

ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำและอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพ
ของถังกรองไร้ออกซิเจน

นายภัทร วิวัฒน์สร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND RECIRCULATION RATE
ON THE EFFICIENCY OF ANAEROBIC FILTER TANK

Mr. Pattara Wiwatthanasorn

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำและอัตราการเวียนกลับต่อ ประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน |
| โดย | นายภัทร วิวัฒน์ศร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ ใสสถาพันธ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปธาน บรรจงปรุ)

ภัทร วิวัฒน์ศร : ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำและอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน . (EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND RECIRCULATION RATE ON THE EFFICIENCY OF ANAEROBIC FILTER TANK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำ และอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายที่ความเข้มข้นซีไอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้ออกซิเจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตร จำนวน 2 ถังต่อกันเป็นอนุกรมคิดเป็นปริมาตร 72 ลิตร ภายในบรรจุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรเต็มถึงปฏิกริยาคิดเป็นพื้นที่ผิวทั้งสิ้น 4,377.6 ตารางเมตร เตรียมหัวเชื้อจากการหมักตะกอนจากมูลสุกรด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ล่วงหน้า 60 วัน เติมน้ำในระบบทดลองต่อเนื่องเป็นเวลาทั้งหมด 357 วัน ด้วยอัตราการไหลของน้ำคงที่ 1.44 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่ระดับความสูงที่ 0.1 0.3 0.5 1.0 1.5 และ 2 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนของระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าระบบใช้เวลาประมาณ 100 วันในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และระยะเวลาเก็บกักน้ำที่มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงขึ้น โดยที่เวลากักเก็บน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมง บำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 90.9 ±1.2 93.3±0.7 94.5±0.6 94.6±1.5 96.9±0.4 และ 97.5±0.5 หรือความเข้มข้นซีไอดีของน้ำออกจากระบบเท่ากับ 86±7 63±5 52±7 51±16 29±3 และ 23±6 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่า ไม่ส่งผลต่อการบำบัดซีไอดี แต่สามารถช่วยในการลดปริมาณการใช้ต่างลงได้ร้อยละ 33.33 50 และ 61.11 ตามลำดับ ในการประเมินค่าจลนพลศาสตร์ ได้ค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (k_1) เท่ากับ 1.10±0.31 ต่อชั่วโมงซึ่งเมื่อนำไปสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม AQUASIM 2.1b พบว่าซีไอดีน้ำออกสอดคล้องกับผลการทดลอง และเมื่อดำเนินระบบเป็นเวลา 249 วันพบว่า ระบบไม่เกิดการอุดตันเนื่องจากระยะเวลาเก็บกักน้ำไม่เปลี่ยนแปลงทดสอบโดยใช้น้ำเกลือความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารติดตามโดยวัดผลจากค่าความนำไฟฟ้าผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของน้ำในถังปฏิกริยามีลักษณะใกล้เคียงกับถังกวนผสมนอร์มมากกว่าถังแบบไหลตามกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา2555.....

5270432521: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: Anaerobic Treatment/ Municipal Wastewater/ Hydraulic Retention Time/ Recirculation Rate/ Kinetic Parameter/ AQUASIM Program

PATTARA WIWATTHANASORN: EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND RECIRCULATION RATE ON THE EFFICIENCY OF ANAEROBIC FILTER TANK. ADVISOR: ASST.PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 124 pp.

This research studied the effect of hydraulic retention time (HRT) and recirculation rate on efficiency of treating synthetic wastewater using sugar as carbon source at COD concentration of 1,000 mg/L. Two reactors with a diameter of 0.2 meters and height of 1.3 meters were connected in series and filled up with $190 \text{ m}^2/\text{m}^3$ random flow media, the reactors volume was 72 Liters and the total surface area was $4,377.6 \text{ m}^2$. Initial inoculum was from swine manures incubated 60 days previously with the synthetic wastewater. The reactors were operated with 1.44 L/hr of flow rate for 357 days. Sample ports were at height of 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 meters representing HRT of 3-50 hr. Results found that this system took another 100 days to reach a steady state condition. Longer hydraulic retention time resulted in better COD removal efficiency. HRT of 3, 8, 13, 25, 38, and 50 hr resulted in COD removal efficiency of 90.9 ± 1.2 , 93.3 ± 0.7 , 94.5 ± 0.6 , 94.6 ± 1.5 , 96.9 ± 0.4 , and $97.5 \pm 0.5\%$, and effluent COD of 86 ± 7 , 63 ± 5 , 52 ± 7 , 51 ± 16 , 29 ± 3 , and $23 \pm 6 \text{ mg/L}$, respectively. While recirculation rate of 1, 2, and 4 times did not effect on COD removal but reduced the addition of alkalinity by 33.33, 50, and 61.11%, respectively. Reduction of COD followed a first order kinetic with k_1 of $1.10 \pm 0.31 \text{ 1/hr}$. The modeling results simulated by AQUASIM 2.1b were agreed with laboratory results. In tracer study, 1,000 mg/L NaCl was spike injected into the influent and conductivities were analyzed. The result showed that after operation for 249 days, HRT was about the same indicating no significant clogged. In addition, the distribution of NaCl concentrations showed patterns similar to completely mixed rather than plug flow conditions.

Department:.....Environmental Engineering

Student's Signature.....

Field of Study:.....Environmental Engineering

Advisor's Signature

Academic Year:2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ เสนอแนวคิด หลักการในการดำเนินงานวิจัย แก้ไขในสิ่งที่บกพร่อง และอดทนกับผู้วิจัย มาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.เขมรัฐ ใสสถาพันธ์ และ ดร.ปธาน บรรจงปรุ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์ สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ ตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่ในภาควิชานี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ

ขอขอบคุณบริษัท แชนอี. 68 คอนซัลติง เอ็นจิเนียรส์ จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อจุลชีพเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณบริษัท อควา นิชิฮาร่า ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกัน และกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา น้องสาว และญาติๆ ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม ทั้ง กำลังกายและกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 น้ำเสียชุมชน..... | 4 |
| 2.2 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบไร้ออกซิเจน..... | 6 |
| 2.3 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน..... | 8 |
| 2.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน..... | 10 |
| 2.5 ประเภทของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน..... | 12 |
| 2.5.1 ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed, AFB)..... | 12 |
| 2.5.2 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)..... | 12 |
| 2.5.3 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB)..... | 12 |
| 2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ (On-site Treatment)..... | 13 |
| 2.6.1 บ่อดักไขมัน (Grease Trap)..... | 13 |
| 2.6.2 บ่อเกรอะ (Septic tank)..... | 13 |
| 2.7 ถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter)..... | 14 |
| 2.8 การทดสอบการดูดซับ (Tracer Study)..... | 17 |
| 2.9 การประเมินปริมาณก๊าซมีเทนของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 20 |
| 2.10 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 25 |
| 2.11.1 ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน | 25 |
| 2.11.2 ผลของตัวกลางชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน.. | 26 |
| 2.11.3 ผลของอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน.. | 27 |
| 2.11.4 การใช้สารติดตามในการตรวจสอบถึงปฏิกรณ์..... | 28 |
| 2.11.5 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 28 |
| บทที่ 3 แผนการทดลอง และการดำเนินการวิจัย..... | 30 |
| 3.1 แผนการทดลอง..... | 30 |
| 3.2 อุปกรณ์และสารเคมี..... | 33 |
| 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 34 |
| 3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 | 37 |
| 3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 | 38 |
| 3.3.3 การทดลองส่วนที่ 3 | 40 |
| 3.3.4 การทดลองส่วนที่ 4 | 41 |
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 42 |
| ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 42 |
| 4.1 ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย | |
| สังเคราะห์..... | 49 |
| 4.1.1 ค่าซีไอดี | 49 |
| 4.1.2 พีเอส (pH)..... | 52 |
| 4.1.3 ค่ากรดไขมันระเหย..... | 54 |
| 4.1.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)..... | 58 |
| 4.1.5 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)..... | 62 |
| 4.2 ผลของอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย | |
| สังเคราะห์..... | 63 |
| 4.2.1 ค่าซีไอดี..... | 63 |
| 4.2.2 ค่ากรดไขมันระเหย..... | 65 |
| 4.2.3 พีเอส (pH)..... | 65 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)..... | 70 |
| 4.2.5 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)..... | 73 |
| 4.3 การตรวจสอบการอุดตันของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 74 |
| 4.4 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 78 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... | 87 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 87 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 87 |
| รายการอ้างอิง..... | 88 |
| ภาคผนวก..... | 91 |
| ภาคผนวก ก. กราฟมาตรฐาน..... | 92 |
| ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง..... | 94 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 124 |

สารบัญญัตราจ

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 2-1 | ลักษณะน้ำเสียชุมชน..... | 4 |
| 2-2 | ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย..... | 5 |
| 2-3 | อัตราการเกิดน้ำเสียในประเทศไทย..... | 5 |
| 2-4 | ปริมาณสารอาหารที่ต้องการสำหรับระบบไร้ออกซิเจน..... | 9 |
| 2-5 | สารพิษ และสารยับยั้งการทำงานของระบบไร้ออกซิเจน..... | 10 |
| 2-6 | ตัวอย่างการออกแบบถังกรองไร้ออกซิเจน..... | 15 |
| 2-7 | มาตรฐานถังกรองไร้ออกซิเจนสำหรับบ้านพักอาศัย..... | 16 |
| 2-8 | ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดไร้ออกซิเจน ในถังกวนผสมหมุน สำหรับ แบบที่เรียกว่าแบบ Suspended growth บำบัดซีไอดีละลายน้ำ..... | 24 |
| 3-1 | รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1..... | 37 |
| 3-2 | รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2..... | 39 |
| 3-3 | พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่..... | 40 |
| 4-1 | ค่าความเป็นต่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อความเป็นต่าง ที่ระยะเวลา เก็บกักน้ำต่างๆ..... | 58 |
| 4-2 | ค่าความเป็นต่าง และปริมาณต่างที่ใส่ ที่อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ..... | 71 |
| 4-3 | ค่าจลนพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า..... | 80 |
| 4-4 | ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง..... | 83 |
| 4-5 | ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการประมาณค่าจากการทดสอบความ คลาดเคลื่อน..... | 86 |
| ข-1 | ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุด การทดลอง..... | 95 |
| ข-2 | ค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... | 97 |
| ข-3 | ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... | 101 |
| ข-4 | ค่าความเป็นต่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... | 103 |

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| ข-5 | ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... 105 |
| ข-6 | ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า..... 107 |
| ข-7 | ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า..... 108 |
| ข-8 | ค่าพีเอช ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า 2 เท่า และ 4 เท่า..... 109 |
| ข-9 | ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า..... 113 |
| ข-10 | ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า..... 114 |
| ข-11 | ค่าความเป็นด่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า..... 115 |
| ข-12 | ค่าความเป็นด่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า..... 116 |
| ข-13 | ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า..... 117 |
| ข-14 | ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า..... 118 |
| ข-15 | ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 1 (ระบบไม่มีเชื้อ)..... 119 |
| ข-16 | ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 (ระบบไม่มี เชื้อ)..... 120 |
| ข-17 | ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (วันที่ 121-136).... 121 |
| ข-18 | ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 (วันที่ 289- 306)..... 122 |
| ข-19 | ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 3 (วันที่ 289-306)..... 123 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 2-1 | ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน..... | 7 |
| 2-2 | การเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่..... | 13 |
| 2-3 | ถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter)..... | 14 |
| 2-4 | ถังกรองไร้ออกซิเจนแบบมาตรฐาน..... | 16 |
| 2-5 | รูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์แบบต่างๆ | 18 |
| 2-6 | การติดตามการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทางเข้าและการตรวจวัดที่ทางออกของสารติดตาม (ก) แบบใส่ครั้งเดียว และ (ข) แบบต่อเนื่อง | 18 |
| 2-7 | ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นสารติดตาม $C_T(t)$ กับ เวลาในถัง (t) ในการตรวจสอบการอุดตัน..... | 19 |
| 2-8 | กราฟของสมการ Monod..... | 23 |
| 3-1 | แผนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย | 32 |
| 3-2 | ถังกรองไร้ออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัย..... | 35 |
| 3-3 | ลักษณะของตัวกลางพลาสติก Model R-190 จากบริษัท Aqua Nishihara Co. Ltd..... | 36 |
| 3-4 | รูปแบบชุดการทดลองทั้ง 3 ชุด..... | 38 |
| 4-1 | กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)..... | 43 |
| 4-2 | กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)..... | 44 |
| 4-3 | กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)..... | 45 |
| 4-4 | กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)..... | 46 |
| 4-5 | กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)..... | 47 |
| 4-6 | กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)..... | 48 |
| 4-7 | กราฟความเข้มข้นซีโอดีน้ำออกที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับน้ำเข้า การทดลองส่วนที่ 1 (วันที่ 1-120)..... | 50 |

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4-8 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีไอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ..... | 51 |
| 4-9 | กราฟค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ..... | 52 |
| 4-10 | กราฟค่าพีเอชน้ำเข้า และน้ำออกที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมง การทดลองส่วนที่ 1..... | 53 |
| 4-11 | กราฟค่ากรดไขมันระเหยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ..... | 54 |
| 4-12 | กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)..... | 55 |
| 4-13 | กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)..... | 56 |
| 4-14 | กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)..... | 57 |
| 4-15 | กราฟความเป็นต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)..... | 59 |
| 4-16 | กราฟความเป็นต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)..... | 60 |
| 4-17 | กราฟความเป็นต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)..... | 61 |
| 4-18 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าของแข็งแขวนลอยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของระบบ | 63 |
| 4-19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีไอดีที่อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของระบบ..... | 64 |
| 4-20 | กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 0 1 2 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 136-148..... | 65 |
| 4-21 | กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ..... | 66 |
| 4-22 | กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ..... | 67 |

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4-23 | กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ..... | 68 |
| 4-24 | กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 307-357..... | 69 |
| 4-25 | กราฟเปรียบเทียบค่าซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 307-357..... | 70 |
| 4-26 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ใช้ ณ อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ กับเปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณที่ใช้..... | 72 |
| 4-27 | กราฟประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของอัตราการเวียนน้ำกลับที่ 0 1 2 และ 4 เท่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง..... | 73 |
| 4-28 | กราฟค่าความเข้มข้นสารติดตามที่เวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... | 76 |
| 4-29 | ตัวอย่างตัวกลางที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะหลังการวิจัย..... | 77 |
| 4-30 | รูปแบบการกระจายตัวของน้ำในถังปฏิกรณ์..... | 77 |
| 4-31 | กราฟแสดงการหาค่าจลนพลศาสตร์ของชุดการทดลองทั้ง 3 ในการทดลองส่วนที่ 1..... | 81 |
| 4-32 | อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ต่อซีโอดีทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 99-249 ทั้ง 3 ชุดถังกรอง..... | 82 |
| 4-33 | อัตราการใช้สารตั้งต้นตลอดการทดลองส่วนที่ 2 ทั้ง 3 อัตราการเวียนน้ำ..... | 82 |
| 4-34 | กราฟเปรียบเทียบผลน้ำเสียระหว่างจากแบบจำลอง และจากการทดลอง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 และ 13 ชั่วโมง..... | 84 |
| 4-35 | กราฟเปรียบเทียบผลน้ำเสียระหว่างจากแบบจำลอง และจากการทดลอง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 25 38 และ 50 ชั่วโมง..... | 85 |
| ก-1 | กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์..... | 93 |
| ก-2 | กราฟมาตรฐานของสารติดตาม..... | 93 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน ผู้ประกอบการให้ความสนใจกับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมากขึ้น เนื่องจากมีผลพลอยได้เป็น ก๊าซมีเทน ซึ่งนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกได้ อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ ต้องการความเชี่ยวชาญในการดูแลควบคุมอย่างใกล้ชิด เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่าง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณกรดไขมันระเหย สภาพต่าง เป็นต้น

ตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมอาคาร พ.ศ.2544 หมวด 7 ข้อ 71 กำหนดให้มีถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter) เป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งในการออกแบบก่อสร้างนั้น ส่วนใหญ่ใช้ถังบำบัดแบบสำเร็จรูปที่ได้รับการออกแบบมาจากบริษัทผู้ผลิต โดยที่ไม่ได้ทำการศึกษาลงไปว่าการทำงานของถังกรองไร้ออกซิเจนนั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ความเข้มข้นของน้ำเสีย ระยะเวลาเก็บกักน้ำ ชนิดและปริมาณตัวกลาง และอัตราการเวียนน้ำ เป็นต้น โดยระบบถังกรองไร้ออกซิเจนมีข้อดีคือ แทบจะไม่ต้องใช้พลังงานในการเดินระบบ ได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพตามปกติของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การเดินระบบไม่มีความซับซ้อนยุ่งยาก อีกทั้งยังสามารถกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ดี แม้ว่าจะไม่สามารถรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ไม่สูงนักก็ตาม

โดยปัญหาสำคัญของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนคือ การอุดตันของระบบหลังจากเดินระบบไปเป็นเวลานาน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลง เนื่องด้วยระบบนี้ไม่มีการนำจุลินทรีย์ที่แขวนลอย และเกาะติดกับตัวกลางออกจากระบบ แม้ว่าอัตราการเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบไร้ออกซิเจนจะต่ำก็ตาม

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ชนิด ปริมาณตัวกลาง และระยะเวลาเก็บกักน้ำ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัดซึ่งจะส่งผลต่อขนาดถัง และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง รวมทั้งทำการตรวจสอบการอุดตันของระบบ ในสภาวะต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาสภาพการอุดตันของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำ และอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน
- 1.2.2 ศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ เปรียบเทียบ และหาความคลาดเคลื่อนของผลจากแบบจำลองและผลการบำบัดจริงของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน
- 1.2.3 วิเคราะห์ผลกระทบของการอุดตันต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 20 องศาเซลเซียส
- 1.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากน้ำตาลทราย โดยกำหนดให้มีค่าซีโอดี 1,000 มก./ล. เทียบเท่าความเข้มข้นของน้ำเสียชุมชน (Metcalf และEddy, 2004) และกำหนดให้มีการเติมสารอาหารที่เหมาะสม (Speece, 1996)
- 1.3.3 ทำการเดินระบบโดยมีอัตราการระส่ำอินทรีย์ 480 มก./ล.-วัน อัตราเร็วน้ำไหลขึ้น 0.046 ม./ชม.
- 1.3.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ พีเอช อุณหภูมิ ซีโอดี ซีโอดีกรอง ของแข็งแขวนลอย กรดไขมันระเหยง่าย และสภาพความเป็นต่าง
- 1.3.5 ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ และความคลาดเคลื่อน
- 1.3.6 ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ AQUASIM 2.1b ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ค่าจลนพลศาสตร์ที่เป็นตัวแทนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน
- 1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปนั้น มีองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 2-1 ซึ่งอ้างอิงมาจากน้ำเสียชุมชนประเทศสหรัฐอเมริกา โดยวิเคราะห์มาจากการรวบรวมข้อมูลอัตราการใช้น้ำจากหลายๆ แหล่งกำเนิด ทั้งที่อยู่อาศัย ออฟฟิศโรงเรียน รวมถึงสถานที่พักผ่อน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำเสียในประเทศไทย ดังตารางที่ 2-2 จะพบว่าซีโอดีของน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยมีค่าใกล้เคียงกับของสหรัฐอเมริกา โดยมีซีโอดีประมาณ 1,000 มก./ล.

ตารางที่ 2-1 ลักษณะน้ำเสียชุมชน (Metcalf และEddy, 2004)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ความเข้มข้น | | |
|---|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | | น้อย | ปานกลาง | มาก |
| 1.ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) | มก./ล. | 390 | 720 | 1,230 |
| ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids) | มก./ล. | 270 | 500 | 860 |
| ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) | มก./ล. | 120 | 210 | 400 |
| 2.ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids) | มล./ล. | 5 | 10 | 20 |
| 3.ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand;BOD) | มก./ล. | 110 | 190 | 350 |
| 4.ค่าซีโอดี (chemical Oxygen Demand;COD) | มก./ล. | 250 | 430 | 800 |
| 5.ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N) | มก./ล. | 20 | 40 | 70 |
| อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic) | มก./ล. | 8 | 15 | 25 |
| แอมโมเนีย (Free ammonia) | มก./ล. | 12 | 25 | 45 |
| ไนไตรท์ (Nitrites) | มก./ล. | 0 | 0 | 0 |
| ไนเตรท (Nitrate) | มก./ล. | 0 | 0 | 0 |
| 6.ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P) | มก./ล. | 4 | 7 | 12 |
| สารอินทรีย์ (Organic) | มก./ล. | 1 | 2 | 4 |
| สารอนินทรีย์ (Inorganic) | มก./ล. | 3 | 5 | 8 |
| 7.คลอไรด์ (Chloride) ⁽¹⁾ | มก./ล. | 30 | 50 | 90 |
| 8.ซัลเฟต (Sulfate) ⁽¹⁾ | มก./ล. | 20 | 30 | 50 |
| 9.สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) | มก./ล. | <100 | 100-400 | >400 |
| 10.ไขมัน (Oil & Grease) | มก./ล. | 50 | 90 | 100 |
| 11.Total Coliform | MPN/100ml | 10 ⁶ -10 ⁸ | 10 ⁷ -10 ⁹ | 10 ⁷ -10 ¹⁰ |

หมายเหตุ: (1) เป็นค่าที่เพิ่มจากค่าที่ตรวจพบในน้ำใช้ปกติ

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะสำนักงาน และคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2530)

| พารามิเตอร์ | น้ำเสีย จาก ส้วม | จากห้องอาบน้ำ | | จากการซักผ้า | | จากครัว | |
|------------------------|------------------------|---------------|--------|--------------|-----------------|----------------|---------|
| | | ตักอาบ | ฝักบัว | ด้วยมือ | ด้วย เครื่อง | ผ่าน ตะแกรง | ไม่ผ่าน |
| pH | 7.7 | 7.1 | 7.0 | 7.2 | 7.7 | 7.2 | 6.3 |
| COD (mg/L) | 1,500 | 230 | 400 | 200 | 560 | 960 | 2,900 |
| BOD (mg/L) | 700 | 120 | 260 | 70 | 150 | 540 | 1,800 |
| TKN (mg/L) | 300 | 8 | 38 | 14 | 12 | 18 | 120 |
| PO ₄ (mg/L) | 24 | 6 | 1 | 10 | 24 | 13 | 90 |
| SS (mg/L) | 560 | 45 | 80 | 60 | 55 | 210 | 1,200 |
| FOG (mg/L) | 540 | 400 | 480 | 500 | 520 | 500 | 2,700 |

โดยข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของประชากรในประเทศไทยจากตารางที่ 2-3 นั้นเป็นการประเมินปริมาณการใช้น้ำล่วงหน้าต่อไปในอนาคต จะเห็นว่าแนวโน้มในการใช้น้ำของประชากรมีมากขึ้นอันเนื่องมาจาก อัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาระบบสาธารณสุขูปโภค การขยายตัวของชุมชนเมือง ฯลฯ

ตารางที่ 2-3 อัตราการเกิดน้ำเสียในประเทศไทย (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2538)

| ภาค | อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน-วัน) | | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2536 | 2540 | 2545 | 2550 | 2555 | 2560 |
| กลาง | 160-214 | 165-242 | 170-288 | 176-342 | 183-406 | 189-482 |
| เหนือ | 183 | 200 | 225 | 252 | 282 | 316 |
| ตะวันออกเฉียงเหนือ | 200-253 | 216-263 | 239-277 | 264-291 | 291-306 | 318-322 |
| ใต้ | 171 | 195 | 204 | 226 | 249 | 275 |

2.2 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบไร้ออกซิเจน(มันลิน ตันทุลเวศม์, 2546)

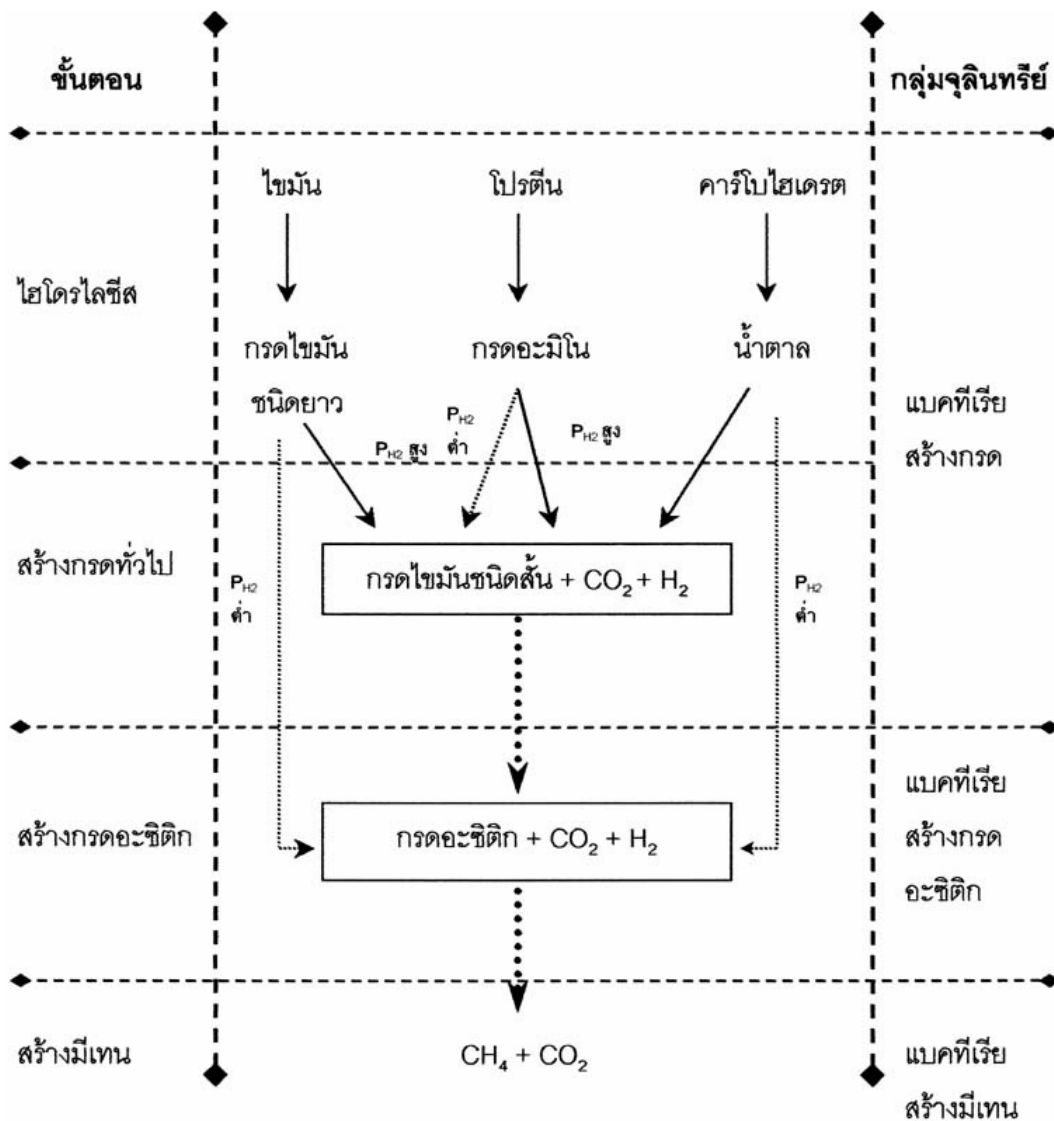
แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2-1 โดยมีรายละเอียดคือ

ขั้นที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ให้เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ซึ่งเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยเอนไซม์ของแบคทีเรียที่ปล่อยออกมาเท่านั้น จึงยังไม่มีกรดคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้า โดยความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นสารตั้งต้น อุณหภูมิ พีเอช ความเข้มข้นเอนไซม์ เป็นต้น

ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acid Former Bacteria) นำไปใช้เพื่อผลิตกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวิก กรดบิวทิริก เป็นต้นและผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ชนิดของสารตั้งต้น และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ แต่จะถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันชนิดสั้น เช่น กรดบิวทิริก กรดไพรูวิก ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง ดังรูปที่ 2-1

ขั้นที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) กรดไขมันระเหยที่ได้จากกระบวนการสร้างกรด จะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) เปลี่ยนให้เป็น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการสารตั้งต้นที่เฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 ขึ้นไปไม่สามารถเป็นสารตั้งต้นให้กับแบคทีเรียสร้างมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 ให้กลายเป็นกรดอะซิติกกับไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และย่อยสลายกรดบิวทิริก กรดไพรูวิก ที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ โดยขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น

ขั้นที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการสร้างกรดอะซิติกทั้งหมดทั้งกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน จะถูกแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) ใช้สร้างมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด โดยที่แบคทีเรียในขั้นที่ 3 และ 4 มีความสัมพันธ์กันโดยให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน (Syntrophy) และต่างไม่สามารถเจริญเติบโตได้หากอยู่เพียงลำพัง



รูปที่ 2-1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

ที่มา: มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546

2.3 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

1. อุณหภูมิ

มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงระหว่าง 8-45 องศาเซลเซียส จุลชีพที่ทำงานคือ เมโซฟิลิก แบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) และช่วงระหว่าง 40-70 องศาเซลเซียส จุลชีพที่ทำงานคือ เทอร์โมฟิลิก แบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) โดยตามปกติแล้ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นย่อมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นไปด้วย แต่หากอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่แบคทีเรียจะทำงานได้ การเจริญเติบโตจะลดลงอย่างรวดเร็ว (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546) หากมองรวมไปถึงในแง่ของค่าใช้จ่าย และระยะเวลาเก็บกักน้ำแล้ว อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25-35 องศาเซลเซียส (Metcalf และ Eddy, 2004)

2. สารอาหาร

ปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการ ที่นิยมใช้มีอัตราส่วนดังนี้ COD:N:P เท่ากับ 150:1.1:0.2 (Speece, 1996) และแบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการธาตุอาหารเพิ่มเติม (Micronutrient) อีก เช่น เหล็ก โคบอลท์ นิกเกิล และสังกะสี เป็นต้น ดังตารางที่ 2-4

3. พีเอช

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอช 5-10 แต่ในส่วนของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่าที่นิยมจะอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546)

4. กรดไขมันระเหย และสภาพต่าง

ปริมาณกรดไขมันระเหยควรมีค่าอยู่ประมาณ 20-200 มก.กรดอะซิติก/ล. หากมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบขาดความสมดุลกล่าวคือ แบคทีเรียสร้างมีเทนผลิตก๊าซมีเทนจากกรดที่เกิดขึ้นได้น้อยกว่าการสร้างกรดของแบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งทำให้ระบบล้มเหลวได้ ระบบจึงควรมีสภาพต่างประมาณ 1,500-2,000 มก./ล. เพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบ นอกจากนั้นต้องพิจารณาอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างด้วย ซึ่งค่าควรน้อยกว่า 0.4 และระบบอาจล้มเหลวได้หากค่ามากกว่า 0.8 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546)

ตารางที่ 2-4 ปริมาณสารอาหารที่ต้องการสำหรับระบบไร้ออกซิเจน (Speece, 1996)

| ธาตุอาหาร | ปริมาณที่ต้องการ (มก./ก.ชีโอดี) | ความเข้มข้นที่มาก เกินพอ (มก./ล.) | รูปแบบสารอาหารใน การเติมสู่ระบบ |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Macronutrients | | | |
| Nitrogen | 5-15 | 50 | $\text{NH}_3, \text{NH}_4\text{Cl}, \text{NH}_4\text{HCO}_3$ |
| Phosphorus | 0.8-2.5 | 10 | NaH_2PO_4 |
| Sulfur | 1-3 | 5 | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| Micronutrients | | | |
| Iron | 0.03 | 10 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ |
| Cobalt | 0.003 | 0.02 | $\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Nickel | 0.004 | 0.02 | $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |
| Zinc | 0.02 | 0.02 | ZnCl_2 |
| Copper | 0.004 | 0.02 | $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Manganese | 0.004 | 0.02 | $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ |
| Molybdenum | 0.004 | 0.05 | $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Selenium | 0.004 | 0.08 | Na_2SeO_3 |
| Tungsten | 0.004 | 0.02 | $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Boron | 0.004 | 0.02 | H_3BO_3 |
| Common Cations | | | |
| Sodium | | 100-200 | $\text{NaCl} \cdot \text{NaHCO}_3$ |
| Potassium | | 200-400 | KCl |
| Calcium | | 100-200 | $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Magnesium | | 75-250 | MgCl_2 |

5. สารพิษ

ในระบบต้องไม่มีสารพิษ เช่น เกล็ดอินทรีย์ (ไซเตียมไอออน โปแทสเซียมไอออน แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน) โลหะหนัก (ทองแดง โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี) แอมโมเนีย และซัลไฟด์ ดังตารางที่ 2-5 เป็นต้น

ตารางที่ 2-5 สารพิษ และสารยับยั้งการทำงานของระบบไร้ออกซิเจน (Metcalf และEddy, 2004)

| สารเคมี | ความเข้มข้นในการยับยั้งระดับปานกลาง (มก./ล.) | ความเข้มข้นในการยับยั้งระดับสูง (มก./ล.) |
|---|--|--|
| Na ⁺ | 3500-5500 | 8000 |
| K ⁺ | 2500-4500 | 12000 |
| Ca ²⁺ | 2500-4500 | 8000 |
| Mg ²⁺ | 1000-1500 | 3000 |
| Ammonia-nitrogen NH ₄ ⁺ | 1500-3000 | 3000 |
| Sulfide, S ²⁻ | 200 | 200 |
| Copper, Cu ²⁺ | | 0.5 (soluble) 50-70 (total) |
| Chromium, Cr(VI) | | 3.0 (soluble) 200-250 (total) |
| Chromium, Cr(III) | | 2.0 (soluble) 180-420 (total) |
| Nickel, Ni ²⁺ | | 30.0 (total) |
| Zinc, Zn ²⁺ | | 1.0 (soluble) |

2.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ข้อดี

1. ต้องการพลังงานต่ำ โดยแบบใช้ออกซิเจนต้องการพลังงาน 1.9×10^6 กิโลจูลต่อวันขณะที่แบบไร้ออกซิเจนได้พลังงาน 8.3×10^6 กิโลจูลต่อวันสำหรับน้ำเสีย 100 ลบ.ม.ต่อวัน (Metcalf และEddy, 2004)
2. เกิดสลัดจ์ในปริมาณน้อย โดยต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจนประมาณ 6-8 เท่า (Metcalf และ Eddy, 2004) เนื่องจากค่าyieldที่ต่ำของแบคทีเรีย ซึ่งส่งผลถึงค่าใช้จ่ายในการจัดการสลัดจ์ที่ต่ำลงตามไปด้วย
3. ต้องการปริมาณสารอาหารต่ำ เนื่องจากเซลล์แบคทีเรียที่เกิดมีน้อย

4. ได้ผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้
5. สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูง โดยแบบใช้ออกซิเจนรับได้ 0.5-3.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ขณะที่แบบไร้ออกซิเจนรับได้ 3.2-32 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน (Speece, 1996) ซึ่งส่งผลให้ถึงปฏิกรณ์เล็กกว่าไปด้วย
6. ระบบสามารถปรับตัวในการบำบัดสารอินทรีย์ได้เร็ว หลังจากระบบหยุดทำงานเป็นเวลานาน

ข้อเสีย

1. ระยะเวลาในการเริ่มต้นระบบ (Start-up) นาน ระดับวันสำหรับแบบใช้ออกซิเจน ขณะที่แบบไร้ออกซิเจนใช้ระยะเวลาเป็นเดือน (Metcalf และEddy, 2004)
2. ต้องการสภาพต่างเพิ่มเติม หากมีสภาพต่างไม่เพียงพอที่จะทำให้พีเอชของระบบลดลง และไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้
3. ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นลดลงได้ถึงระดับที่กฎหมายกำหนด จึงจำเป็นต้องมีระบบใช้อากาศมาบำบัดน้ำเสียต่ออยู่เสมอ
4. ไม่สามารถบำบัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้
5. ที่อุณหภูมิต่ำส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของแบคทีเรียแบบไร้ออกซิเจนมากกว่าแบบใช้ออกซิเจน
6. ทนต่อสภาพความเป็นพิษของสารอินทรีย์ระเหยพวก Chlorinated Aliphatic Hydrocarbon (CAHs) ได้น้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน (Speece, 1996)
7. เกิดกลิ่นเหม็น และผลิตภัณฑ์ที่กัดกร่อนได้สูง เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.5 ประเภทของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

2.5.1 ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed, AFB)

ระบบนี้คล้ายคลึงกับถังกรองไร้ออกซิเจนตรงที่มีน้ำไหลขึ้นด้านบน แต่ตัวกลางที่ใช้เป็นทราย แอนทราไซต์ถ่านกัมมันต์ ซึ่งขนาดเล็กกว่า ทำให้มีแบคทีเรียมาจับเกาะได้เป็นจำนวนมาก อัตราการไหลของน้ำเสียต้องสูงมาก จนทำให้มีการลอยตัวของตัวกลาง โดยกำหนดให้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 20 ม./ชม. เพื่อให้ชั้นตัวกลางขยายตัว 100% ทั้งหมดส่งผลให้อัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียสูงมาก ขนาดของระบบจึงเล็กกว่าระบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามตัวกลางในระบบต้องลอยตัวตลอดเวลา ก่อให้เกิดปัญหาในการออกแบบ และควบคุมระบบ รวมทั้งต้องเสียพลังงานในการทำให้ออกซิเจนลอยตัวอีกด้วย ความลึกของถังจึงอยู่ในช่วง 4-6 ม. สามารถรับภาระชีโอดีประมาณ 10-20 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีสูงกว่า 90% (Metcalf และ Eddy, 2004)

