 168 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.4-20)

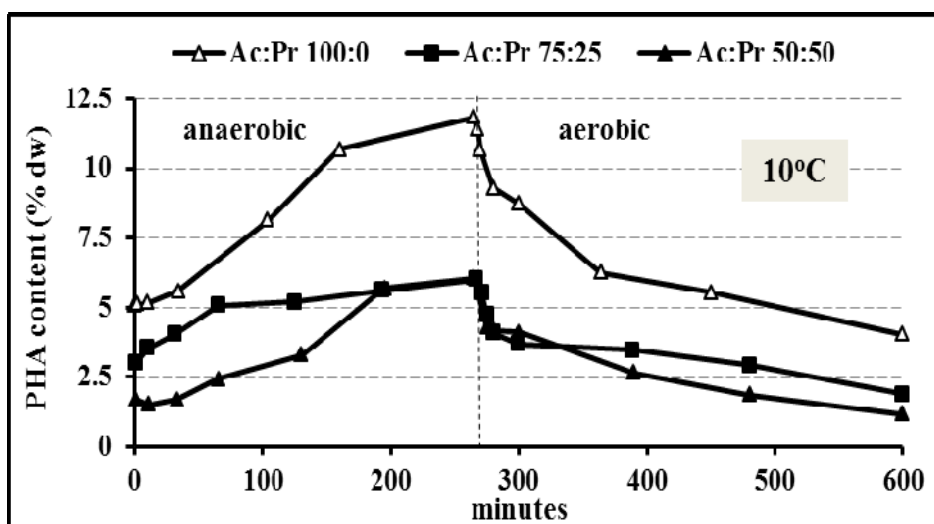


รูปที่ 4.4-20 ค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

จะเห็นได้ว่า การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในการทดลองนี้สูงกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้าและสูงที่สุดในการศึกษานี้ แสดงว่า ถังปฏิกรณ์ Pr ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้มากถึง 4 – 5 เท่าของฟอสฟอรัสที่มีในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ เพื่อใช้ดึงสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ได้จนเกือบหมดภายในสภาวะแอนแอโรบิก และทุกอัตราส่วน Ac:Pr ที่ใช้ในถังปฏิกรณ์นี้ พบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกอย่างรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงหลังจากเริ่มมีการเติมอากาศ พบค่าฟอสฟอรัสละลายน้ำที่ปลายสภาวะอยู่ในช่วง 2.5 – 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในระดับร้อยละ 90 เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในถังปฏิกรณ์ Pr ที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.4-4 และ 4.4-12 ตามลำดับ) จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสมีการปลดปล่อยและจับใช้มากที่สุด อาจกล่าวได้ว่า บทบาทของจุลชีพกลุ่มฟิเอโอ (PAOs) มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

(3) ฟิเอซเอ (polyhydroxyalkanoates, PHAs)

ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ Ac พบการสะสมสารฟิเอซเอเพิ่มขึ้นระหว่างสภาวะแอนแอโรบิก โดยการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 100:0 พบการสะสมฟิเอซเอสูงที่สุด คือ มีสัดส่วนฟิเอซเอในเซลล์ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกถึงร้อยละ 11.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (รูปที่ 4.4-21) ในขณะที่อีก 2 อัตราส่วน (75:25 และ 50:50) พบการสะสมฟิเอซเอในสภาวะแอนแอโรบิกพอสมควร โดยมีสัดส่วนฟิเอซเอร้อยละ 6.0 และ 6.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามลำดับ

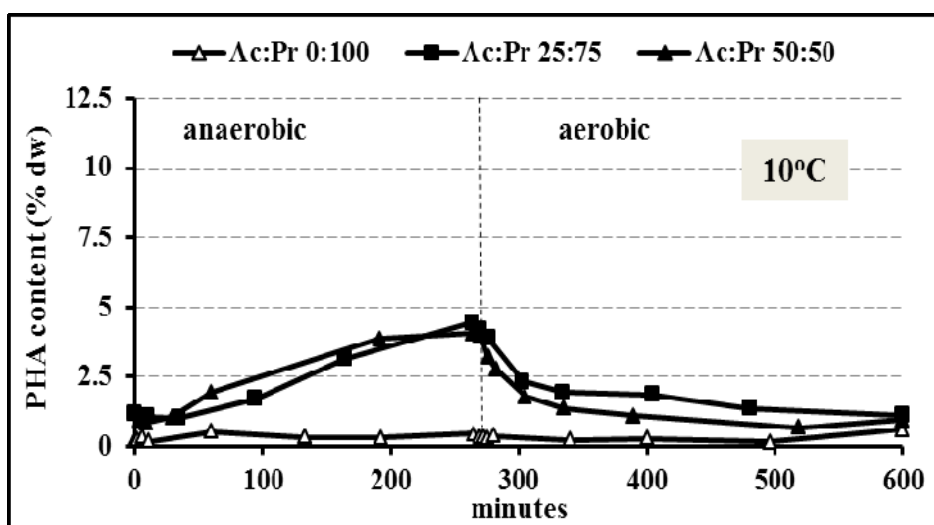


รูปที่ 4.4-21 ฟิเอซเอในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

แสดงว่าน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกร่วมกับนิวเทรียนบรอต (อัตราส่วน 100:0) มีการดูดซึมสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์แล้วใช้ไปการสะสมฟิเอซเอมากกว่าการทดลองกับน้ำเสียอัตราส่วนอื่นๆ แต่การสังเคราะห์สารฟิเอซเอจำเป็นต้องได้สารรีดิวซิง NADH ที่ได้มาจากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ ซึ่งพลังงาน

ที่ได้ระหว่างการสลายกลัยโคเจนอาจถูกเก็บกลับไปอยู่ในรูป ATP ทำให้มีการดึงฟอสฟอรัสบางส่วนกลับจนอาจส่งผลให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสสุทธิ (net P released) ในสภาวะแอนแอโรบิกต่ำลงได้ สำหรับอัตราส่วนอื่น (75:25 และ 50:50) พบการสะสมพีเอชเอน้อยกว่า อาจเป็นเหตุผลในทางกลับกันคือ มีการสลายกลัยโคเจนน้อย ทำให้มีสาร NADH สำหรับการผลิตสารพีเอชเอน้อย ส่งผลให้พบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่า และเมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ พบการสลายสารพีเอชเอน้อยลงในช่วง 2 ชั่วโมงหลังจากเริ่มมีการเติมอากาศ สอดคล้องกับการจับใช้ฟอสฟอรัสในรูปที่ 4.4-19 เมื่อสิ้นสุดสภาวะแอโรบิกพบสัดส่วนพีเอชเอนในเซลล์ร้อยละ 4.0 1.9 และ 1.2 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามลำดับ

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ที่การทดลองในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสะสมสารพีเอชเอนในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิกต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac (รูปที่ 4.4-22) จะเห็นได้ว่า ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 0:100 (ไม่มีกรดอะซิติก) แทบจะไม่พบการสะสมสารพีเอชเอนเลย โดยพบสัดส่วนพีเอชเอนเพียงร้อยละ 0.46 ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกและคงอยู่ในระดับนี้ตลอดการทำงานในวัฏจักร เมื่อน้ำเสียมีสัดส่วนของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น พบการสะสมสารพีเอชเอนในสภาวะแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีพีเอชเอนในเซลล์ที่ปลายสภาวะร้อยละ 4.4 และ 4.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน 25:75 และ 50:50 ตามลำดับ แล้วมีการสลายสารพีเอชเอนในสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมอากาศ ที่ปลายสภาวะพบสัดส่วนพีเอชเอนเหลือร้อยละ 1.1 และ 0.95 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามลำดับ



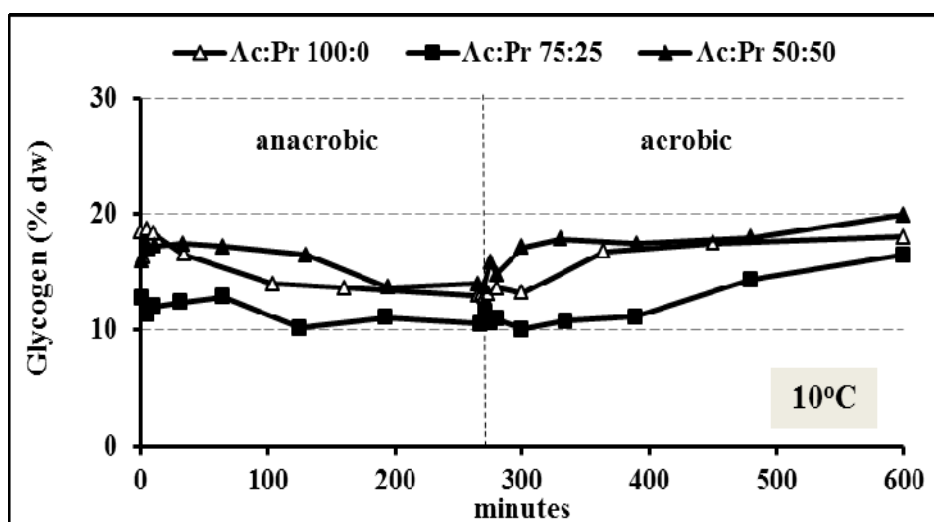
รูปที่ 4.4-22 พีเอชเอนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีของการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ กรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ควรเปลี่ยนรูปเป็นสารพีเอชเอนสะสมภายในเซลล์ เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับกระบวนการย่อยสลายเมื่อมีการเติมอากาศ แล้วจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ แต่ในการทดลองที่ไม่มีการสะสมพีเอชเอนเลย ก็ยังพบการจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิกได้ดี อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกรดอะซิติกเป็นส่วนผสมร่วมกับกรดโพรพิโอนิกทำให้การปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ Pr ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ดี

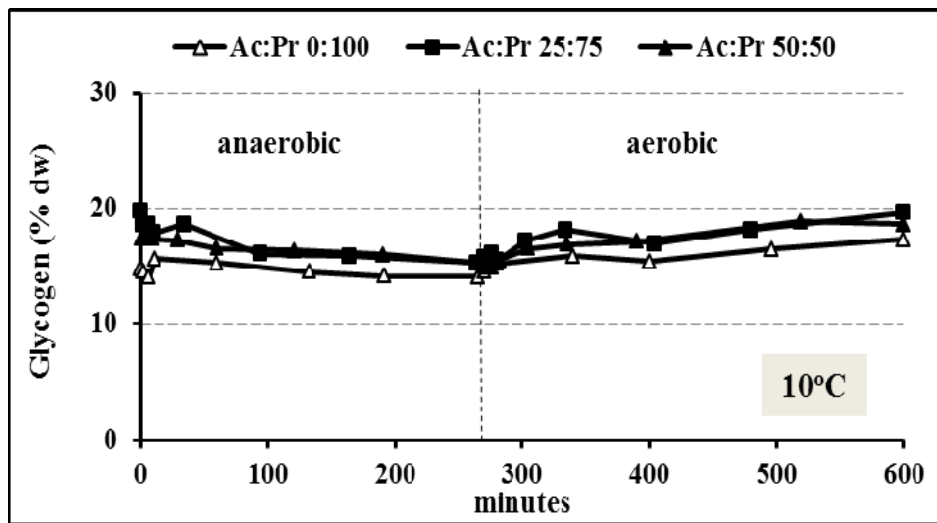
ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ การสะสมสารพีเอเอในเซลล์ของจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) ควรจะมีในระดับหนึ่ง แต่ถ้ามีมากเกินไปอาจแสดงได้ว่ามีกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) ร่วมด้วยในระบบ ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเนื่องจากจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น อุณหภูมิ ค่าพีเอช ฯลฯ

(4) กลัยโคเจน (glycogen)

จากรูปที่ 4.4-23 ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนี้ จะเห็นได้ว่ากลัยโคเจนในเซลล์ตลอดวัฏจักรการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก โดยเห็นการลดลงในช่วงสภาวะแอนแอโรบิกเล็กน้อยในการทดลองที่อัตราส่วน 100:0 และ 50:50 แล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในสภาวะแอโรบิก ส่วนอัตราส่วน 75:25 พบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ต่ำกว่าอัตราส่วนอื่นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาในถังปฏิกรณ์ Pr (รูปที่ 4.4-24) พบการเปลี่ยนแปลงกลัยโคเจนในเซลล์น้อยมากหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักร และในถังปฏิกรณ์ Pr นี้ อัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกที่แตกต่างกัน อาจไม่ส่งผลต่อระดับกลัยโคเจนในเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับสารพีเอเอในเซลล์ที่กล่าวไปแล้ว กล่าวคือ ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่มีจุลชีพเคยชินกับกรดอะซิติกมากกว่าถังปฏิกรณ์ Pr พบการสะสมพีเอเอมากกว่า ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของกลัยโคเจนมากกว่า และมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกน้อยกว่า จึงคาดว่ามีจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) ทำงานร่วมกันกับกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ที่อุณหภูมิต่ำนี้ แต่ในถังปฏิกรณ์ Pr คาดว่าจุลชีพกลุ่มหลักควรเป็นกลุ่มพีเอโอ (PAOs) เป็นสำคัญ (มีการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี) โดยอาจมีจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) น้อยมากหรืออาจไม่มีเลยเนื่องจากสิ่งแวดล้อมเป็นอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.4-23 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10 °C

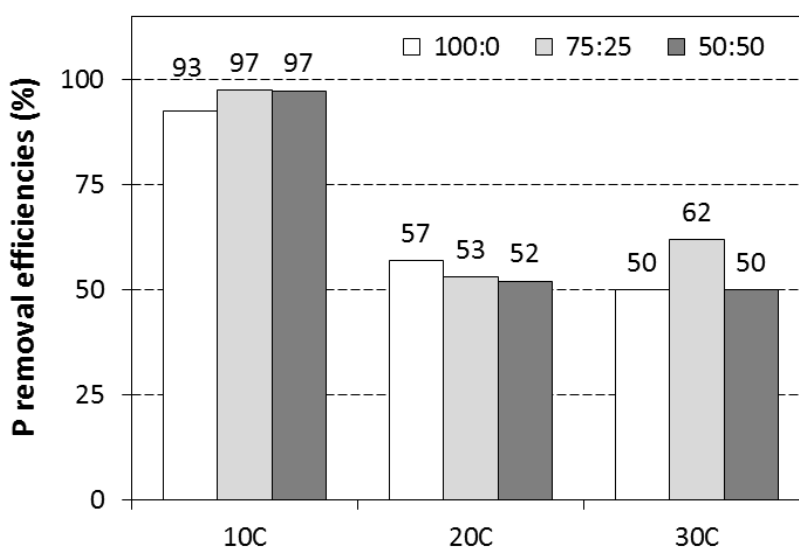


รูปที่ 4.4-24 กลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr ที่สถานะคงตัวของการทดลองที่อุณหภูมิ 10°C

4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

(1) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส

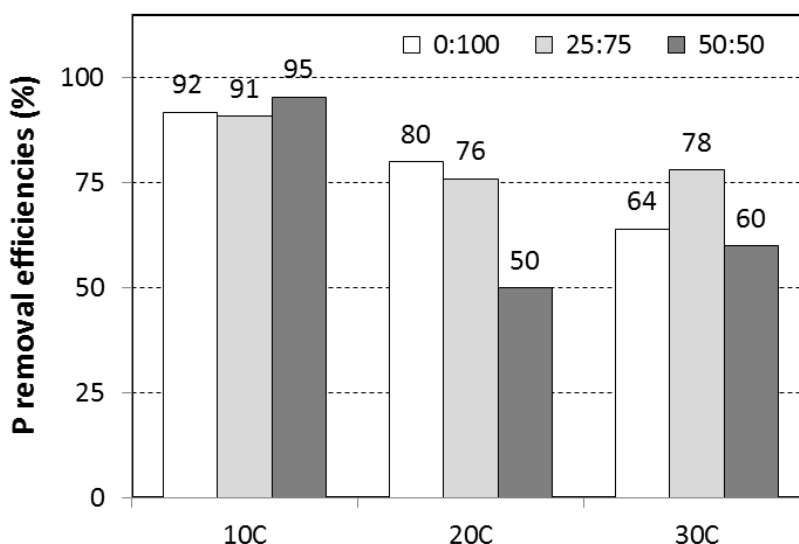
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ Ac (เดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีอัตราส่วนกรดอะซิติกมากกว่าหรือเท่ากับกรดโพธิ์โอนิก) ดังแสดงในรูปที่ 4.5-1 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 90 ทุกอัตราส่วน Ac:Pr ที่ใช้ ทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีฟอสฟอรัสละลายนํ้าน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 พบประสิทธิภาพเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 52 – 53 โดยอัตราส่วน Ac:Pr ที่แตกต่างอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสบ้างเล็กน้อย ส่วนประสิทธิภาพเฉลี่ยในการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียสอยู่ในระดับร้อยละ 50 มีเพียงอัตราส่วน 75:25 (มีกรดโพธิ์โอนิกเป็นส่วนผสมแต่น้อยกว่ากรดอะซิติก) ที่พบประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงขึ้นที่ร้อยละ 62



รูปที่ 4.5-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยในถังปฏิกรณ์ Ac

จะเห็นว่าอุณหภูมิต่ำที่ 10 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยดีที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างสองอุณหภูมิ (Janssen และคณะ, 2002) แล้วสรุปว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า 30 องศาเซลเซียสมาก (ระหว่างร้อยละ 94 และ 50 ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในการศึกษานี้ยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ต่ำลง แต่การผสมกรดโพธิ์โอนิกในน้ำเสียป้อนเข้าระบบทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้นในอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25

เมื่อพิจารณาในถังปฏิกรณ์ Pr (เดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีอัตราส่วนกรดพร็อพไอออนิกมากกว่าหรือเท่ากับกรดอะซิติก) ดังแสดงในรูปที่ 4.5-2 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยที่ดีที่สุด (มากกว่าร้อยละ 90) พบในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกับในถังปฏิกรณ์ Ac สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 80 76 และ 50 ในอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 25:75 และ 50:50 ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 64 78 และ 60 ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ Pr พบอัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 0:100 ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และลดลงเมื่อน้ำเสียมีส่วนของกรดพร็อพไอออนิกน้อยลง แสดงว่ากรดพร็อพไอออนิกช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้น ส่วนกรดอะซิติกน่าจะส่งเสริมให้จุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ทำงานมากขึ้นที่อุณหภูมินี้ สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของกรดอะซิติกแต่ยังไม่ให้เท่ากับกรดพร็อพไอออนิก (Ac:Pr = 25:75) ช่วยทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น



รูปที่ 4.5-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยในถังปฏิกรณ์ Pr

เห็นได้ชัดเจนนว่าที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อัตราส่วน Ac:Pr ในน้ำเสียไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ไม่ว่าจะเป็นถังปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินระบบด้วยกรดอะซิติกมากหรือกรดพร็อพไอออนิกมากก็ตาม และให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด สำหรับกรณีอุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียสนั้น พบว่าถังปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินระบบด้วยน้ำเสียที่มีกรดพร็อพไอออนิกมากกว่า (ถังปฏิกรณ์ Pr) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าจะมีการทำงานร่วมกันของจุลชีพทั้งกลุ่มจีเอโอ (GAOs) และกลุ่มพีเอโอ (PAOs) กรดอะซิติกทำให้การทำงานของจุลชีพจีเอโอมากขึ้น ในขณะที่กรดพร็อพไอออนิกช่วยส่งเสริมให้การทำงานของจุลชีพพีเอโอเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oehmen และคณะ (2005) ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส

ระหว่างการใช้กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับระบบเอสปีอาร์ (SBR) ที่ป้อนน้ำเสียมีค่าซีโอดี 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสฟอรัส 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเดินระบบที่อายุสัปดาห์ 8 วัน แล้วพบว่า กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีกว่ากรดอะซิติกในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

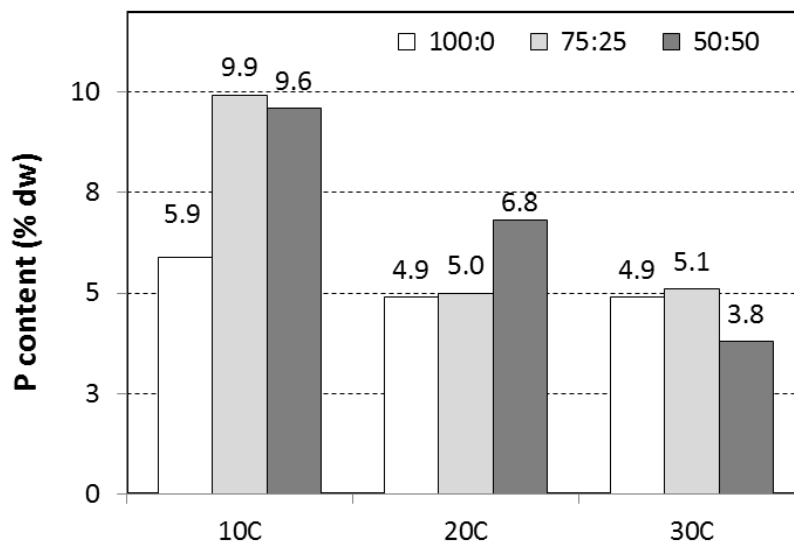
นอกจากนี้ Broughton และคณะ (2008) ยังให้ความเห็นทำนองเดียวกันจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 16 และ 22 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบน้ำเสียที่มีอัตราส่วน COD:P เท่ากับ 20:1 15:1 และ 10:1 พบว่าที่ COD:P เท่ากับ 20:1 กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งคาร์บอนให้ประสิทธิภาพดีกว่ากรดอะซิติก อย่างไรก็ตาม กรดไขมันระเหยยังคงเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ Hollender และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพและเปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนหลายๆ ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว กรดอะซิติกร่วมกับกลูโคส และกลูโคสเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสและสัดส่วนฟิเอชเอในเซลล์สูงกว่าเมื่อใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงอย่างเดียว

(2) สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์

ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์เป็นพารามิเตอร์ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ที่ใช้แสดงลักษณะของกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ (PAOs) แยกจากกลุ่มจุลินทรีย์จีเอโอ (GAOs) ได้ในระดับหนึ่ง ในถังปฏิกรณ์ Ac พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ค่อนข้างสูงในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในการทดลองที่มีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสมในน้ำเสีย (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 75:25 และ 50:50) พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงถึงร้อยละ 9.9 และ 9.6 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5-3 สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่สูงมาก (ร้อยละ 97 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในรูปที่ 4.5-1) อย่างไรก็ตาม ในการทดลองที่ใช้น้ำเสียไม่มีกรดโพรพิโอนิก (อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 100:0) พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ร้อยละ 5.9 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่าเล็กน้อย (ร้อยละ 93 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง) ในการทดลองอุณหภูมิเดียวกันนี้

สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเช่นกัน โดยสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ของการทดลองที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เว้นแต่ในการทดลองที่ใช้อัตราส่วน Ac:Pr เท่ากับ 50:50 ซึ่งพบสูงขึ้นถึงร้อยละ 6.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในอุณหภูมิการทดลอง 20 องศาเซลเซียส แต่พบลดลงเหลือร้อยละ 3.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในอุณหภูมิการทดลอง 30 องศาเซลเซียส โดยไม่สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส แต่ถ้าพิจารณาประกอบกับโปรไฟล์การปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในรอบวัฏจักรการทำงานในรูปที่ 4.4-3 (20 องศาเซลเซียส) จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 50:50 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกมากที่สุด และในรูปที่ 4.4-11 (30 องศาเซลเซียส) พบว่าอัตราส่วน 50:50 แทบจะไม่มีมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะ

แอนแอโรบิกเลย ดังนั้น สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์น่าจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก มากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในภาพรวม

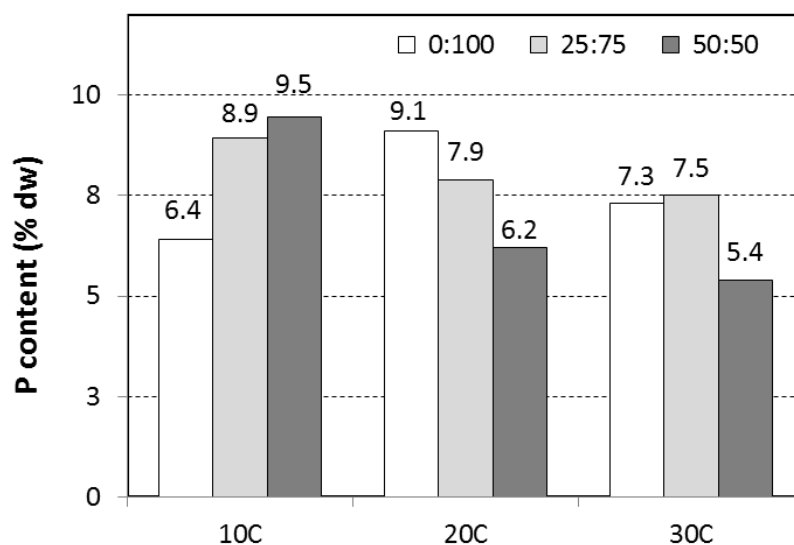


รูปที่ 4.5-3 เปรียบเทียบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ค่อนข้างสูงกว่าการทดลองที่อุณหภูมิอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4 โดยการทดลองที่มีแต่กรดโพรพิโอนิก (Ac:Pr เท่ากับ 0:100) พบฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำกว่าน้ำเสียที่อัตราส่วนอื่นคือร้อยละ 6.4 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในขณะที่อัตราส่วนอื่นที่มีกรดอะซิติกผสม (อัตราส่วน 25:75 และ 50:50) พบฟอสฟอรัสในเซลล์สูงขึ้นเป็นร้อยละ 8.9 และ 9.5 ของน้ำหนักเซลล์แห้งตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เมื่อใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติก (อัตราส่วน 100:0 ในถังปฏิกรณ์ Ac) หรือมีแต่กรดโพรพิโอนิก (อัตราส่วน 0:100 ในถังปฏิกรณ์ Pr) จะมีสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำกว่าน้ำเสียที่มีกรดทั้ง 2 ชนิดรวมกัน โดยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่าร้อยละ 90 และไม่แตกต่างกันมากนักในทุกอัตราส่วนน้ำเสีย ทั้งนี้ สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์นี้ มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกที่อุณหภูมิการทดลองเดียวกันนี้ (รูปที่ 4.4-20) มากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย

สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าในถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้อัตราส่วน 0:100 (ไม่มีกรดอะซิติก) มีฟอสฟอรัสในเซลล์สูงถึงร้อยละ 9.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในขณะที่อัตราส่วนอื่น (25:75 และ 50:50) พบฟอสฟอรัสในเซลล์ร้อยละ 7.9 และ 6.2 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามลำดับ สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก (รูปที่ 4.4-4) กล่าวได้ว่าในถังปฏิกรณ์ Pr ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนี้ พบการทำงานของจุลชีพกลุ่มพีเอโอ (PAOs) มากที่สุดเมื่อน้ำเสียไม่มีกรดอะซิติกเป็นส่วนผสม สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนี้

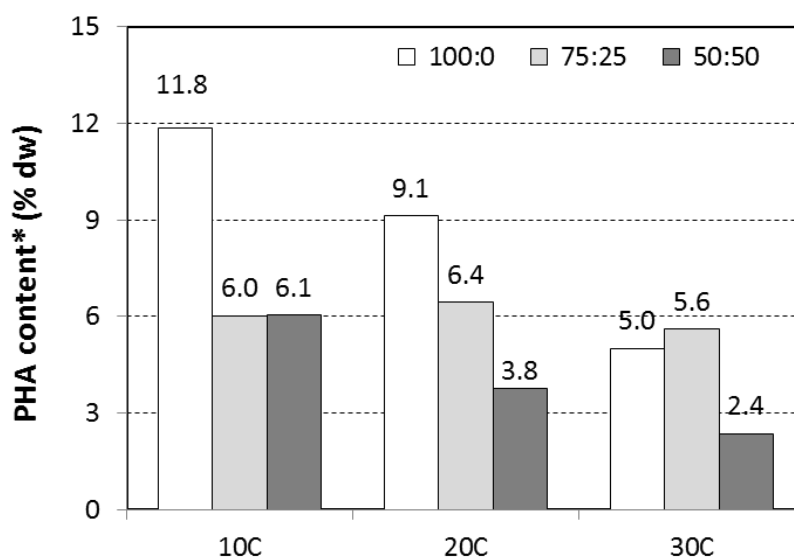
ฟอสฟอรัสในเซลล์ของถังปฏิกรณ์ Pr นี้สูงกว่าทุกอัตราส่วนในถังปฏิกรณ์ Ac ที่อุณหภูมิเดียวกัน คือร้อยละ 7.3 7.5 และ 5.4 ของน้ำหนักเซลล์แห้งตามลำดับ สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสถานะแอนแอโรบิกที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ (รูปที่ 4.4-12) กล่าวได้ว่า กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในระบบที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มักจะพบจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) มากกว่ากลุ่มพีเอโอ (PAOs) โดยเฉพาะในน้ำเสียที่มีการดอะซิติกมากกว่ากรดโพรพิโอนิก แต่สามารถพบการทำงานของกลุ่มพีเอโอมากขึ้นได้ เมื่อน้ำเสียมีส่วนผสมของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5-4 เปรียบเทียบสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Pr

(3) พีเอเอ (polyhydroxyalkanoates, PHAs)

ในถังปฏิกรณ์ Ac ที่มีอุณหภูมิการทดลองที่ 10 องศาเซลเซียส พบว่าในอัตราส่วน 100:0 พบการสะสมพีเอเอที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกมากที่สุด (รูปที่ 4.5-5) คือ ร้อยละ 11.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในขณะที่อัตราส่วนอื่น (75:25 และ 50:50) พบพีเอเอในเซลล์ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 6.0 และ 6.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้งตามลำดับ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส คือ พบสัดส่วนพีเอเอในเซลล์ร้อยละ 9.1 6.4 และ 3.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้งตามลำดับ กล่าวคือ น้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติก (ไม่มีกรดโพรพิโอนิก) มีการสะสมพีเอเอในสถานะแอนแอโรบิกมากกว่าน้ำเสียที่มีส่วนผสมของกรดโพรพิโอนิก อาจเป็นไปได้ว่าการทดลองที่อุณหภูมิก่อนข้างต่ำ (10 และ 20 องศาเซลเซียส) จะมีจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) มากขึ้นเมื่อนำน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติก จึงแสดงพฤติกรรมสลายกลัยโคเจนในสถานะแอนแอโรบิกเพื่อได้พลังงานดึงกรดไขมันระเหยเข้าเซลล์ ทำให้มีสารรีดิวซิง NADH (ผลผลิตจากการสลายกลัยโคเจน) เพียงพอสำหรับการสังเคราะห์สารพีเอเอ ส่งผลให้มีการสะสมพีเอเอมากกว่า

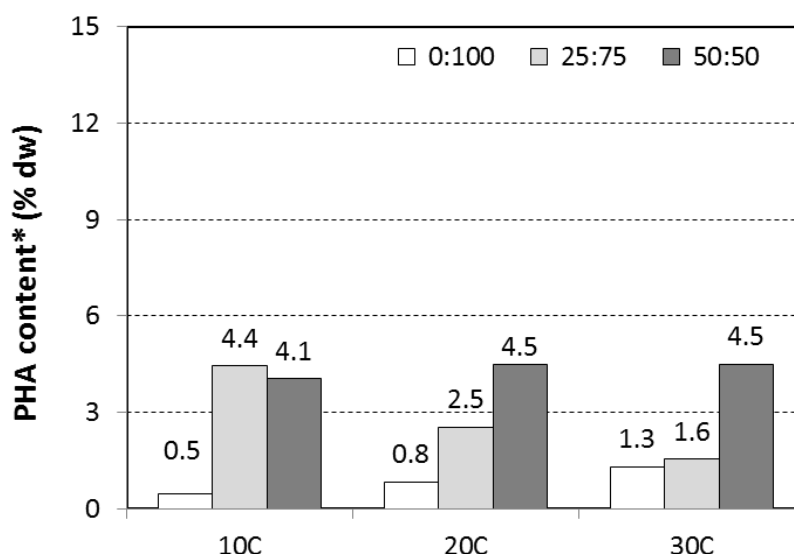


รูปที่ 4.5-5 เปรียบเทียบสัดส่วนพีเอชเอในเซลล์(*สภาวะแอนแอโรบิก)ในถังปฏิกรณ์ Ac

สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr พบการสะสมสารพีเอชเอในเซลล์ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกค่อนข้างต่ำทุกอุณหภูมิการทดลอง (รูปที่ 4.5-6) โดยเฉพาะถ้าใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิก แทบจะไม่พบการสะสมสารพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิกหรือมีค่อนข้างต่ำ คือ ร้อยละ 0.5 0.8 และ 1.3 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ที่อุณหภูมิ 10 20 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อใช้น้ำเสียมีกรดอะซิติกเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นพบการสะสมพีเอชเอที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิการทดลอง สอดคล้องกับการสะสมสารพีเอชเอในถังปฏิกรณ์ Ac ก่อนหน้า กล่าวคือ การสะสมพีเอชเอในเซลล์ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะเพิ่มมากขึ้นถ้าใช้น้ำเสียมีกรดอะซิติกเป็นส่วนผสม ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการดอะซิติกมีโครงสร้างโมเลกุลเล็กกว่ากรดโพรพิโอนิกเมื่อเทียบกับโมลของคาร์บอนในน้ำเสีย และเป็นวัตถุดิบโดยตรงที่จุลชีพสามารถนำไปใช้สังเคราะห์สารพีเอชเอ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ระบุว่า สัดส่วนของกรดอะซิติกในแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสังเคราะห์สารพีเอชเอในเซลล์ (Chang et al., 2012; Puig et al., 2008; Hu et al., 2005) อย่างไรก็ตาม จุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ก็แสดงพฤติกรรมทำนองเดียวกันคือ ดูดซึมกรดไขมันระเหยเข้าสู่เซลล์แล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารพีเอชเอ เพียงแต่ไม่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ซึ่งในการศึกษานี้การสะสมพีเอชเอในสภาวะแอนแอโรบิกได้ค่อนข้างสูงในน้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติก แต่ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย และสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ไม่สูงตาม อาจสรุปได้ว่า การสะสมพีเอชเอสูงนี้น่าจะเป็นการทำงานของจุลชีพกลุ่มจีเอโอ GAOs มากกว่ากลุ่มพีเอโอ (PAOs)

อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สารพีเอชเอที่ควรกล่าวถึง คือ สารมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สารพีเอชเอเป็นสาร poly-3-hydroxybutyrate (PHB)/poly-3-hydroxyvalerate(PHV) (88%/12%) มีเฉพาะสาร PHB และ PHV เป็นองค์ประกอบ แต่จากงานวิจัยหลายงานเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ได้มีการรายงานถึงสารพีเอชเอในเซลล์ที่อยู่ในรูป poly-3-

hydroxy-2-methylvaleric acid (PH2MV) ด้วย ซึ่งไม่ได้ถูกวิเคราะห์ในการศึกษานี้เนื่องจากความซับซ้อนในการวิเคราะห์ และสารมาตรฐานไม่สามารถจัดหาได้



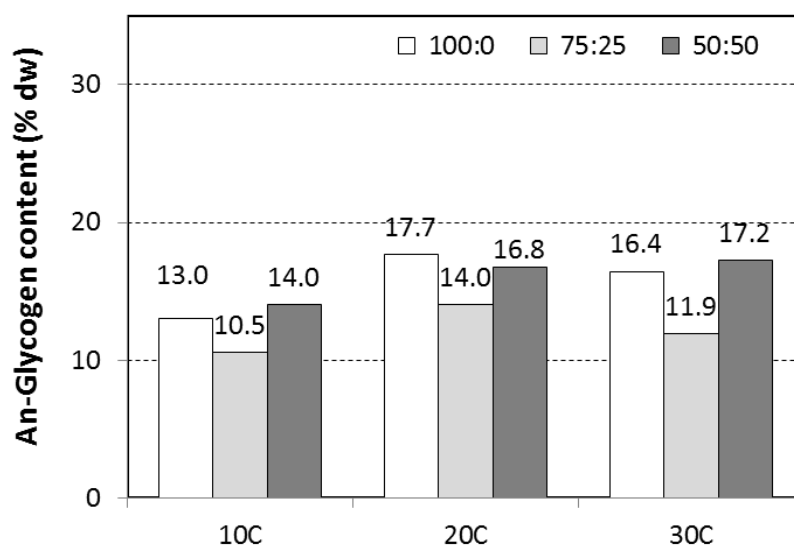
รูปที่ 4.5-6 เปรียบเทียบสัดส่วนพีเอชเอในเซลล์(*สภาวะแอนแอโรบิก)ในถังปฏิกรณ์ Pr

นอกจากนี้ อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อการสะสมพีเอชเอในเซลล์ด้วย Chinwetkitvanich และ คณะ (2009) พบการสะสมพีเอชเอที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส รวมทั้ง Li และคณะ (2010) ได้ให้ความเห็นว่า อุณหภูมิไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเท่านั้น แต่อาจส่งผลให้ระบบใช้กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือ ผ่านการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์แล้วเก็บอยู่ในรูป ATP หรือเพียงแค่ถูกกักไว้ในสารโพลิเมอร์ภายนอกเซลล์ (extracellular polymeric substance, EPS) เท่านั้น

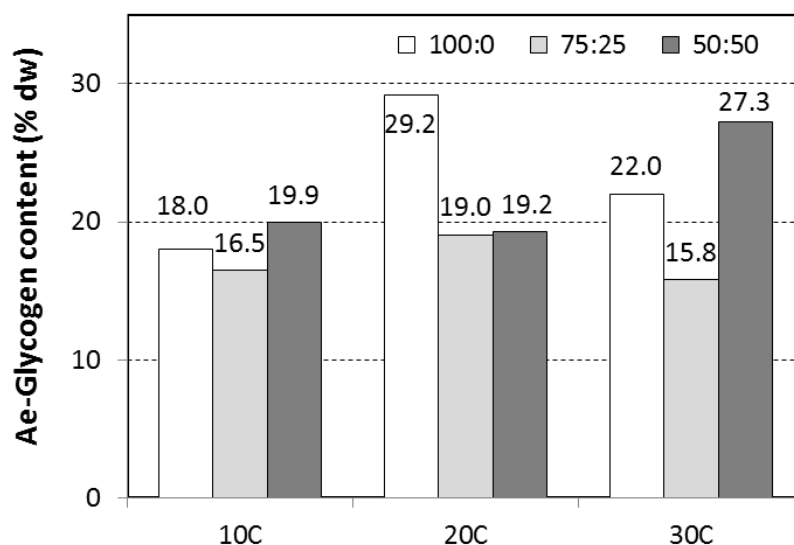
(4) กลัยโคเจน (glycogen)

ในกลุ่มจุลชีพฟีเอโอ (PAOs) พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในการดึงกรดไขมันระเหยง่ายเข้าสู่เซลล์ได้มากจากการสลายฟอสเฟตในเซลล์ แล้วเปลี่ยนรูปกรดไขมันระเหยง่ายเหล่านั้นให้เป็นแหล่งคาร์บอนในเซลล์ในรูปของสารพีเอชเอ ซึ่งต้องใช้สารรีดิวซิง NADH ที่จะได้มากจากการสลายกลัยโคเจนในเซลล์ ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลัยโคเจนในเซลล์ของจุลชีพกลุ่มฟีเอโอ คือ มีการสลายกลัยโคเจนในสภาวะแอนแอโรบิกทำให้สัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ลดลง แล้วมีการสังเคราะห์กลัยโคเจนกลับคืนในสภาวะแอโรบิกทำให้สัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ จุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ก็แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกลัยโคเจนในเซลล์แบบเดียวกัน เพียงแต่ไม่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิกและจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะแอโรบิก

จากรูปที่ 4.5-7 และ 4.5-8 จะเห็นว่าสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในถังปฏิกรณ์ Ac พบว่าที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกส่วนใหญ่แล้วจะต่ำกว่าที่ปลายสภาวะแอโรบิก สอดคล้องกับการสลายและสังเคราะห์กลัยโคเจนโดยจุลชีพกลุ่มฟิเอโอและกลุ่มจีเอโอ แต่ที่อุณหภูมิต่ำ (10 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง พบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ต่ำกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า (20 และ 30 องศาเซลเซียส) ดังนั้น ถึงแม้จุลชีพกลุ่มฟิเอโอ (PAOs) จำเป็นต้องมีกลัยโคเจนเป็นองค์ประกอบของเซลล์ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส แต่สัดส่วนกลัยโคเจนที่มากขึ้นอาจเป็นข้อบ่งชี้ในอีกทางหนึ่งว่ามีกลุ่มจุลชีพจีเอโอเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในการทดลองที่อัตราส่วน 100:0 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสที่มีการสังเคราะห์กลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกจนสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 29 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง (รูปที่ 4.5-8) สอดคล้องกับสัดส่วนสารฟิเอชเอในเซลล์ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 9.1 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในรูปที่ 4.5-5) ในขณะที่สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 4.9 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในรูปที่ 4.5-3) และประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ยอยู่ในระดับร้อยละ 50 (ในรูปที่ 4.5-1) อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงกลัยโคเจนในการทดลองชุดอื่นๆ ในถังปฏิกรณ์ Ac ไม่สอดคล้องกับพารามิเตอร์อื่นๆ แบบเดียวกันนี้มากนักโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 50:50 ที่พบสัดส่วนกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกสูงถึงร้อยละ 27 แต่กลับมีสัดส่วนสารฟิเอชเอในเซลล์ค่อนข้างต่ำมาก (ร้อยละ 2.4 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ในรูปที่ 4.5-5) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสัดส่วนกลุ่มจุลชีพฟิเอโอ (PAOs) และกลุ่มจีเอโอ (GAOs) ที่แตกต่างกันไปเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ซึ่งยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับกลุ่มจุลชีพในแต่ละอุณหภูมิในการศึกษานี้ แต่ในงานวิจัยของ Lopez-Vazquez และคณะ (2009) ได้ระบุว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กลุ่มจีเอโอมีแนวโน้มที่จะโดดเด่นกว่ากลุ่มฟิเอโอ แต่การปรับอัตราส่วนกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกให้เป็น 75:25 ร่วมกับการควบคุมฟิเอชเอน้ำเสียให้เป็น 7.5 สามารถยับยั้งการเจริญของจุลชีพกลุ่มจีเอโอได้



รูปที่ 4.5-7 เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic) ในถังปฏิกรณ์ Ac