2.5.2 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

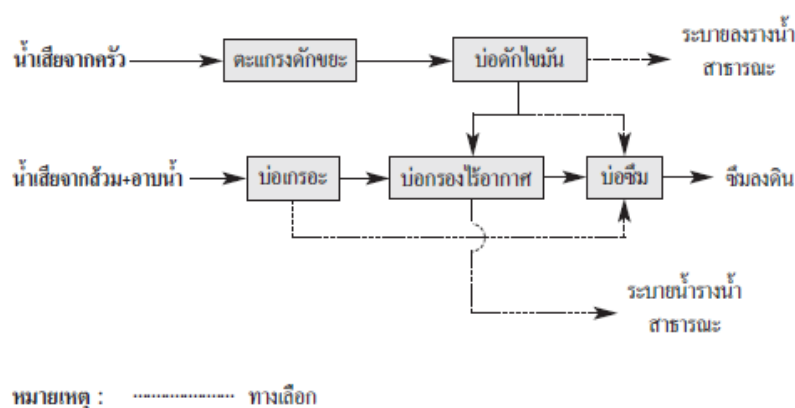
เพื่อลดค่าใช้จ่ายของตัวกลาง วิศวกรจึงคิดค้นระบบนี้ขึ้น โดยน้ำเสียไหลจากล่างขึ้นบนแต่ไม่ใช้ตัวกลาง แบคทีเรียจะถูกลี้น้ำให้จับตัวกันเป็นเม็ดหรือฟล็อก จนมีน้ำหนักมากจนสามารถตกตะกอนได้ดี น้ำเสียที่ไหลเข้าถังจะทำให้เม็ดแบคทีเรียลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ไม่จมลงก้นถัง และมีอุปกรณ์แยกตะกอนไม่ให้หลุดออกไปกับน้ำทิ้งอีกด้วย ระบบนี้สามารถรองรับภาระบรรทุกอินทรีย์ได้มากถึง 4-12 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีระยะเวลาเก็บกักน้ำ 4-12 ชม. และต้องการความเร็วน้ำไหลขึ้น 0.6-0.9 ม./ชม. ซึ่งหากน้ำเสียเข้ามีชีโอดี 5-15 ก./ล. สามารถกำจัดชีโอดีได้ถึง 75-90% วิศวกรจึงนิยมใช้ระบบนี้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการเลี้ยงแบคทีเรียชนิดไร้ออกซิเจนให้จับตัวกันเป็นเม็ดหรือฟล็อกนั้นเป็นเรื่องยาก ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการดูแลระบบ (Qasim, 1999)

2.5.3 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB)

ปรับปรุงมาจากระบบยูเอเอสบี โดยให้น้ำมีอัตราไหลขึ้นสูงประมาณ 3-10 ม./ชม. ทำให้ชั้นตะกอน (Sludge Bed) มีการขยายตัวมากกว่า ช่วยทำให้น้ำเสีย และเม็ดแบคทีเรียสัมผัสกันได้ดีทั่วถึงมากกว่า ลักษณะน้ำเสียมักเข้าทางด้านล่างผ่านท่อกระจายน้ำแบบพิเศษภายในถังหมักจะมีชั้นตะกอนของเม็ดสลัดจ์ขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนได้ดี (มีความเร็วในการตกตะกอนประมาณ 60-80 ม./ชม.) ความสูงของชั้นสลัดจ์นอนขึ้นอยู่กับความสูงของถังหมักซึ่งมักมีค่าอยู่ในช่วง 7-14 เมตร (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2546)

2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ (On-site Treatment)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการก่อสร้าง หรือติดตั้งเพื่อบำบัดน้ำเสียจากอาคารเดี่ยว เช่น บ้านพักอาศัย อาคารชุด ตึกแถว หรืออาคารสถานที่ทำการที่มีพื้นที่ไม่เกิน 1,000 ตร.ม. เพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมตามข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ.2544 หมวด 7 ข้อ 71 โดยกำหนดให้มีบ่อดักไขมัน (Grease Trap) บ่อเกรอะ (Septic Tank) และถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter) ดังรูปที่ 2-2 เนื่องจากเป็นระบบที่ก่อสร้างง่าย อีกทั้งยังมีการผลิตเป็นถึงสำเร็จรูป ทำให้สะดวกในการติดตั้ง อาจก่อสร้างเป็นระบบแบบติดกับที่ขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เช่น ระบบเอเอส ต่อไปได้อีกด้วย



รูปที่ 2-2 การเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2545

2.6.1 บ่อดักไขมัน (Grease Trap)

บ่อดักไขมันใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียจากครัว ซึ่งมีน้ำเสียไขมันปนเปื้อนอยู่มาก หากไม่ทำการบำบัดก่อนจะส่งผลให้ท่อระบายน้ำอุดตัน และประสิทธิภาพในการบำบัดทางชีวภาพลดลง โดยก่อสร้างเป็นบ่อคอนกรีต มีทั้งแบบทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม กำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำ 6 ชม. สามารถกำจัดไขมันได้ 60% (กรมควบคุมมลพิษ, 2537)

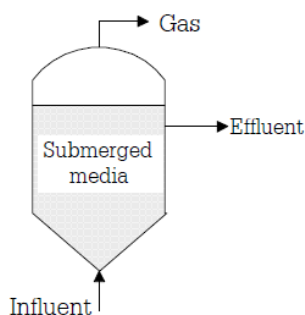
2.6.2 บ่อเกรอะ (Septic tank)

บ่อเกรอะ มักสร้างเป็นคอนกรีตปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ใต้พื้นดิน ใช้น้ำเสียจากบ้านเรือนที่ปริมาณน้ำเสียไม่มากนักมีระยะเวลาเก็บกักน้ำประมาณ 1-3 วัน การทำงานเหมือนกับบ่อไร้ออกซิเจนทุกประการ น้ำใสจะระบายต่อไปยังบ่อเติมอากาศระบบเอเอส หรือ ถังกรองไร้ออกซิเจน

ออกซิเจน การดูแลรักษา จะทำการสูบลบตะกอนภายในบ่อออกทุกๆ 1-1.5 ปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) กำหนดความลึกประมาณ 1.5 ม. น้ำที่ผ่านบ่อเกรอะปริมาณบีโอดีเหลือประมาณ 130 มก./ล. ค่าของแข็งแขวนลอยประมาณ 90 มก./ล. (Qasim, 1999)

2.7 ถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter)

มีส่วนประกอบสำคัญคือ ถังที่มีลักษณะคล้ายถังกรอง แต่ภายในบรรจุหินขนาด 1.5-2 นิ้ว หรืออาจใช้ตัวกลางพลาสติกแทนก็ได้ น้ำเสียจะไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน ทำให้น้ำท่วมถึงสูงตลอดเวลา และแบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกจับอยู่ในถังกรอง ดังรูปที่ 2-3 น้ำที่ไหลออกมาจึงใส ถังหมักแบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำด้วย เพราะมีอายุตะกอนยาวนานมาก อย่างไรก็ตามระบบนี้มีปัญหาสำคัญคือ ต้องหาวิธีกระจายน้ำเสียให้ไหลเข้าถังกรองได้อย่างสม่ำเสมอ และการอุดตัน แต่การอุดตันสามารถบรรเทาได้ ด้วยการตกตะกอนน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถัง (Metcalf และ Eddy, 2004)



รูปที่ 2-3 ถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter)

ที่มา: มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2546

โดยปัจจัยในการออกแบบ และเลือกใช้ระบบถังกรองไร้ออกซิเจนประกอบด้วย ตัวถัง ปฏิกริยา ตัวกลาง ความสกปรกของน้ำเข้า ระยะเวลาเก็บกักน้ำ รวมไปถึงอัตราการเวียนน้ำกลับ ซึ่งในตำราหลายเล่มได้มีการเสนอค่าการออกแบบมาหลากหลาย ซึ่งได้สรุปได้ดังนี้

Grady และคณะ (1999) กล่าวถึงตัวอย่างของตัวกลางพลาสติก ทั้งแบบ cross-flow, tubular และ pall rings ว่าควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อย 100 ตร.ม./ลบ.ม. และมีปริมาตรของช่องว่าง 90-95% และกำหนดระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0.5-4 วัน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5-15 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Qasim (1999) กำหนดอายุตะกอน 100 วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1-2 วัน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1-5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีอยู่ที่ 75-85% ที่ความเข้มข้นซีไอดีน้ำเข้า 10,000-20,000 มก./ล.

Metcalf และEddy (2004) กำหนดขนาดถังทั้งแบบทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม ให้มีรัศมี หรือความกว้าง 2-8 ม. และความสูง 3-13 ม. โดยบรรจุตัวกลางพลาสติกที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 100 ตร.ม./ลบ.ม. ลงไปประมาณ 50-70% ของความสูงถัง ซึ่งจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ตัวกลางพลาสติกแบบ tubular อัตราการระบรทุกซีไอดี 0.2-0.7 กก./ลบ.ม.-วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 25-37 วัน และไม่มีการเวียนน้ำกลับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงถึง 90-96% ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ตัวอย่างการออกแบบถังกรองไร้ออกซิเจน (Metcalf และEddy, 2004)

| Wastewater | Packing type | Temp (°C) | COD loading (kg/m ³ ·d) | HRT (d) | Recycle ratio, R/Q | %COD removed |
|---------------------|--------------|-----------|------------------------------------|----------|--------------------|--------------|
| Guar gum | Pall rings | 37 | 7.7 | 1.2 | 5.0 | 61 |
| Chemical processing | Pall rings | 37 | 12-15 | 0.9-1.3 | 5.0 | 80-90 |
| | Pall rings | 15-25 | 0.1-1.2 | 0.5-0.75 | 0 | 50-70 |
| Domestic | Tubular | 37 | 0.2-0.7 | 25-37 | 0 | 90-96 |
| Landfill leachate | Cross-flow | 35 | 1.5-2.5 | 2.0-3.0 | 0.25 | 89 |
| Food canning | Cross-flow | 30 | 4-6 | 1.8-2.5 | 0 | 90 |
| Soft drink | 2-stage | | | | | |

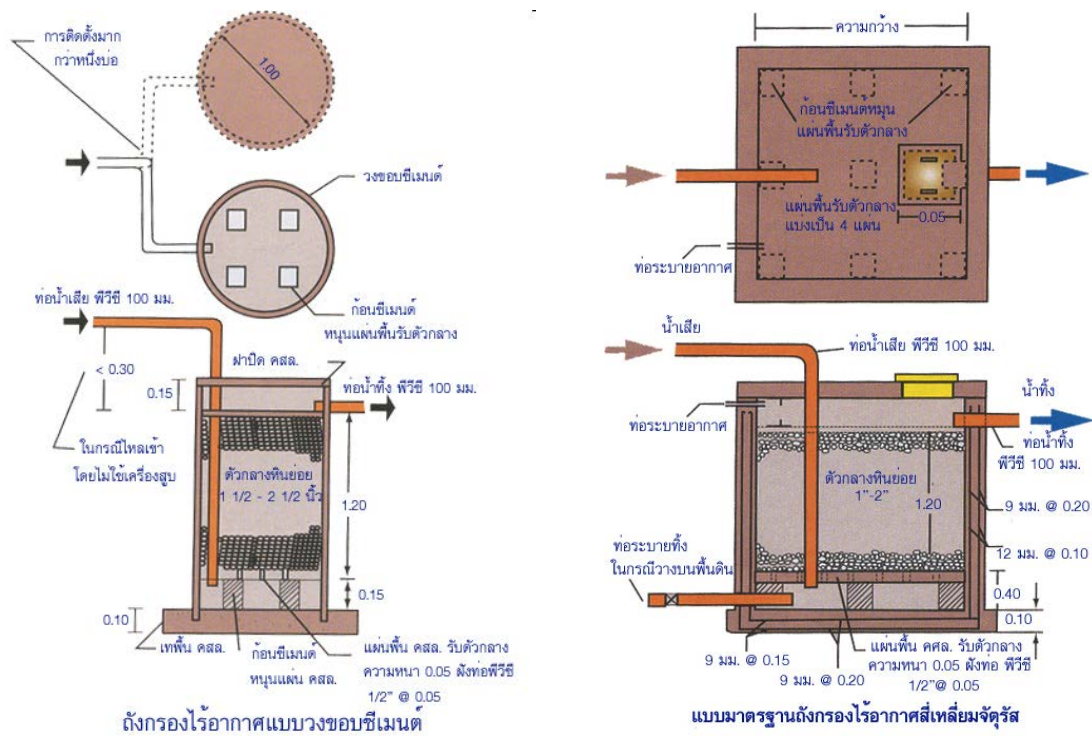
เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2537) กำหนดระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1-10 วัน การระบรทุกซีไอดี 4-16 กก./ลบ.ม.-วัน ความลึกถังไม่เกิน 1.5 ม. เสนอให้ใช้ตัวกลางดินเผา ซึ่งมีความขรุขระมาก พบว่าสามารถกำจัดบีไอดีลดลงเหลือ 30 มก./ล.

กรมควบคุมมลพิษ (2537) ได้ทำการกำหนดขนาดมาตรฐานของถังกรองไร้ออกซิเจน สำหรับบ้านพักอาศัยไว้ดังตารางที่ 2-7 ซึ่งมีทั้งแบบถังทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2-3 โดยมีเกณฑ์การออกแบบคือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 12 ชม. บรรจุตัวกลางหินลิก 1.2 ม. ซึ่งมีความพรุนชั้นตัวกลาง 45%

งานวิจัยนี้จึงใช้ อัตราการบรรทุกซีโอดีประมาณ 1-5 กก./ลบ.ม.-วัน ทำการบำบัดน้ำเสียซีโอดี 1,000 มก./ล. มีระยะเวลาเก็บกักน้ำประมาณ 1-5 วัน โดยใช้ตัวกลางพลาสติก ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อย 100 ตร.ม./ลบ.ม.

ตารางที่ 2-7 มาตรฐานถังกรองไร้ออกซิเจนสำหรับบ้านพักอาศัย (กรมควบคุมมลพิษ, 2537)

| จำนวนผู้พัก | ปริมาตรตัวกลาง (ลบ.ม) (สูง 1.20 ม.) | ถังทรงกระบอก จำนวนถัง x สผก. (สูง 1.50 ม.) | แบบถังสี่เหลี่ยม | |
|-------------|---|--|--|--------------|
| | | | กว้าง x ยาว (ม ²) (สูง 1.50 ม.) | จำนวน ถัง |
| 5 | 0.5 | 1 x 1.00 | - | - |
| 5-10 | 1.0 | 2 x 1.00 | - | - |
| 10-15 | 1.5 | 3 x 1.00 | - | - |
| 15-20 | 2.0 | 3 x 1.20 | - | - |
| 20-25 | 2.5 | 4 x 1.20 | - | - |
| 25-30 | 3.0 | - | 1.6 x 1.6 | - |
| 30-35 | 3.5 | - | 1.7 x 1.7 | 2 |
| 35-40 | 4.0 | - | 1.8 x 1.8 | 2 |
| 40-45 | 4.5 | - | 1.9 x 1.9 | 2 |
| 45-50 | 5.0 | - | 2.0 x 2.0 | 2 |



รูปที่ 2-4 ถังกรองไร้ออกซิเจนแบบมาตรฐาน ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2537

2.8 การทดสอบการอุดตัน (Tracer Study)

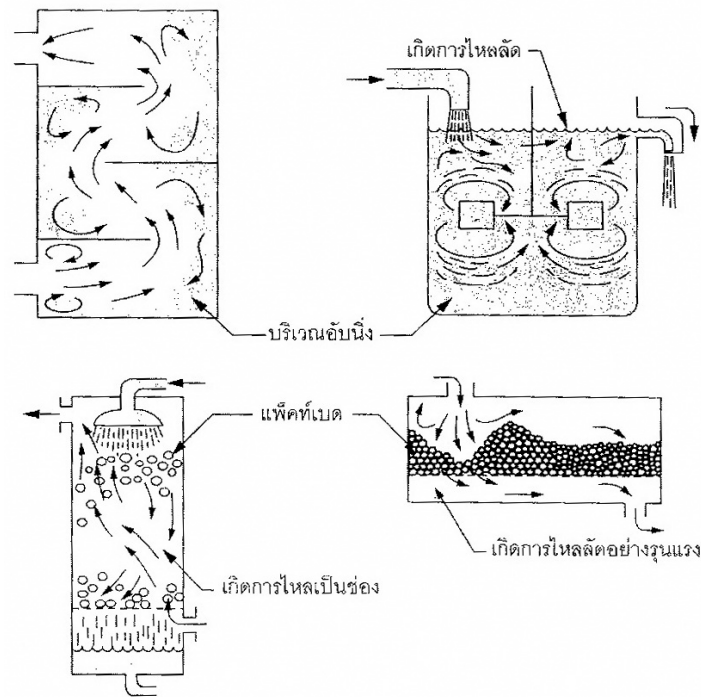
ลักษณะการไหลในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในอุดมคติมี 2 แบบได้แก่ แบบกวนผสมสมบูรณ์ (Completely mixed) และแบบไหลตามกัน (Plug flow) โดยที่แบบกวนผสมสมบูรณ์สมมุติให้ทุกๆจุดในถังมีความเข้มข้นเท่ากันหมด ส่วนแบบไหลตามกันความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางการไหล ในความเป็นจริงลักษณะการไหลไม่ได้เป็นตามอุดมคติ เนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 ประการคือ การกระจายตัวของน้ำ (Flow distribution) สภาพการผสม (State of aggregation) และการผสมก่อนหลัง (Earliness and lateness of mixing)

ถังกรองไร้ออกซิเจนเป็นถังปฏิกรณ์แบบไหลตามกัน โดยน้ำไหลผ่านเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะบนตัวกลาง ระบบไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบทำให้เมื่อเดินระบบเป็นเวลานานจุลินทรีย์เกิดการสะสมตัว เกิดการอุดตันในระบบซึ่งจะทำให้ระยะเวลาเก็บกักน้ำของระบบลดลงจากที่ออกแบบทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการอุดตันของระบบ โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวของน้ำ

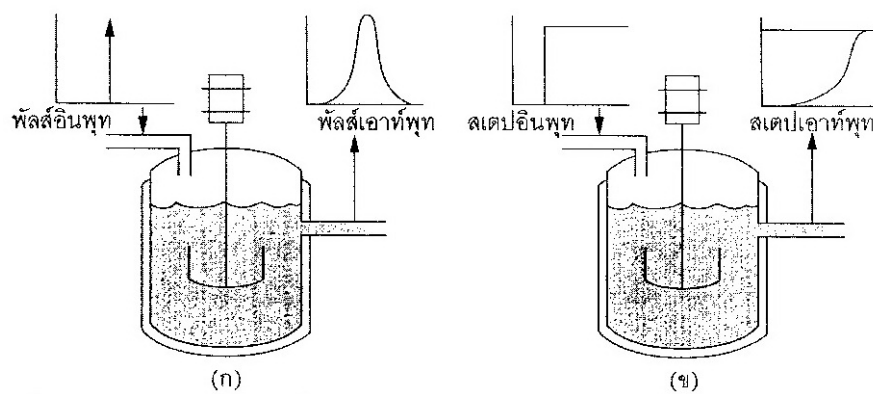
การกระจายตัวของน้ำ (Residence Time Distribution, RTD) ในถังปฏิกรณ์แบบไม่อุดมคติ ของไหลที่ไหลผ่าน ใช้เวลาในถังไม่เท่ากัน ขึ้นกับลักษณะจำเพาะของถังปฏิกรณ์นั้น สารที่เข้ามาอาจใช้เวลาอยู่ในถังนานกว่าที่ต้องการถ้าอยู่ในบริเวณอับนิ่ง (Stagnant region) หรืออาจเกิดการลัดวงจร (Short-circuit) ทำให้สารใช้เวลาอยู่ในถังน้อยกว่าที่ต้องการ เช่น ในรูปที่ 2-5 แสดงให้เห็นว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ สารที่เข้ามาอยู่ในบริเวณอับนิ่ง ใช้เวลาอยู่มากกว่าสารในบริเวณอื่น ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการกวนไม่สมบูรณ์ หรือสารทำปฏิกิริยาหลุดออกไปก่อนการเกิดปฏิกิริยา

วิธีการตรวจสอบคือ ใช้เทคนิคการฉีดสารติดตาม (Tracer) แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารติดตามที่ทางออก จากนั้นแปลงเป็นฟังก์ชัน RTD ซึ่งสามารถหาเวลากักน้ำเฉลี่ย (mean residence time) หรือเวลาที่สารติดตามใช้เวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์โดยเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน (variance) ได้ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีวิธีตรวจวัดทั้งแบบใส่ครั้งเดียว (Pulse) และต่อเนื่อง (Step) ดังรูปที่ 2-6

โดยสารติดตามที่ใช้ต้องมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ไม่ดูดซับกับผนังถังปฏิกรณ์ ไม่ต้องระวังเรื่องความเป็นพิษ และวิเคราะห์ได้โดยสะดวก เช่น ฟีนอลเรดหรือเมทีลีนบลู โดยตรวจวัดด้วยพีเอชมิเตอร์ หรือ KCl, NaCl โดยตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า เป็นต้น

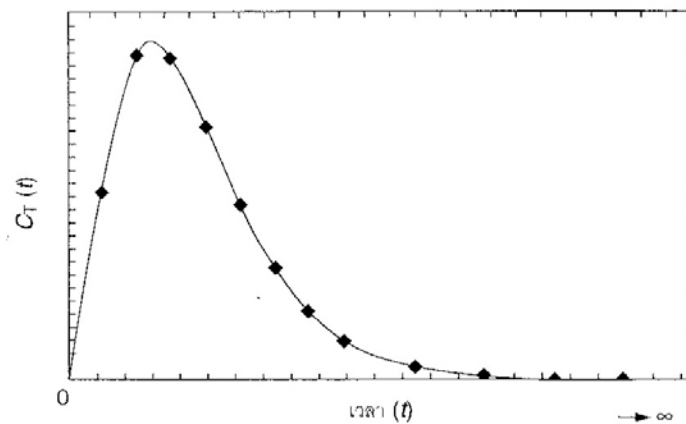


รูปที่ 2-5 รูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์แบบต่างๆ
 (โดยลูกศรแสดงถึงทิศทาง การไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์)
 ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544



รูปที่ 2-6 การฉีดสารติดตามเข้าที่ทางเข้าและการตรวจวัดที่ทางออกของสารติดตาม
 (ก) แบบใส่ครั้งเดียว และ(ข) แบบต่อเนื่อง
 ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544

สมมติว่ามีการฉีดสารติดตามแบบครั้งเดียวด้วยปริมาณ N_T (โมล หรือ กก.) ที่ทางเข้าของถังที่มีสารทำปฏิกิริยาไหลเข้าด้วยอัตราคงที่ v (ล./วินาที) แล้วทำการตรวจความเข้มข้นสารติดตาม $C_T(t)$ จะได้ดังรูปที่ 2-7 จะเห็นว่า $C_T(t)$ จะเพิ่มขึ้นตามเวลา แสดงว่าสารติดตามเริ่มทยอยออกจากเครื่องปฏิกรณ์ จนเมื่อ $t = \infty$ แสดงว่าไม่มีสารติดตามเหลืออยู่ในถังอีกต่อไป



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นสารติดตาม $C_T(t)$ กับเวลาในถัง (t) ในการตรวจสอบการอุดตัน

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544

ดังนั้นปริมาณสารติดตามทั้งหมดที่เติมในถังคือพื้นที่ใต้กราฟของ $vC_T(t)-t$ หรือ

$$\int_0^{\infty} vC_T(t)dt = N_T \quad (2-1)$$

เมื่อปริมาตรของถังคงที่ พื้นที่ใต้กราฟของ $vC_T(t)-t$ จะเท่ากับปริมาณสารติดตามที่ใส่เข้าไป (N_T) และ ณ เวลาใดๆ (t) ให้ค่า n_T คือปริมาณสารติดตามที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ในเวลา t จากกราฟ ถ้ากำหนดให้ $\frac{C_T(t)}{N_T/v} = E(t)$ เมื่อคิดอัตราส่วนของสารติดตาม ณ เวลาใดๆ จะได้

$$\int_0^{t_1} E(t)dt = \frac{n_T}{N_T} \quad (2-2)$$

เนื่องจากกราฟของฟังก์ชัน $E(t)$ เป็นกราฟที่บอกอัตราส่วนสารติดตามที่ใช้เวลาในถัง ดังนั้นกราฟจึงมีลักษณะเดียวกับรูปที่ 2-6 โดยนิยามฟังก์ชันนี้ว่า ฟังก์ชัน RTD ซึ่งกราฟนี้ช่วยทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆทำได้ง่ายกว่ากราฟของ $C_T(t)-t$ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษต่างๆ ที่มีในฟังก์ชัน $E(t)$ โดยเราสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟนี้ได้ด้วยวิธี Trapezoidal method (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, 2544)

ซึ่งฟังก์ชัน $E(t)$ นี้มีคุณสมบัตินำมาคำนวณค่าเรซิเดนซ์โทมเฉลี่ย (Mean Residence Time, \bar{t}) หรือเวลาที่สารติดตามอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เฉลี่ย ซึ่งใช้บ่งบอกการไหลลัด (Short Circuit) ของถังได้ ดังนี้

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \cong \sum t_i E_i(t) \Delta t_i \quad (2-3)$$

โดยที่หากค่า \bar{t} มีค่าต่ำกว่า ระยะเวลาเก็บกักน้ำจากการออกแบบ แสดงว่าระบบเกิดการไหลลัด (Short-circuit) และหากมีค่าสูงกว่า แสดงว่าระบบเกิดบริเวณอับนิ่ง (Stagnant region หรือ Dead-zone) นอกจากนี้ค่าที่ได้ยังสามารถหาค่าความแปรปรวน (variance, σ_t^2) ของข้อมูลได้ดังนี้

$$\sigma_t^2 \cong \sum [t_i^2 E_i(t) \Delta t_i] - \bar{t}^2 \quad (2-4)$$

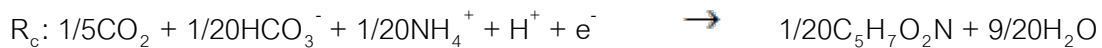
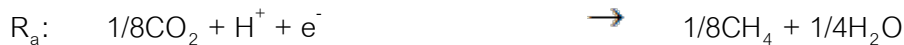
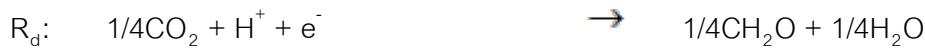
2.9 การประเมินปริมาณก๊าซมีเทนของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีความสำคัญต่อการประเมินปริมาณก๊าซชีวภาพของระบบ จึงจำเป็นต้องศึกษาปริมาณสารสัมพันธ์ในระบบถังกรองไร้ออกซิเจนดังนี้

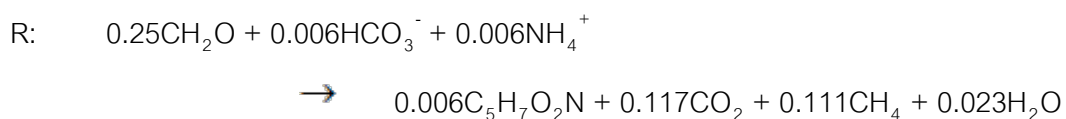
ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ในระบบคือ น้ำตาลทราย ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน โดยกำหนดให้มีความเข้มข้นซีไอดี 1,000 มก./ล. ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า น้ำตาลทราย 1,000 มก./ล. จะมีค่าเทียบเท่ากับซีไอดี 1,000 มก./ล.

ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในระบบคือ คาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการไร้ออกซิเจน

และเซลล์ที่เกิดขึ้นใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน ซึ่งสมการครึ่งเซลล์ทั้งหมดอ้างอิงจาก Metcalf และ Eddy (2004) ดังนี้



สมมติค่าyield ของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจากตารางที่ 2-8 ซึ่งเท่ากับ 0.08 g-VSS/g-COD เมื่อนำมาหาค่า f_e และ f_s จะได้ $f_s = 1.42Y = 0.11$ และ $f_e = 1 - f_s = 0.89$ ดังนั้นเมื่อรวมสมการของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะได้สมการดังนี้



ซึ่งเมื่อเทียบน้ำตาล 1,000 มก. จะเกิดก๊าซมีเทน $\frac{0.111 \times 16 \times 1000}{0.25 \times 30} = 236.8$ มก.

และด้วยอัตราการไหลของน้ำ ($Q = V/t$) เท่ากับ $\frac{65.24}{50} = 1.305$ ล./ชม.

จะประเมินปริมาณก๊าซมีเทนต่อวันได้ ณ อุณหภูมิห้อง (25°C) เท่ากับ 11.33 ลิตรต่อวัน

หากนำสมการการบำบัดนี้มาประยุกต์ใช้กับสภาวะการทำงานจริง กำหนดให้อาคารพื้นที่ไม่เกิน 1,000 ตร.ม. (จากข้อบัญญัติกทม.พ.ศ.2544) มีคนอาศัยประมาณ 100 คน อัตราการใช้น้ำประมาณ 200 ลิตร/คน-วัน และให้ปริมาณซีโอดี 198 กรัม/คน-วัน (Metcalf และ Eddy, 2004)

จะเกิดก๊าซมีเทน $\frac{0.111 \times 16 \times 19800}{0.25 \times 30 \times 100} = 46.89$ กรัม/คน-วัน

คิดเป็นปริมาตร ณ อุณหภูมิห้องได้ $\frac{4688.64 \times 24.45}{16 \times 100} = 71.65$ ลิตร/คน-วัน

ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากการคำนวณนั้น ไม่คุ้มค่าเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยมีค่าเทียบเท่าก๊าซหุงต้ม 3.3 กิโลกรัมคิดเป็นเงิน 68 บาท ซึ่งในความเป็นจริงย่อมจะเกิดปริมาณก๊าซต่ำกว่าที่ประมาณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น แม้ว่าก๊าซมีเทนนี้เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนก็ตาม

2.10 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

ในการหาค่าจลนพลศาสตร์นั้น พารามิเตอร์ที่นิยมใช้เป็นตัวแทนของสารตั้งต้น และปริมาณเซลล์ของจุลินทรีย์ ได้แก่ ซีโอดีละลายน้ำที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable soluble COD) และของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (Volatile Suspended Solids) (Metcalf และ Eddy, 2004)

อัตราการใช้สารตั้งต้นของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไหลตามกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2-5)

$$r_s = \frac{F}{A_c} \cdot \frac{dS}{dL} \quad (2-5)$$

โดยที่ r_s = อัตราการใช้ของสารตั้งต้น (มก./ล.-ชม.)
 F = อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม./ชม.)
 A_c = พื้นที่หน้าตัดการไหล (ตร.ม.)
 dL = ระยะทางการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป (ม.)
 dS = ความเข้มข้นซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไป (มก./ล.)

เนื่องจากระบบถังกรองไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่ให้จุลินทรีย์มาเกาะบนตัวกลาง (Attached growth) ที่มีพื้นที่จำกัด ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-state) เราสามารถสมมติได้ว่าจุลินทรีย์ในระบบเกาะได้เต็มพื้นที่ของตัวกลาง ดังนั้นค่า X ซึ่งเป็นตัวแทนของเซลล์จุลินทรีย์แบบตกตะกอน (Suspended growth) จึงเทียบเท่ากับค่า A_x ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของตัวกลาง จึงนำมาหาค่าอัตราจำเพาะของการใช้สารตั้งต้น (k) ได้ดังสมการ (2-6)

$$r_s = kA_x \quad (2-6)$$

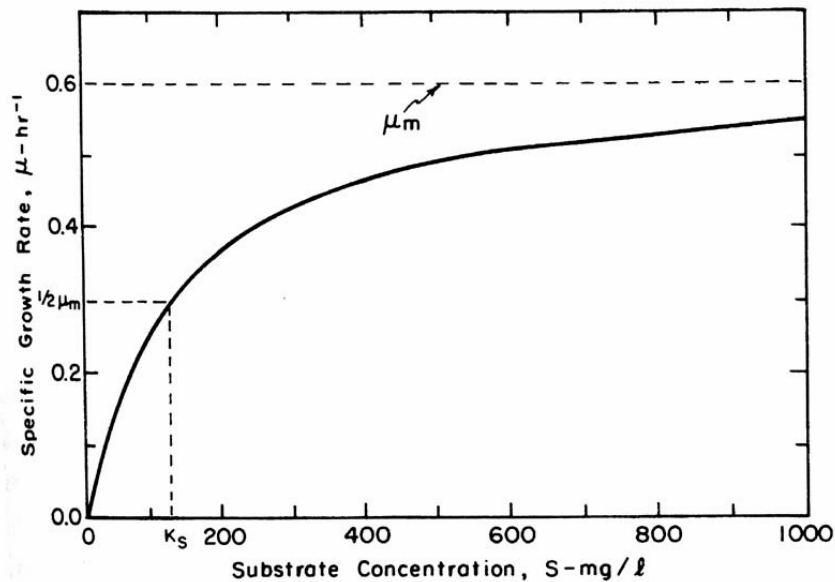
ดังนั้นสมการข้างต้นเมื่อทำเป็นกราฟระหว่าง k กับ C แล้วจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสมการ Monod (2-7) ซึ่งใช้อธิบายอัตราการเติบโตเทียบกับความเข้มข้นของอาหารของจุลินทรีย์ ดังรูปที่ 2-8 โดยสมการ Monod เกิดจากการทดลองซึ่งพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น แล้วช้าลงจนถึงระดับหนึ่งแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งไม่เป็นไปตามปฏิกิริยา

อันดับหนึ่งข้างต้น Monod จึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสับสเตรต (S) กับอัตราจำเพาะการเจริญเติบโต (μ) ได้เป็น สมการ Monod ดังนี้

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{(K_S + S)} \quad (2-7)$$

ซึ่งจะได้ μ_m = เป็นอัตราจำเพาะสูงสุดในการเจริญเติบโต (ชม.⁻¹)

และ K_S = เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นสับสเตรต ณ $\frac{1}{2} \mu_m$



รูปที่ 2-8 กราฟของสมการ Monod

ที่มา: มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2546

จึงอาจสรุปได้ว่า สมการ Monod สามารถจะนำมาใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งสามารถนำค่า μ_m และ K_S ไปใช้ในการออกแบบต่อไปได้ เช่นเดียวกันกับค่า k_m และ K_S ของอัตราการใช้สารตั้งต้น โดยการกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ นั่นคือ การกำหนดค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไปในสมการ (2-5) จากนั้นเราจะใช้กราฟระหว่าง k กับ C เพื่อนำมาหาอัตราจำเพาะของระบบที่ต้องการ แล้วจึงคำนวณตามสมการ (2-5) และ (2-6) เพื่อหาปริมาณของถังกรองไร้ออกซิเจนที่บำบัดน้ำเสียได้ตามประสิทธิภาพที่ต้องการ

ดังตัวอย่างค่าจลนพลศาสตร์สำหรับถังกวนผสมในตารางที่ 2-8 ซึ่งในระบบ และประเภทน้ำเสียที่ต่างกัน ค่าจลนพลศาสตร์ย่อมมีค่าต่างกันเช่นกัน

ตารางที่ 2-8 ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดไร้ออกซิเจน ในถังกวนผสมบวม สำหรับแบคทีเรียแบบ Suspended growth บำบัดชีโอดีละลายน้ำ (Metcalf และ Eddy, 2004)

| Parameter | Unit | Value | |
|---|-------------|-----------|---------|
| | | Range | Typical |
| Solids yield, Y | | | |
| Fermentation | g VSS/g COD | 0.06-0.12 | 0.10 |
| Methanogenesis | g VSS/g COD | 0.02-0.06 | 0.04 |
| Overall combined | g VSS/g COD | 0.05-0.10 | 0.08 |
| Decay coefficient, k_d | | | |
| Fermentation | g/g·d | 0.02-0.06 | 0.04 |
| Methanogenesis | g/g·d | 0.01-0.04 | 0.02 |
| Overall combined | g/g·d | 0.02-0.04 | 0.03 |
| Maximum specific growth rate, μ_m | | | |
| 35°C | g/g·d | 0.30-0.38 | 0.35 |
| 30°C | g/g·d | 0.22-0.28 | 0.25 |
| 25°C | g/g·d | 0.18-0.24 | 0.20 |
| Half-velocity constant, K_s | | | |
| 35°C | mg/l | 60-200 | 160 |
| 30°C | mg/l | 300-500 | 360 |
| 25°C | mg/l | 800-1100 | 900 |

2.11งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน

หัยศักดิ์ ธรรมกุล (2000) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีความเข้มข้นซีไอดี 1,500 มก./ล. ของถังกรองไร้ออกซิเจนปริมาตรประมาณ 7.85 ลิตร โดยใช้ตัวกลางเป็นวงแหวนพลาสติกโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเก็บกักน้ำจาก 0.44-1.96 วัน พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีค่อนข้างใกล้เคียงกัน (74-85%) ซึ่งระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 1.3 วัน โดยบำบัดได้ 84.47%

Bodik และคณะ (2002) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีไอดีรวมกัน 300 มก./ล. ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่ใช้ตัวกลางเป็นหลอดพลาสติก (Plastic Insulating Tube) ปริมาตรถัง 1.5 ลิตร โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 และ 20 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 8-24 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสขึ้นไป ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีมากกว่า 80% โดยระยะเวลาเก็บกักน้ำ 20 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพสูงกว่า

Manariotis และGrigoropoulos (2006) ศึกษากระบวนการถังกรองไร้ออกซิเจนสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นซีไอดีเฉลี่ย 442 มก./ล. และมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 247 มก./ล. โดยแต่ละถังใช้ตัวกลางเป็น เซรามิก (Ceramic Saddle) พลาสติก (Plastic Ring) และหิน (Crushed Stone) เปรียบเทียบระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0.3-3.1 วัน พบว่าทั้งสามถังมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมคือ 1 วัน โดยสามารถบำบัดซีไอดีได้ 74-79% และบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ 95-96% และหากระยะเวลาเก็บกักน้ำต่ำกว่า 0.4 วัน ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเรื่อยๆ

Bodkhe (2008) ทำการดัดแปลงถังกรองไร้ออกซิเจนขนาด 170 ลิตร โดยติดตั้ง Inclined Tube Settler (ITS) เพิ่มก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่ตัวกรอง เพื่อลดการอุดตันในชั้นกรอง และลด SS เลือกใช้ตัวกลางเป็นอิฐดินเผาซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 200 ตร.ม./ลบ.ม. ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนจริงที่มีซีไอดี 350-450 มก./ล. เมื่อทำการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0.125-12 วัน พบว่าระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดคือ 12 ชม. โดยสามารถบำบัดซีไอดีได้ถึง 95%

Gannoun และคณะ (2009) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ โดยใช้ถังหมักแบบกวนผสมหมุน จากนั้นผ่านถึงตกตะกอน เป็นการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ก่อนจะผ่านน้ำใสซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 4,500 มก./ล. เข้าสู่ถังกรองไร้ออกซิเจนปริมาตร 5 ลิตร ซึ่งใช้ตัวกลางพลาสติก Flocor (Corrugated Plastic Ring) เปรียบเทียบระยะเวลาเก็บกักน้ำ ระหว่าง 12-54 ชั่วโมง โดยเดินระบบใน 2 ช่วงอุณหภูมิคือ ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic, 37°C) และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic, 55°C) พบว่าในช่วงเมโซฟิลิก (ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องในไทย) ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมคือ 30 ชั่วโมง โดยบำบัดซีโอดีได้ประมาณ 83% ส่วนในช่วงเทอร์โมฟิลิก ระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 24 ชั่วโมง โดยบำบัดได้ประมาณ 85%

Martin และคณะ (2010) ทำการศึกษาดังกรองไร้ออกซิเจนขนาด 1.5 ลิตร บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นซีโอดี 705 มก./ล. ใช้ตัวกลางพลาสติก (Corrugated Plastic Ring) ทำการศึกษาก่อนอุณหภูมิ 15-17 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเก็บกักน้ำจาก 3.2-17.1 ชั่วโมง พบว่าในช่วงระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10-17.1 ชั่วโมง สามารถบำบัดซีโอดีได้ประมาณ 80%

สรุปได้ว่า สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีประมาณ 85% ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.5-1 วัน สำหรับน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 300-800 มก./ล.