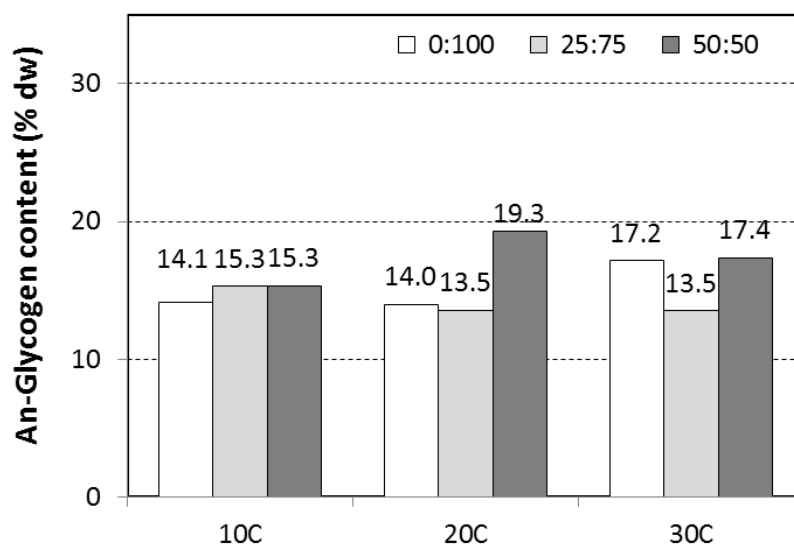


รูปที่ 4.5-8 เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอโรบิก (aerobic) ในถังปฏิกรณ์ Ac

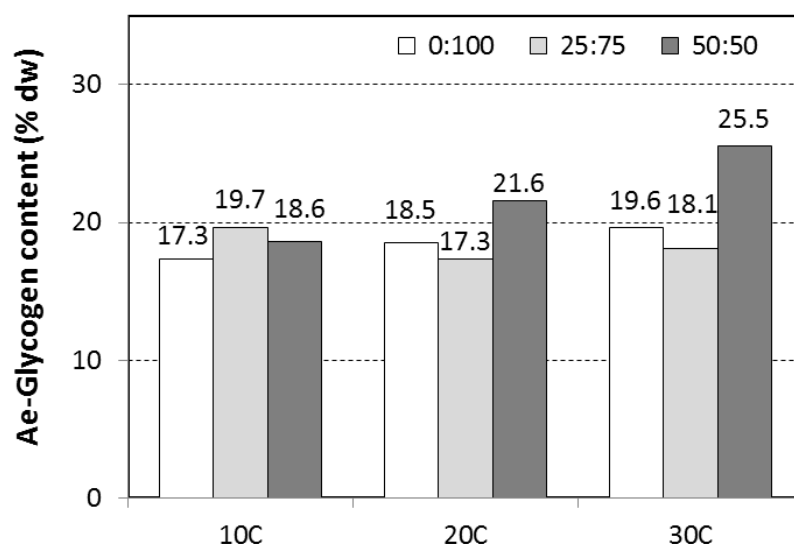
สำหรับในถังปฏิกรณ์ Pr พบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ที่ปลายสภาวะแอนแอโรบิกต่ำกว่าที่ปลายสภาวะแอโรบิกคล้ายกับในถังปฏิกรณ์ Ac รูปที่ 4.5-9 และ 4.5-10 แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีสัดส่วนต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac เว้นแต่ในการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนกลัยโคเจนในถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr ใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะแอนแอโรบิกและสภาวะแอโรบิก อย่างไรก็ตาม สัดส่วนกลัยโคเจนสูงที่สุดประมาณร้อยละ 26 พบในสภาวะแอโรบิกของการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วน 50:50 ทั้งนี้ สำหรับถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่าหรือเท่ากับกรดอะซิติก แล้วพบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac เป็นส่วนใหญ่นั้น เป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดกลุ่มจุลชีพพีเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจีเอโอ (GAOs) สอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานที่รายงานว่าจุลชีพกลุ่มพีเอโอสามารถใช้กรดโพรพิโอนิกได้ดีกว่ากลุ่มจีเอโอ และจุลชีพกลุ่มจีเอโอมักจะเป็นกลุ่มสำคัญของระบบเมื่อแหล่งคาร์บอนเป็นกรดอะซิติก (Pijuan และคณะ, 2004; Chen และคณะ, 2004; Oehmen และคณะ, 2006)

Oehmen และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) และพีเอโอ (PAOs) ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ และได้ระบุว่าถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบให้มีลักษณะการทำงานของจุลชีพกลุ่มจีเอโออย่างเด่นชัดและเรียกชื่อกลุ่มจุลชีพนี้ว่า *Competibacter* จะมีการดูดซึมกรดโพรพิโอนิกได้น้อยกว่า ในขณะที่ระบบที่มีกลุ่มพีเอโออย่างเด่นชัดและเรียกชื่อกลุ่มจุลชีพนี้ว่า *Accumulibacter* สามารถดูดซึมทั้งกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกได้รวดเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด Chen และคณะ (2005) ได้เสนอข้อสรุปที่คล้ายคลึงกันว่า ถึงแม้จะเป็นกลุ่มพีเอโอในระบบที่ใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดอะซิติกมาก่อนก็ตาม เมื่อป้อนกรดโพรพิโอนิกให้ กลุ่มจุลชีพในระบบก็ยังสามารถดูดซึมกรดโพรพิโอนิกได้ในอัตราเร็วใกล้เคียงกับการดูดซึมกรดอะซิติกที่เคยชินมาก่อน และถึงแม้จะเป็นกลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) ที่คุ้นชินกับน้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิกมาก่อน เมื่อได้รับน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกก็สามารถใช้กรดอะซิติกได้รวดเร็ว

กว่าการใช้กรดโพรพิโอนิกที่คุ้นชิน นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่รายงานถึงการใช้กรดโพรพิโอนิกเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนช่วยในการเดินระบบอีพีฟาร์ (EBPR) ให้ประสบความสำเร็จ (Pijuan และ คณะ, 2004; Thomas และ คณะ, 2003) ดังนั้น เมื่อน้ำเสียมีกรดโพรพิโอนิกเป็นส่วนผสม จุลชีพกลุ่มฟิเอโอมีโอกาที่จะโดดเด่นกว่ากลุ่มจีเอโอเนื่องจากดูดซึมสารอาหาร(กรดโพรพิโอนิก)ได้เร็วกว่า



รูปที่ 4.5-9 เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอนแอโรบิก (anaerobic) ในถังปฏิกรณ์ Pr



รูปที่ 4.5-10 เปรียบเทียบสัดส่วนกลัยโคเจนในเซลล์ในสภาวะแอโรบิก (aerobic) ในถังปฏิกรณ์ Pr

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายโซ่สั้นและอัตราส่วนของประเภทกรดไขมันระเหยง่ายโซ่สั้นที่ควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีพ GAOs รวมทั้งผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ จากผลการศึกษาที่มีข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ประเภทของกรดไขมันระเหยง่ายโซ่สั้น (short chain volatile fatty acid, SCVFA) ในการศึกษาได้แก่ กรดโพรพิโอนิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) มีผลต่อกลุ่มจุลชีพในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยน้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิกร่วมกับนิวเทรียนบรอสส่งผลให้การทำงานของกลุ่มจุลชีพฟิเอโอ (PAOs) มากกว่ากลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัส สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์ และประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ที่มีมากกว่ากรณีที่น้ำเสียมีแต่กรดอะซิติก ร่วมกับนิวเทรียนบรอส และในน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกแต่ไม่มีกรดโพรพิโอนิกก็พบพฤติกรรมของจุลชีพกลุ่มจีเอโอ คือ มีการดูดซึมสารอินทรีย์ในสถานะแอนแอโรบิกจนเกือบหมดแต่การปลดปล่อยฟอสฟอรัสไม่พบหรือพบค่อนข้างน้อย อีกทั้ง ยังมีการสะสมสารฟิเอชเอในสถานะแอนแอโรบิก และสะสมกลัยโคเจนในสถานะแอโรบิกมากกว่า
2. อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ แต่ผลกระทบแตกต่างกันระหว่างถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr อีกทั้ง ยังมีความแตกต่างกันไปในแต่ละอุณหภูมิการทดลองด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้
 - สำหรับอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่แตกต่างกันทั้งในถังปฏิกรณ์ Ac และ Pr ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามการมีส่วนผสมของกรดทั้ง 2 ชนิดในน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนใด (75:25 50:50 และ 25:75) ล้วนทำให้สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่ามีกลุ่มจุลชีพชนิดฟิเอโอมากกว่าในการทดลองที่ใช้กรดอะซิติกหรือกรดโพรพิโอนิกชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าในน้ำเสียที่ใช้กรดอะซิติก (ไม่มีกรดโพรพิโอนิก) พบการสะสมสารฟิเอชเอในแอนแอโรบิกสูงกว่าทุกอัตราส่วน เนื่องจากกรดอะซิติกถูกเปลี่ยนให้เป็นสารในกลุ่มฟิเอชเอได้ง่าย สำหรับในน้ำเสียที่ใช้กรดโพรพิโอนิก (ไม่มีกรดอะซิติก) แทบจะไม่พบการสะสมสารฟิเอชเอเลย แต่เป็นไปได้ที่อาจมีสารฟิเอชเอชนิดอื่นๆ ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในการศึกษานี้
 - สำหรับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าถังปฏิกรณ์ Ac มีพฤติกรรมของจุลชีพกลุ่มฟิเอโอมากขึ้น กล่าวคือ มีสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงขึ้น การสะสมฟิเอชเอในสถานะแอนแอโรบิกและการ

สะสมกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกต่ำกว่า เมื่อมีสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกในน้ำเสียมากขึ้น ส่วนในถังปฏิกรณ์ Pr เมื่อใช้น้ำเสียที่มีแต่กรดโพรพิโอนิกพบลักษณะของจุลชีพกลุ่มฟิเอโอโตดเด่นมาก นั่นคือ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูง สัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูง แต่มีการสะสมสารฟิเอโอในสภาวะแอนแอโรบิกต่ำมาก (ซึ่งอาจด้วยเหตุผลเดียวกับการทดลองที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส) และจุลชีพกลุ่มฟิเอโอมีการทำงานน้อยลงเมื่อมีสัดส่วนของกรดอะซิติกเพิ่มมากขึ้น

- สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าในถังปฏิกรณ์ Ac การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกไม่สามารถสรุปแนวทางได้อย่างชัดเจนนัก โดยพบว่าที่อัตราส่วน 50:50 (มีกรดโพรพิโอนิกเพิ่มมากขึ้นจนเท่ากับกรดอะซิติก) กลับพบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสคงเดิม มีสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์น้อยลง การสะสมสารฟิเอโอในสภาวะแอนแอโรบิกต่ำ แต่สะสมกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ หรือกล่าวได้ว่ามีลักษณะของจุลชีพกลุ่มจีเอโอ (GAOs) มากขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองในอุณหภูมิอื่นที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามในถังปฏิกรณ์ Pr พบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และสัดส่วนฟอสฟอรัสในเซลล์สูงกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac นอกจากนี้ การเพิ่มสัดส่วนกรดอะซิติกในน้ำเสียมีแนวโน้มที่อาจทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีประสิทธิภาพน้อยลง กลุ่มจุลชีพฟิเอโอ (PAOs) มีบทบาทน้อยลง ในขณะที่กลุ่มจุลชีพจีเอโอ (GAOs) น่าจะมีเพิ่มมากขึ้น (เห็นได้จากการสะสมกลัยโคเจนในสภาวะแอโรบิกค่อนข้างสูงในอัตราส่วน 50:50 ของถังปฏิกรณ์ Pr)

3. ในการศึกษาี้ อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพชัดเจนที่สุด โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพดีกว่า โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงมาก (มากกว่าร้อยละ 90) ในทุกอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ถังปฏิกรณ์ Pr ที่ใช้กรดโพรพิโอนิกมากกว่าหรือเท่ากับกรดอะซิติกมีแนวโน้มทำให้มีการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าในถังปฏิกรณ์ Ac ทุกอุณหภูมิการทดลอง
4. สำหรับวิธีการส่งเสริมให้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ เพื่อให้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น อธิบายได้ดังนี้

- สำหรับอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ควรใช้น้ำเสียที่มีส่วนผสมของกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกร่วมกัน โดยกรดอะซิติกอาจมีประโยชน์มากกว่ากรดโพรพิโอนิกบ้างเล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำนี้
- สำหรับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ควรใช้น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติก หรืออัตราส่วน Ac:Pr ควรน้อยกว่า 50:50 จะช่วยส่งเสริมให้มีจุลชีพกลุ่มฟิเอโอได้มากขึ้น และอาจส่งผลให้จุลชีพกลุ่มจีเอโอลดลงได้บ้าง
- สำหรับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีจุลชีพกลุ่มจีเอโออย่างเด่นชัดโดยเฉพาะในถังปฏิกรณ์ Ac การเริ่มเดินระบบจึงควรใช้น้ำเสียที่มีกรดโพรพิโอนิกมากกว่ากรดอะซิติกคล้ายกับในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และไม่สามารถคาดหวังประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่สูงมากได้

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- ในงานวิจัยนี้ การปรับเปลี่ยนชนิดกรดไขมันระเหยง่ายโซ่สั้น (กรดโพรพิโอนิกหรือกรดอะซิติก) มีผลทำให้ค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสียเปลี่ยนไป ค่าพีเอชในน้ำส่งผลกระทบต่ออัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะแอนแอโรบิก ดังนั้น ควรมีการศึกษาผลกระทบของค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสียต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อกรดโพรพิโอนิกแตกต่างกัน
- งานวิจัยในอนาคตจำเป็นต้องมีความช่วยเหลือในเรื่องของการวิเคราะห์ชนิดแหล่งคาร์บอนในเซลล์ไม่ว่าจะเป็นชนิดของสารในกลุ่มพีเอชเอ (polyhydroxyalkanoates, PHAs) หรือการวิเคราะห์กลัยโคเจนในเซลล์ที่แม่นยำมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

- ธงชัย พรณสวัสดิ์. (2544). *การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ*. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย
- ปริญดา เหล่ารุจิจินดา. (2541). *ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อุณหภูมิต่างกัน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ (2552). การจัดการและการแก้ไขปัญหาเสียน้ำเสีย. <http://dds.bma.go.th/wqm/Thai/wwtp.html> (13 มกราคม 2552)
- อภิรดี ดวงใจ. (2543). *ผลของอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในช่วงอุณหภูมิเมโสฟิลิก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environment Federation). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association.
- Broughton, A., Pratt, S. and Shilton, A. (2008). Enhanced biological phosphorus removal for high-strength wastewater with a low rbCOD:P ratio. *Bioresource Technology* 99(5): 236-241.
- Cech, J.S. and Harmann, P. (1993). Competition between phosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphorus removal systems. *Water Research* 27(7): 1219-1225.
- Chang, H.F., Chang, W.C. and Tsai, C.Y. (2012). Synthesis of poly (3 hydroxybutyrate 3-hydroxyvalerate) from propionate-fed activated sludge under various carbon sources. *Bioresource Technology* 113: 51-57.
- Chen, Y., Randall, A.A. and McCue, T. (2004). The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid. *Water Research* 38(1): 27-36.
- Chen, Y., Liu, Y., Zhou, Q. and Gu, G. (2005). Enhanced phosphorus biological removal from wastewater-effect of microorganism acclimatization with different ratios of short-chain fatty acids mixture. *Biochemical Engineering Journal* 27(1): 24-32.

- Dai, Y., Yuan, Z., Wang, X. Oehmen, A., and Keller, J. (2007). Anaerobic metabolism of *Defluviicoccus vanus* related to glycogen accumulating organisms (GAOs) with acetate and propionate as carbon source. *Water Research* 41: 1885-1896.
- Erdal, U.G., Erdal, Z.K., and Randall, C.W. (2003). The competition between PAO (phosphate accumulating organisms) and GAO (glycogen accumulating organisms) in EBPR (enhanced biological phosphorus removal) systems at different temperatures and the effects on system performance. *Water Science and Technology* 47(11): 1-8.
- Erdal, U.G., Erdal, Z.K., and Randall, C.W. (2006). The mechanism of enhanced biological phosphorus removal washout and temperature relationship. *Water Environment Research* 78(7): 710-715.
- Filipe, C.D.M., Diagger, G.T. and Grady Jr., C.P.L. (2001). Stoichiometry and kinetics of acetate uptake under anaerobic conditions by an enriched culture of phosphate-accumulating organisms at different pHs. *Biotechnology and Bioengineering* 76: 32-43.
- Hollender, J., van der Krol, D., Kornberger, L., Gierden, E. and Dott, W. (2002). Effect of different carbon sources on the enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 18(4): 359-364.
- Hu, W., Sin, S., Chua, H., and Yu, P. (2005). Synthesis of polyhydroxyalkanoate (PHA) from excess activated sludge under various oxidation-reduction potentials (ORP) by using acetate and propionate as carbon sources. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 121(1): 289-301.
- Janssen K. M. and Van der Roest H. F. (2002). *Biological phosphorus removal: Manual for design and operation*, STOWA, Utrecht, the Netherland.
- Li, N., Ren, N.-Q., Wang, X.-H. and Kang, H. (2010). Effect of temperature on intracellular phosphorus absorption and extra-cellular phosphorus removal in EBPR process. *Bioresource Technology* 101(15): 6265-6268.
- Liu, W.T., Mino, T., Nakamura, K. and Matsuo, T. (1996). Glycogen accumulating population and its anaerobic substrate uptake in anaerobic-aerobic activated sludge without biological phosphorus removal. *Water Research* 30(1): 75-82.