2.11.2 ผลของตัวกลางชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน

Anderson และคณะ (1994) ทำการศึกษาเปรียบเทียบตัวกลาง 2 ชนิดคือ แก้วเผาแบบ Raschig Ring และพลาสติก PVC แบบ Mini Ring ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) 90,000 ตร.ม./ลบ.ม. และ 140 ตร.ม./ลบ.ม. ตามลำดับ ของถังกรองไร้ออกซิเจน โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานนม ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบโดยทำการทดลองในภาชนะบรรจุซีโอดีตั้งแต่ 1-21 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ตัวกลางแก้วเผาซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ดีกว่า ในช่วงภาชนะบรรจุเดียวกัน (2-6 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) และยังสามารถบำบัดได้ดีจนกระทั่งถึงภาชนะบรรจุทุก 14 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จึงมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า 75% นอกจากนั้น สำหรับตัวกลางแก้วเผา เมื่อทำการแปรค่าความเร็วไหลขึ้นของน้ำจาก 5-25 ม./วัน พบว่าระบบยังคงตัว กล่าวคือตะกอนที่เกาะกับตัวกลางไม่หลุดออกมาจนน้ำเสียไม่เกิดการบำบัด (wash-out) เมื่อความเร็วไหลขึ้นไม่เกิน 25 ม./วัน

Show และ Tay (1999) ทำการวิจัยเปรียบเทียบชนิดตัวกลาง Raschig rings 3 ชนิดคือ แก้ว PVC และ PVC เจาะรู เพื่อเพิ่มความพรุนโดยตัวกลางที่ไม่เจาะรู และเจาะรูมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 187 และ 132 ตร.ม./ลบ.ม. ตามลำดับในถังกรองไร้ออกซิเจนขนาด 15 ลิตร บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ (กำหนดให้ไม่มี SS) โดยทำการทดลองที่ซีไอดี 2,500-10,000 มก./ล. และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 15-30 ชม. พบว่า ที่อัตราการระบรทุกซีไอดีที่ 8 ก./ล.-วัน แก้ว และ PVC เจาะรูจะยังคงมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงกว่า 90% เมื่ออัตราการระบรทุกสูงขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง ส่วน PVC ไม่เจาะรู ตั้งแต่ 8 ก./ล.-วัน ขึ้นไป ระบบเริ่มเกิดความล้มเหลว เนื่องจากความพรุนและความขรุขระต่ำของตัวกลางและจากการทดสอบการอุดตันของระบบ ณ อัตราการระบรทุกซีไอดี 16 ก./ล.-วัน พบว่า ทั้งสามชนิดตัวกลาง มีบริเวณอับนิ่ง (Dead space) ถึงประมาณ 50% ของปริมาตรทั้งหมดในถังกรองไร้ออกซิเจน

สรุปได้ว่า ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่า เมื่อนำมาพิจารณากับน้ำหนัก และราคาตัวกลางแล้วพบว่า ตัวกลางพลาสติกมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาล้วนแล้วแต่มีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่น้อยกว่า 100 ตร.ม./ลบ.ม. (Grady และคณะ, 1999) รวมไปถึงตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย (190 ตร.ม./ลบ.ม.)

2.11.3 ผลของอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจน

Yu และคณะ (2000) ทำการประเมินหาผลกระทบของการเวียนน้ำกลับในระบบถังกรองไร้ออกซิเจน ด้วยการใช้สมการอย่างง่าย เปรียบเทียบกับการทดลอง ระหว่างน้ำเสียชุมชนกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถั่วเหลือง พบว่าในน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นซีไอดี 260-540 มก./ล. อัตราการเวียนน้ำกลับที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง แต่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถั่วเหลืองที่มีความเข้มข้นซีไอดี 7,520-11,450 มก./ล. อัตราการเวียนน้ำกลับที่มากขึ้น แต่ยังไม่เกินค่าอัตราการเวียนน้ำกลับสูงสุด ($r_{\text{threshold}}$) ประมาณ 10-16 เท่า ขึ้นอยู่กับภาวะบรทุกสารอินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น แต่หากเกินค่าอัตราดังกล่าว ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง และทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้ที่อัตราการเวียนน้ำกลับประมาณ 2-6 เท่า

Libeiro และคณะ (2001) ทำการศึกษาเปรียบเทียบความเร็วน้ำไหลขึ้น โดยการเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำกลับของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน ในการรองรับสภาวะวิกฤต (Shock load) ในบำบัดกรดโอเลอิก ซึ่งเป็นกรดที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด และยังทำให้จุลชีพเกิดการ wash-out อีกด้วย โดยถังกรองไร้ออกซิเจนบรรจุตัวกลางพลาสติก PVC แบบ Raschig Ring เติมน้ำในระบบในสภาวะปกติคือ ความเข้มข้นซีไอดีเข้า 4,000 มก./ล. และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 16 ชั่วโมง

ให้ระบบเข้าสู่สภาวะวิกฤตทั้งในด้านความเข้มข้นซีไอดี (Organic shock, 20,000 มก./ล.) และด้านระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic shock, 3.2 ชั่วโมง) โดยเปรียบเทียบความเร็วน้ำไหลขึ้นจาก 0.12-0.41 ม./ชม. พบว่าความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.21 ม./ชม.

สรุปได้ว่า การเวียนน้ำกลับจะส่งผลดีกับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง แต่ไม่เหมาะกับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำและการเวียนน้ำยังเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นของระบบซึ่งอาจช่วยลดการอุดตันได้

2.11.4 การใช้สารติดตามในการตรวจสอบถังปฏิกรณ์

Show และTay (1999) ทำการตรวจสอบการอุดตันของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน ณ เวลาที่ระบบไม่มีเชื้อ และ ที่อัตราภาระบรรทุกซีไอดี 16 ก./ล.-วัน โดยเลือกใช้ Rhodamine B เป็นสารติดตาม ฉีดสารแบบพัลส์ ตรวจวัดด้วยการวัดค่าสีโดย Fluorometer ความถี่ในการวัดคือ ทุก 30 นาทีในช่วง 12 ชั่วโมงแรก (ระยะเวลาเก็บกักที่ออกแบบ 15 ชั่วโมง) จากนั้นเก็บทุก 1 ชั่วโมงในช่วงที่เหลือ พบว่า ทั้งสามชนิดตัวกลาง มีบริเวณอับนิ่ง (Dead space) ถึงประมาณ 50% ของปริมาตรทั้งหมดในถังกรองไร้ออกซิเจน

Li และคณะ (2008) ทำการทดสอบการอุดตันของระบบเอสปีอาร์โดยเลือกใช้ NaCl เป็นสารติดตาม ฉีดสารแบบพัลส์ ตรวจวัดด้วยการวัดค่าความนำไฟฟ้า ถังปฏิกรณ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำ 6 ชม. และมีขนาดประมาณ 252 ลิตร จากการทดสอบพบว่า ความเข้มข้นของ NaCl ที่เหมาะสมคือ 1,000 มก./ล. และช่วงที่เหมาะสมในการวัดคือ ทุก 15 นาที

สรุปได้ว่า การฉีดสารติดตามแบบพัลส์แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบบถังกรองไร้ออกซิเจน และการใช้สารติดตามเป็น NaCl เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

2.11.5 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

Ahn และ Forster (2000) ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการใช้สารตั้งต้นสูงสุด (Maximum COD utilization rate) ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนระหว่างที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (Mesophilic) และ 55 องศาเซลเซียส (Thermophilic) โดยบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ใช้ตัวกลางพลาสติกประเภท Raschig Rings เลือกใช้สมการ Stover-

Kincannon ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสมีอัตราการใช้สารตั้งต้นสูงสุดสูงกว่าที่ 55 องศาเซลเซียสถึง 15 เท่า และสมการ Stover-Kincannon เหมาะสมที่จะใช้ในการประเมินค่าจลนพลศาสตร์ของระบบนี้

Perez และคณะ (2001) ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Thermophilic) ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียโรงงานไวน์ความเข้มข้นซีไอดี 15,000 มก./ล. ใช้ตัวกลางพลาสติก (Corrugated Plastic Tube) โดยใช้ 2 ชุดการทดลองซึ่งมีอัตราส่วนน้ำเสียต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่างกัน โดยศึกษาหาปริมาณจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลาง (Attach Biomass Concentration, VS_{att}) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของโรเมโร (Romero kinetic model, 1991) ซึ่งสรุปได้ว่า ชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนน้ำเสียต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์มากกว่า ช่วยให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่า และให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่า โมเดลทางคณิตศาสตร์ของโรเมโรสามารถนำมาประเมินค่าจลนพลศาสตร์ของระบบได้ และพบว่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เกาะกับตัวกลางที่วัดได้มีค่าสูงกว่าจากการคำนวณ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีจุลินทรีย์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (non-active biomass) อยู่เป็นจำนวนมาก

สรุปได้ว่า ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนมีสมการทางคณิตศาสตร์หลายชนิดที่เหมาะสม เช่น สมการ Stover-Kincannon และ Romero นอกเหนือจากสมการ Monod และ First-order ที่เป็นสมการพื้นฐานของระบบไร้ออกซิเจนทั่วไป

บทที่ 3

แผนการทดลอง และการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการด้วยชุดถังกรองไร้ออกซิเจนจำนวน 3 ชุด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วนดังสรุปได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3-1 มีรายละเอียดคือ

การทดลองส่วนที่ 1 การหาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ทำการเดินระบบถังกรองไร้ออกซิเจนทั้ง 3 ชุดพร้อมกัน ในสภาวะที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากันโดยถือว่าการดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 6 จุดต่อชุดถังกรองตามแนวระดับ เพื่อเป็นตัวแทนระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงตามลำดับ (เทียบเท่ากับจุดเก็บตัวอย่าง A-F ดังรูปที่ 3-2) เดินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของแต่ละชุดถังกรอง

การทดลองส่วนที่ 2 การหาผลของอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

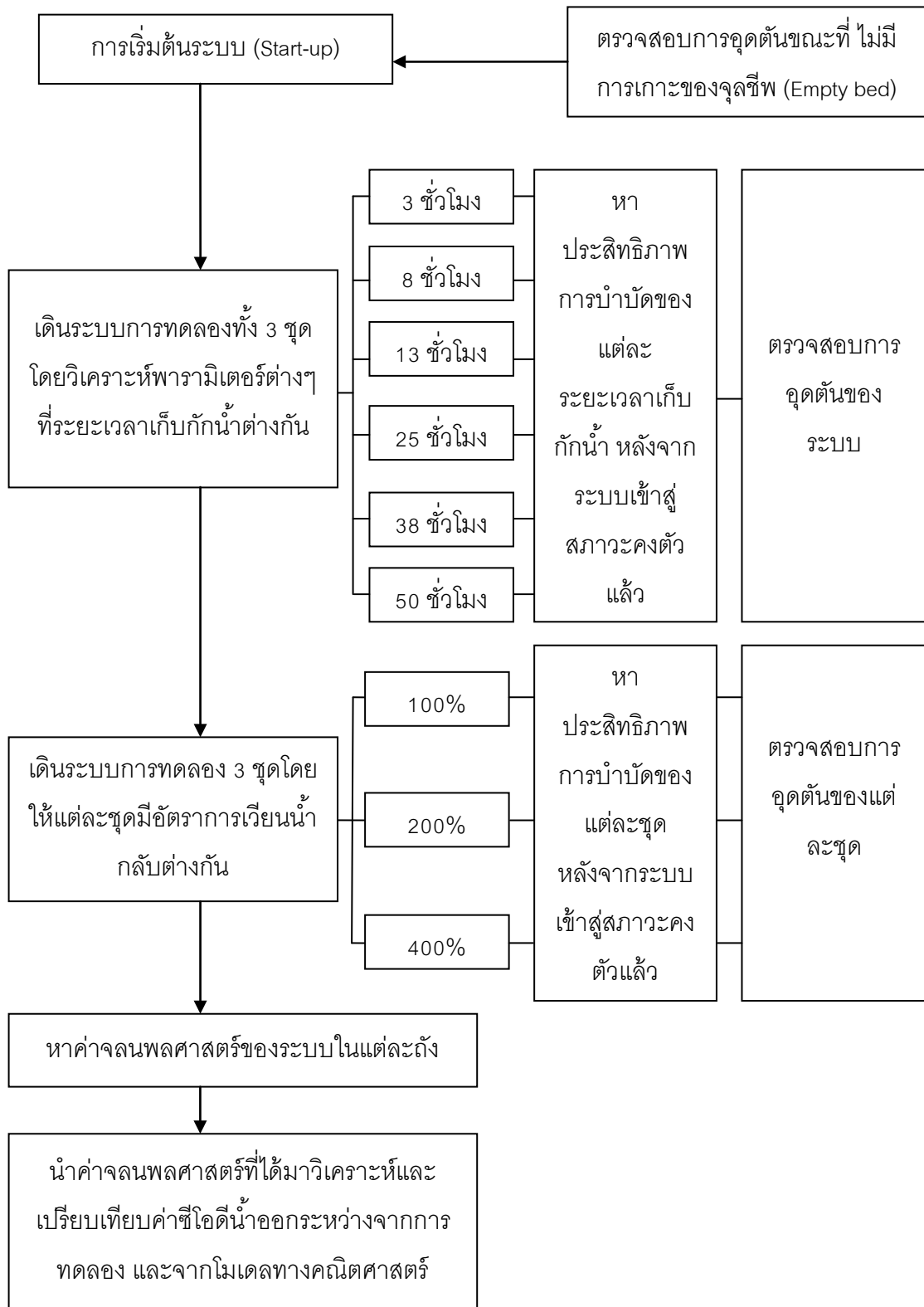
ทำการเดินระบบถังกรองไร้ออกซิเจนทั้ง 3 ชุด โดยในแต่ละชุดมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่าของอัตราน้ำไหลเข้า เก็บตัวอย่างทั้ง 6 จุดเช่นเดิมเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าจลนพลศาสตร์ในการทดลองส่วนที่ 4 ต่อไป เดินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของแต่ละชุดจากระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองส่วนที่ 1 นอกจากนี้ทำการปรับปริมาณการเติมต่างให้กับระบบในแต่ละชุดถังกรองไร้ออกซิเจนจนกระทั่งระบบมีพีเอชเท่ากับระบบเมื่อตอนยังไม่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ และทดสอบประสิทธิภาพของระบบเมื่อไม่มีการเติมต่างให้กับระบบเลย

การทดลองส่วนที่ 3 การตรวจสอบการดูดตันของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

ทำการฉีดสารติดตามตรวจสอบการดูดตันของถังกรองไร้ออกซิเจน ในขณะที่ถังกรองยังไม่มีการเกาะของจุลินทรีย์ (วันที่ 0) จากนั้นทำการตรวจสอบอีกครั้งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งในการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาระยะเวลาที่สารติดตามอยู่ในถังเฉลี่ย (Mean Residence Time) ของชุดถังกรองไร้ออกซิเจน และความแปรปรวนของข้อมูล

การทดลองส่วนที่ 4 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความจลนพลศาสตร์ของระบบ เช่น ค่าซีไอดี ปริมาณตัวกลาง อัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น มาหาค่าจลนพลศาสตร์ โดยอ้างอิงสมการ Monod (ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.10) จากนั้นนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าซีไอดีน้ำออกเปรียบเทียบกับค่าที่หาได้จากโปรแกรม AQUASIM 2.1b เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบต่อไป



รูปที่ 3-1 แผนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย

3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือ

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
2. ตู้บ่มซีไอดี 150 องศาเซลเซียส
3. ชุดปั๊มสุญญากาศ และขวดกรอง
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องวัดพีเอช
6. เต้าไฟฟ้า
7. เครื่องกวนแม่เหล็ก
8. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
9. เทอร์โมมิเตอร์
10. นาฬิกาจับเวลา
11. กระจกกรอง GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
12. หลอดย้อยสลายน
13. กระจกตวง
14. ปีกเกอร์
15. บิวเรต
16. ปิเปต
17. โปรแกรม Microsoft Excel
18. โปรแกรม AQUASIM 2.1b

3.2.2 สารเคมี

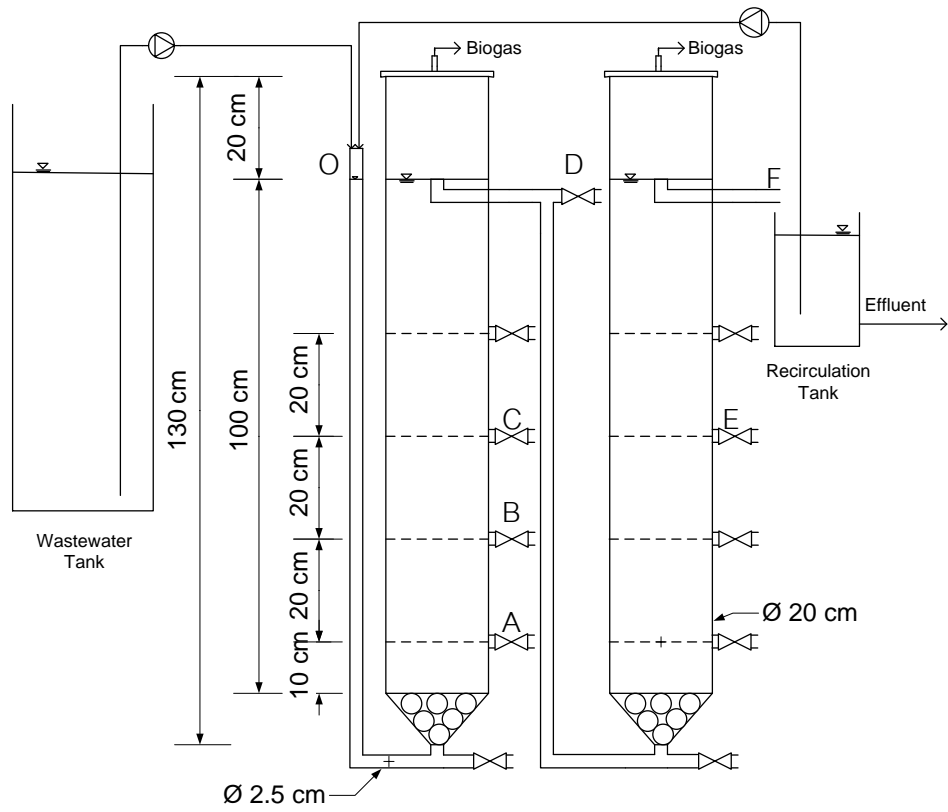
1. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 0.1 N
2. สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.025 N
4. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์
5. สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.05 N
6. สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.05 N
7. สารละลายเกลือ (NaCl)
8. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)

9. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)
10. แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)
11. โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 2H_2O$)
12. นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$)
13. ซิงก์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
14. คอปเปอร์คลอไรด์ ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$)
15. แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4 \cdot H_2O$)
16. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)
17. กรดบอริก (H_3BO_3)
18. น้ำตาลทรายขาว ตรามิตรผล
19. โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ถังกรองไร้ออกซิเจน

เดินระบบถังกรองไร้ออกซิเจนจำนวน 3 ชุด ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยถังปฏิกรณ์ในแต่ละชุดทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตรต่อกันแบบอนุกรม 2 ถัง ชุดถังกรองมีปริมาตรโดยรวมประมาณ 72 ลิตร ป้อนน้ำเข้าด้วยเครื่องสูบน้ำแบบ Diaphragm ทางด้านล่างของถัง เพื่อให้น้ำไหลขึ้นผ่านตัวกลางพลาสติกที่บรรจุอยู่เต็มพื้นที่ภายในชุดถังกรองมีท่อเก็บตัวอย่างตามระดับความสูง 0.1 0.3 0.5 และ 1 เมตรจากด้านล่างของถัง (จุด A-F) เพื่อเป็นตัวแทนของระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงดังรูปที่ 3-2 บริเวณด้านบนของชุดถังกรองมีท่อระบายก๊าซออกจากระบบ และที่บริเวณปลายทางของถังกรองที่สองมีถังเก็บน้ำออกซึ่งใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำออกและเวียนน้ำกลับ โดยระบบท่อลำเลียงในระบบทั้งหมดใช้ท่อ PVC ขนาด 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3-2 ถังกรองไร้ออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัย (ภาพแสดง 1 ชุดการทดลอง)



| | |
|------------------|------------------------------------|
| Type | Randomflow configuration |
| Material | Polyethylene (PE) |
| Size | Diameter 70 mm Height 22 mm |
| Specific Surface | 190 m ² /m ³ |
| Void Ratio | 90% |

รูปที่ 3-3 ลักษณะของตัวกลางพลาสติก Model R-190 จากบริษัท Aqua Nishihara Co. Ltd.

ตัวกลางพลาสติก

ตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยเป็นชนิด Random flow ทำจาก Polyethylene รุ่น Model R-190 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Aqua Nishihara Corporation Limited ตัวกลางมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. (ดังรูปที่ 3-3) โดยทำการบรรจุจำนวน 620 ชิ้นต่อชุด หรือ 310 ชิ้นต่อถัง คิดเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งสิ้น 4,377.6 ตร.ม.

น้ำเสีย และหัวเชื้อจุลินทรีย์

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมขึ้นจากน้ำตาลทรายแล้วปรับความเข้มข้นจนมีค่าซีโอดี 1,000 มก./ล. เพื่อให้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นน้ำเสียชุมชนและเติมสารอาหาร (Nutrient) ให้ได้ค่า COD:N:P เป็น 150:1.1:0.2 ตามค่าที่แนะนำโดย Speece (1996) ปรับพีเอชด้วย NaHCO₃ ปริมาณ 1.5 เท่าของปริมาณน้ำตาลที่ใช้ เพื่อให้ได้พีเอชอยู่ที่ 6.6-6.8 ปริมาณกรดไขมันระเหย 50-80 มก.กรดอะซิติก/ล. และค่าความเป็นด่าง 1,000 มก./ล. ของหินปูน ตลอดความยาวของถังปฏิกรณ์ฯ ส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบ (Start-up) ใช้กากตะกอนระบบไร้ออกซิเจนจากบริษัท แชน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

การทดลองส่วนที่ 1 การหาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

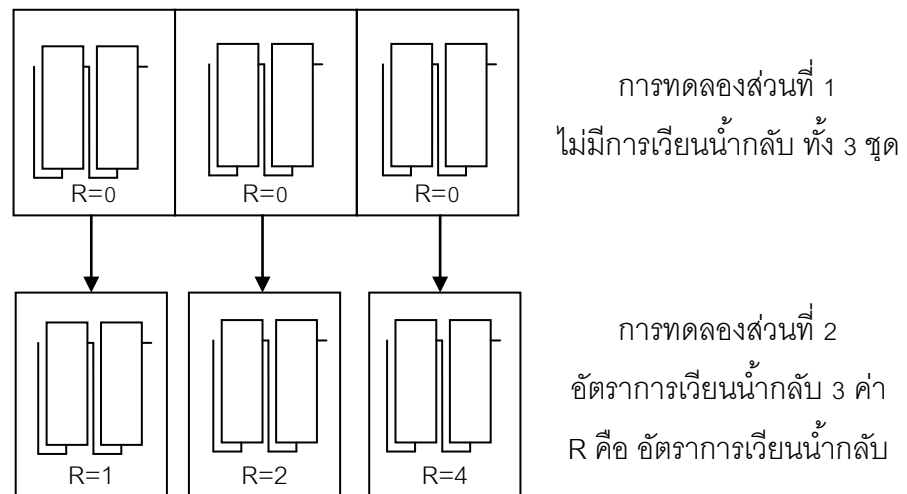
การทดลองในส่วนนี้ เป็นการหาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเดินระบบถังกรองไร้ออกซิเจนทั้ง 3 ชุดภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งในสภาวะนี้ยังไม่มีภาระหมุนเวียนน้ำเสีย โดยถือว่าการดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง 3 ชุดการทดลองแบ่งจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 จุด (A-F) เพื่อเป็นตัวแทนระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงตามลำดับโดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำประมาณ 1.44 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากปริมาตรของถัง เก็บตัวอย่างจากจุดเก็บน้ำที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว กล่าวคือความเข้มข้นซีไอไดออกซิเจนที่จุดเก็บตัวอย่างทั้ง 6 คอนข้างคงที่แล้ว จึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆเป็นไปดังตารางที่ 3-3 โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ศึกษาดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1

| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง/เครื่องมือวิเคราะห์ |
|----------------------------|---|
| 1. ซีไอดีน้ำเสียสังเคราะห์ | 1,000 มก./ล. |
| 2. ชนิดตัวกลาง | PE (Random flow) พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. |
| 3. ปริมาณตัวกลาง | เต็มพื้นที่สัมผัสน้ำ |
| 4. อุณหภูมิ | อุณหภูมิห้อง |
| 5. อัตราการไหลน้ำเสีย | 1.44 ล./ชม. |
| 6. อัตราการเวียนกลับ | ไม่มีการเวียนน้ำกลับ |
| 7. ปริมาณต่างที่ใส่น้ำเข้า | 1.5 ก./ล. |
| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ | 3 8 13 25 38 และ 50 ชม. |
| ตัวแปรตาม | วิธีการวิเคราะห์ |
| 1. ซีไอดี และซีไอดีกรอง | วิธีฟลักซ์ปิดแบบไตเตรท |
| 2. ของแข็งแขวนลอย | วิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °ซ |
| 3. พีเอช | เครื่องวัดพีเอช |
| 4. กรดระเหยง่าย | วิธีไตเตรท |
| 5. ความเป็นต่าง | วิธีไตเตรท |

การทดลองส่วนที่ 2 การหาผลของอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

เดินระบบการทดลองต่อเนื่องจากส่วนที่ 1 โดยใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีดีที่สุดมาใช้ในการทดลองส่วนที่ 2 โดยใช้ผลการทดลองดังกล่าวในการทดลองส่วนที่ 1 เป็นอัตราการเวียนน้ำกลับ 0 เท่า ปรับอัตราการเวียนน้ำกลับของชุดถังกรองทั้งสามเป็น 1 2 และ 4 เท่า ดังรูปที่ 3-4 โดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบ Diaphragm สูบน้ำจากถังเวียนน้ำกลับซึ่งมีไว้รับน้ำออกด้วยอัตราการไหลคงที่ 1.44 2.88 และ 5.76 ลิตรต่อชั่วโมงตามลำดับ กลับเข้าสู่ชุดถังกรองบริเวณท่อน้ำเข้า ขณะที่ยังคงอัตราการไหลน้ำไหลจากถังน้ำเข้าอยู่ที่ 1.44 ลิตรต่อชั่วโมง เช่นเดิม เก็บตัวอย่างที่ระยะต่างๆ เช่นเดียวกับในการทดลองส่วนที่ 1 เนื่องมาจากต้องนำมาหาค่าจลนพลศาสตร์ต่อในการทดลองส่วนที่ 4 จนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วง 6.6-6.8 ด้วยการปรับการเติมต่างในทุกระยะการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปดังตารางที่ 3-3 เช่นเดียวกับในการทดลองส่วนที่ 1 โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ศึกษาดังตารางที่ 3-2 นอกจากนี้ทำทดสอบประสิทธิภาพของระบบเมื่อไม่มีการเติมต่างให้กับระบบเลย



รูปที่ 3-4 รูปแบบชุดการทดลองทั้ง 3 ชุด

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2

| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง/เครื่องมือวิเคราะห์ |
|----------------------------|--|
| 1. ซีไอดีน้ำเสียสังเคราะห์ | 1,000 มก./ล. |
| 2. ชนิดตัวกลาง | PE (Random flow) พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. |
| 3. ปริมาณตัวกลาง | เต็มพื้นที่สัมผัสน้ำ |
| 4. อุณหภูมิ | อุณหภูมิห้อง |
| 5. อัตราการไหลน้ำเสีย | 1.44 ล./ชม. |
| 6. ระยะเวลาเก็บกักน้ำ | ระยะเวลาที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนที่ 1 |
| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| อัตราการเวียนกลับ | 0 1 2 และ 4 เท่า |
| ปริมาณต่างที่ใส่น้ำเข้า | 1-1.5 ก./ล. (1เท่า) 0.75-1.5 ก./ล. (2เท่า) และ 0.58-1.5 ก./ล. (4เท่า) |
| ตัวแปรตาม | วิธีการวิเคราะห์ |
| 1. ซีไอดี และซีไอดีกรอง | วิธีฟลักซ์ปิดแบบไตเตรท |
| 2. ของแข็งแขวนลอย | วิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °ซ |
| 3. พีเอช | เครื่องวัดพีเอช |
| 4. กรดระเหยง่าย | วิธีไตเตรท |
| 5. ความเป็นด่าง | วิธีไตเตรท |

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่

| พารามิเตอร์ | จุดเก็บตัวอย่าง | | | | | | | ความถี่ |
|----------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|----------------------------|
| | O | A | B | C | D | E | F | |
| พีเอช | / | / | / | / | / | / | / | 3-4 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| อุณหภูมิ | / | / | / | / | / | / | / | 3-4 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| ซีไอดี และซีไอดีกรอง | / | / | / | / | / | / | / | 1 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| ของแข็งแขวนลอย | / | / | / | / | / | / | / | 1 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| กรดระเหยง่าย | / | / | / | / | / | / | / | 1 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| ความเป็นด่าง | / | / | / | / | / | / | / | 1 ครั้งต่อสัปดาห์ |
| ความนำไฟฟ้า | / | | | | | | / | เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว |

*หมายเหตุ : O หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ทางน้ำเข้า

A หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมง

B หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 ชั่วโมง

C หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 13 ชั่วโมง

D หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 25 ชั่วโมง

E หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 38 ชั่วโมง

F หมายถึง จุดเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง

การทดลองส่วนที่ 3 การตรวจสอบการอุดตันของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

การทดลองส่วนนี้เป็นการตรวจสอบการอุดตัน ซึ่งจะมีการตรวจสอบทั้งหมด 3 ครั้งคือ ก่อนเริ่มการทดลองส่วนที่ 1 ขณะที่ตัวกลางยังไม่มีจุลชีพ (Empty bed) สิ้นสุดการทดลองส่วนที่ 1 และสิ้นสุดการทดลองส่วนที่ 2 โดยปรับการเดินระบบให้ไม่มีการเวียนน้ำกลับในทั้งสามการตรวจสอบ ใช้สารติดตาม (Tracer) คือ น้ำเกลือ (NaCl) ปล่อยสารติดตามแบบพัลส์ บริเวณทางน้ำเข้า จากนั้นวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) บริเวณทางน้ำออก หลังจากนั้นนำค่าความนำไฟฟ้ามาทำเป็น กราฟ RTD เพื่อนำมาหาระยะเวลาที่สารติดตามอยู่ในถังเฉลี่ย (Mean Residence Time) และค่าความแปรปรวนของถังกรองไร้ออกซิเจน

การทดลองส่วนที่ 4 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

นำค่าซีโอดี ปริมาณตัวกลาง อัตราการไหลของน้ำ มาหาค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้ออกซิเจน โดยอ้างอิงสมการ Monod และ First-order แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เมื่อได้ค่าจลนพลศาสตร์ k_m และ K_s ดังหัวข้อ 2.10 นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีน้ำออกเปรียบเทียบกับค่าที่หาได้จากโปรแกรม AQUASIM 2.1b จากนั้นนำข้อมูลทั้งจากการคำนวณ และจากการใช้แบบจำลองทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ โดยนำข้อมูลของซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากแบบจำลอง มาใช้ทดสอบความคลาดเคลื่อน ด้วยสมการความผิดพลาดมาตรฐานจากการประมาณค่า (Standard Error of Estimation : SEE) (Holman, 2001) โดยมีสมการดังนี้

$$SEE = \left[\frac{\sum (C_i - \hat{C}_i)^2}{n-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-1)$$

โดยที่ C_i = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 \hat{C}_i = ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
 N = จำนวนข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด

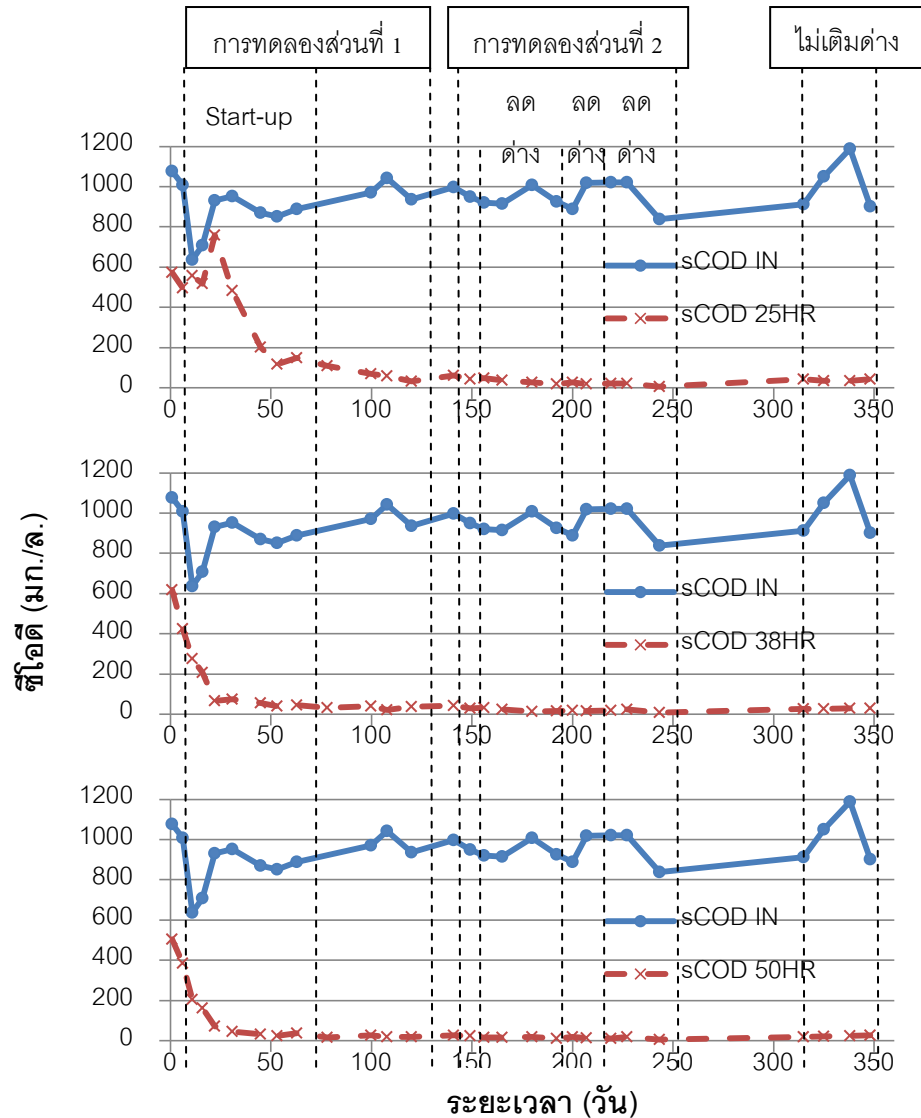
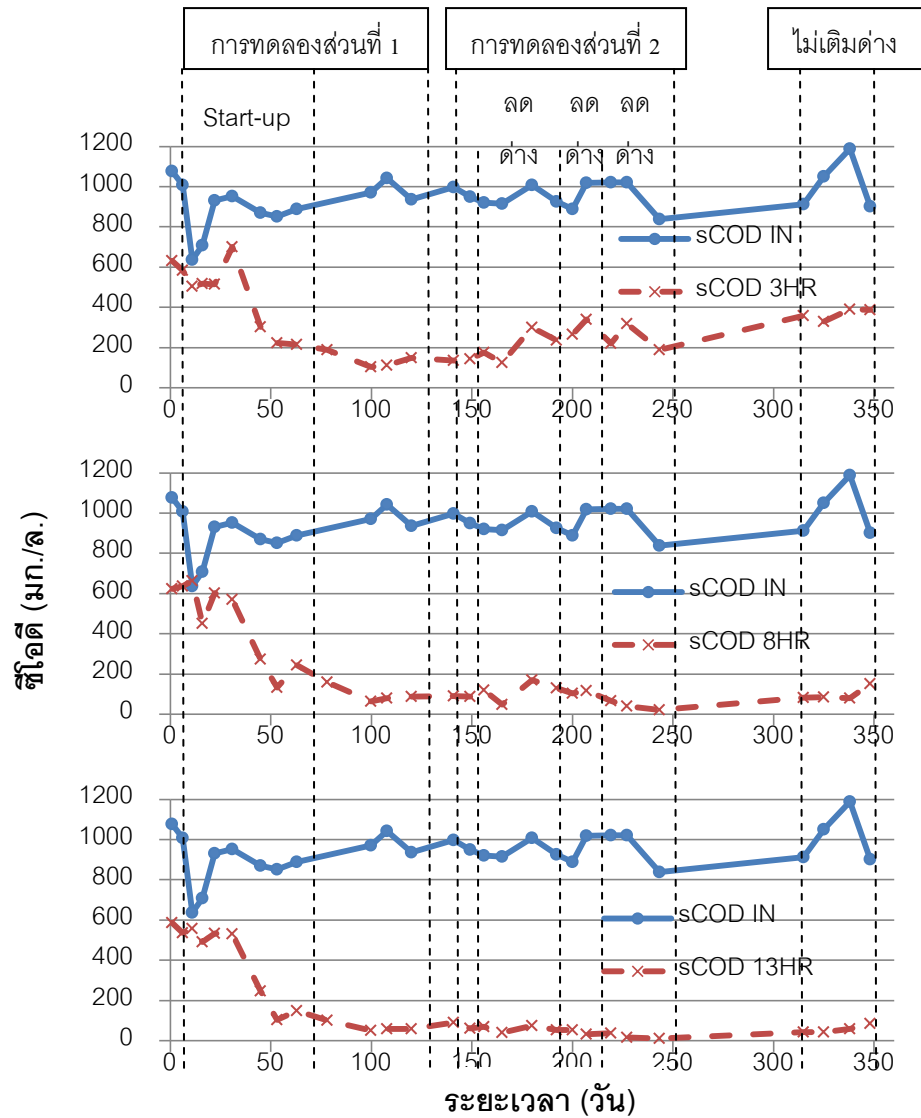
ค่าที่ได้จากสมการควรมีค่าน้อยกว่า 10% ของความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นจากนั้นจึงสรุปผลที่ได้และวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

บทที่ 4

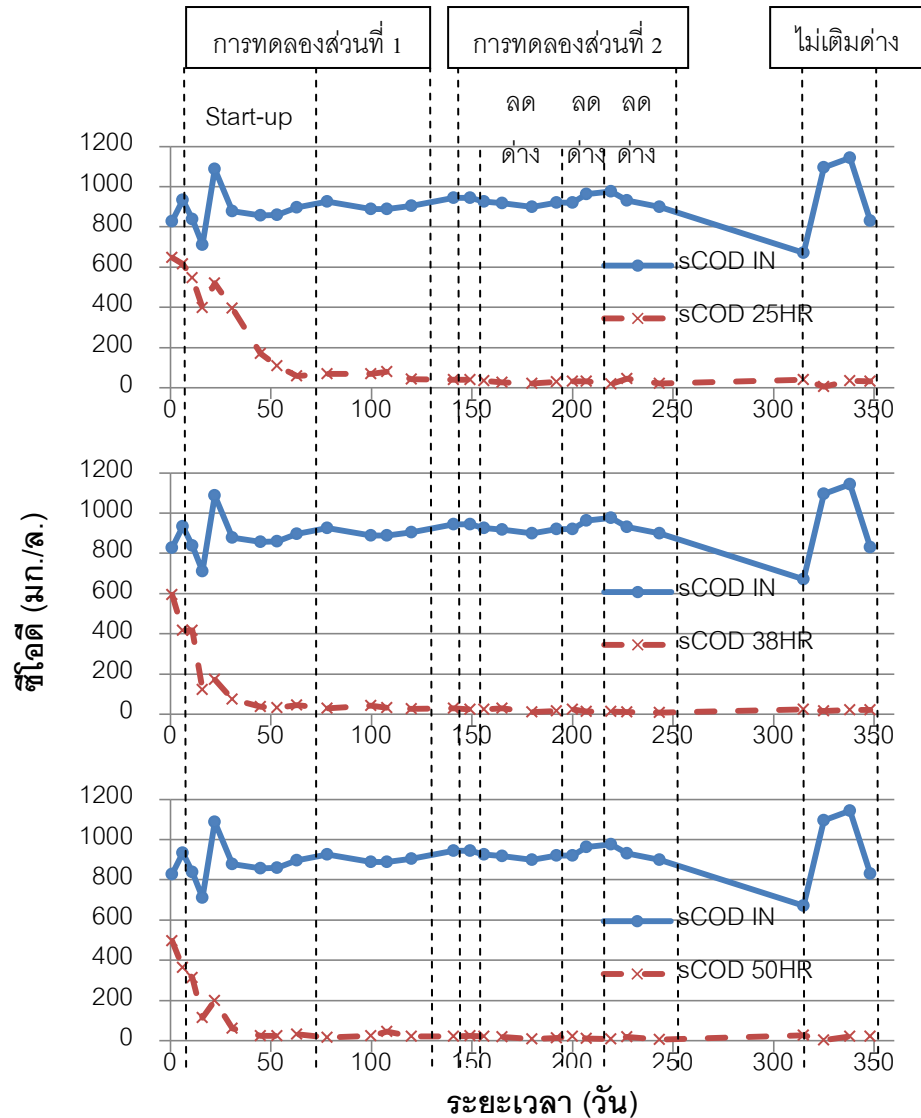
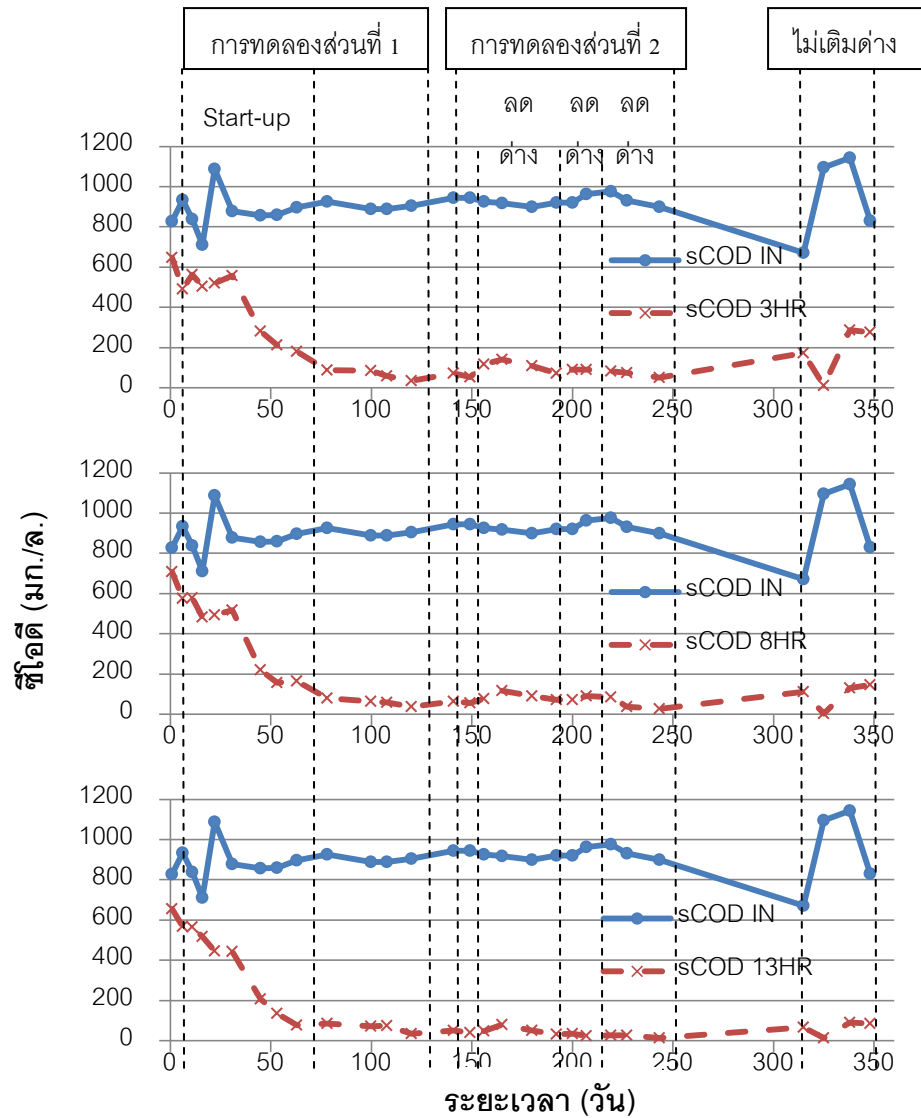
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

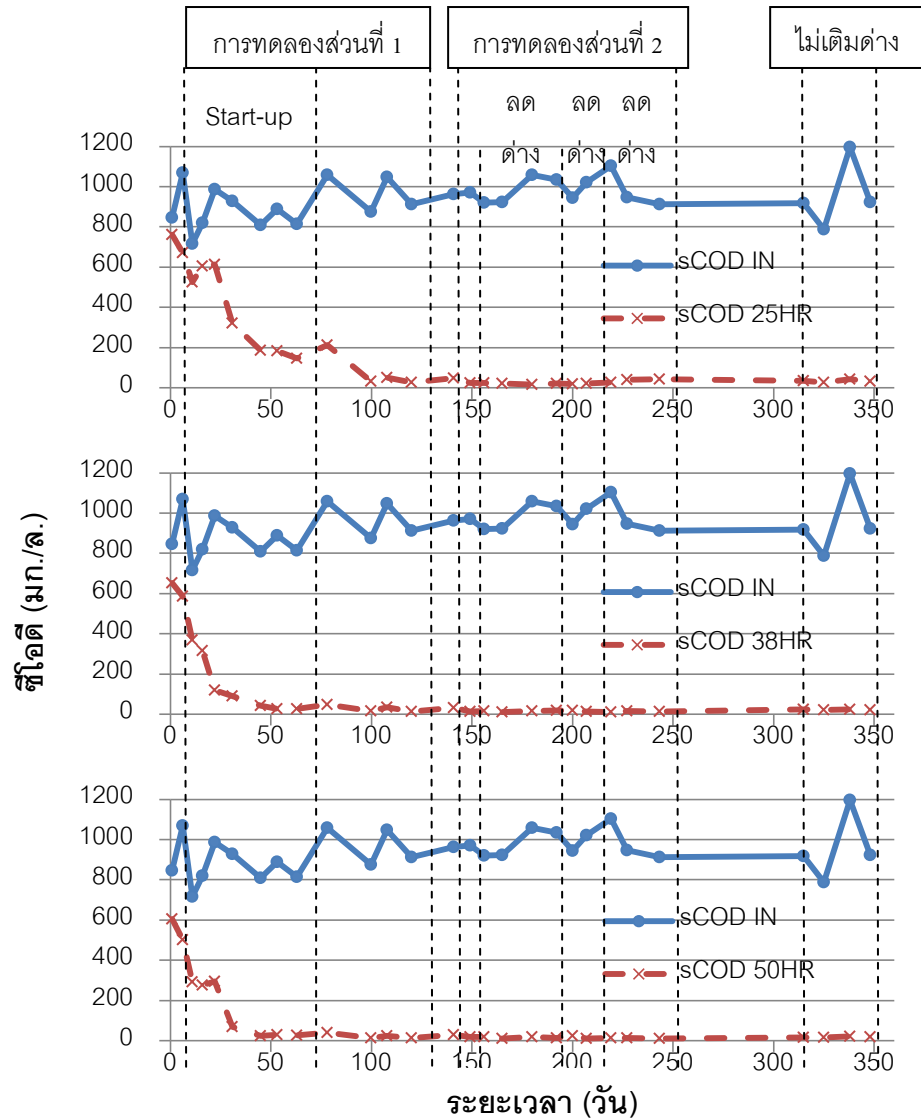
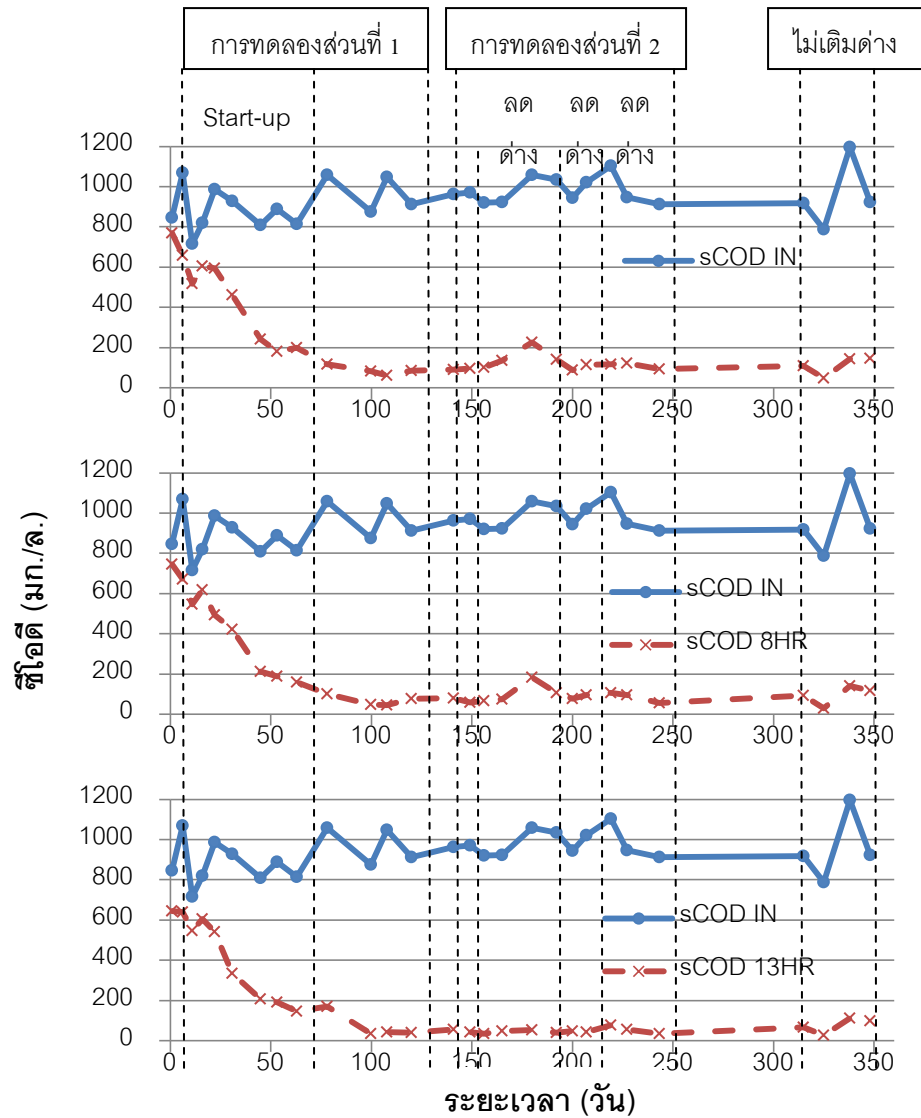
งานวิจัยนี้ใช้เวลาทั้งหมด 357 วัน โดยแบ่งช่วงเวลาในการดำเนินระบบดังนี้ ก่อนทำการเดินระบบทำการตรวจสอบการอุดตันทั้ง 3 ชุดการทดลอง จากนั้นเริ่มต้นเดินระบบโดยใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์ลงไปประมาณ 8 ลิตรในทุกชุด แบ่งเป็นถังละ 4 ลิตร เป็นระยะเวลา 60 วัน จากนั้นจึงระบายตะกอนออกจากระบบ เนื่องจากต้องการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดจากเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับตัวกลางเท่านั้น จากนั้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวในวันที่ 99 เดินระบบต่อไปจนถึงวันที่ 120 จากนั้นจึงตรวจสอบการอุดตันทั้ง 3 ชุดอีกครั้งในวันที่ 121-136 จากนั้นจึงเริ่มเดินระบบโดยเพิ่มการเวียนน้ำกลับโดยแต่ละชุดมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่าตามลำดับ ต่อมาเริ่มลดปริมาณต่างที่ใส่ให้กับระบบในวันที่ 149 192 และ 216 จนพีเอชในระบบกลับมาเท่ากับเมื่อยังไม่มีการเวียนน้ำ จากนั้นจึงตรวจสอบการอุดตันอีกครั้งในช่วงวันที่ 250-306 และลดต่างลงอีกครั้งจนไม่มีการเติมต่างในช่วงสุดท้าย (วันที่ 307-357) โดยภาพรวมของการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 4-1 ถึง 4-6



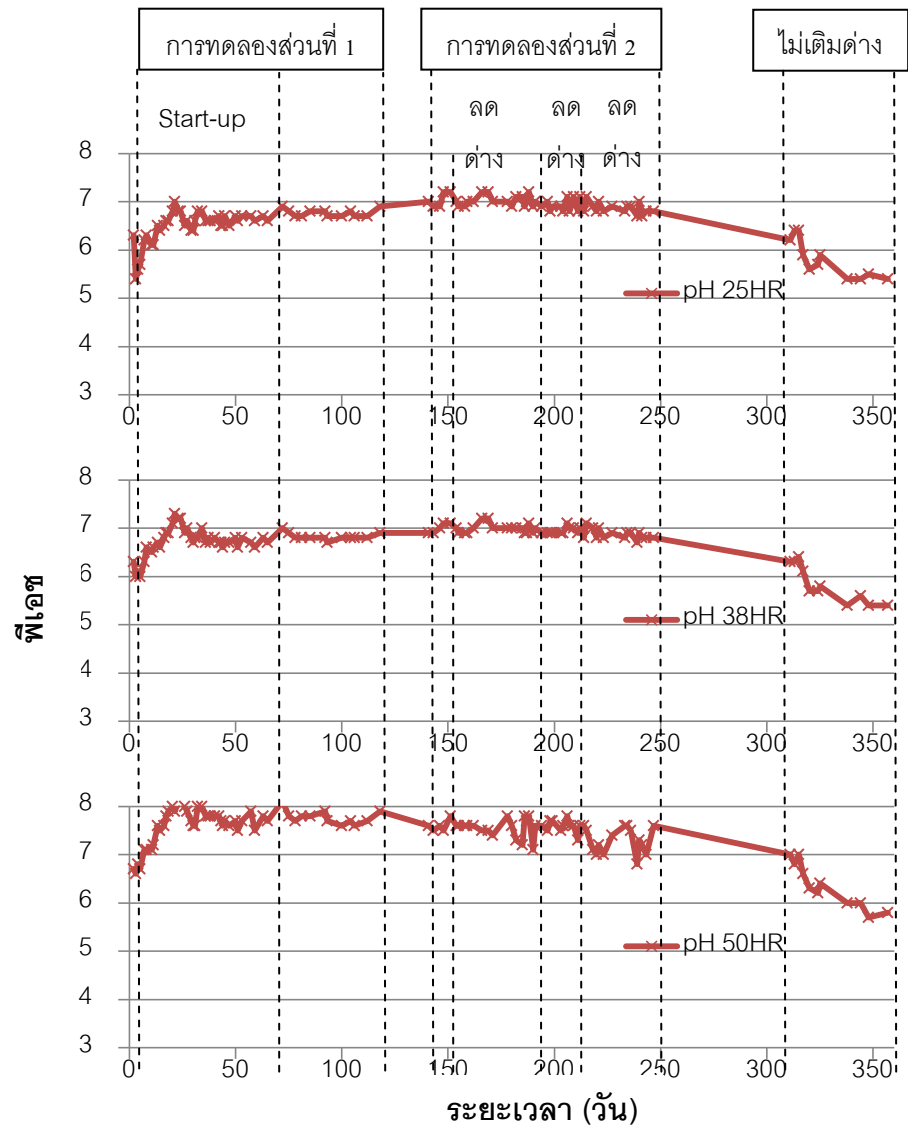
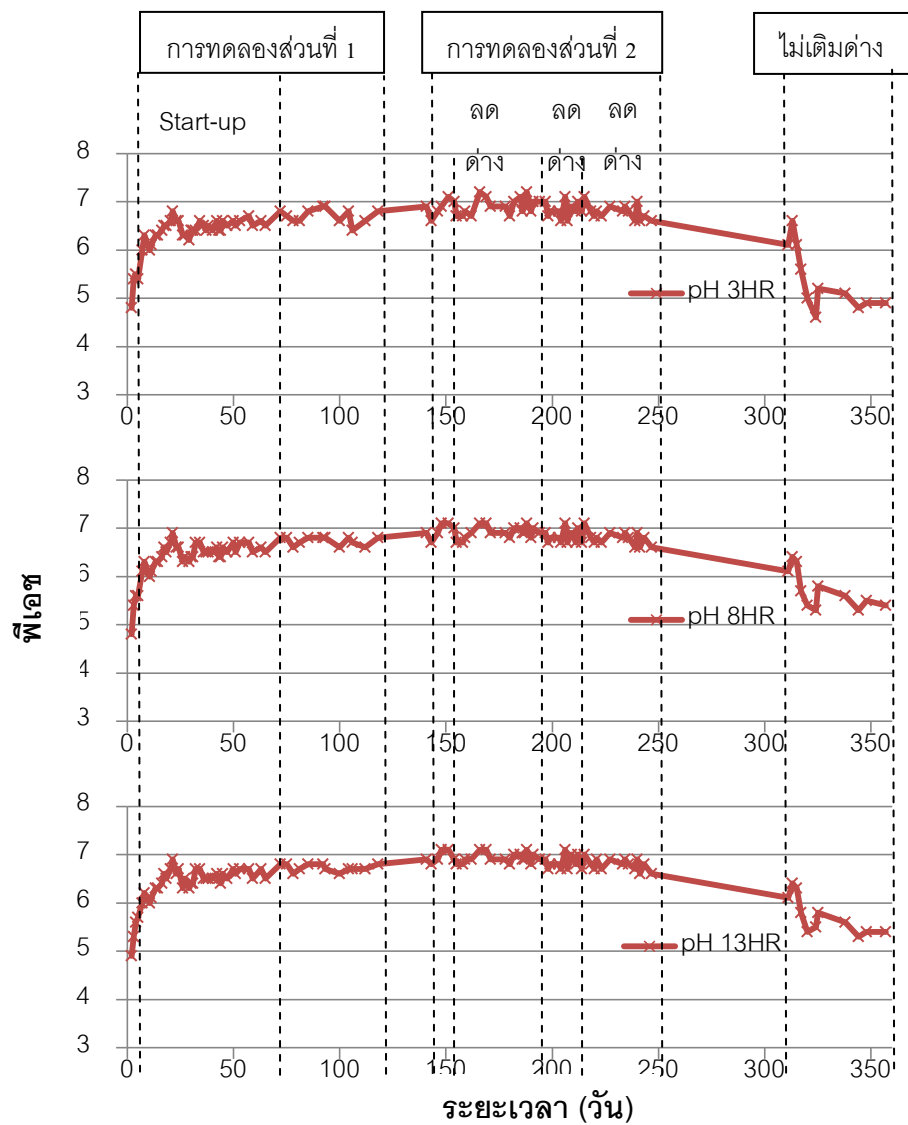
รูปที่ 4-1 กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)



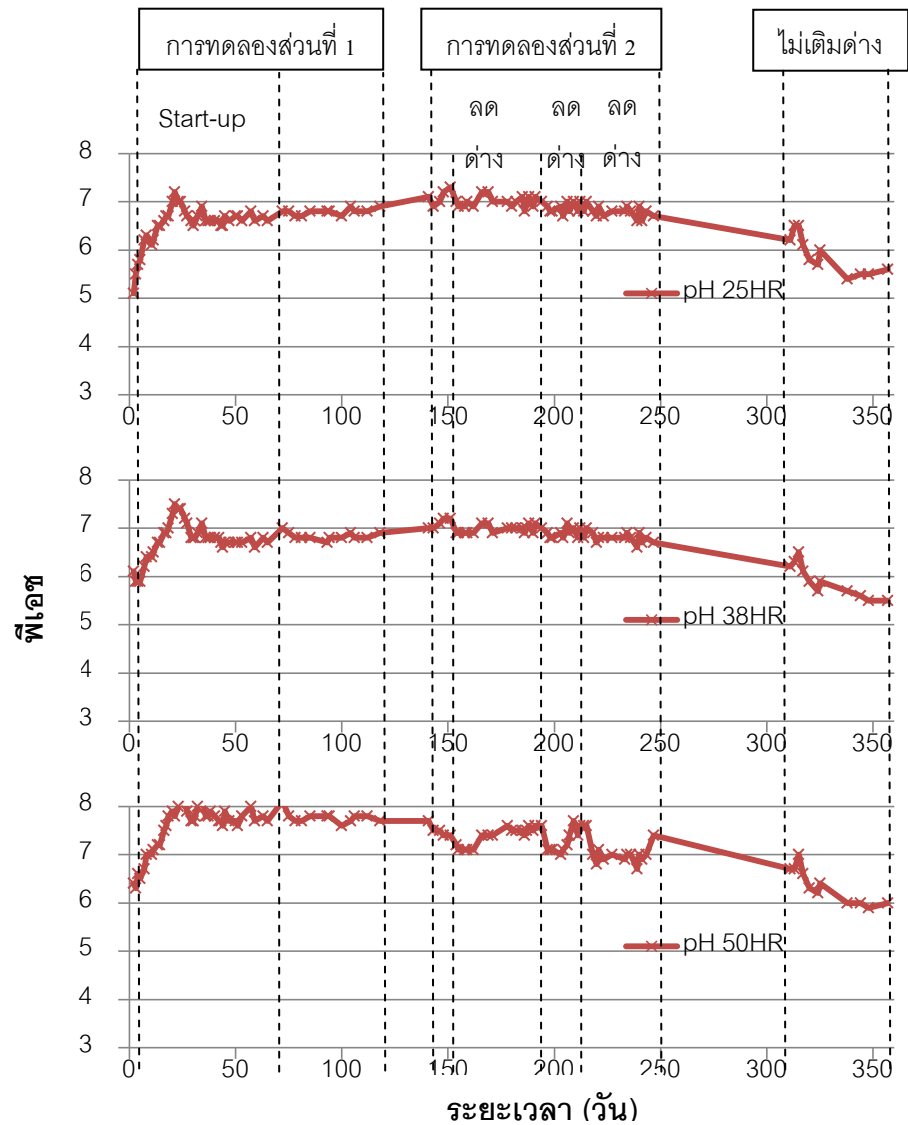
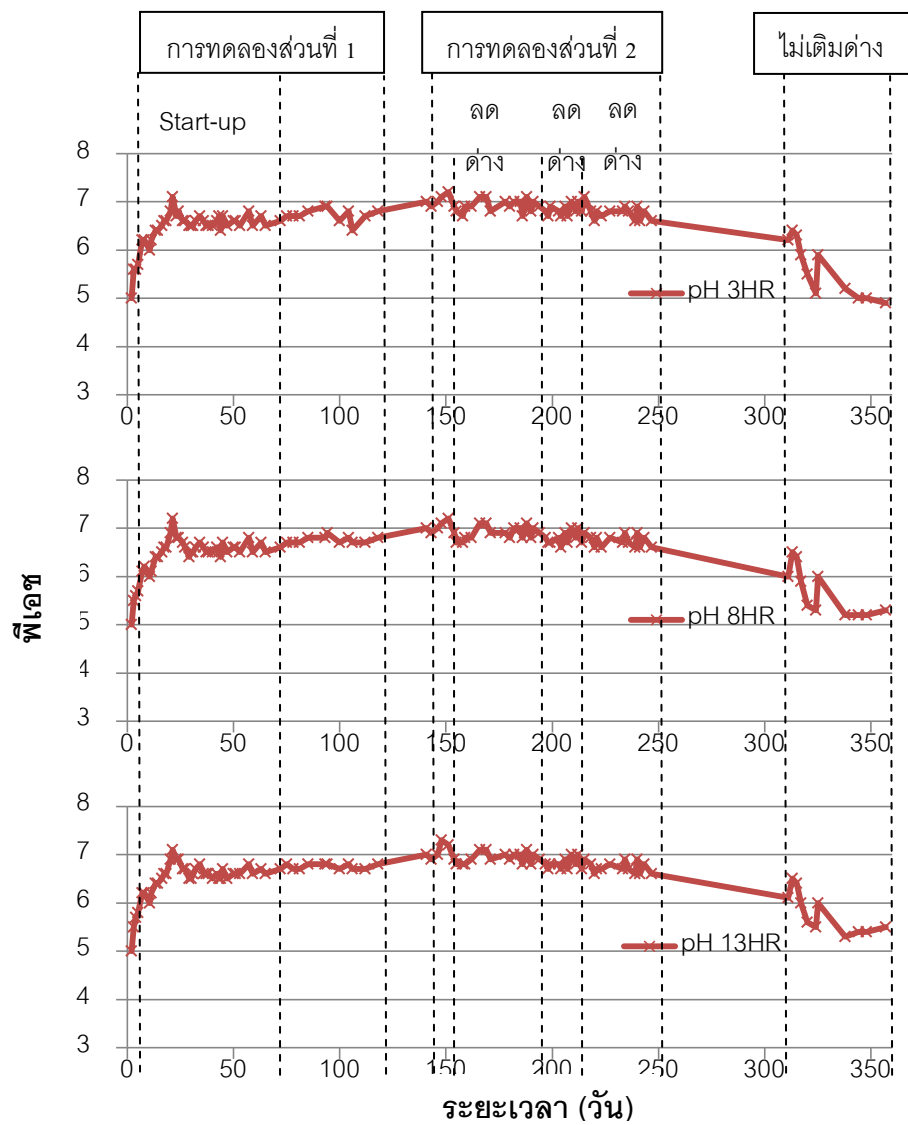
รูปที่ 4-2 กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)



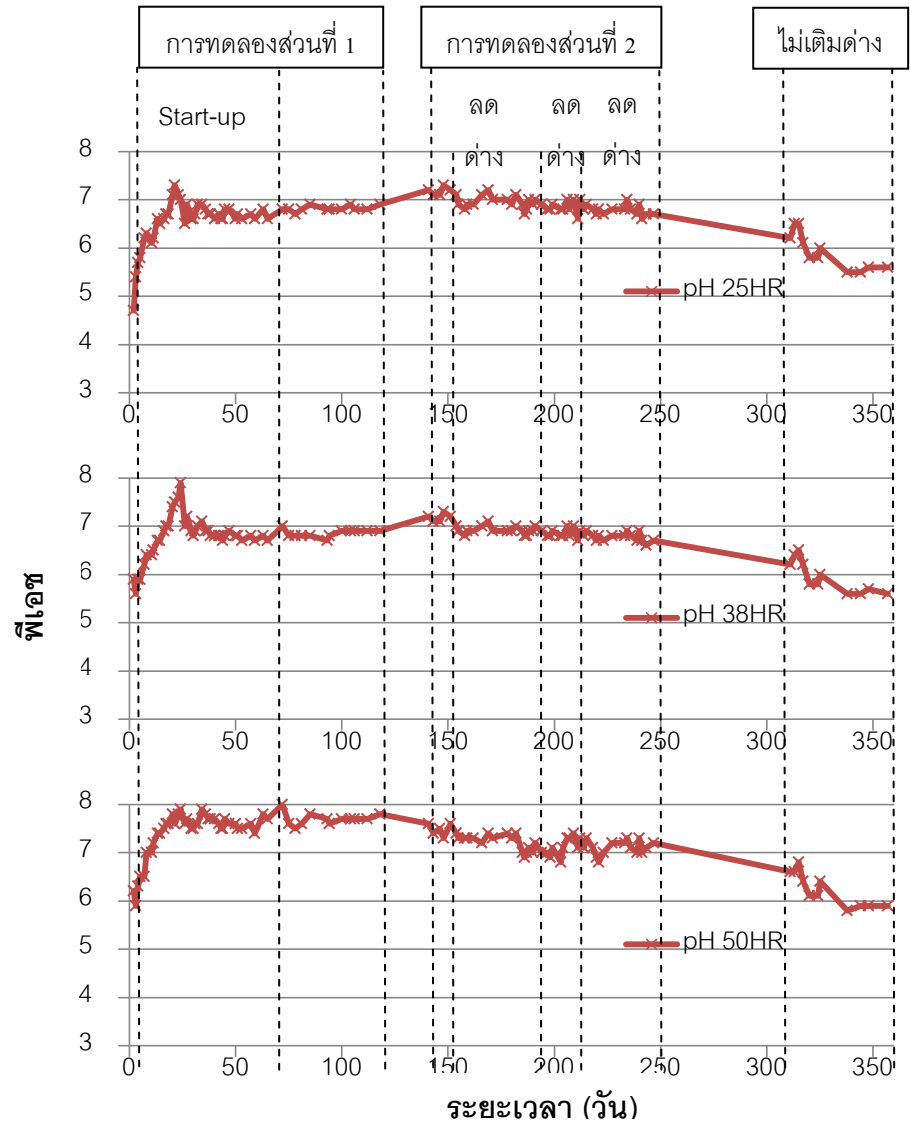
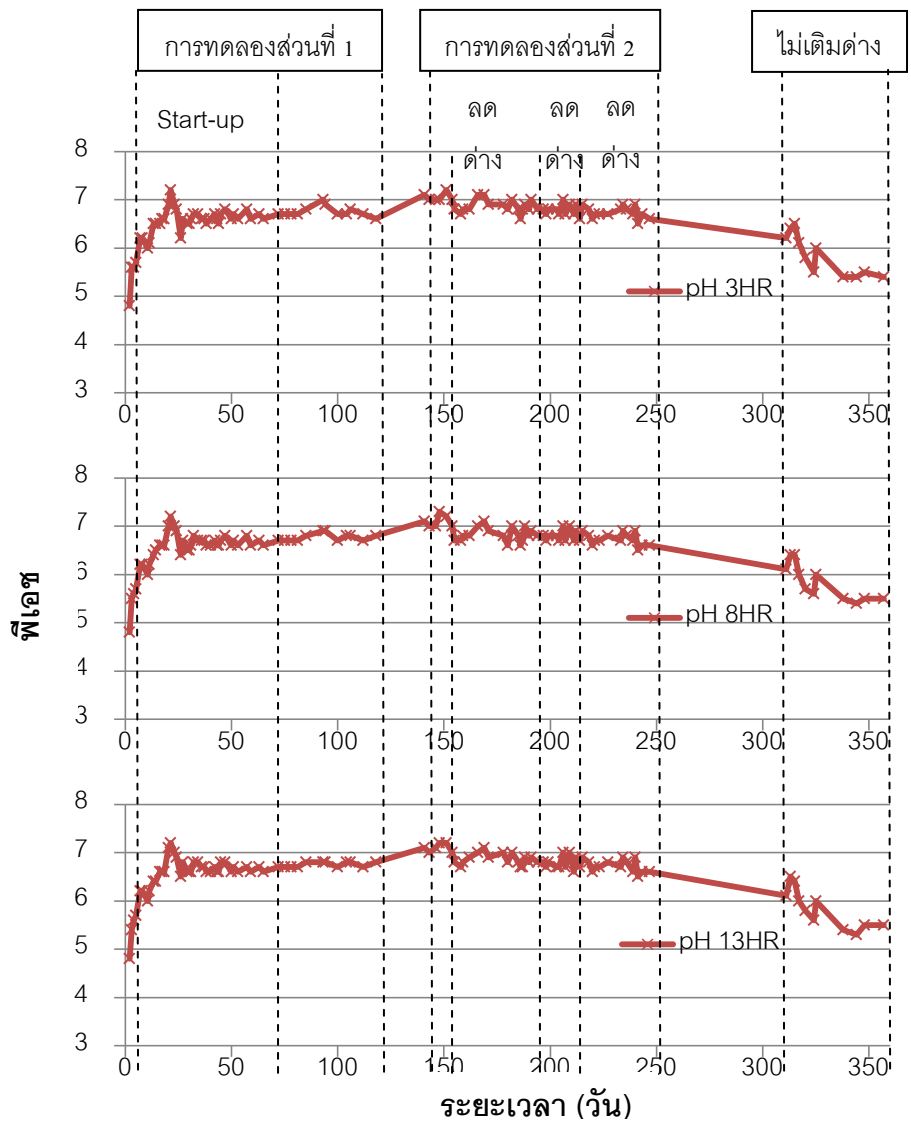
รูปที่ 4-3 กราฟความเข้มข้นซีโอดีตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)



รูปที่ 4-4 กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียน้ำ 1 เท่า)



รูปที่ 4-5 กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)



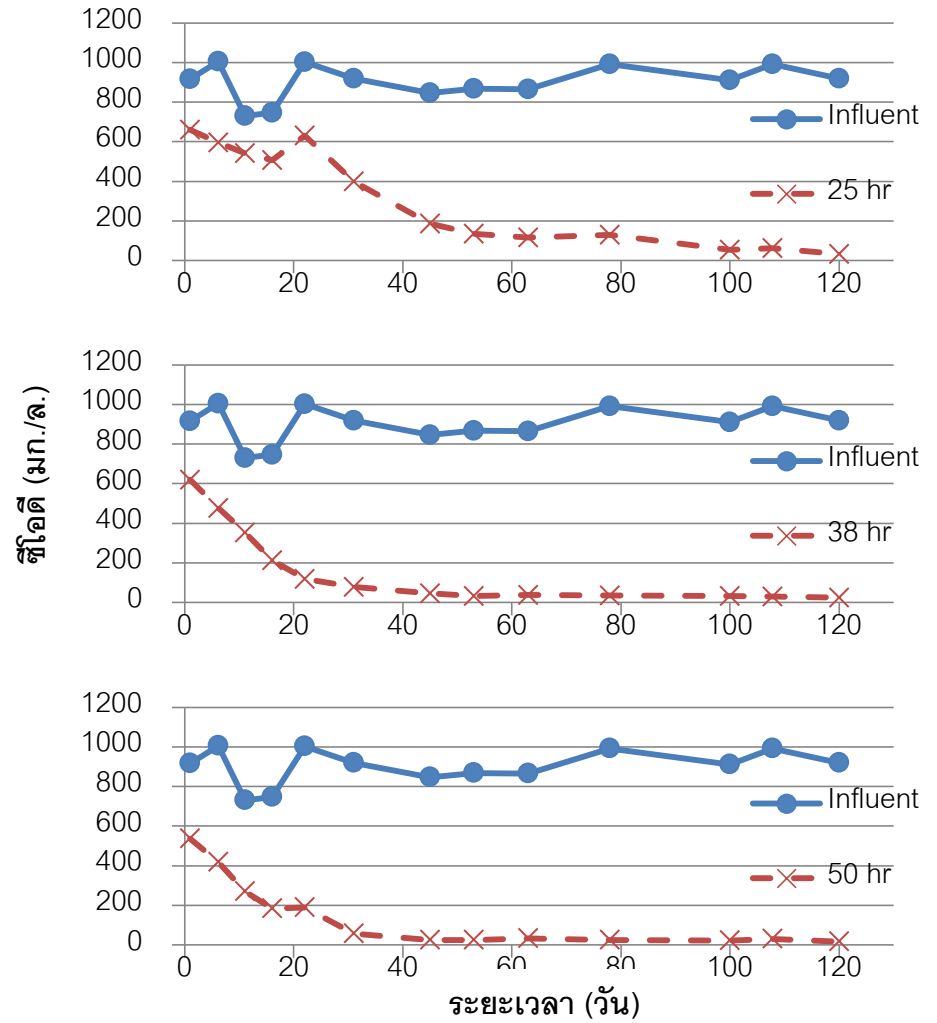
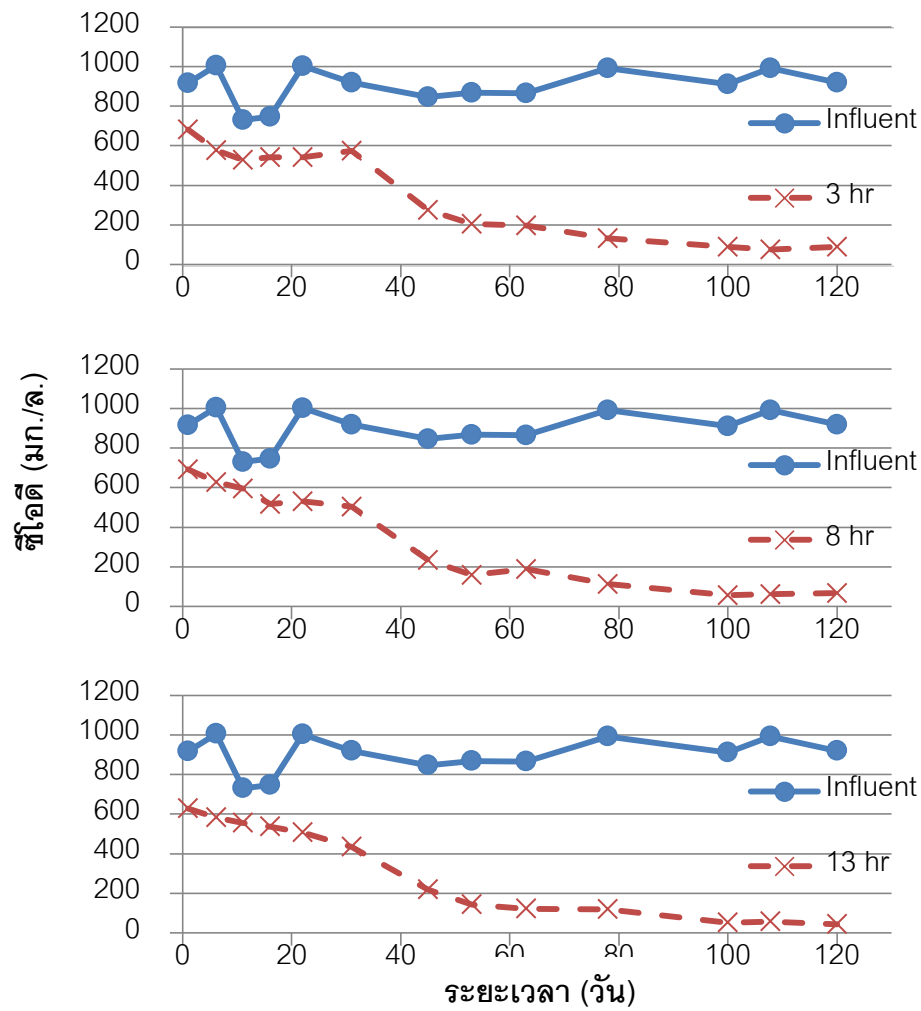
รูปที่ 4-6 กราฟค่าพีเอชตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)