- Liu, Y., Chen, Y.G. and Zhou, Q. (2007). Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids. *Chemosphere* 66: 123-129.
- Lopez-Vazquez, C.M., Song, Y., Hooijmanns, C.M., Brdjanovic, D. Moussa, M.S., Gijzen, H.J., and van Loosdrecht, M.C.M. (2007). Short-term temperature effects on the anaerobic metabolism of glycogen accumulating organisms” *Biotechnology and Bioengineering* 97(3): 483-495.
- Lopez-Vazquez, C.M., Oehmen, A., Hooijmanns, C.M., Brdjanovic, D., Gijzen, H.J., Yuan, Z.G. and van Loosdrecht, M.C.M. (2009). Modeling the PAO–GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature. *Water Research* 43: 450-462.
- Oehmen, A., Yuan, Z., Blackall, L.L. and Keller, J. (2005). Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms. *Biotechnology and Bioengineering* 91(2): 162-168.
- Oehmen, A., Saunders, A.M., Vives, M.T., Yuan, Z. and Keller, J. (2006). Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon source. *Journal of Biotechnology* 123: 22-32.
- Pijuan, M., Saunders, A.M., Guisasola, A., Baeza, J.A., Casas, C. and Blackall, L.L., (2004). Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor using propionate as the sole carbon source. *Biotechnology and Bioengineering* 85(1): 56–67.
- Puig, S., Coma, M., Monclu, H., van Loosdrecht, M.C.M., Colprima, J. and Balaguera, M.D. (2008). Selection between alcohols and volatile fatty acids as external carbon sources for EBPR. *Water Research* 42: 557-566.
- Panswad, T., Dounghai, A. and Anotai, J. (2003). Temperature effects on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system. *Water Research* 37(2): 409-415.
- Randall, C.W., Barnard, J.L. and Stensel, H.D. (1992). Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. *Water Quality Management Library*, Volume 5. Pennsylvania :Technomic Publishing Co. Inc. 1992.
- Satoh, H., Mino, T. and Matsuo, T. (1994). Deterioration of enhanced biological phosphorus removal by the domination of microorganisms without polyphosphate accumulation. *Water Science and Technology* 30(6): 203-211.

- Smolders, G.J.F., van der Meji, J., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1994). Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence. *Biotechnology and Bioengineering* 42: 461-470.
- Thomas, M., Wright, P., Blackall, L., Urbain, V. and Keller, J. (2003). Optimisation of Noosa BNR plant to improve performance and reduce operating costs. *Water Science Technology* 47: 141-148.
- Whang, L.M. and Park, J.K. (2002). Competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in biological phosphorus removal systems - effect of temperature. *Water Science Technology* 46(1-2): 191-194.
- Whang, L.M. and Park, J.K. (2006). Competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in enhance biological phosphorus removal systems: Effect of temperature and sludge age. *Water Environment Research* 78(1): 4-11.
- Zhang, C., Chen, Y.G. and Liu, Y. (2007). The long-term effect of initial pH control on the enrichment culture of phosphorus- and glycogen-accumulating organisms with a mixture of proionic and acetic acids as carbon sources. *Chemosphere* 69: 1713-1721.
- Zhou, Y., Pijuan, M., Zeng, R. J., Lu, H. and Yuan, Z. (2008). Could polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) be glycogen-accumulating organisms (GAOs)? *Water Research* 42(10-11): 2361-2368.

ภาคผนวก

PHA analysis

PHA, PHB and PHV contents were determined using the methanolysis-GC method developed by Hart (1994),

1. The biomass that collected from the system was centrifuged and dried at 100 °C for at least 24 hours.

2. Weighed biomass was put into a 5 ml high pressure Wheaton vial and 2 ml of the benzoic acid solution (50 mg of benzoic acid dissolved in 100 ml of 3% sulfuric acid in methanol (v/v) was added into each vial

3. Then, followed by another 2 ml of chloroform.

4. Vials were sealed by Teflon caps and incubated at 100 °C for 3.5 hours.

5. After the vials were cool down, distilled water added for 1 ml into every vials and the vials were shaken for about 10 minutes.

6. The layers of chloroform and sulfuric-methanol solution were separated from each other.

7. Bring 1ul from the chloroform (bottom) layer of each sample were injected in to GC equipped with a Stabilwax capillary column (inner diameter about 0.25 x 3 mm.) and attached to an FID detector.

8. The oven temperature was programmed to increase from 90 – 130 °C with rate of 20 °C/min, while the temperature of injector and detector were 160 and 200°C.

9. Pure substance of P(3HB-co-3HV) copolymer (contained 12% of 3HV) PHA content was defined as % TSS, i.e., the mass of PHA in the total dry weight biomass, expressed as percent. And PHA concentration and residual biomass were calculated using equations followed;

PHA concentration = PHA content x MLSS (mg/l).

Residual biomass = MLSS - PHA concentration (mg/l)

The calculation of synthesis wastewater preparation

1. COD

The COD concentration used in this study was about 600 mg/l. Therefore, this COD concentration could divide from nutrient broth about 160 mg/l and from acetic or propionic acid about 440 mg/l.

Nutrient broth 1.0 gram contains COD concentration about 1,000 mg.

(determined from the laboratory)

$$\begin{aligned}\text{COD concentration used in this study} &= 160 \text{ mg/l} \\ &= (1,000 \text{ mg} \times 160 \text{ mg/l}) / 1000 \text{ mg} \\ &= 160 \text{ mg/l}\end{aligned}$$

Take nutrient broth about 200 mg/synthesis wastewater 1 liter.

Acetic acid (CH_3COOH) 1 ml has COD concentration about 1,000 mg

(determined from the laboratory)

$$\begin{aligned}\text{COD concentration used in this study} &= 440 \text{ mg/l} \\ &= (1 \text{ ml} \times 440 \text{ mg/l}) / 1000 \text{ mg} \\ &= 0.44 \text{ ml/l}\end{aligned}$$

Take acetic acid about 0.5 ml /synthesis wastewater 1 liter.

Propionic acid ($\text{CH}_2\text{CH}_3\text{COOH}$) 1 ml has COD concentration about 1,600 mg

(determined from the laboratory)

$$\begin{aligned}\text{COD concentration used in this study} &= 440 \text{ mg/l} \\ &= (1 \text{ ml} \times 440 \text{ mg/l}) / 1600 \text{ mg} \\ &= 0.27 \text{ ml/l}\end{aligned}$$

Take propionic acid about 0.27 ml /synthesis wastewater 1 liter.

2. Nitrogen

The total nitrogen concentrations used in this study receive from only nutrient broth. Therefore, of all experiments the external nitrogen was not added in the synthesis wastewater. As a result, the nitrogen concentrations from nutrient broth were about 0.2 g/l (from the experiments).

3. Phosphorus

The total phosphorus concentrations were about 30 mg/l, which prepare from KH_2PO_4

$$\begin{aligned}\text{The MW of } \text{KH}_2\text{PO}_4 \text{ was about} &= 136 \text{ g} \\ \text{Used } \text{KH}_2\text{PO}_4 &= (136 \text{ g} \cdot 30 \text{ mg/l}) / 31 \text{ g} \\ &= 131.61 \text{ mg/l}\end{aligned}$$

Used KH_2PO_4 about 131.61 mg/synthesis wastewater 1 liter

4. The alkalinity

The alkalinity 400 mg/l as NaHCO_3

$$\begin{aligned}\text{The MW of } \text{NaHCO}_3 \text{ was about} &= 84 \text{ g} \\ \text{Used } \text{NaHCO}_3 &= (84 \text{ g} \cdot 400 \text{ mg/l}) / 61 \\ &= 560 \text{ mg/l}\end{aligned}$$

Used NaHCO_3 about 560 mg/synthesis wastewater 1 liter

5. Magnesium

The magnesium 5.76 mg/l, prepare from $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned}\text{The MW of } \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} &= 246 \\ \text{Used } \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} &= (246 \text{ g} \cdot 5.76 \text{ mg/l}) / 24 \text{ g} \\ &= 59.04 \text{ mg}\end{aligned}$$

Used $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ about 59.04 mg/synthesis wastewater 1 liter