4.1 ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

4.1.1 ค่าซีไอดี

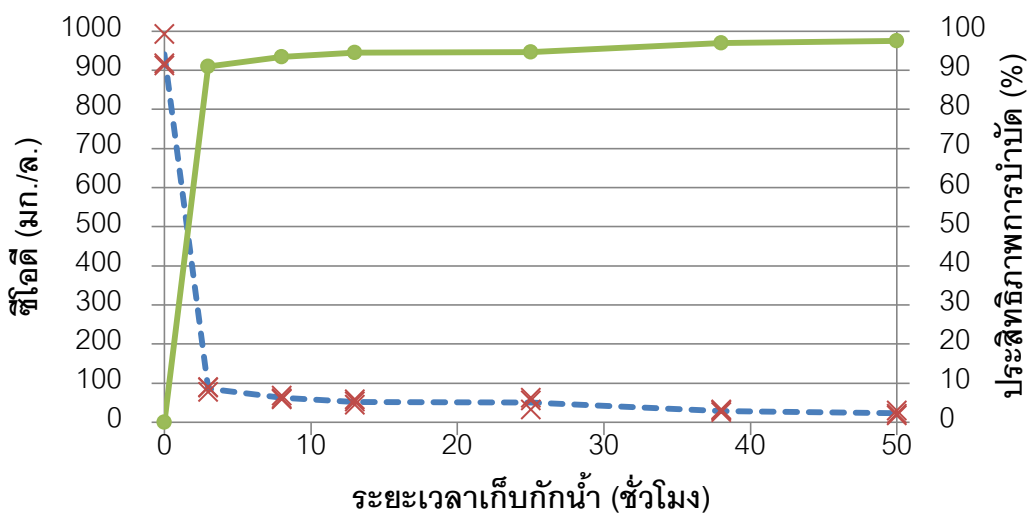
การทดลองส่วนที่ 1 นี้ ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 120 วัน น้ำเสียสังเคราะห์เข้าตลอด การทดลองมีค่า 898 ± 106 มก./ล. หลังจากเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงพบว่า ค่าซีไอดีในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำจะค่อยๆลดลงจากวันเริ่มต้นระบบ เมื่อวันที่ 45 ค่าซีไอดีของระยะเวลาเก็บกักน้ำ 38 และ 50 ชั่วโมงเริ่มคงตัว โดยลดลงจาก 621 ± 29 และ 535 ± 61 มก./ล. เหลือ 45.47 ± 10.11 และ 26.17 ± 5.36 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อเห็นว่าระบบเริ่มมีการปรับตัวได้แล้วจึงทำการระบายตะกอนจุลชีพออกจากถังในวันที่ 60 โดยจากการศึกษาก่อนหน้านี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบอยู่ในช่วง 50-90 วัน (Show, 1999 ทัยศักดิ์ ธรรมกุล, 2000 และ Manariotis, 2006)

ภายหลังจากการระบายตะกอนจุลชีพแล้ว ซีไอดีของระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 และ 25 ชั่วโมงยังคงลดลงต่อไปจนเริ่มคงตัวเมื่อผ่านไป 100 วัน โดยลดลงจาก 683 ± 75 692 ± 62 629 ± 37 และ 660 ± 95 มก./ล. ในวันแรกเหลือ 90.34 ± 11.87 58.39 ± 9.50 53.35 ± 18.68 และ 56.02 ± 20.63 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อดำเนินระบบต่อไปจนถึงวันที่ 120 พบว่าค่าซีไอดีในทุก ระยะเวลาเก็บกักน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ดังรูปที่ 4-7 จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บ กักน้ำ 38 และ 50 ชั่วโมง ระบบสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าที่ระยะเวลาอื่นๆ และ แม้ว่าจะมีการระบายตะกอนจุลชีพออกจากถังในวันที่ 60 ค่าซีไอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 และ 25 ชั่วโมง ยังคงมีการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวในทิศทางเดียวกันกับก่อนมีการระบาย ตะกอนแสดงให้เห็นว่า ตะกอนจุลชีพไม่มีผลต่อการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 4-7 กราฟความเข้มข้นไนไตรต์น้ำออกที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับน้ำเข้า การทดลองส่วนที่ 1 (วันที่ 1-120)

เมื่อคิดค่าเฉลี่ยของซีโอดีในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วันที่ 100-120) ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆพบว่า ที่ 3 ชั่วโมงถึงกรองไร้ออกซิเจนสามารถลดค่าซีโอดีลงได้อย่างรวดเร็วเหลือเพียง 85.62 ± 7.22 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 90.9 % หลังจากนั้นระบบสามารถบำบัดได้เพิ่มมากขึ้นอีกเล็กน้อยดังที่ 8 ชั่วโมง 62.74 ± 4.97 มก./ล. (93.33%) ที่ 13 ชั่วโมง 52.14 ± 6.72 มก./ล. (94.46%) ที่ 25 ชั่วโมง 50.79 ± 15.78 มก./ล. (94.6%) ที่ 38 ชั่วโมง 29.38 ± 3.45 มก./ล. (96.88%) และ 50 ชั่วโมงลดลงเหลือ 23.28 ± 6.00 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 97.53% ดังแสดงในรูปที่ 4-8 โดยที่ Show และ Tay (1999) ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อ้างอิงน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นซีโอดี 2,500 มก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 30 ชั่วโมง โดยบำบัดได้มากกว่า 90% ขณะที่ Manariotis และ Grigoropoulos (2006) ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นซีโอดี 442 มก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน สามารถบำบัดซีโอดีได้ 74-79% นั้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้บำบัดได้ดีกว่าที่ระยะเวลาเพียง 3 ชั่วโมง อาจเนื่องมาจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้คือ น้ำตาลทรายซึ่งย่อยสลายได้ง่าย ทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถดูดซึมไปใช้ได้ง่าย นอกจากนั้นหลังจากการนำข้อมูลจากการตรวจสอบการอุดตันของระบบซึ่งจะกล่าวถึงภายหลังพบว่า ระบบถึงกรองไร้ออกซิเจนในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับถึงปฏิกรณ์แบบกวนผสมบวมจริงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนการลดลงอย่างรวดเร็วของซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมง

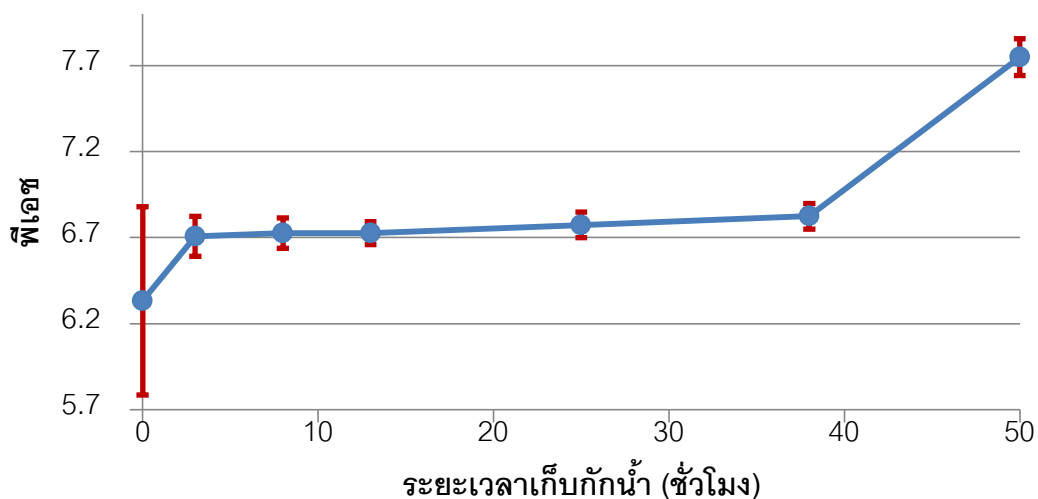


รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ โดยที่ \times คือค่าซีโอดี และ \bullet คือประสิทธิภาพการบำบัด

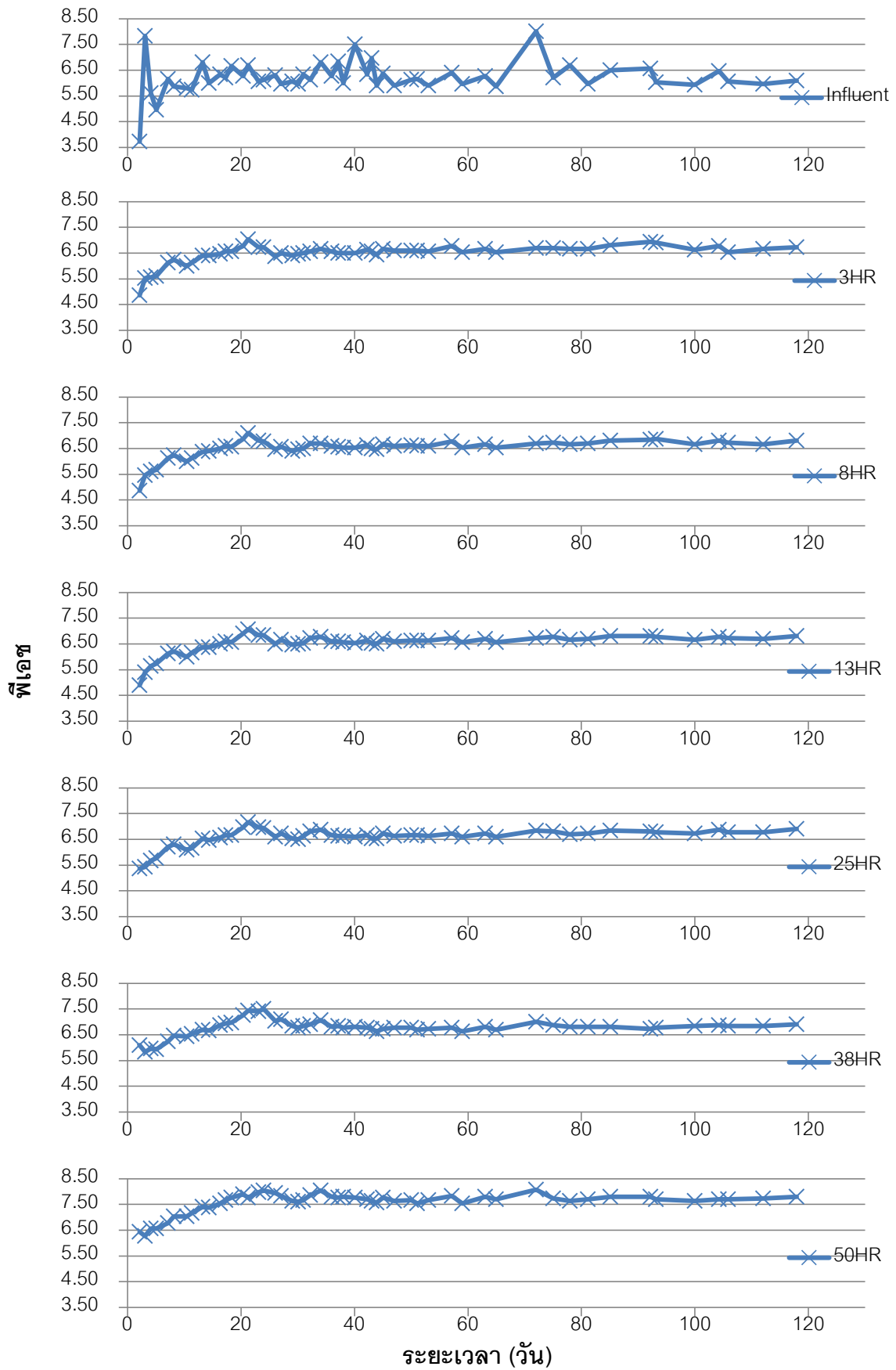
4.1.1.2 พีเอช (pH)

ในการทดลองนี้ทำการควบคุมพีเอชให้อยู่ระหว่าง 6.6-6.8 ตลอดความยาวของถังด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ลงไปในน้ำเข้าเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบ ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองนั้นยังไม่สามารถหาปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมได้ จึงใช้วิธีการทดลองเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ แล้ววัดค่าพีเอชที่ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ เริ่มต้นด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 เท่าของปริมาณน้ำตาลที่ใช้ ในช่วง 5 วันแรกพบว่าพีเอชต่ำกว่าช่วงที่ต้องการมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.39 ± 0.35 ถึง 6.46 ± 0.14 ดังนั้นจึงเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มเป็น 1 เท่าซึ่งพีเอชยังคงต่ำกว่าที่ต้องการ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.89 ± 0.19 ถึง 7.00 ± 0.17 ในช่วงวันที่ 6-11 หลังจากนั้นปรับเพิ่มเป็น 1.5 เท่าพบว่าพีเอชเริ่มสูงขึ้นและคงที่ในช่วงที่ต้องการ นั่นคือ 6.6-6.8 ตลอดความยาวจึงถือเอาปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตนี้เป็นปริมาณบัฟเฟอร์ที่ต้องการของระบบแล้วดำเนินระบบต่อไปจนถึงวันที่ 120 ดังรูปที่ 4-10

เมื่อนำค่าพีเอชเฉลี่ยหลังจากการระบายตะกอนออก (วันที่ 60-120) มาเปรียบเทียบกับระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ ดังรูปที่ 4-9 พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 และ 38 ชั่วโมงค่าพีเอชค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักน้ำ โดยมีค่า 6.72 ± 0.12 6.73 ± 0.09 6.73 ± 0.07 6.77 ± 0.08 และ 6.82 ± 0.07 ในส่วนของน้ำเข้าที่มีค่า 6.33 ± 0.55 ซึ่งค่อนข้างแปรปรวนและต่ำกว่าในระบบ เนื่องจากความถี่ในการเตรียมน้ำเสียเข้าสู่ถัง โดยเตรียม 3 วันต่อครั้งทำให้เกิดการหมักของน้ำตาลในถัง ในขณะที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมงนั้น เป็นบริเวณที่น้ำเสียออกจากระบบแล้วสัมผัสกับอากาศอาจทำให้มีการระเหยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้พีเอชของน้ำมีค่า 7.75 ± 0.11 ซึ่งสูงกว่าในระบบมาก



รูปที่ 4-9 กราฟค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ



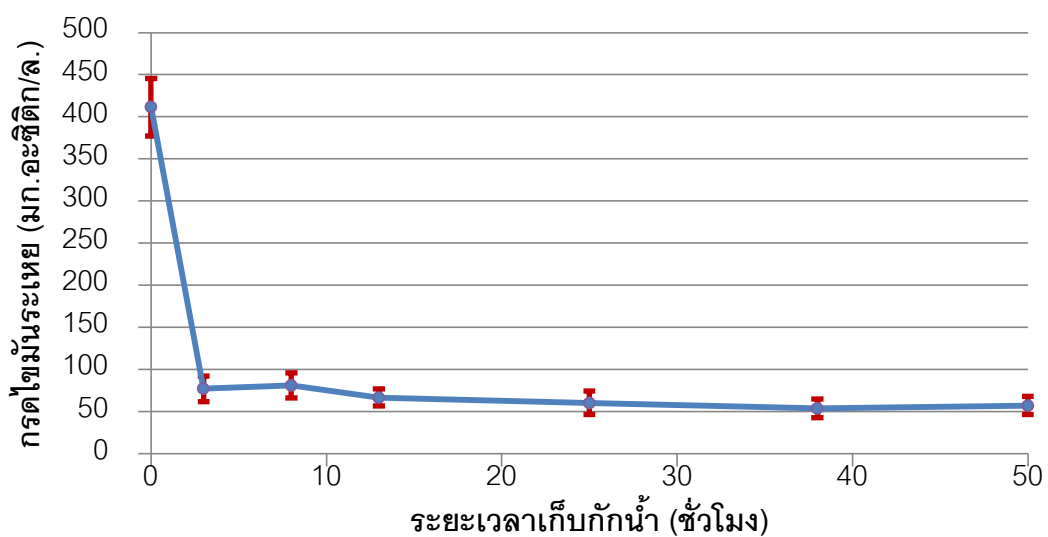
รูปที่ 4-10 กราฟค่าพีเอชน้ำเข้า และน้ำออกที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมง การทดลองส่วนที่ 1 (วันที่ 1-120)

4.1.3 ค่ากรดไขมันระเหย

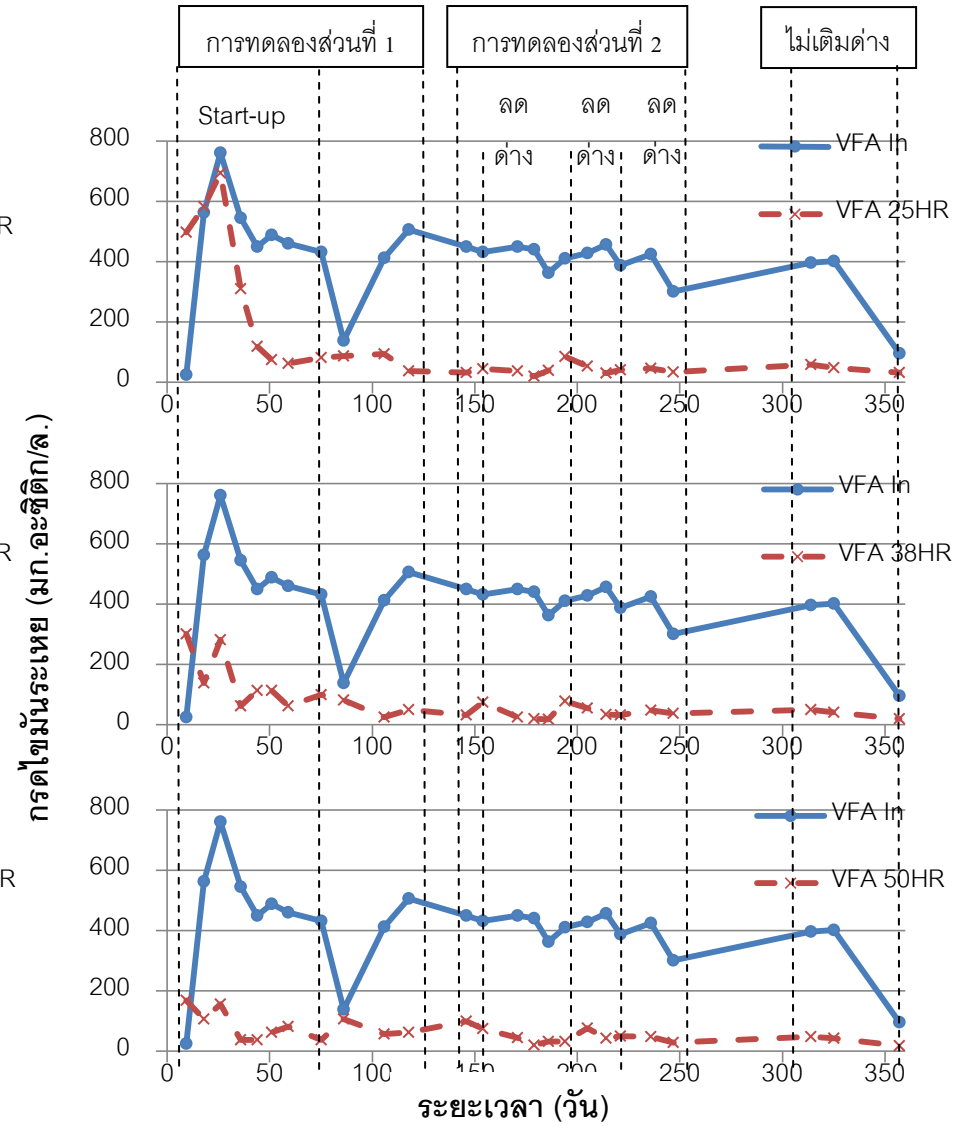
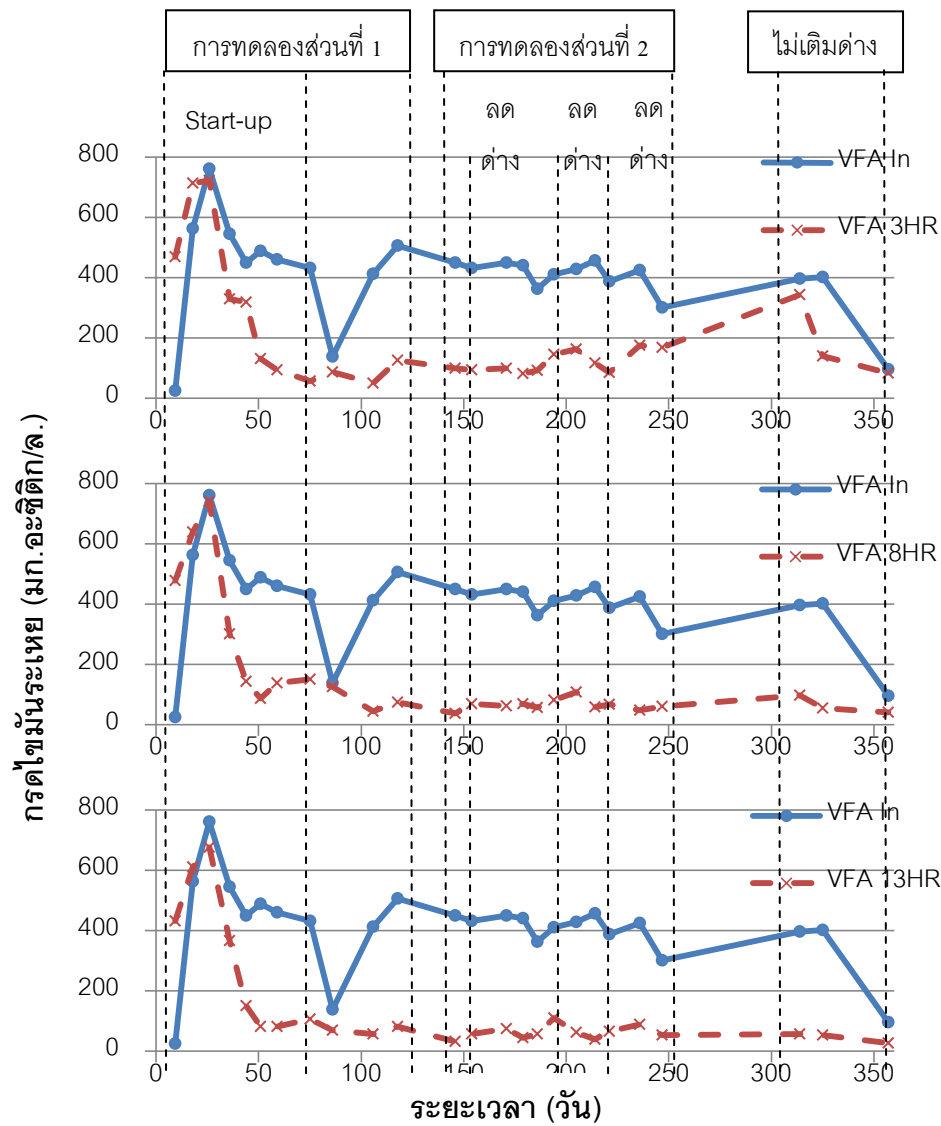
ค่ากรดไขมันระเหยถือว่าเป็นหนึ่งในค่าที่ใช้ชี้วัดในการดำเนินระบบ หากมีมากเกินไปจะทำให้ระบบขาดสมดุลระหว่างกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด และกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งทำให้ระบบล้มเหลวได้ โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 20-200 มก.กรดอะซิติก/ล. (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546)

โดยในช่วงแรกของการดำเนินระบบจะพบว่าค่าค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณต่าง (NaHCO₃) ให้กับระบบ จะพบว่าต่อมาที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 25 38 และ 50 ชั่วโมง เริ่มคั่งที่ในวันที่ 44 โดยมีค่า 110.42±7.22 79.17±29.54 และ 29.17±7.22 มก.กรดอะซิติก/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 และ 13 ชั่วโมง เริ่มคั่งที่ในวันที่ 59 โดยมีค่า 110.42±23.66 122.92±25.26 และ 102.08±36.08 มก.กรดอะซิติก/ล. ในส่วนของน้ำเข้าที่มีค่าแปรปรวนตลอดการทดลอง สาเหตุเกิดจากความถี่ในการเตรียมน้ำเสียเช่นกัน

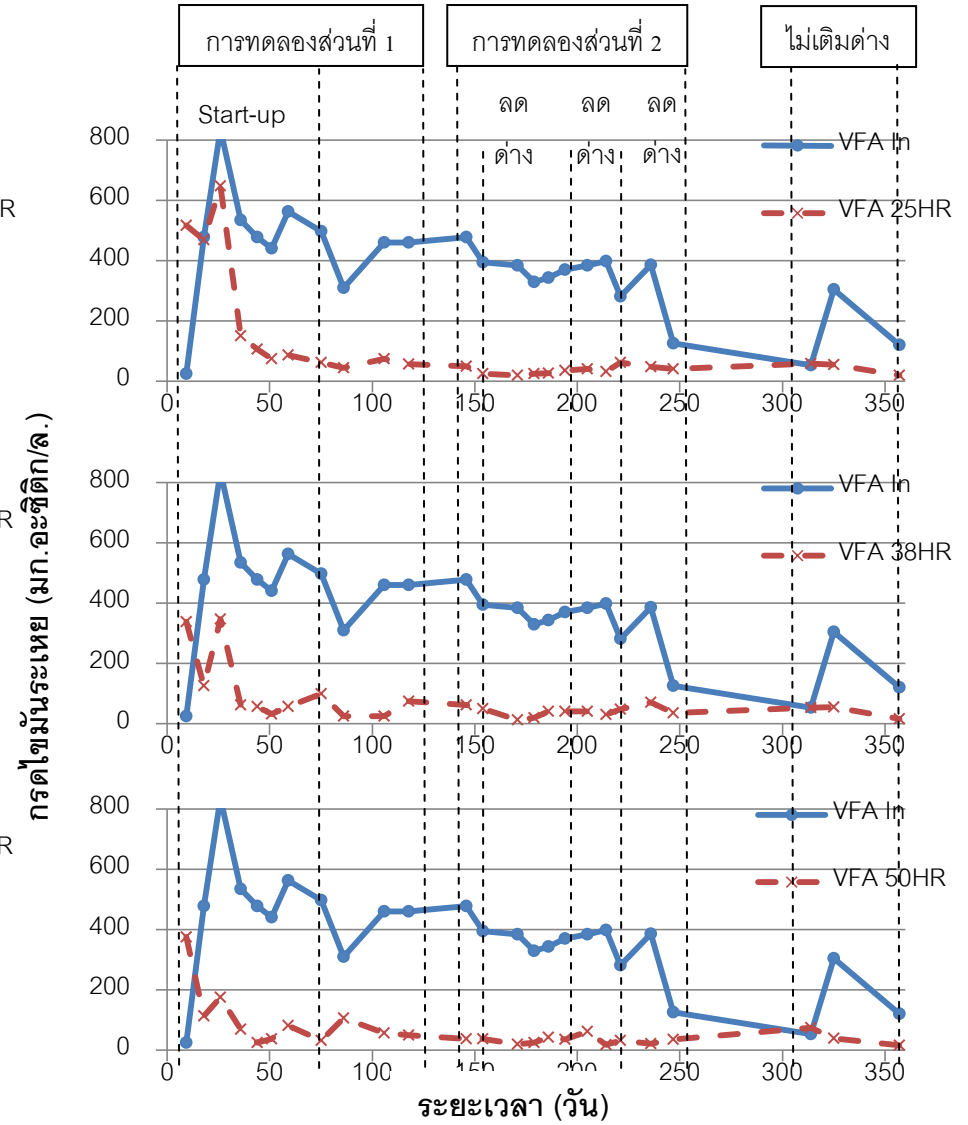
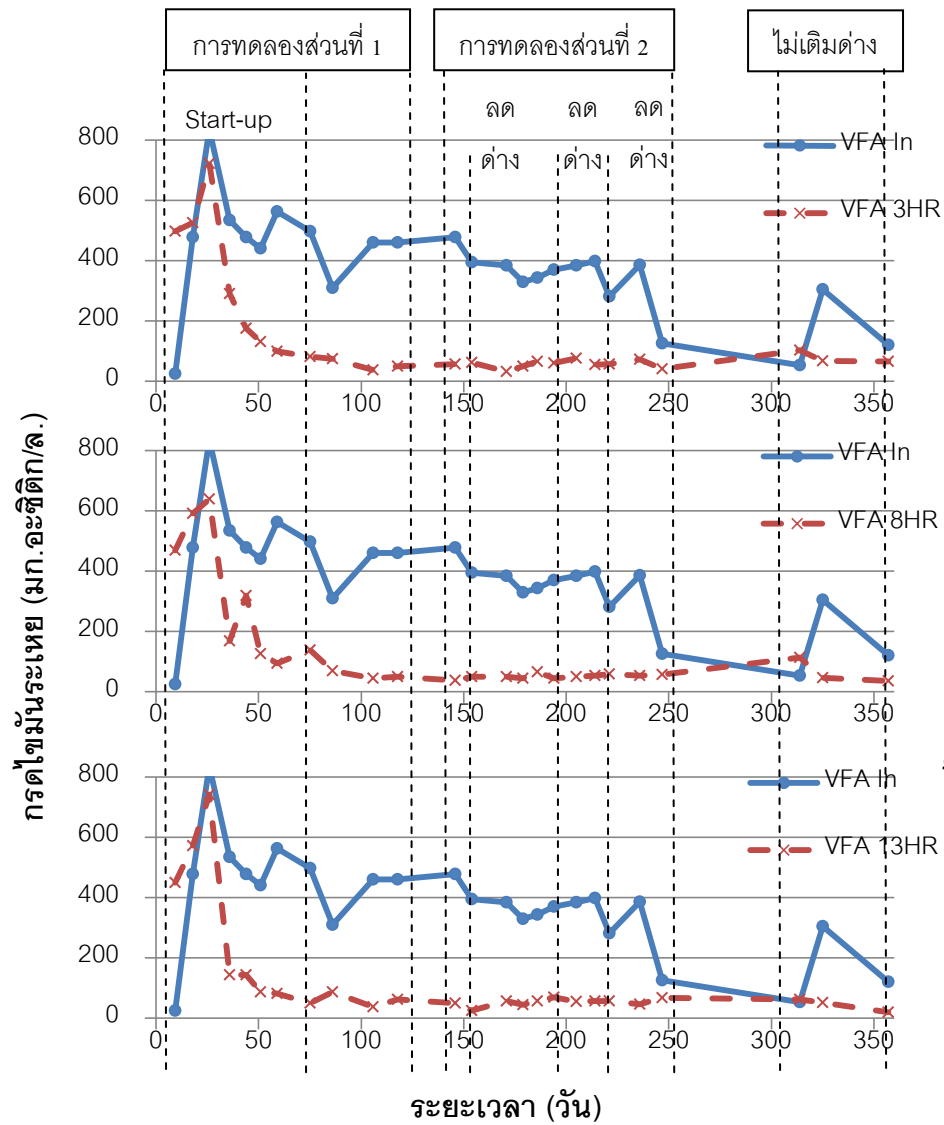
และเมื่อนำค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยหลังจากที่คั่งที่แล้ว (วันที่ 59) มาเปรียบเทียบกับระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ ดังรูปที่ 4-11 พบว่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำมีค่ากรดไขมันระเหยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 50-80 มก.กรดอะซิติก/ล. ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยที่ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าดังนี้ 77.08±15.01 81.25±15.07 66.67±10.07 60.42±14.09 54.17±11.09 และ 57.29±10.64 มก.กรดอะซิติก/ล. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับกราฟของซีไอดี (รูปที่ 4-8) เนื่องจากในกระบวนการไร้ออกซิเจน กรดไขมันระเหยเป็นสารตัวกลางของสารอินทรีย์ (ค่าซีไอดี) ก่อนจะเป็นมีเทน ซึ่งค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง (357 วัน) มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าซีไอดีเช่นเดียวกัน ดังแสดงดังรูปที่ 4-12 ถึง 4-14



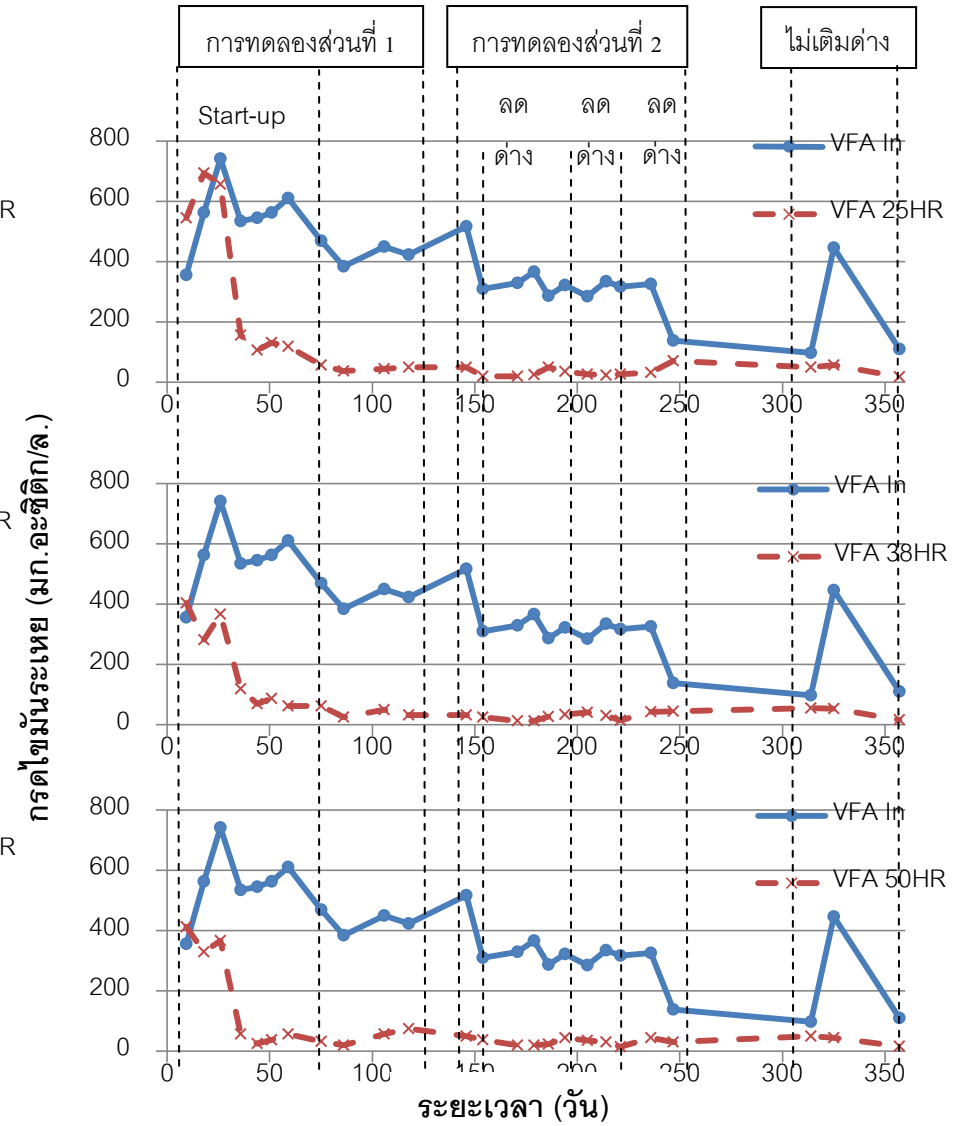
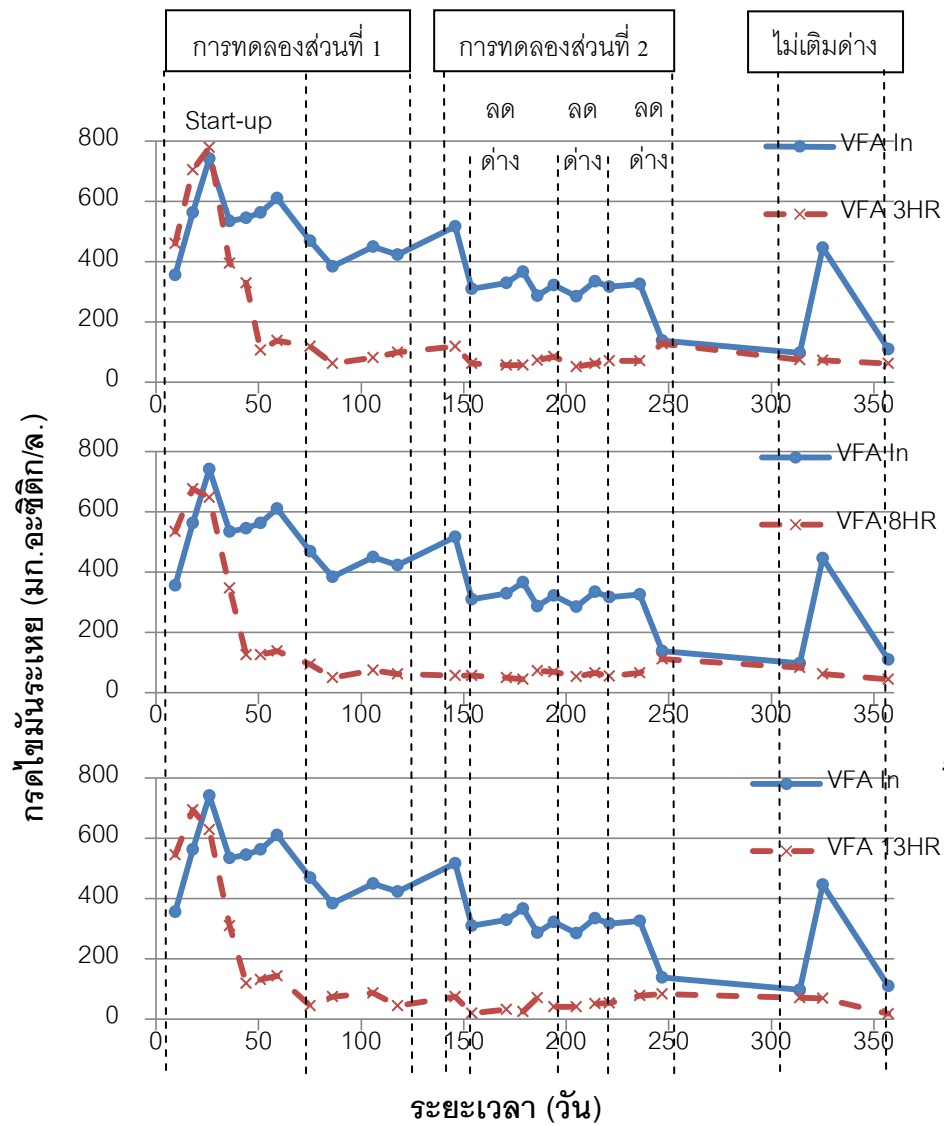
รูปที่ 4-11 กราฟค่ากรดไขมันระเหยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ



รูปที่ 4-12 กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)



รูปที่ 4-13 กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)



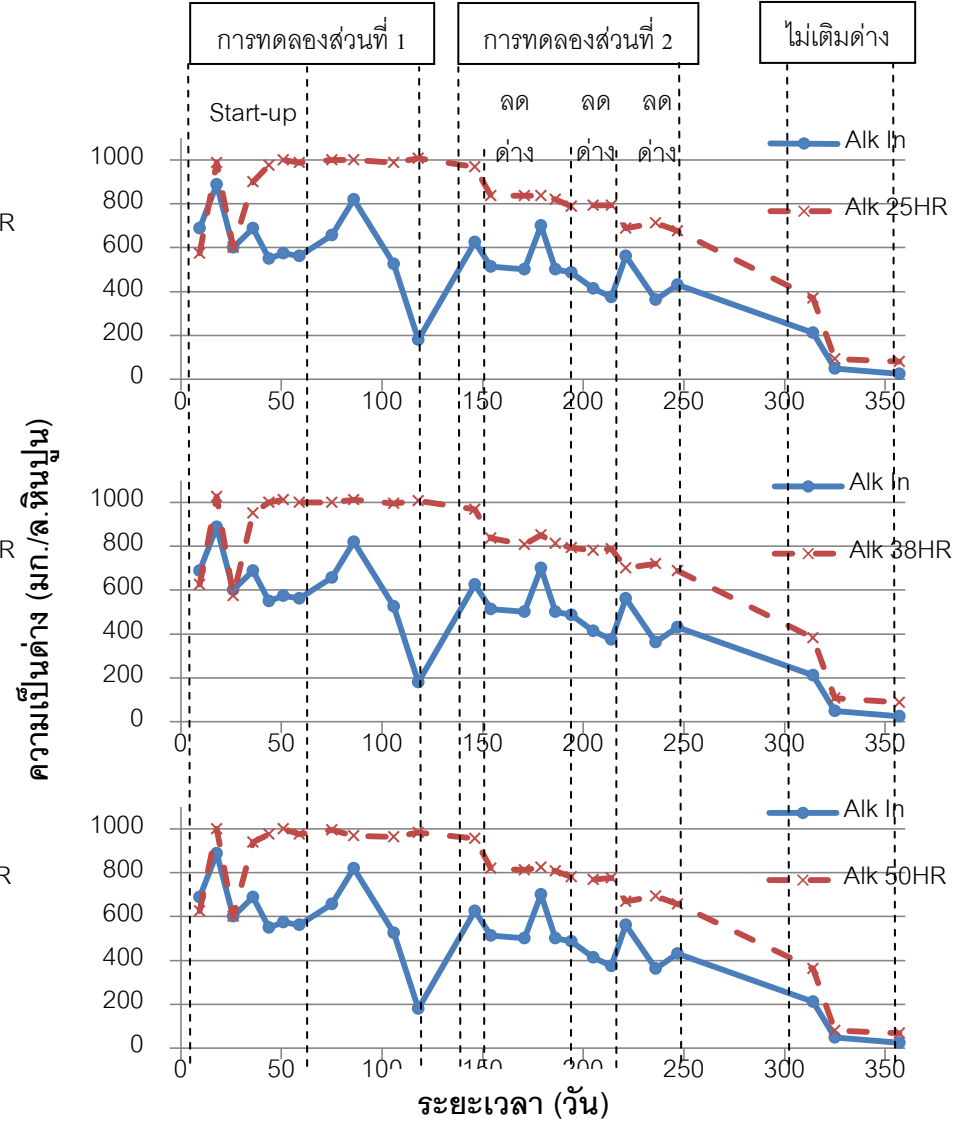
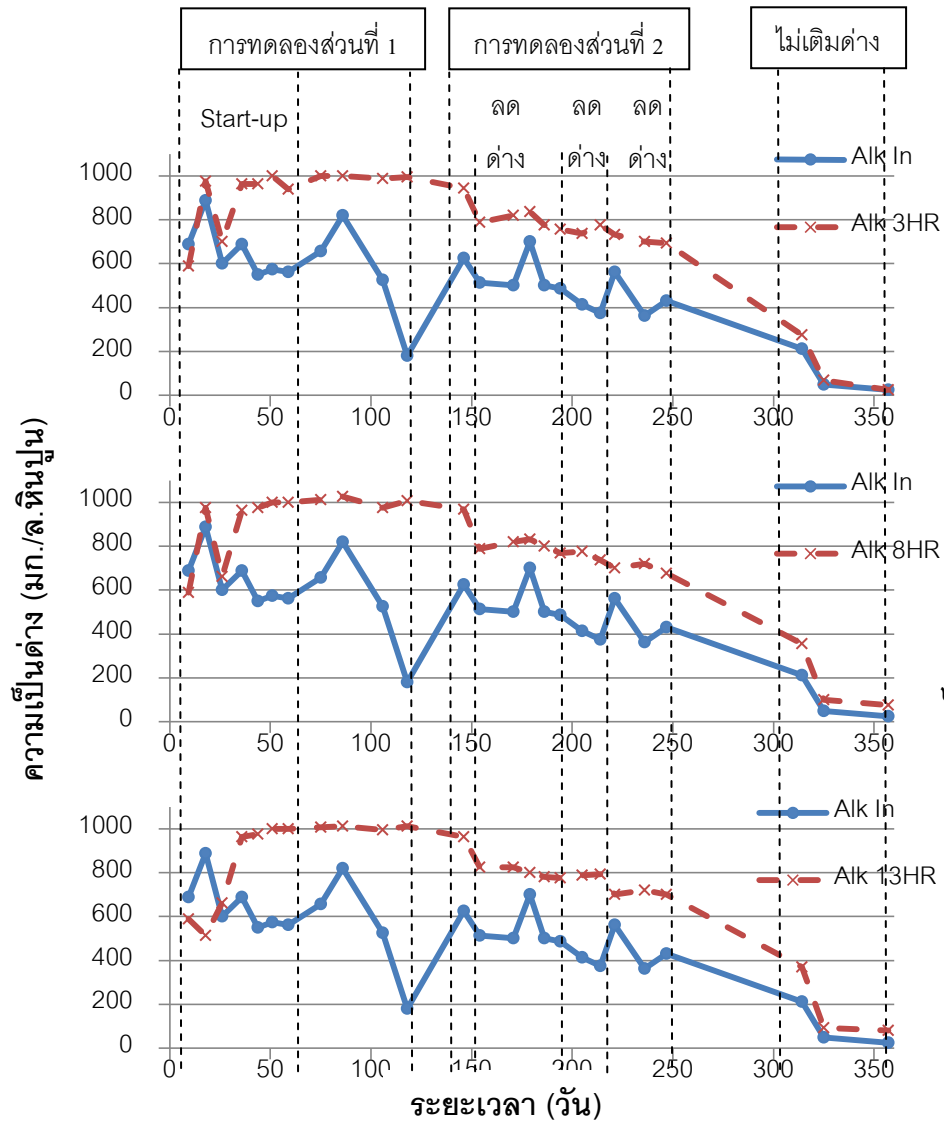
รูปที่ 4-14 กราฟกรดไขมันระเหยตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)

4.1.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

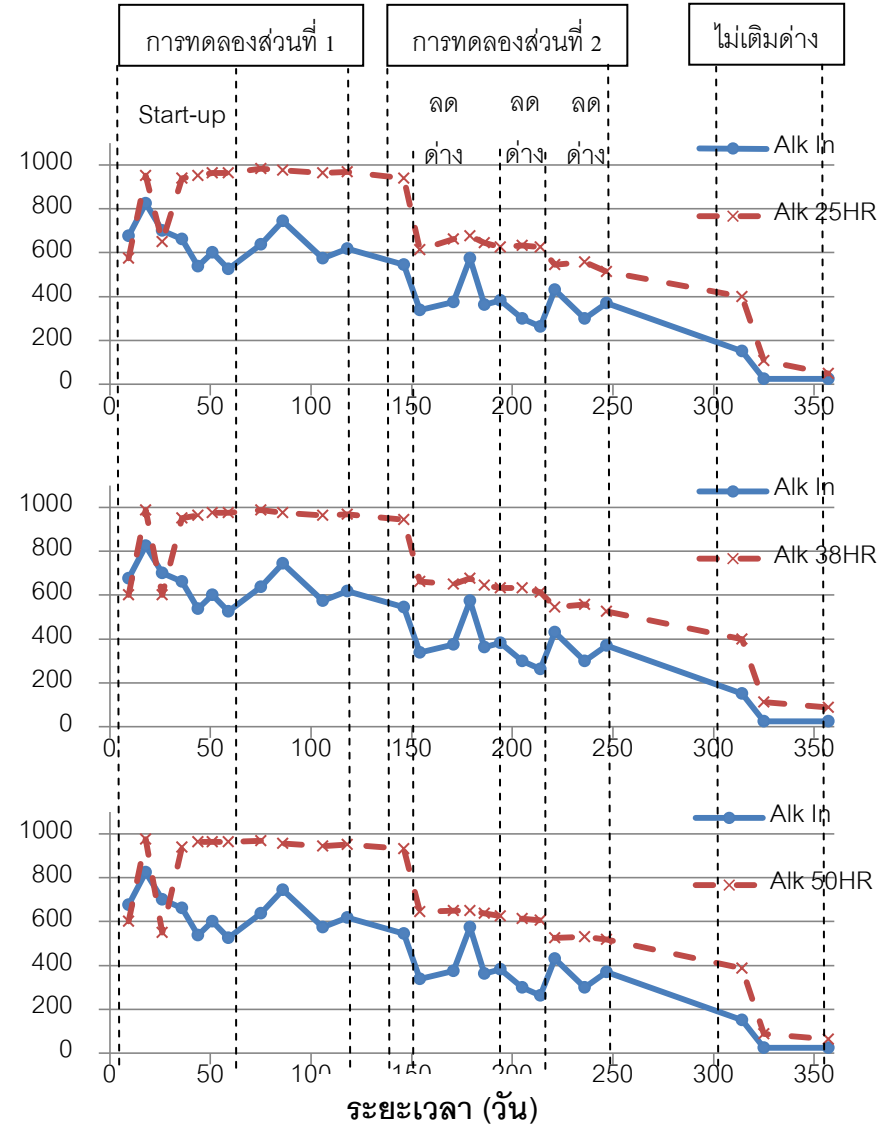
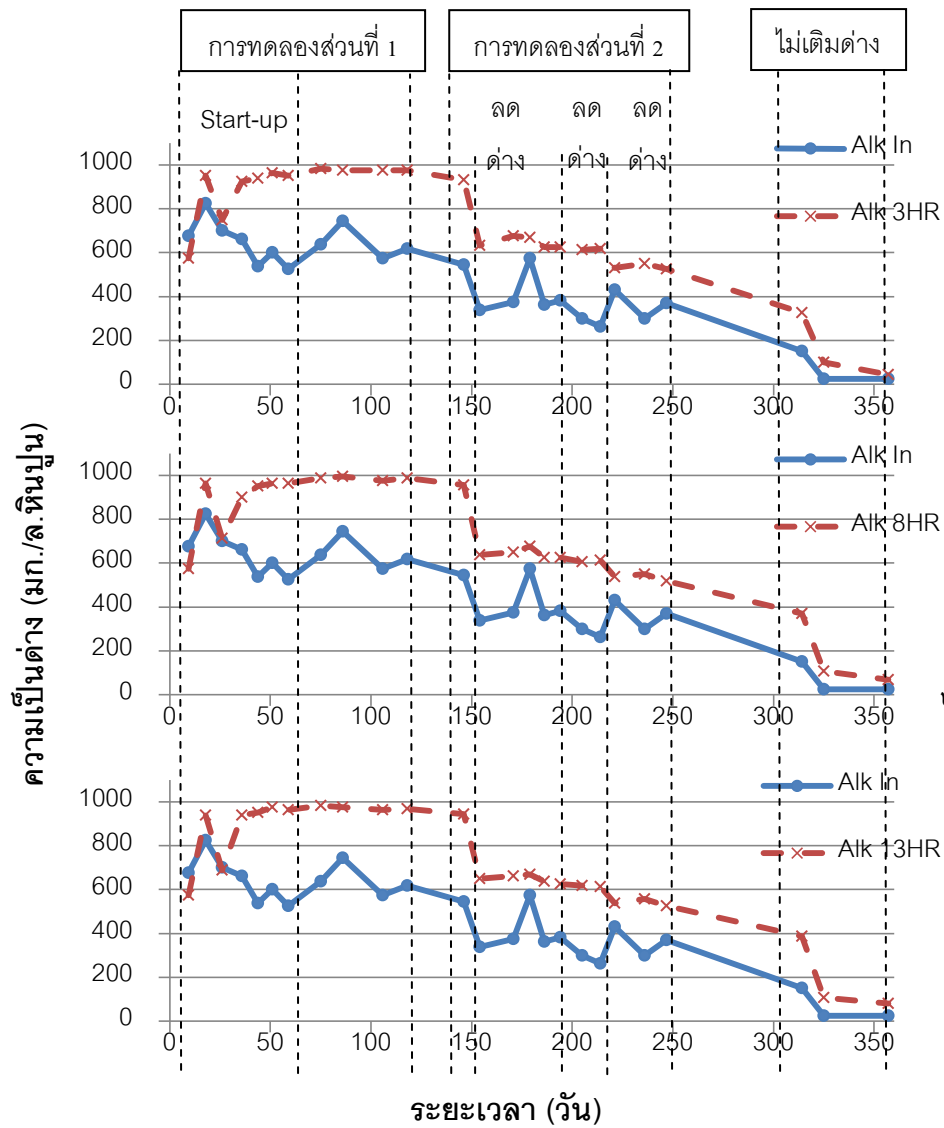
ค่าความเป็นด่างเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดในการดำเนินระบบเช่นเดียวกับค่ากรดไขมันระเหย โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 1,500-2,000 มก./ล.ของหินปูน และอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างควรต่ำกว่า 0.4 (มันลิน ตันพุลเวศม์, 2546) ผลจากการทดลองพบว่า ในทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำมีค่าความเป็นด่างใกล้เคียงกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณด่าง (NaHCO_3) ที่ใส่ให้กับระบบ ซึ่งเป็นเช่นนี้ตลอดการทดลอง (357 วัน) ดังแสดงในรูปที่ 4-15 ถึง 4-17 โดยในการทดลองส่วนที่ 1 นี้เมื่อใส่ด่างปริมาณ 1 เท่าของปริมาณน้ำตาลที่ใช้ (1 ก./ล.) จะได้ค่าความเป็นด่าง 619 ± 38 มก./ล. และเมื่อใส่ด่างปริมาณ 1.5 เท่า (1.5 ก./ล.) ซึ่งเป็นปริมาณบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมจะได้ค่าความเป็นด่าง 971 ± 47 มก./ล. ถึงแม้ว่าค่าความเป็นด่างจะต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม แต่หากพิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างแล้ว นับตั้งแต่วันที่ 36 เป็นต้นไป อัตราส่วนล้วนอยู่ต่ำกว่า 0.4 ทั้งสิ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่าง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

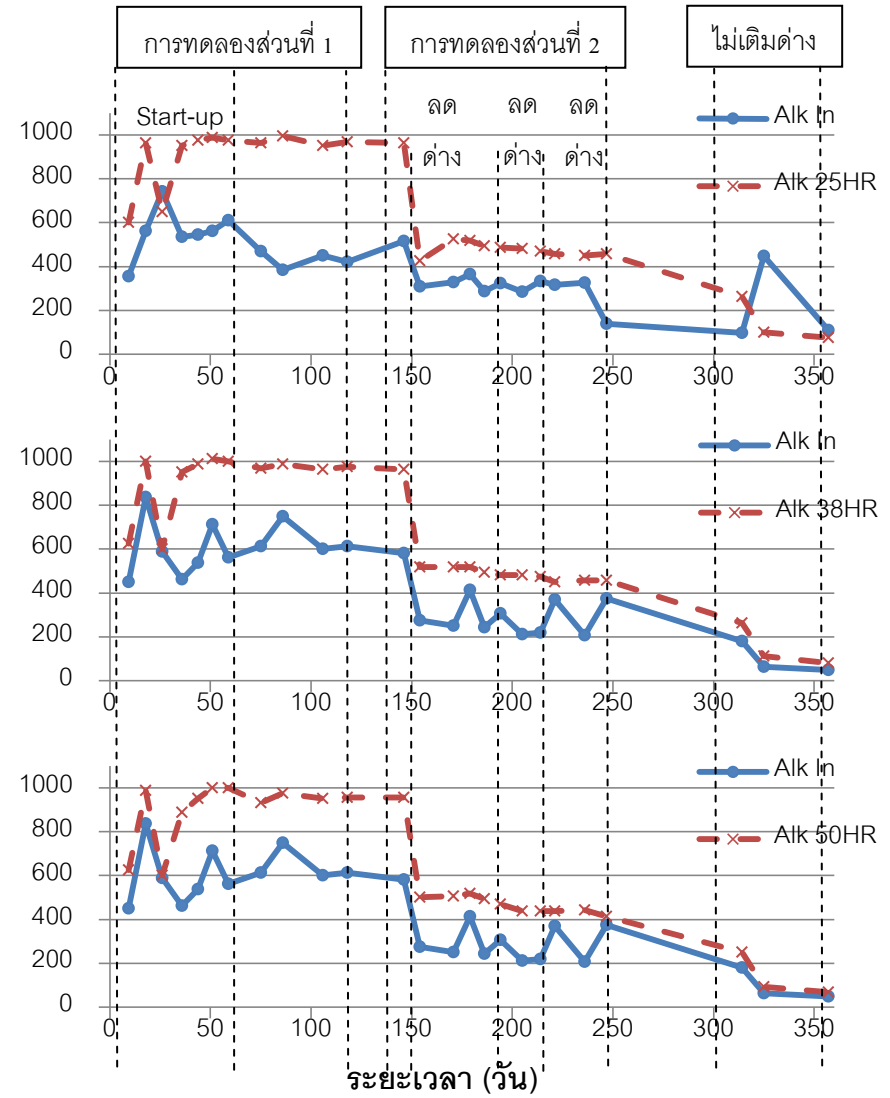
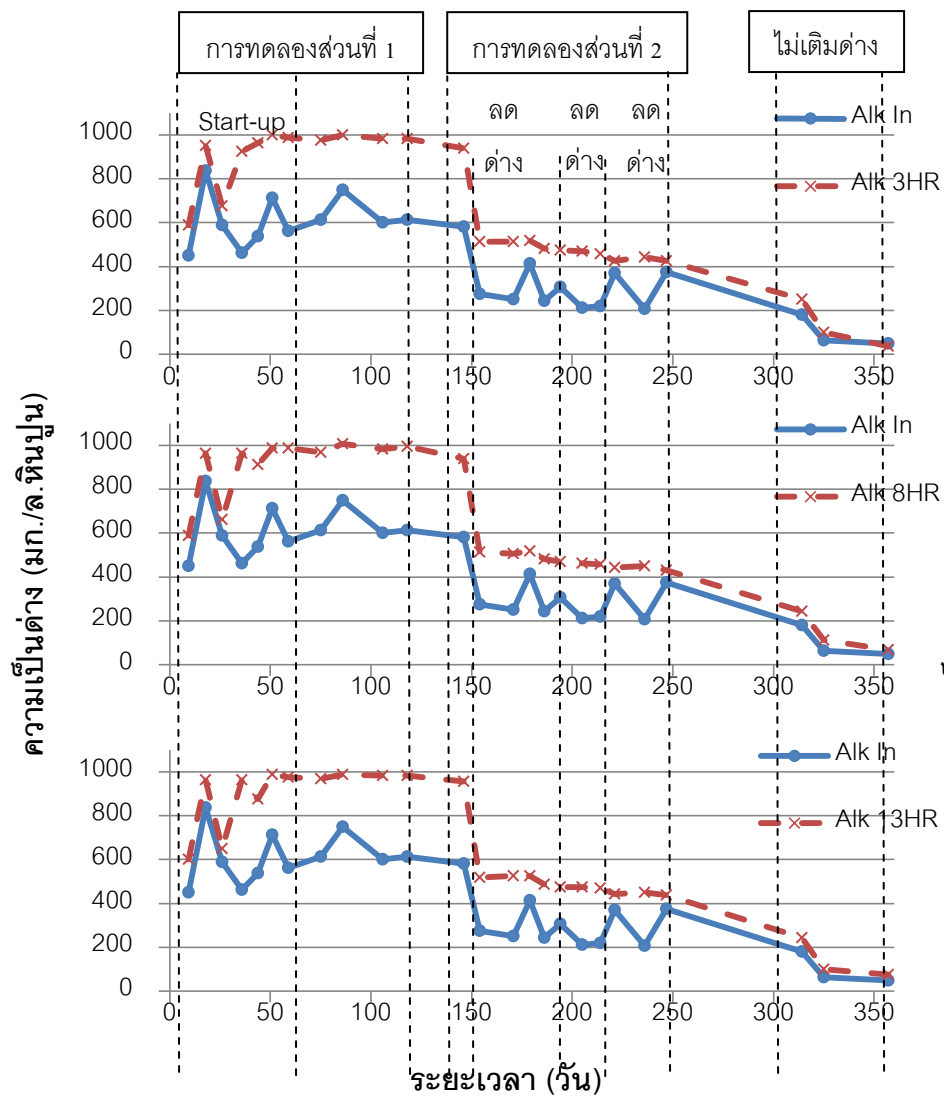
| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ | ความเป็นด่าง (มก./ล.หินปูน) | อัตราส่วนกรดไขมันระเหย ต่อความเป็นด่าง |
|--------------------|--------------------------------|---|
| น้ำเข้า | 651±13 | 0.86±0.29 |
| 3 ชั่วโมง | 985±9 | 0.15±0.11 |
| 8 ชั่วโมง | 993±10 | 0.13±0.08 |
| 13 ชั่วโมง | 986±18 | 0.11±0.07 |
| 25 ชั่วโมง | 980±16 | 0.10±0.06 |
| 38 ชั่วโมง | 983±17 | 0.07±0.02 |
| 50 ชั่วโมง | 961±13 | 0.06±0.02 |



รูปที่ 4-15 กราฟความแตกต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 (อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า)



รูปที่ 4-16 กราฟความเป็นต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 (อัตราเวียนน้ำ 2 เท่า)

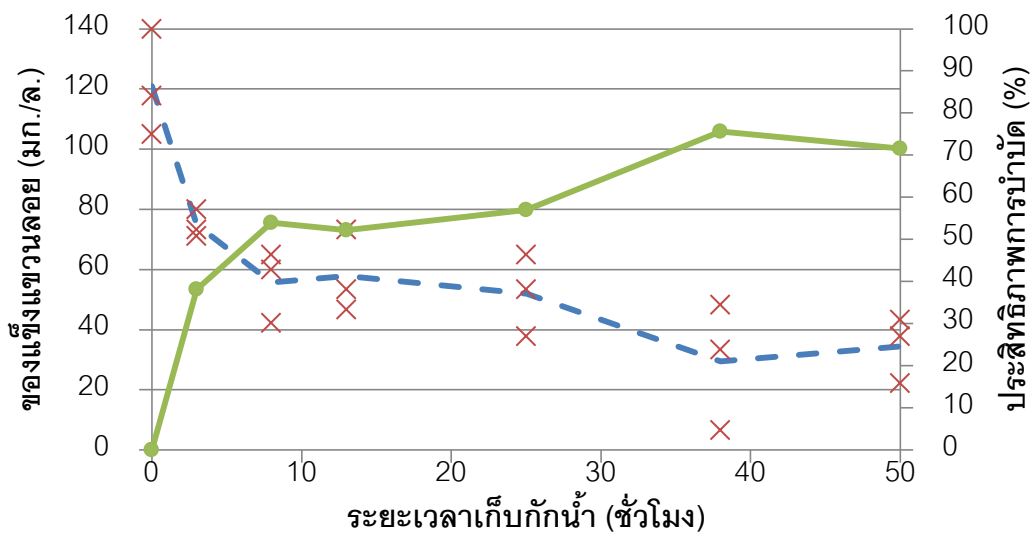


รูปที่ 4-17 กราฟความแตกต่างตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 (อัตราเวียนน้ำ 4 เท่า)

4.1.5 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)

ค่าของแข็งแขวนลอยเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย โดยค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอยู่ที่ 30-60 มก./ล. จึงต้องมีการศึกษาปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากระบบด้วย แม้ระบบจะเกิดตะกอนน้อยมากก็ตาม ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำมาจากน้ำตาลทรายซึ่งละลายน้ำได้หมด แต่เนื่องด้วยความถี่ในการเตรียมน้ำเสียอาจทำให้เกิดสิ่งสกปรกในถังน้ำเข้า ซึ่งค่าของแข็งแขวนลอยที่น้ำเข้าจะแปรปรวนมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 121 ± 18 มก./ล. ในช่วงก่อนระบายตะกอนจุลินทรีย์ออกจากถัง (60 วันแรก) นั้นผลการทดลองพบว่า มีค่าของแข็งแขวนลอยสูงกว่าน้ำเข้า และยิ่งสูงมากที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่ำๆ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ที่ระดับความสูงต่ำๆ ซึ่งมีตะกอนจุลินทรีย์จากการเริ่มต้นระบบอยู่มากนั่นเอง

เมื่อคิดค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (วันที่ 100-120) ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆพบว่า ที่ 3 ชั่วโมง ค่าของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลงเหลือ 74.81 ± 4.63 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพ 38.13% และเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ค่าจะลดลงเรื่อยๆ โดยที่ 8 และ 25 ชั่วโมงมีค่า 55.75 ± 11.97 มก./ล. (53.91%) 57.78 ± 13.88 มก./ล. (52.22%) และ 52.04 ± 13.66 มก./ล. (56.97%) ตามลำดับ และค่าลดลงต่ำสุดที่ 38 ชั่วโมงซึ่งมีค่า 29.44 ± 21.10 มก./ล. คิดเป็น 75.65% ในขณะที่ 50 ชั่วโมงมีค่า 34.44 ± 10.94 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพ 71.52% ดังรูปที่ 4-18 แสดงให้เห็นว่าแม้ระบบจะมีตะกอนสิ่งสกปรกจากน้ำเข้า ซึ่งตามปกติน้ำเสียที่ผ่านบ่อเกรอะเข้าสู่ถังกรองไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่จะเป็นน้ำใส ระบบถังกรองไร้ออกซิเจนยังสามารถบำบัดตะกอนได้ผ่านมาตรฐาน เช่นเดียวกับ Manariotis และ Grigoropoulos (2006) ที่สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ 95.7% ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าของแข็งแขวนลอยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของระบบ โดยที่ **x** คือค่าของแข็งแขวนลอย และ **●** คือประสิทธิภาพการบำบัด

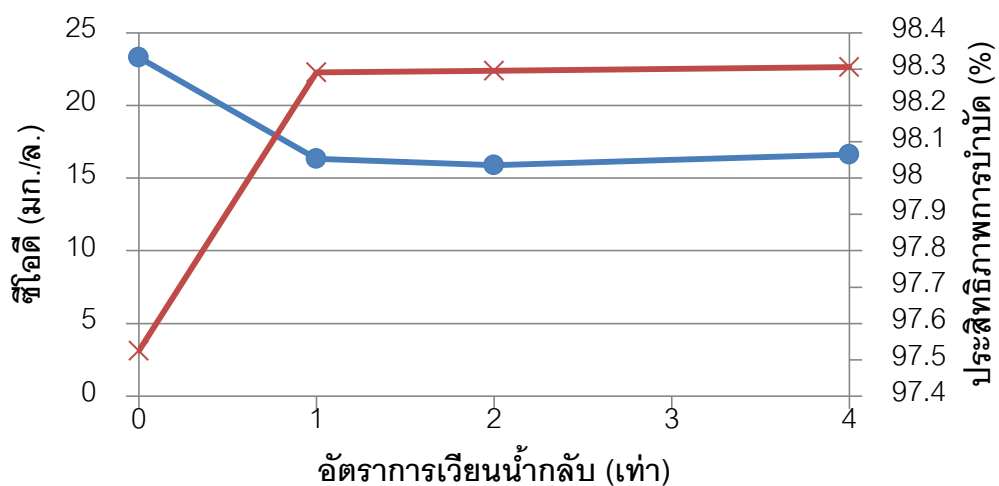
4.2 ผลของอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.1 ค่าซีไอดี

การทดลองส่วนที่ 2 นี้ ใช้เวลาดำเนินการทั้งหมด 114 วัน นับจากวันที่ 136 ถึงวันที่ 249 การทดลองนี้ดำเนินระบบต่อจากการตรวจสอบการอุดตัน (วันที่ 121-135) และทำการทดลองเพิ่มเติมอีก 50 วันในช่วงวันที่ 307-357 ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์เข้ายังคงไว้เท่ากับการทดลองส่วนที่ 1 ทั้ง 3 ชุดถังกรองไร้ออกซิเจน โดยความเข้มข้นน้ำเข้าเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดมีดังนี้ ชุดที่ 1 มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่ามีค่า 955 ± 62 มก./ล. ชุดที่ 2 มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่ามีค่า 931 ± 24 มก./ล. และชุดที่ 3 มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่ามีค่า 981 ± 63 มก./ล. หลังจากเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆในแต่ละชุดพบว่า ค่าซีไอดีในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 1 มากนักดังรูปที่ 4-1 ถึง 4-3 โดยที่ระยะเวลา 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าซีไอดีเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดดังนี้ 84.16 ± 35.58 45.48 ± 19.13 29.6 ± 11.86 19.09 ± 7.80 และ 16.27 ± 6.02 มก./ล. ตามลำดับ มีเพียงที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมงซึ่งถังกรองชุดที่ 1 มีค่าสูงชันมากกว่าชุดอื่น ซึ่งเมื่อนำค่าซีไอดีมาเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดได้เท่ากับ 143 ± 77

มก./ล. สาเหตุอาจเกิดจากมีแมลงวางไข่ทำให้เกิดหนอนจำนวนมากบริเวณท่อลำเลียงน้ำเข้า แต่จากการทดลองในระยะเวลากักเก็บน้ำอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าปัญหานี้ไม่มีผลต่อระบบมากนัก

เนื่องด้วยค่าพีเอชในช่วงวันที่ 136-147 มีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4-4 ถึง 4-6 ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.2.3 ทำให้การทดลองส่วนที่ 2 นี้ได้มีการลดปริมาณด่าง (NaHCO_3) ลง ซึ่งจะพบว่าค่าซีโอดียังคงที่เช่นเดิมจึงอนุมานได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อนำค่าซีโอดีเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวในแต่ละอัตราการเวียนน้ำกลับ (แต่ละชุดการทดลอง) จะพบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลองส่วนที่ 1 อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่าบำบัดได้ 98.29% 2 เท่าบำบัดได้ 98.3% และ 4 เท่าบำบัดได้ 98.31% จากเดิม (0เท่า) 97.53% ดังรูปที่ 4-19 สรุปได้ว่าการเวียนน้ำกลับที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำเสียสัมผัสกับจุลชีพเป็นเวลานานขึ้น แต่เนื่องด้วยประสิทธิภาพการบำบัดขณะไม่มีการเวียนน้ำกลับสูงมากอยู่แล้วจึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่ง Yu และคณะ (2000) ซึ่งศึกษาผลของอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียชุมชนกับน้ำเสียโรงงานถั่วเหลืองพบว่าอัตราการเวียนน้ำกลับที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงสำหรับน้ำเสียชุมชน ขณะที่น้ำเสียโรงงานถั่วเหลืองประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้นจนถึงอัตราที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ ประมาณ 2-6 เท่า โดยให้เหตุผลว่าน้ำเสียโรงงานถั่วเหลืองมีความเข้มข้นที่มากกว่า (ประมาณ 3,000 มก./ล. ขณะที่น้ำเสียชุมชนประมาณ 400 มก./ล.) และย่อยสลายได้ง่ายกว่า ซึ่งในงานวิจัยนี้แม้ความเข้มข้นจะไม่สูงถึง 3,000 มก./ล. แต่น้ำเสียสังเคราะห์ทำจากน้ำตาลซึ่งย่อยสลายได้ง่ายจึงมีความเป็นไปได้ที่อัตราการเวียนน้ำกลับที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น



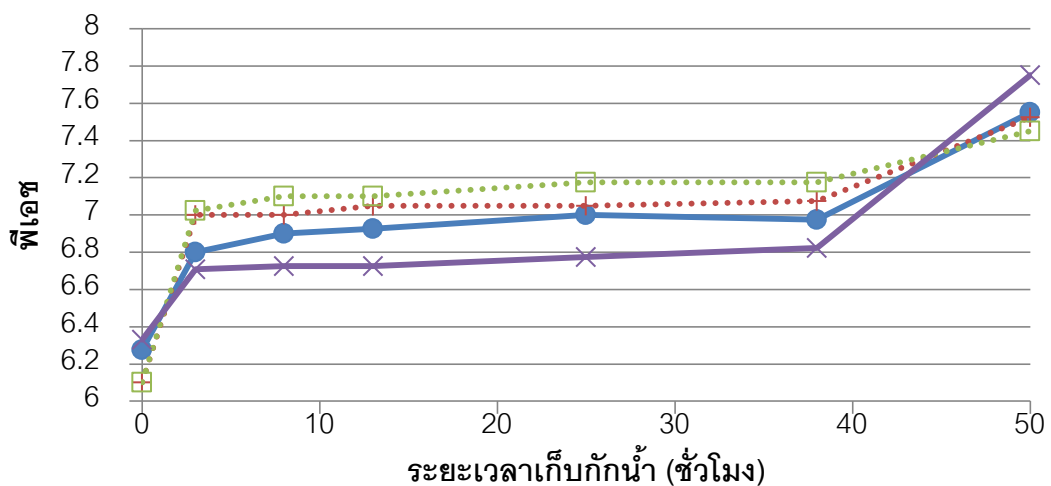
รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีโอดีที่อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของระบบ โดยที่ ● คือค่าซีโอดี และ × คือประสิทธิภาพการบำบัด

4.2.2 ค่ากรดไขมันระเหย

ค่ากรดไขมันระเหยของน้ำเข้ายังคงมีค่าแปรปรวนทั้ง 3 ชุดการทดลอง สาเหตุเกิดจากความถี่ในการเตรียมน้ำเสียเช่นเดิม โดยค่ากรดไขมันระเหยนั้นมีแนวโน้มเดียวกับค่าซีโอดีข้างต้น กล่าวคือค่ากรดไขมันระเหยในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 1 มากนักดังรูปที่ 4-12 ถึง 4-14 โดยที่ระยะเวลา 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดดังนี้ 59.96 ± 16.34 55.53 ± 19.66 37.58 ± 15.31 36.86 ± 17.47 และ 38.22 ± 18.77 มก.กรดอะซิติก/ล. ตามลำดับ และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมง ซึ่งถึงกรองชุดที่ 1 มีค่าสูงขึ้นมาแตกต่างจากชุดอื่นเช่นกันซึ่งมีค่าไขมันระเหยเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดเท่ากับ 84.28 ± 36.97 มก.กรดอะซิติก/ล. ซึ่งทั้งหมดยังมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าแม้จะมีการปรับปริมาณต่างที่ใส่ให้กับระบบในปริมาณที่แตกต่างกันไปในแต่ละชุดจนกระทั่งไม่มีการเติมต่างซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ค่ากรดไขมันระเหยยังคงคงที่

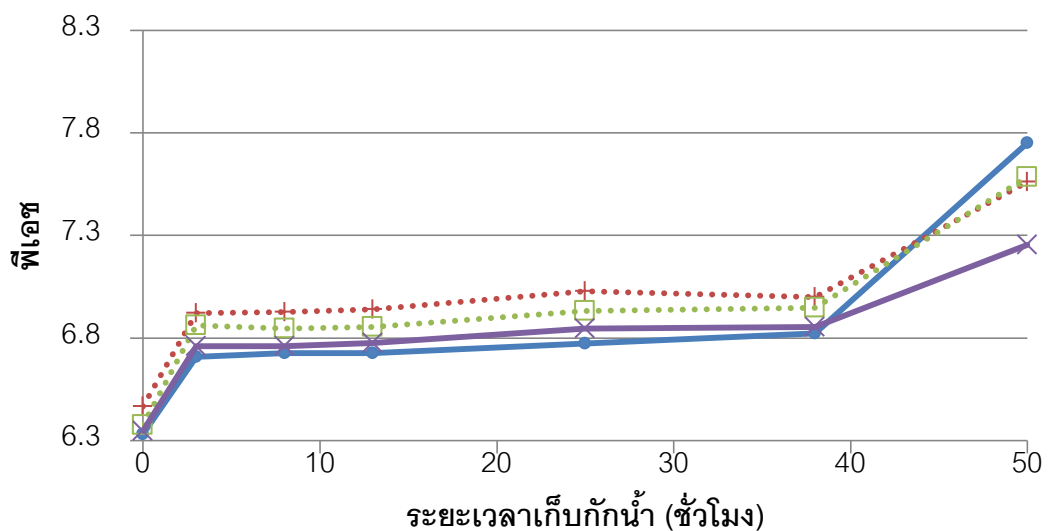
4.2.3 พีเอช (pH)

ในการทดลองส่วนที่ 2 นี้ระบบมีการเวียนน้ำกลับทำให้ในช่วงวันที่ 136-148 ค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้นมากกว่าช่วงที่ทำการควบคุมพีเอชในการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งอยู่ระหว่าง 6.6-6.8 ตลอดความยาวของถังดังรูปที่ 4-20 จึงมีการลดปริมาณการเติมต่างโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ในน้ำเข้าในสัดส่วนต่างๆในแต่ละชุดการทดลองซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่าไม่มีผลต่อค่าซีโอดีของระบบหากยังรักษาพีเอชไว้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังรูปที่ 4-1 ถึง 4-3



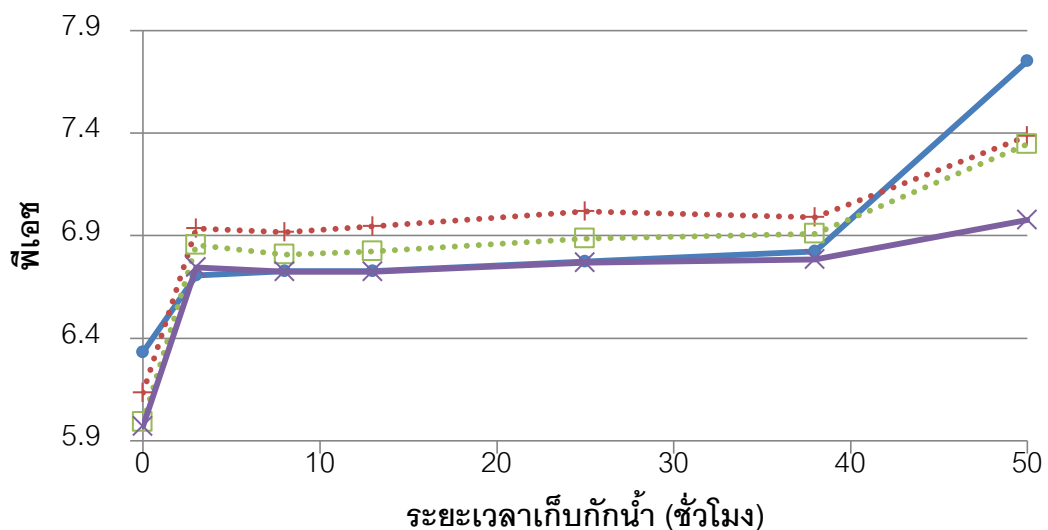
รูปที่ 4-20 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 0 1 2 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 136-148 โดยที่ x คือ 0 เท่า ● คือ 1 เท่า + คือ 2 เท่า □ คือ 4 เท่า

ชุดการทดลองที่ 1 อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. ทำให้ในช่วงวันที่ 136-148 ค่าพีเอชสูงขึ้นโดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 6.28 ± 0.42 6.8 ± 0.14 6.9 ± 0.16 6.93 ± 0.13 7.0 ± 0.14 6.98 ± 0.1 และ 7.55 ± 0.06 ดังรูปที่ 20 จากนั้นจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 1.25 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 พบว่าค่ายังคงอยู่ในช่วงเดิมโดยมีค่าเฉลี่ยของน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงอยู่ที่ 6.47 ± 0.31 6.92 ± 0.17 6.93 ± 0.13 6.94 ± 0.11 7.03 ± 0.11 7.0 ± 0.1 และ 7.56 ± 0.2 จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 1.17 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าเริ่มลดลงแต่ยังไม่ถึงช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 โดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 6.38 ± 0.32 6.36 ± 0.17 6.85 ± 0.15 6.85 ± 0.14 6.93 ± 0.13 6.95 ± 0.09 และ 7.58 ± 0.12 ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 1 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถือว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 (6.6-6.8) โดยน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าพีเอชเฉลี่ยดังนี้ 6.35 ± 0.33 6.76 ± 0.13 6.76 ± 0.11 6.78 ± 0.11 6.85 ± 0.1 6.85 ± 0.09 และ 7.25 ± 0.27 ดังรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-21 กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำโดยที่ ● คือเมื่อไม่มีการเวียนน้ำ + คือ 1.25 ก./ล. □ คือ 1.17 ก./ล. × คือ 1 ก./ล.

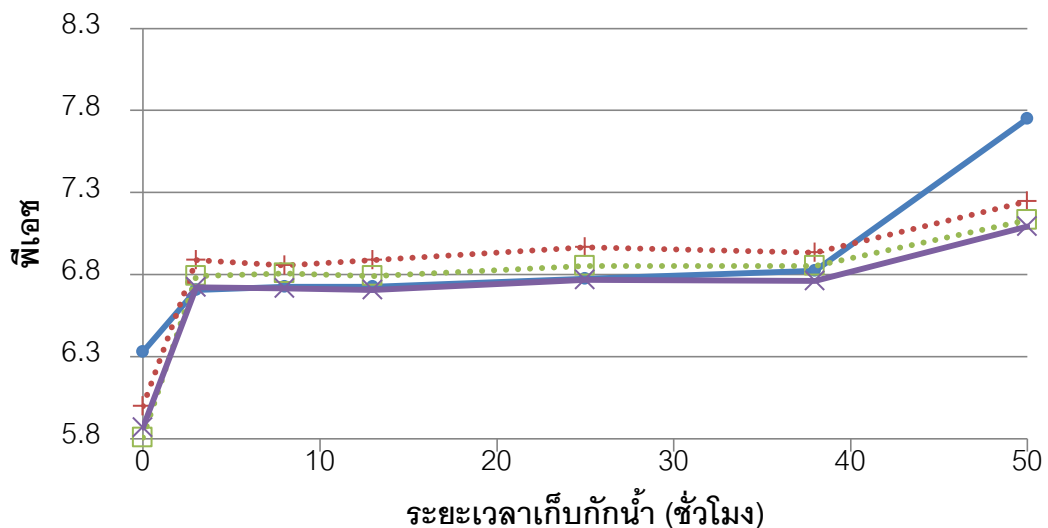
ชุดการทดลองที่ 2 อัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. เช่นกันในช่วงวันที่ 136-148 ค่าพีเอชสูงขึ้นโดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 6.1 ± 0.35 7.0 ± 0.08 7.0 ± 0.08 7.05 ± 0.17 7.05 ± 0.13 7.08 ± 0.1 และ 7.53 ± 0.13 ดังรูปที่ 4-20 อีกทั้งยังสูงกว่าที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่าจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 1 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 พบว่าค่าลดลงมาเล็กน้อยโดยมีค่าเฉลี่ยของน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงอยู่ที่ 6.13 ± 0.36 6.93 ± 0.14 6.92 ± 0.15 6.94 ± 0.12 7.02 ± 0.13 6.99 ± 0.1 และ 7.38 ± 0.18 จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.92 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าลดลงแต่ยังไม่ถึงช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 โดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 5.99 ± 0.34 6.85 ± 0.13 6.81 ± 0.13 6.82 ± 0.11 6.88 ± 0.11 6.91 ± 0.1 และ 7.35 ± 0.25 ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 0.75 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถือว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 (6.6-6.8) โดยน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าพีเอชเฉลี่ยดังนี้ 5.97 ± 0.3 6.75 ± 0.11 6.72 ± 0.12 6.72 ± 0.11 6.77 ± 0.1 6.78 ± 0.09 และ 6.98 ± 0.16 ดังรูปที่ 4-22



รูปที่ 4-22 กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำโดยที่ ● คือเมื่อไม่มีการเวียนน้ำ + คือ 1 ก./ล.

□ คือ 0.92 ก./ล. × คือ 0.75 ก./ล.

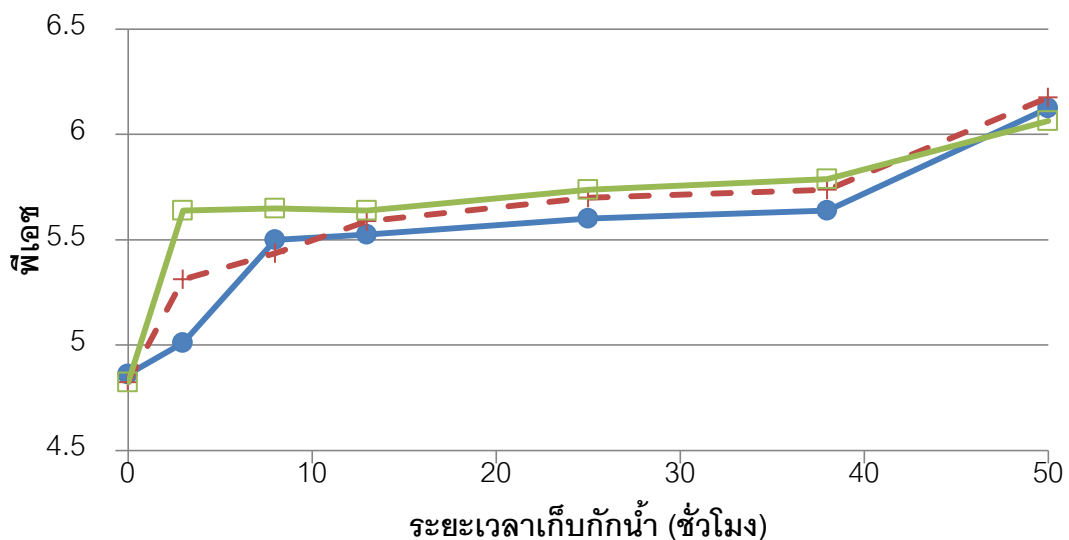
ชุดการทดลองที่ 3 อัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. เช่นกันในช่วงวันที่ 136-148 ค่าพีเอชสูงขึ้นโดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 6.1 ± 0.27 7.03 ± 0.05 7.1 ± 0.14 7.1 ± 0.08 7.18 ± 0.1 7.18 ± 0.1 และ 7.45 ± 0.13 ดังรูปที่ 4-20 โดยสูงกว่าที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่าจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.75 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 พบว่าค่าลดลงมามากโดยมีค่าเฉลี่ยของน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงอยู่ที่ 6.0 ± 0.43 6.89 ± 0.15 6.86 ± 0.17 6.89 ± 0.14 6.97 ± 0.14 6.93 ± 0.1 และ 7.24 ± 0.18 จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.67 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าลดลงแต่ยังไม่ถึงช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 โดยที่น้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 5.81 ± 0.39 6.79 ± 0.11 6.81 ± 0.11 6.79 ± 0.13 6.85 ± 0.11 6.85 ± 0.9 และ 7.13 ± 0.18 ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 0.58 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถึงว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 (6.6-6.8) โดยน้ำเข้า และระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 13 25 38 และ 50 ชั่วโมงมีค่าพีเอชเฉลี่ยดังนี้ 5.87 ± 0.42 6.72 ± 0.12 6.72 ± 0.12 6.71 ± 0.13 6.77 ± 0.1 6.76 ± 0.09 และ 7.09 ± 0.15 ดังรูปที่ 4-23



รูปที่ 4-23 กราฟค่าพีเอชที่การปรับการเติมปริมาณต่างๆ ของถังกรองไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่า ทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำโดยที่ ● คือเมื่อไม่มีการเวียนน้ำ + คือ 0.75 ก./ล.

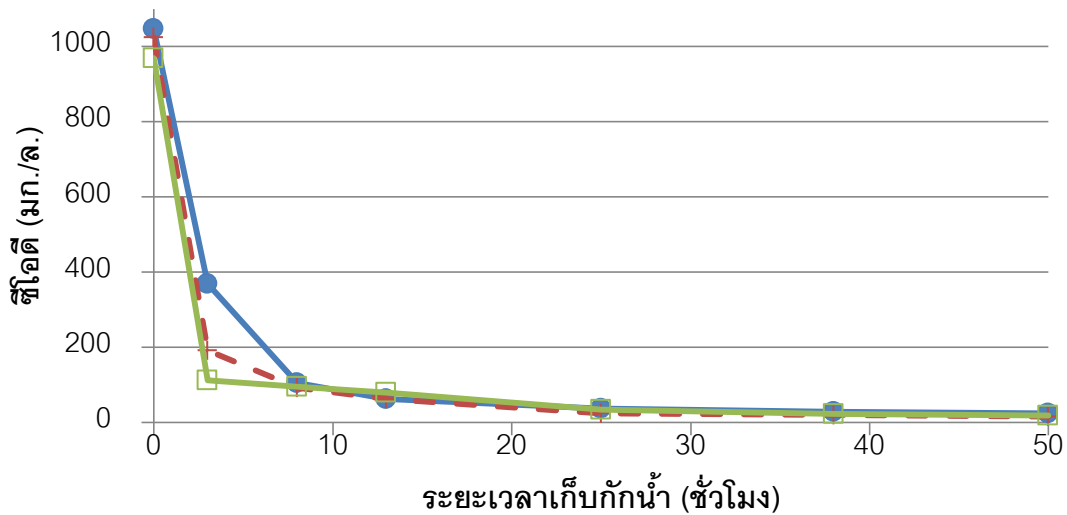
□ คือ 0.67 ก./ล. × คือ 0.58 ก./ล.

หลังจากลดปริมาณการเติมต่างจนพีเอชกลับมาอยู่ในช่วงก่อนทำการเวียนน้ำ ในช่วงวันที่ 307-357 ได้ทำการทดลองไม่เติมต่างลงในน้ำเข้าเลย ผลที่ได้พบว่าค่าพีเอชทั้ง 3 อัตราการเวียน น้ำลดลงจากเดิมที่ควบคุมไว้ที่ 6.6-6.8 เหลืออยู่ในช่วง 5.5-5.8 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสม สำหรับระบบไร้ออกซิเจน นอกจากนั้นจะพบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมง อัตราการเวียนน้ำที่ ต่ำกว่าค่าพีเอชจะลดมากกว่า ดังรูปที่ 4-24 โดยที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่าลดลงเหลือ 5.01 ± 0.3 ที่ 2 เท่าเหลือ 5.31 ± 0.41 และที่ 4 เท่าเหลือ 5.64 ± 0.29 แสดงให้เห็นว่าการเวียนน้ำ กลับที่มากขึ้นทำให้พีเอชในช่วงแรกของถังเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ส่วนที่เหลือของถังได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4-24 กราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 2 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 307-357 โดยที่ ● คือ 1 เท่า + คือ 2 เท่า □ คือ 4 เท่า

นอกจากนั้นเมื่อศึกษาค่าซีไอดีเฉลี่ยในช่วงนี้ดังรูปที่ 4-25 จะพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 ชั่วโมงค่าซีไอดีเริ่มสูงขึ้น โดยอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่าเพิ่มขึ้นเป็น 369 ± 34 มก./ล. ที่ 2 เท่า เป็น 191 ± 155 มก./ล. และที่ 4 เท่าเป็น 112 ± 57 มก./ล. แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่ระบบ จะล่มหากยังไม่มีการเติมต่างเช่นนี้ต่อไปเป็นเวลานาน ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัยนี้ จึงสรุป ได้ว่า ไม่สามารถงดการเติมต่างให้กับระบบได้



รูปที่ 4-25 กราฟเปรียบเทียบค่าซีไอดีที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อมีอัตราการเวียนน้ำกลับ 1 และ 4 เท่า ในช่วงวันที่ 307-357 โดยที่ ● คือ 1 เท่า + คือ 2 เท่า □ คือ 4 เท่า

4.2.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

จากการทดลองส่วนที่ 1 พบว่าในทุกๆระยะเวลาเก็บกักน้ำมีค่าความเป็นด่างใกล้เคียงกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณต่าง (NaHCO₃) ที่ใส่ให้กับระบบ ซึ่งในการทดลองส่วนที่ 2 นี้มีการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบที่ 1 และ 4 เท่า ทำให้เมื่อเติมปริมาณต่างเท่ากัน ค่าความเป็นด่างในชุดถังกรองไร้ออกซิเจนในแต่ละชุดมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

ชุดการทดลองที่ 1 อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. มีค่าความเป็นด่าง 971±47 มก./ล. หินปูน ในช่วงวันที่ 136-148 จากนั้นจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 1.25 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 ค่าความเป็นด่างเหลืออยู่ที่ 816±11 มก./ล. หินปูน จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 1.17 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าลดลงเหลือ 776±15 มก./ล. หินปูน ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 1 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถึงว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งค่าความเป็นด่างลดเหลือ 697±13 มก./ล. หินปูน ดังรูปที่ 4-15

ชุดการทดลองที่ 2 อัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. มีค่าความเป็นด่าง 971±47 มก./ล. หินปูน ในช่วงวันที่ 136-148 จากนั้นจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 1 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 ค่าความเป็นด่างเหลืออยู่ที่ 651±5 มก./ล. หินปูน จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.92 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าลดลงเหลือ 620±5 มก./ล. หินปูน

ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 0.75 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถึงถือว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งค่าความเป็นด่างลดเหลือ 536±6 มก./ล. หินปูนดังรูปที่ 4-16

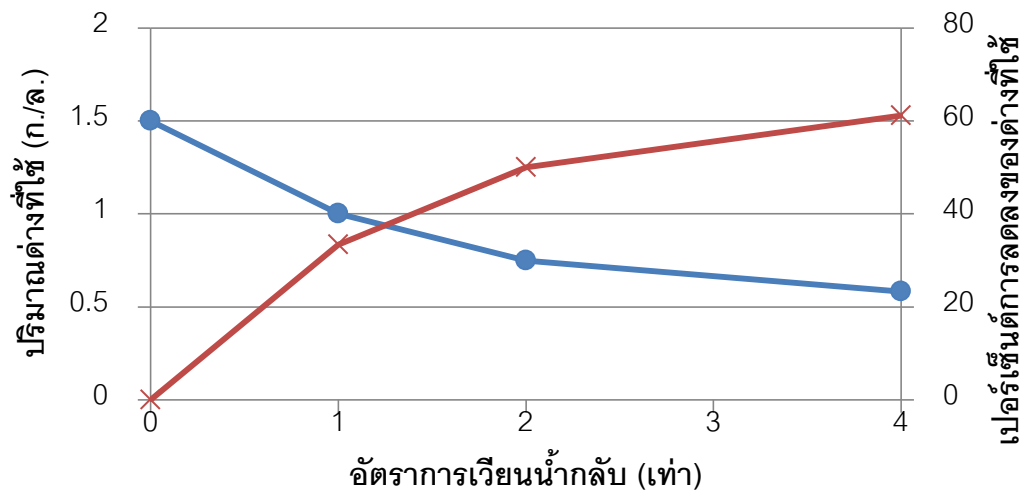
ชุดการทดลองที่ 3 อัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่า เริ่มต้นด้วยการเติมต่างปริมาณ 1.5 ก./ล. มีค่าความเป็นด่าง 971±47 มก./ล. หินปูนในช่วงวันที่ 136-148 จากนั้นจึงลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.75 ก./ล. ในช่วงวันที่ 148-191 ค่าความเป็นด่างเหลืออยู่ที่ 505±8 มก./ล. หินปูน จากนั้นลดปริมาณต่างลงเหลือ 0.67 ก./ล. ในช่วงวันที่ 191-215 พบว่าค่าลดเหลือ 468±12 มก./ล. หินปูน ในช่วงวันที่ 215-249 จึงลดปริมาณต่างอีกครั้งเหลือ 0.58 ก./ล. ซึ่งพบว่าค่าพีเอชลดลงจนถึงถือว่าอยู่ในช่วงที่ควบคุมในการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งค่าความเป็นด่างลดเหลือ 443±10 มก./ล. หินปูน ดังรูปที่ 4-17

เมื่อนำค่าปริมาณต่างเปรียบเทียบกับระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆพบว่า ค่าใกล้เคียงกันโดยขึ้นอยู่กับปริมาณต่างที่ใส่น้ำเข้าเช่นเดียวกับการทดลองส่วนที่ 1 ทั้ง 3 ชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าความเป็นด่าง และปริมาณต่างที่ใส่ ที่อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ

| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| ปริมาณต่างที่เติม (ก./ล.) | ความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน) | ปริมาณต่างที่เติม (ก./ล.) | ความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน) | ปริมาณต่างที่เติม (ก./ล.) | ความเป็นด่าง (มก./ล. หินปูน) |
| 1.5 | 971±47 | 1.5 | 971±47 | 1.5 | 971±47 |
| 1.25 | 816±11 | 1 | 651±5 | 0.75 | 505±8 |
| 1.17 | 776±15 | 0.92 | 620±5 | 0.67 | 468±12 |
| 1 | 691±73 | 0.75 | 536±6 | 0.58 | 443±10 |

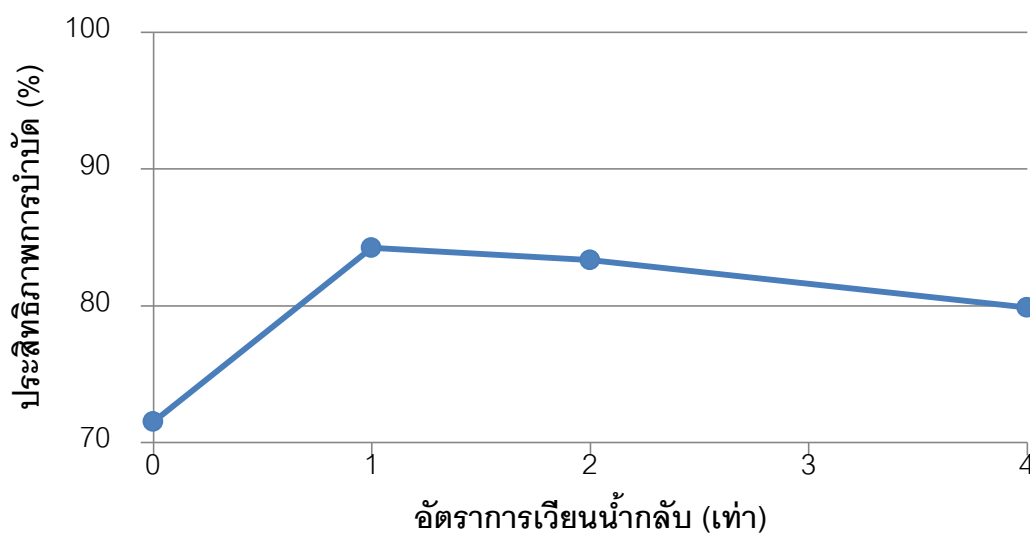
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การเพิ่มอัตราเวียนน้ำกลับทำให้สามารถลดปริมาณการใช้ต่างลงได้ ซึ่งยังคงควบคุมพีเอชของระบบได้เท่ากับตอนไม่มีการเวียนน้ำกลับ และสามารถบำบัดน้ำเสียได้ประสิทธิภาพเท่าเดิมอีกด้วย โดยที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า ลดการใช้ต่างไป 33.33% อัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่าลดได้ 50% และอัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่าลดได้ถึง 61.11% ดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างที่ใช้ ณ อัตราการเวียนน้ำกลับต่างๆ กับ เปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณต่างที่ใช้ โดยที่ ● คือค่าปริมาณต่างที่ใช้ และ × คือเปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณต่างที่ใช้

4.2.5 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)

ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่ใช้นำมาหาผลของอัตราการเวียนน้ำกลับ ต่อประสิทธิภาพของระบบ จากรูปที่ 4-27 จะพบว่า อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่าบำบัดได้ 84.23% 2 เท่าบำบัดได้ 83.33% และ 4 เท่าบำบัดได้ 79.87% จากเดิม (0เท่า) 71.52% จะพบว่า การเวียนน้ำกลับที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น แต่หากมากเกินไปจะทำให้ตะกอน หลุดลอยออกมาเนื่องจากอัตราเร็วน้ำไหลขึ้นที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้ ซึ่งคาดว่าหาก เพิ่มอัตราการเวียนน้ำกลับมากขึ้นกว่า 4 เท่า ประสิทธิภาพอาจลดลงต่ำกว่าขณะไม่มีการเวียนน้ำ กลับได้



รูปที่ 4-27 กราฟประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของอัตราการเวียนน้ำกลับที่ 0 1 2 และ 4 เท่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง

4.3 การตรวจสอบการอุดตันของระบบถึงกรองไร้ออกซิเจน

การทดลองส่วนนี้ได้ทำการตรวจสอบการอุดตันของระบบ เมื่อระบบยังไม่มีจุลชีพเกาะ (วันที่ 0) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการทดลองส่วนที่ 1 (วันที่ 120-136) และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการทดลองส่วนที่ 2 (วันที่ 250) โดยก่อนหน้าการทดลองทำการระบายตะกอนที่ก้นถังออกก่อนซึ่งมีเพียงเล็กน้อย เพื่อเป็นการตรวจสอบการอุดตันที่เกิดจากการเกาะตัวของจุลชีพบนตัวกลางเท่านั้น การทดลองนี้ใช้น้ำเกลือ 72 กรัมละลายในน้ำปริมาณ 300 มิลลิลิตร เป็นสารติดตาม ปล่องแบบพัลส์บริเวณท่อน้ำเข้า จากนั้นวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ทางน้ำออก หลังจากการทดลองในถังกรองชุดที่ 1 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามเป็นดังรูปที่ 4-34 ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมดประมาณ 7 วัน โดยค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงใกล้ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ได้จากการออกแบบ (50 ชั่วโมง) จากนั้นจะค่อยๆลดลงไปในทางเดียวกันจนกระทั่งถึงวันที่ 7 ของการทดลอง ทำให้ได้ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างดังนี้ เมื่อช่วงระยะเวลาเข้าใกล้ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 50 ชั่วโมง ความถี่ในการเก็บตัวอย่างจะเป็น ชั่วโมงละครั้ง หลังจากนั้นเมื่อค่าความนำไฟฟ้าเริ่มลดลง ความถี่ในการเก็บตัวอย่างจะเหลือวันละ 2-3 ครั้งจนกระทั่งครบ 7 วันหรือจนค่าเข้าใกล้ตอนก่อนทำการใส่สาร จากนั้นนำค่าความนำไฟฟ้าที่ได้มาแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้ เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยต่อไป

ชุดการทดลองที่ 1 เมื่อระบบยังไม่มีจุลชีพเกาะพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นสูงสุดที่เวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นค่อยๆลดลง เมื่อนำค่าทั้งหมดมาหารระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยจะได้ 75.36 ชั่วโมง ความแปรปรวน 711 ชั่วโมง² ขณะที่เมื่อถึงสภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 1 ค่าความนำไฟฟ้าขึ้นสูงสุดที่เวลา 44 ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยจึงได้ 69.94 ชั่วโมง ความแปรปรวน 753 ชั่วโมง² และที่สภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 2 (อัตราการเวียนน้ำกลับ 1 เท่า) ค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่เวลา 51 ชั่วโมง คิดเป็นระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย 87.1 ชั่วโมง ความแปรปรวน 1,176 ชั่วโมง² ซึ่งค่าทั้ง 3 ครั้งพบว่าค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และรูปแบบการกระจายตัวค่อนข้างเหมือนกัน

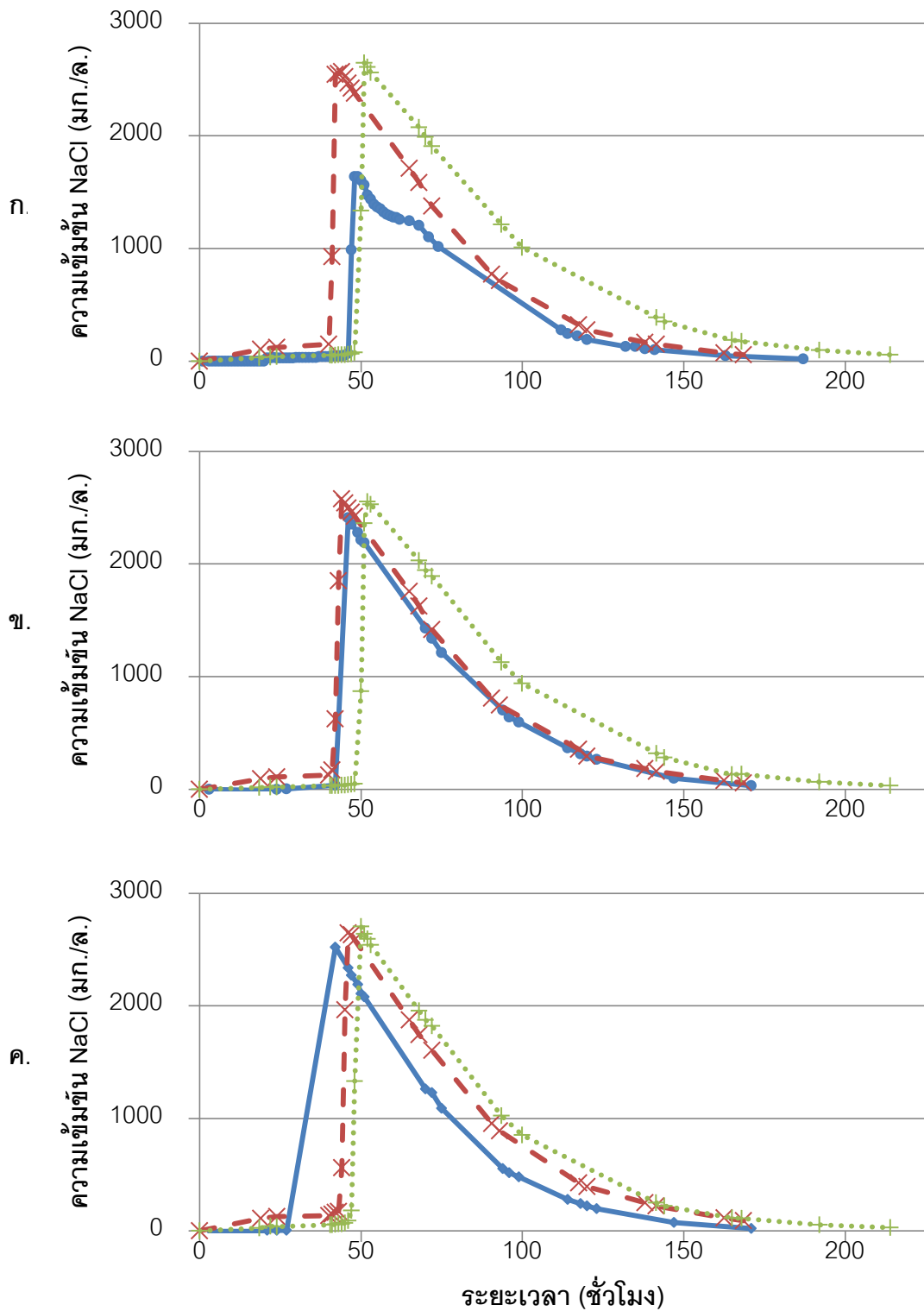
ชุดการทดลองที่ 2 เมื่อระบบยังไม่มีจุลชีพเกาะพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นสูงสุดที่เวลา 46 ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย 73.49 ชั่วโมง ความแปรปรวน 672 ชั่วโมง² ขณะที่เมื่อถึงสภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 1 ค่าความนำไฟฟ้าขึ้นสูงสุดที่เวลา 44 ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยจึงได้ 71.53 ชั่วโมง ความแปรปรวน 758 ชั่วโมง² และที่สภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 2 (อัตราการเวียนน้ำกลับ 2 เท่า) ค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่เวลา 52 ชั่วโมง คิดเป็นระยะเวลา

เก็บกักน้ำเฉลี่ย 84.96 ชั่วโมง ความแปรปรวน 1,010 ชั่วโมง² ซึ่งค่าทั้ง 3 ครั้งพบว่าค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และรูปแบบการกระจายตัวค่อนข้างเหมือนกัน

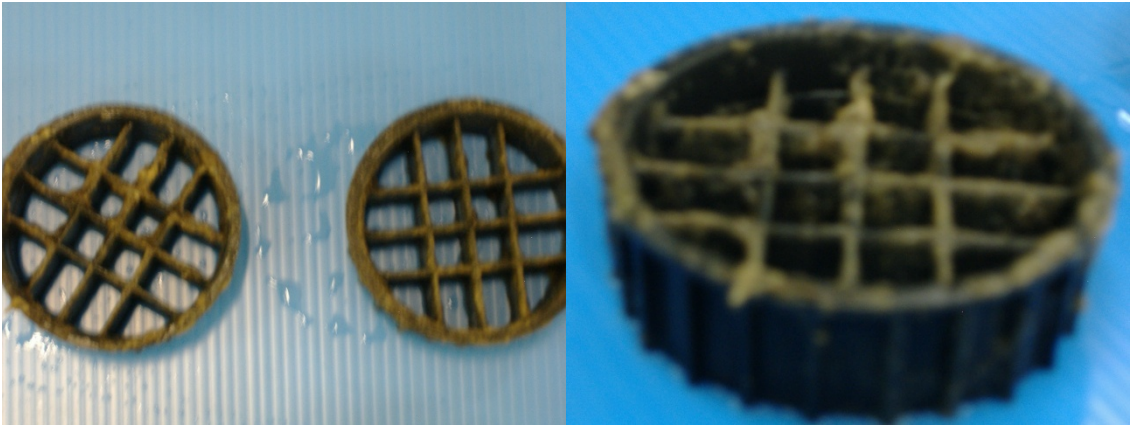
ชุดการทดลองที่ 3 เมื่อระบบยังไม่มีจุลชีพเกาะพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นสูงสุดที่เวลา 42 ชั่วโมงระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย 64.88 ชั่วโมง ความแปรปรวน 628 ชั่วโมง² ขณะที่เมื่อถึงสภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 1 ค่าความนำไฟฟ้าขึ้นสูงสุดที่เวลา 46 ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยจึงได้ 74.74 ชั่วโมง ความแปรปรวน 828 ชั่วโมง² และที่สภาวะคงตัวในการทดลองส่วนที่ 2 (อัตราการเวียนน้ำกลับ 4 เท่า) ค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่เวลา 50 ชั่วโมง คิดเป็นระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย 81.34 ชั่วโมง ความแปรปรวน 963 ชั่วโมง² ซึ่งค่าทั้ง 3 ครั้งพบว่าค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และรูปแบบการกระจายตัวค่อนข้างเหมือนกันซึ่งจากรูปที่ 4-28 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อระบบไม่มีจุลชีพมีการอุดตันมากกว่าที่มีจุลชีพคาดที่เกิดจากความผิดพลาดในการวัดของผู้วิจัยเอง

แม้จากการทดลองจะพบว่าค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดมีความแตกต่างกันเล็กน้อยนั้น อาจเกิดมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ทั้งปริมาณการใส่สารติดตาม อัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ รวมไปถึงความคลาดเคลื่อนจากตัวชุดถังกรองเอง ซึ่งส่งผลทำให้ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยของระบบคลาดเคลื่อนตามไปด้วย และในกรณีของการกระจายตัวของสารติดตามในระบบจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถอธิบายได้ว่า สารติดตามส่วนใหญ่จะไหลออกจากระบบใกล้เคียงกับระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ออกแบบไว้ ดังแสดงได้จากค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด ในขณะที่สารติดตามอีกส่วนหนึ่งเกิดการกระจายตัวแล้วค่อยๆ ออกจากระบบทำให้ค่าความนำไฟฟ้าค่อยๆ ลดลงอย่างที่ปรากฏในการทดลองซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าทั้ง 3 ชุดการทดลองนี้หลังจากดำเนินระบบไปเป็นระยะเวลา 120 วันสำหรับสภาวะที่ 1 และ 114 วันสำหรับสภาวะที่ 2 นั้นเกิดการอุดตันในระบบน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-28 ซึ่งหลังจากเสร็จสิ้นการดำเนินระบบแล้วได้สูบน้ำตัวอย่างตัวกลางออกมาจากระบบ ลักษณะที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งตัวอย่างในรูปที่ 4-29 เป็นตัวกลางที่มีการเกาะติดของจุลชีพที่มากที่สุดที่ได้สู่มขึ้นมา โดยตัวกลางส่วนใหญ่มีจุลชีพเกาะติดค่อนข้างต่ำ

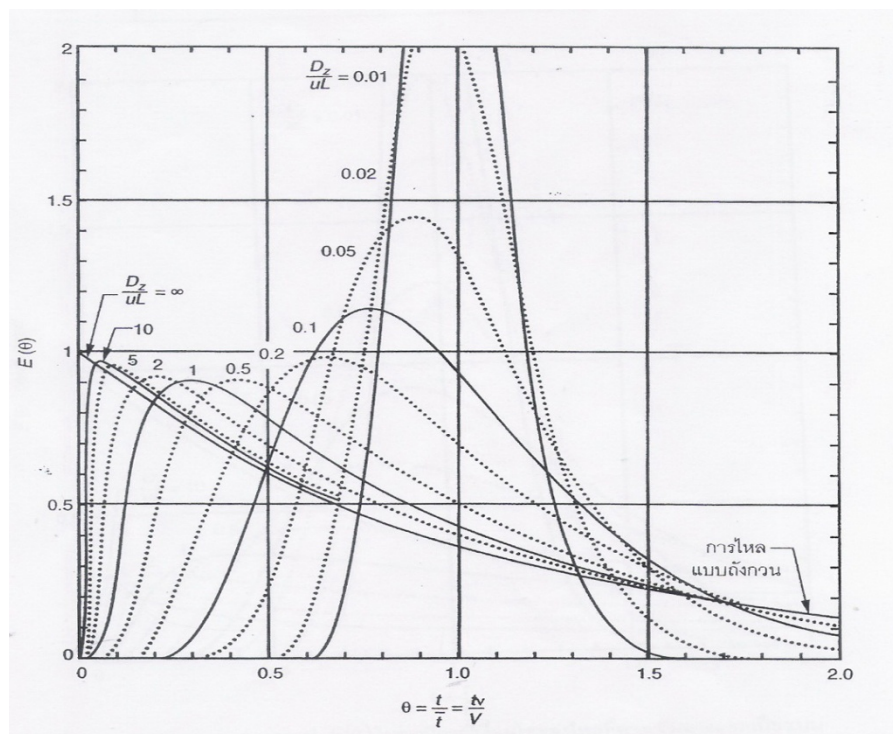


รูปที่ 4-28 กราฟค่าความเข้มข้นสารติดตามที่เวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง โดยที่ ● คือ ก่อนทำการทดลองส่วนที่ 1 × คือ เมื่อสิ้นสุดการทดลองส่วนที่ 1 และ + คือ เมื่อสิ้นสุดการทดลองส่วนที่ 2 (ก. ชุดที่ 1 ข. ชุดที่ 2 และ ค. ชุดที่ 3)



รูปที่ 4-29 ตัวอย่างตัวกลางที่เชื่อมจุดชีพเกาะหลังการวิจัย

หลังจากทำการหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยด้วยการทำเป็นกราฟ RTD แล้วพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของสารติดตามในถังทั้ง 3 ชุดการทดลองมีลักษณะเดียวกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะการกระจายตัวของน้ำในถังปฏิกรณ์ของวิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา (2544) ดังรูปที่ 4-30 พบว่าระบบถังกรองไร้ออกซิเจนในงานวิจัยนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับถังกวนสมบูรณ์ กล่าวคือ ค่าความเข้มข้นสารติดตามจะขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นค่อยๆลดลง ในขณะที่ถังแบบไหลตามกัน จะขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำนั้นๆ



รูปที่ 4-30 รูปแบบการกระจายตัวของน้ำในถังปฏิกรณ์
ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา, 2544

4.4 การหาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

จากการทดลองส่วนที่ 1 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์คือ ค่าซีโอดีกรอง หรือซีโอดีละลายน้ำ และระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ เมื่อลองนำค่าดังกล่าวมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 4-31 จะพบว่า ค่าที่ได้เข้ากับสมการอันดับหนึ่ง (First-order) ดังสมการ (4-1) มากกว่าสมการ Monod ดังที่ได้วางแผนไว้ข้างต้น การวิเคราะห์ทำได้โดยนำค่าซีโอดีละลายน้ำที่สภาวะคงตัว (วันที่ 99-120) มาเฉลี่ยกัน และค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0-50 ชั่วโมง วิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel เมื่อทำการวิเคราะห์ทั้ง 3 ชุดถังกรองแล้วจะได้ค่าซีโอดีย่อยสลายได้ (bCOD) 897 ± 46 มก./ล. ค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ (nbCOD) 43 ± 8 มก./ล. และอัตราการใช้สารตั้งต้น (k) 1.1 ± 0.31 ต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4-31

$$COD = bCOD e^{-kt} + nbCOD \quad (4-1)$$

โดยที่ COD คือ ค่าซีโอดีที่เวลาใดๆ (มก./ล.)
 bCOD คือ ค่าซีโอดีย่อยสลายได้ (มก./ล.)
 nbCOD คือ ค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ (มก./ล.)
 k คือ อัตราการใช้สารตั้งต้น (ต่อชั่วโมง)
 t คือ เวลาใดๆ (ชั่วโมง)

จากการทดลองส่วนที่ 2 พบว่าทั้ง 3 อัตราการเวียนน้ำกลับ (1 2 และ 4 เท่า) ค่าซีโอดีในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำแตกต่างจากที่สภาวะคงตัวของการทดลองส่วนที่ 1 น้อยมาก ซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว จึงนำค่าจากวันที่ 136-249 มาหาค่าจลนพลศาสตร์ทั้ง 3 (ซีโอดีย่อยสลายได้ ซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ และอัตราการใช้สารตั้งต้น) ในแต่ละครั้งผลที่ได้จะพบว่า อัตราส่วนค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ต่อค่าซีโอดีทั้งหมดค่อนข้างแปรปรวนดังรูปที่ 4-32 ซึ่งตามหลักความเป็นจริงนั้น อัตราส่วนควรมีค่าเท่ากันเนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากน้ำตาลทรายชนิดเดียวกัน จึงนำอัตราส่วนดังกล่าวตลอดระยะเวลาวันที่ 99-249 มาหาค่าเฉลี่ยจะได้ 4.18% จากนั้นจึงนำค่าอัตราส่วนนี้กลับมาหาอัตราการใช้สารตั้งต้น (k) อีกครั้ง ผลที่ได้พบว่า ค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับขณะไม่มีการเวียนน้ำโดยที่อัตราเวียนน้ำกลับ 1 เท่ามีค่าซีโอดีย่อยสลายได้ 915 ± 57 มก./ล. ค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ 40 ± 2 มก./ล. และอัตราการใช้สารตั้งต้น 0.55 ± 0.14 ต่อชั่วโมง อัตราเวียนน้ำกลับ 2 เท่ามีค่าซีโอดีย่อยสลายได้ 892 ± 22 มก./ล. ค่าซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ 39 ± 1 มก./ล. และอัตราการใช้สารตั้งต้น 1.03 ± 0.22 ต่อชั่วโมง และที่อัตราเวียนน้ำกลับ 4

เท่ามีค่าซีไอดีที่ย่อยสลายได้ 940 ± 58 มก./ล. ค่าซีไอดีที่ย่อยสลายไม่ได้ 41 ± 3 มก./ล. และอัตราการ
ใช้สารตั้งต้น 0.84 ± 0.12 ต่อชั่วโมง ซึ่งจะพบว่าค่าค่อนข้างแปรปรวนดังรูปที่ 4-33 อาจ
เนื่องมาจากค่าซีไอดีที่นำมาใช้วิเคราะห์มีค่าต่ำมาก ทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเพียง
เล็กน้อยส่งผลต่อค่าอัตราการใช้สารตั้งต้นมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Ahn และ Forster, 2000 และ Isik และ Sponza, 2005) พบว่าอีก
หนึ่งสมการที่นิยมใช้กันคือสมการ Stover-Kincannon รูปสมการเป็นดังนี้

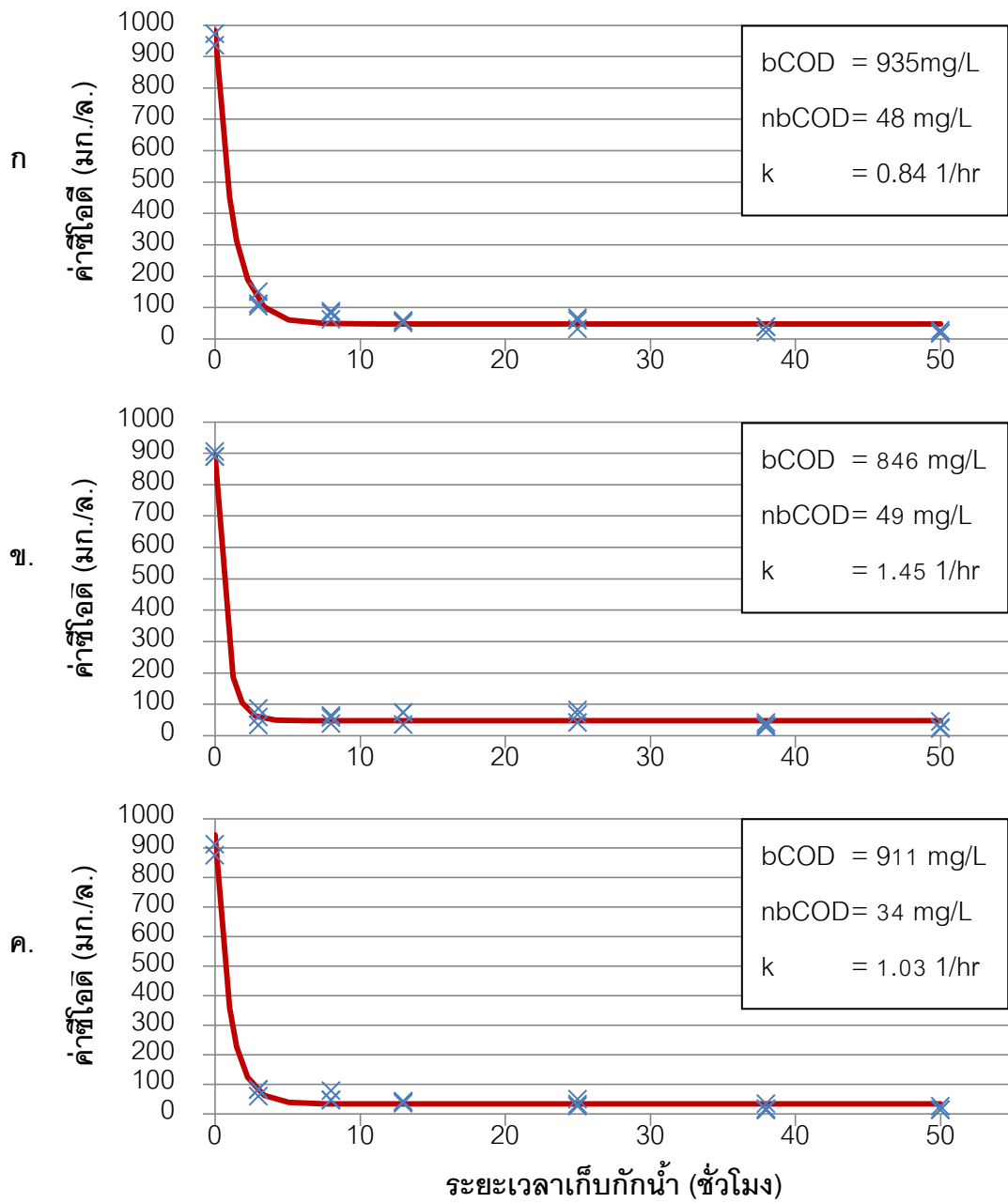
$$S = S_0 - \left[\frac{R_{max}t}{1 + K_B t} \right] \quad (4-2)$$

| | |
|-----------|---------------------------------|
| โดยที่ S | คือ ค่าซีไอดีที่ระยะเวลาใดๆ |
| S_0 | คือ ค่าซีไอดีน้ำเข้า |
| t | คือ ระยะเวลาใดๆ |
| K_B | คือ ค่าคงที่การอิ่มตัวของจุลชีพ |
| R_{max} | คือ อัตราการย่อยสลายสูงสุด |

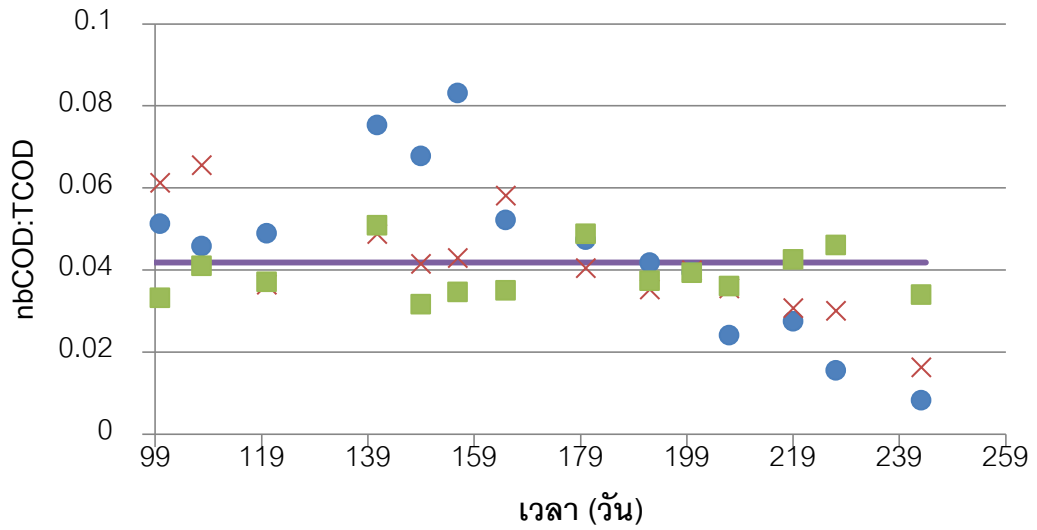
เมื่อทดลองนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์กับสมการ Stover-Kincannon พบว่ามี
ลักษณะใกล้เคียงกันกับสมการอันดับหนึ่ง แต่สมการมีความซับซ้อนซึ่งยากต่อการนำไปใช้ จึง
เลือกใช้สมการอันดับหนึ่ง โดยค่าที่ได้จากสมการ Stover-Kincannon เปรียบเทียบกับงานวิจัย
ก่อนหน้าเป็นดังตารางที่ 4-3 ซึ่งจะพบว่าค่าอัตราการใช้สารตั้งต้นจากงานวิจัยนี้สูงกว่ามาก อาจ
เนื่องมาจากน้ำเสียสังเคราะห์ทำจากน้ำตาลทรายซึ่งย่อยสลายได้ง่ายเชื้อจุลชีพจึงสามารถดูดซึม
ไปใช้ได้ง่ายนอกจากนั้นยังถือว่าลดระยะเวลาในช่วงไฮโดรไลซิสิกอีกด้วย

ตารางที่ 4-3 ค่าจลนพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า

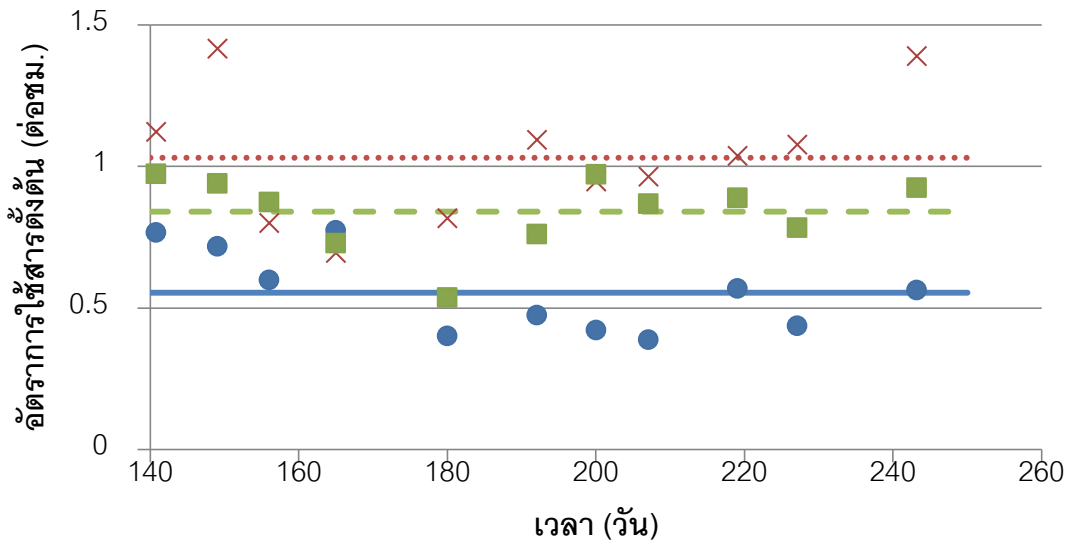
| สมการ | น้ำเสียที่ใช้ | รูปแบบถัง ปฏิกิริยา | ความเข้มข้น น้ำเข้า (มก./ล.) | ระยะเวลาเก็บ กักน้ำ(ชั่วโมง) | ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง | | | อ้างอิง |
|----------------------|------------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------|-------------------------|
| | | | | | k (ต่อชม.) | nbCOD (มก./ล.) | bCOD (มก./ล.) | |
| อันดับหนึ่ง | น้ำเสียอุตสาหกรรม สิ่งทอ | UASB | 4,214 | 6-99.84 | 0.026 | 116 | | Isik และSponza, 2005 |
| อันดับหนึ่ง | น้ำเสียสังเคราะห์ จากน้ำตาลทราย | AF | 1,000 | 3-50 | 1.1 | 43 | 897 | งานวิจัยนี้ |
| | | | | | R_{max} (ก.ซีโอดี/ล./วัน) | K_B (ก./ล./วัน) | | |
| Stover- Kincannon | น้ำเสียจากโรงงาน แปรง | AF | 1,150 | 6-24 | 49.75 | 50.62 | | Ahn และForster, 2000 |
| Stover- Kincannon | น้ำเสียจากถั่ว เหลือง | AF | 7,520-11,400 | 24-34.8 | 83.3 | 85.5 | | Isik และSponza, 2005 |
| Stover- Kincannon | น้ำเสียสังเคราะห์ จากน้ำตาลทราย | AF | 1,000 | 3-50 | 659 | 0.75 | | งานวิจัยนี้ |



รูปที่ 4-31 กราฟแสดงการหาค่าจลนพลศาสตร์ของชุดการทดลองทั้ง 3 ในการทดลองส่วนที่ 1
(ก. ชุดที่ 1 ข. ชุดที่ 2 และ ค. ชุดที่ 3)



รูปที่ 4-32 อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีที่ย่อยสลายไม่ได้ต่อซีโอดีทั้งหมดตั้งแต่วันที่ 99-249 ทั้ง 3 จุด ถังกรองโดยที่ ● คือจุดที่ 1 × คือจุดที่ 2 และ ■ คือจุดที่ 3 และเส้นค่าเฉลี่ย



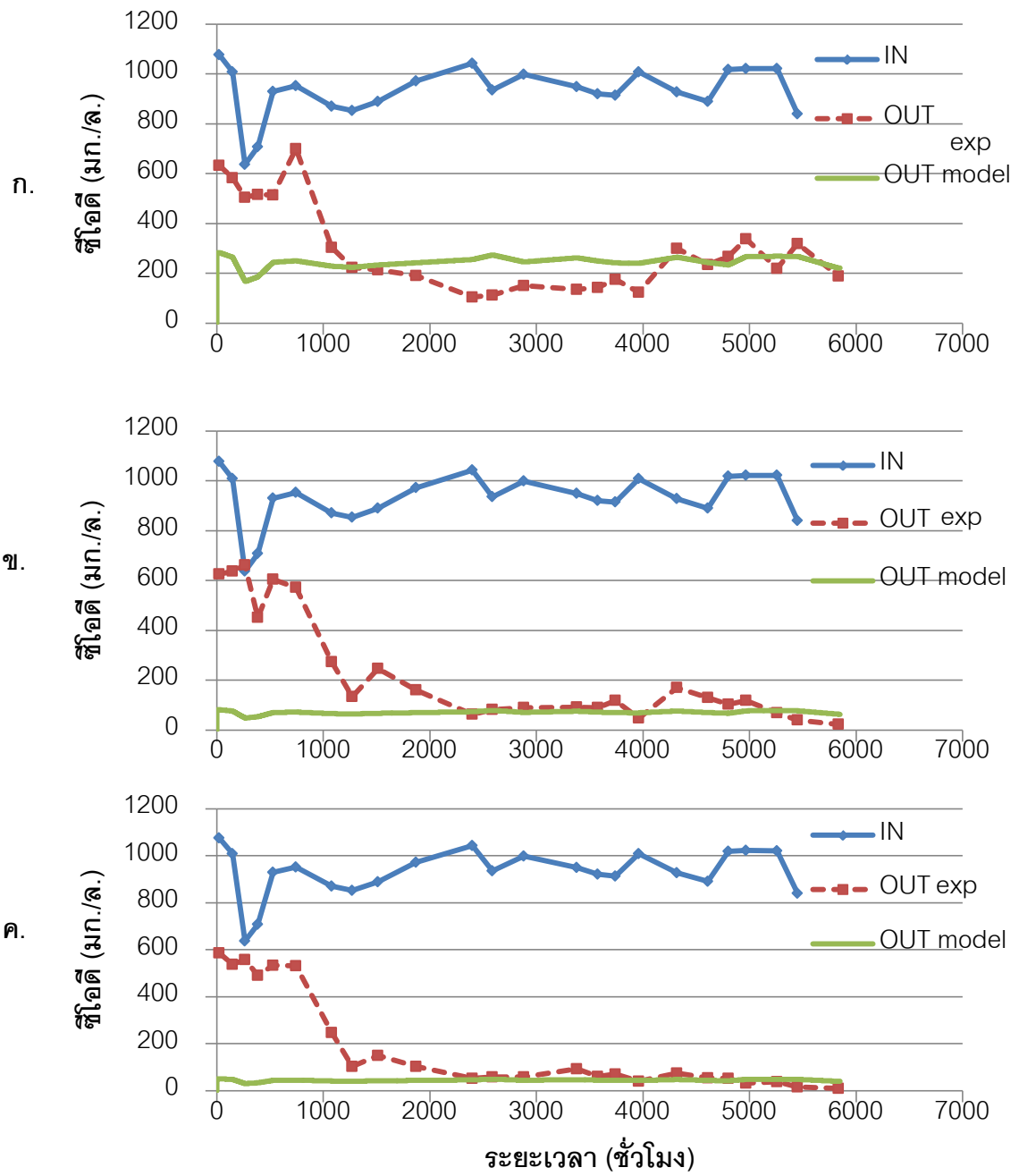
รูปที่ 4-33 อัตราการใช้สารตั้งต้นตลอดการทดลองส่วนที่ 2 ทั้ง 3 อัตราการเวียนน้ำโดยที่ เส้นทึบ (●) คือเวียนน้ำ 1 เท่า จุดไขว่ปลา (×) คือเวียนน้ำ 2 เท่า และเส้นประ (■) คือเวียนน้ำ 4 เท่า

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดตั้งข้างต้นแล้วจึงนำมาใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม AQUASIM 2.1b โดยป้อนค่าตัวแปร (variable) กระบวนการที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ (process) ซึ่งค่าตัวแปร และสมการต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองมีดังตารางที่ 4-4

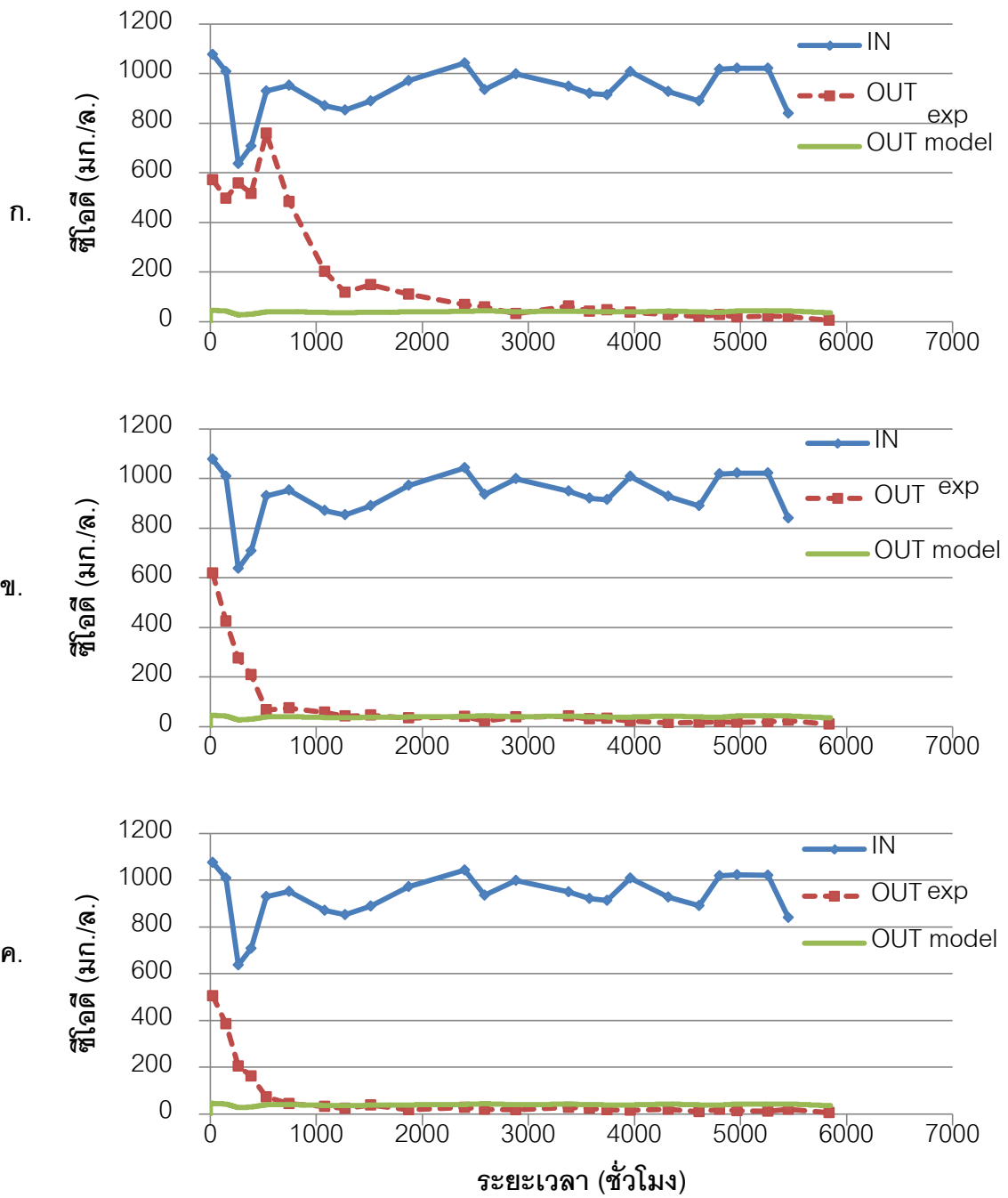
ตารางที่ 4-4 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

| ตัวแปร | ความหมาย | ค่า/สมการ |
|---------------------|---|-------------------|
| ตัวแปร (variable) | | |
| C | ซีโอดีของน้ำเสีย (มก./ล.) | |
| C_{inf} | ซีโอดีน้ำเข้า(มก./ล.) | เฉลี่ย 941 |
| nbCOD | ซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ (มก./ล.) | $C_{inf} * Ratio$ |
| Ratio | อัตราส่วนซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ต่อซีโอดีทั้งหมด | 0.0418 |
| k | อัตราการใช้สารตั้งต้น (ต่อชม.) | $1.1/X$ |
| k_{GX} | อัตราการเกิดของเซลล์ (ต่อชม.) | $K*Y$ |
| k_d | อัตราการตายของเซลล์(ต่อชม.) | 0.00125 |
| X | เซลล์จุลชีพ (มก./ล.) | |
| Y | ยี่ล็ดของเซลล์จุลชีพ | 0.08 |
| Q | อัตราการไหลของน้ำเสีย(ล./ชม.) | |
| Q_{in} | อัตราการไหลของน้ำเข้า (ล./ชม.) | 1.44 |
| V | ปริมาตรของถัง (ล.) | 72 |
| กระบวนการ (process) | | |
| Degradation | กระบวนการการย่อยสลายของน้ำเสีย | $k*(C-nbCOD)*X$ |
| Growth | กระบวนการการเกิดของเซลล์จุลชีพ | $k_{GX} * X$ |
| Decay | กระบวนการการตายของเซลล์จุลชีพ | $k_d * X$ |

เมื่อป้อนค่าตัวแปรใส่ลงไปในแบบจำลองโดยตัวแปร C_{in} หรือค่าซีโอดีน้ำเข้าที่ใช้ ใช้ค่าซีโอดีจริงจากการทดลองทั้ง 3 ชุดถึงกรองทดลองการทดลองทั้ง 2 ส่วนการทดลอง เนื่องมาจากค่าจลนพลศาสตร์มีค่าไม่ต่างกันมาก ผลที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4-34 และ 4-35



รูปที่ 4-34 กราฟเปรียบเทียบผลน้ำเสียระหว่างจากแบบจำลอง และจากการทดลอง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3 8 และ 13 ชั่วโมง (ก. 3 ชม. ข. 8 ชม. และ ค. 13 ชม.)



รูปที่ 4-35 กราฟเปรียบเทียบผลน้ำเสียระหว่างจากแบบจำลอง และจากการทดลอง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 25 38 และ 50 ชั่วโมง (ก. 25 ชม. ข. 38 ชม. และ ค. 50 ชม.)

จากการจำลองผลพบว่า ค่าจากการจำลองใกล้เคียงกับค่าจริงทั้งหมด เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้ง 3 ชุดการทดลอง เมื่อหาความคลาดเคลื่อนโดยใช้สมการ 3-1

$$SEE = \left[\frac{\sum (C_i - \hat{C}_i)^2}{n-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-1)$$

โดยที่ C_i = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 \hat{C}_i = ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
 N = จำนวนข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด

ค่าที่ได้จากสมการควรมีค่าน้อยกว่า 10% ของความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น

จะได้ผลดังตารางที่ 4-5 จะพบว่าค่าที่ได้จากสมการน้อยกว่า 10% ของความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นทุกค่าแสดงให้เห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้ในแบบจำลอง AQUASIM 2.1b ได้

ตารางที่ 4-5 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการประมาณค่าจากการทดสอบความคลาดเคลื่อน

| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ | ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน | %ต่อค่าซีไอดีเริ่มต้น |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3 ชั่วโมง | 72.83 | 7.58 |
| 8 ชั่วโมง | 31.93 | 3.32 |
| 13 ชั่วโมง | 17.25 | 1.79 |
| 25 ชั่วโมง | 14.58 | 1.52 |
| 38 ชั่วโมง | 14.82 | 1.54 |
| 50 ชั่วโมง | 18.63 | 1.94 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. เนื่องจากระบบถังกรองไร้ออกซิเจนที่ใช้มีลักษณะใกล้เคียงกับถังกวนผสมบอร์น ดังนั้นระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมคือ 50 ชั่วโมง ซึ่งบำบัดซีโอดีได้ 97.5% และใช้เวลาปรับตัว 45 วัน อย่างไรก็ตามจากการทดลองจะพบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่มากขึ้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น

2. อัตราการเวียนน้ำกลับของระบบถังกรองไร้ออกซิเจนไม่ส่งผลต่อการบำบัดค่าซีโอดี แต่ส่งผลต่อปริมาณการเติมต่างในการควบคุมพีเอชของระบบ จากการทดลองพบว่าอัตราการเวียนน้ำที่สูงขึ้นสามารถลดปริมาณการเติมต่างได้มากขึ้นโดยที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่าสามารถลดปริมาณต่างที่ใช้ไปได้ถึง 61.1% และยังคงมีความจำเป็นจะต้องมีการเติมต่างเพื่อควบคุมพีเอชในระบบ

3. จากการตรวจสอบการอุดตันพบว่า หลังจากดำเนินระบบทั้งหมดเป็นเวลา 250 วัน ระบบเกิดการอุดตันน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ และยังพบว่าการกระจายตัวของน้ำในถังกรองไร้ออกซิเจนที่ใช้มีลักษณะใกล้เคียงกับถังกวนผสมบอร์น

4. เนื่องจากน้ำเสียทำมาจากน้ำตาลทรายซึ่งย่อยสลายง่ายจากการทดลองพบว่า ค่าอัตราการใช้สารตั้งต้นของระบบนี้เท่ากับ 1.10 ± 0.31 ต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ของซีโอดีย่อยสลายไม่ได้ต่อซีโอดีทั้งหมดคือ 4.18% ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม AQUASIM2.1b พบว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำมีค่าไม่เกิน 10% ของซีโอดีน้ำเข้าซึ่งถือว่าสามารถนำไปใช้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรลองนำน้ำเสียชุมชนจริงมาทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัด
2. เพื่อการหาค่าจลนพลศาสตร์ที่ชัดเจนมากขึ้นควรลดระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ใช้วิเคราะห์ หรือเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุทมสินโรจน์. 2537. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2537. คู่มือผู้ออกแบบและผู้ผลิตระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2545. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- ทัยศักดิ์ ธรรมกุล. 2543. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต้นทางโดยใช้ถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2546(ก). คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2546(ข). คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- วิจารณ์ บุญอำนวยการวิทยา. 2544. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร: ดวงกลมสมัย.
- สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำเสียชุมชน. [ระบบออนไลน์]. http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html : [8 มีนาคม 2554]

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, J.-H. and Forster, C.F. 2000. Kinetic Analyses of the Operation of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filters Treating a Simulated Starch Wastewater. Process Biochemistry. 36: 19-23.
- Anderson, G.K., Kasapgil, B., and Ince, O. 1994. Comparison of Porous and Non-Porous Media in Upflow Anaerobic Filters when Treating Dairy Wastewater. Water Research. 28(7): 1619-1624.
- APHA, AWWA, WEF, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed, American Public Health Association, Washington, DC.
- Barber, W.P., and Stuckey, D.C. 1999. The Use of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for Wastewater Treatment: A Review. Water Research. 33(7): 1559-1578.
- Bodik, I., Herdova, B., and Drtil, M. 2002. The Use of Anaerobic Filter and AnSBR for Wastewater Treatment at Ambient Temperature. Water Research. 36: 1084-1088.
- Bodkhe, S. 2008. Development of an Improved Anaerobic Filter for Municipal Wastewater Treatment. Bioresource Technology. 99: 222-226.
- Gannoun, H., Bouallagui, H., Okbi, A., Sayadi, S., and Hamdi, M. 2009. Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Biologically Pretreated Abattoir Wastewaters in an Upflow Anaerobic Filter. Journal of Hazardous Materials. 170: 263-271.
- Grady, C.P.L., Daigger, G.T. and Lim H.C. 1999. Biological Wastewater Treatment. 2nd ed. Revised and expanded. New York: Marcel Dekker.
- Holman, J.P. 2001. Experiment Methods for Engineers. 7th ed. Boston: McGraw-Hill.
- Isik, M. and Sponza, D.T. 2005. Substrate Removal Kinetics in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Decolorising Simulated Textile Wastewater. Process Biochemistry. 40: 1189-1198.
- Li, J., Tao, T., Chen, H., Zhou, X., Lu, J., Li, X., Wang, Y., Li, S., Li, Q., and Zhang, Y. 2008. Tracer Study on a Modified SBR Process. 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 1161-1164.

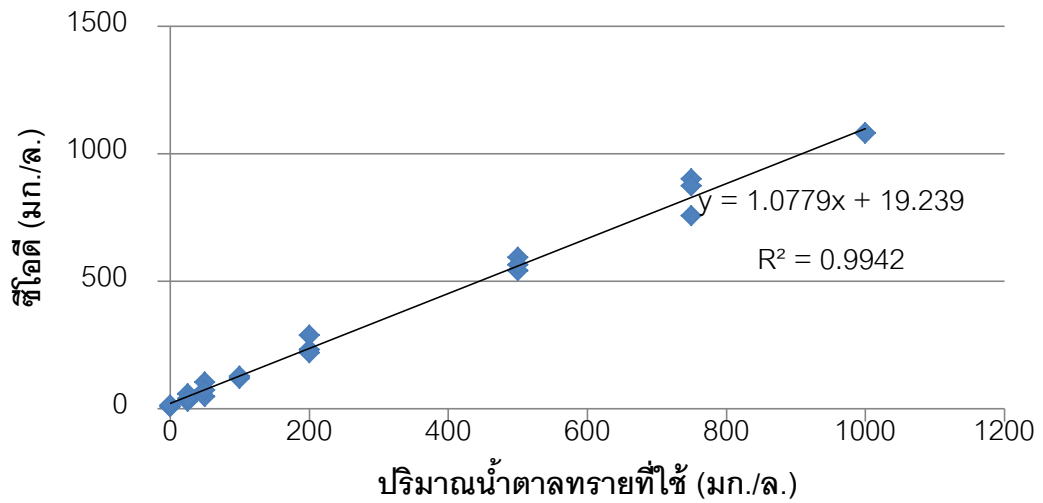
- Manariotis, I.D., and Grigoropoulos, S.G. 2006. Municipal-Wastewater Treatment Using Upflow-Anaerobic Filters. Water Environment Research. 78(3): 233-242.
- Martin, M.A., De la Rubia, M.A., Martin, A., Borja, R., Montalvo, S., and Sanchez, E. 2010. Kinetic Evaluation of the Psychrophilic Anaerobic Digestion of Synthetic Domestic Sewage Using an Upflow Filter. Bioresource Technology. 101: 131-137.
- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Perez, M., Romero, L.I., and Sales, D. 2001. Kinetics of Thermophilic Anaerobes in Fixed-bed Reactors. Chemosphere. 44: 1201-1211.
- Qasim, S.R. 1999. Wastewater Treatment Plants: planning, design, and operation. 2nd ed., Boca Raton: CRC Press.
- Ribeiro, N.J., Pires, O.C., Mota, M., Ferreira, E.C., and Alves, M.M. 2001. Influence of Up-flow Velocity on the Performance of an Anaerobic Filter Under Oleic Acid Overloads. Biotechnology Letters. 23: 1833-1839.
- Show, K., and Tay, J. 1999. Influence of Support Media on Biomass Growth. Water Research. 33(6): 1471-1481.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Archae Press, Nashville, USA.
- Yu, H., Wilson, F., and Tay, J. 2000. Prediction of the Effect of Recirculation on the Effluent Quality of Anaerobic Filters by Empirical Models. Water Environment Research. 72(2): 217-224.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

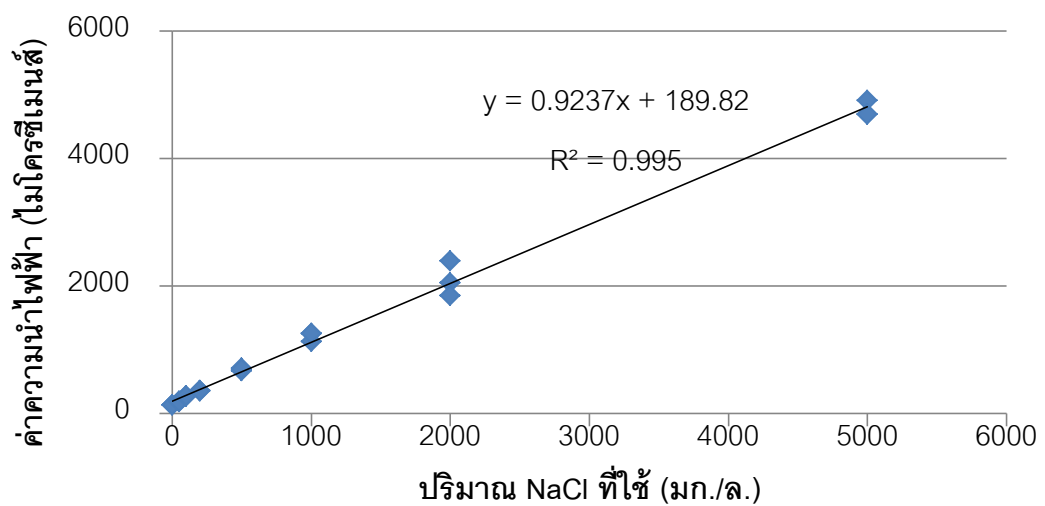
กราฟมาตรฐาน

1. กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์

2. กราฟมาตรฐานของสารติดตาม



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของสารติดตาม

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

การทดลองส่วนที่ 1 การหาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ข-1 ค่าซีโอดีละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | | ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 26/9/54 | 1.0 | 1075.9 | 632.0 | 624.5 | 586.8 | 571.8 | 616.9 | 504.1 | 26/9/54 | 1.0 | 827.6 | 647.0 | 707.2 | 654.5 | 647.0 | 594.4 | 496.6 |
| 1/10/54 | 6.1 | 1007.7 | 583.4 | 636.5 | 537.0 | 497.2 | 424.3 | 384.5 | 1/10/54 | 6.1 | 934.8 | 490.6 | 576.8 | 566.9 | 616.6 | 417.7 | 364.6 |
| 6/10/54 | 11.1 | 636.1 | 504.9 | 662.3 | 557.4 | 557.4 | 275.4 | 203.3 | 6/10/54 | 11.1 | 838.6 | 562.5 | 579.5 | 565.9 | 545.5 | 415.9 | 313.6 |
| 11/10/54 | 16.0 | 707.8 | 516.9 | 451.0 | 490.5 | 516.9 | 207.4 | 161.3 | 11/10/54 | 16.0 | 711.1 | 503.7 | 484.0 | 516.9 | 398.4 | 121.8 | 115.2 |
| 17/10/54 | 22.0 | 929.7 | 514.3 | 603.3 | 534.1 | 758.2 | 65.9 | 72.5 | 17/10/54 | 22.0 | 1086.7 | 520.0 | 493.3 | 446.7 | 520.0 | 173.3 | 200.0 |
| 26/10/54 | 31.0 | 951.8 | 700.3 | 571.1 | 530.3 | 482.7 | 74.8 | 44.2 | 26/10/54 | 31.0 | 877.1 | 557.5 | 516.7 | 441.9 | 394.3 | 74.8 | 61.2 |
| 9/11/54 | 45.0 | 869.7 | 303.4 | 273.0 | 246.1 | 202.2 | 56.6 | 32.4 | 9/11/54 | 45.0 | 857.1 | 280.2 | 219.8 | 206.6 | 170.3 | 36.9 | 23.1 |
| 17/11/54 | 53.0 | 852.2 | 224.0 | 133.7 | 102.3 | 118.0 | 40.7 | 23.8 | 17/11/54 | 53.0 | 859.5 | 211.6 | 157.6 | 134.4 | 108.0 | 31.1 | 23.1 |
| 27/11/54 | 63.0 | 888.3 | 214.0 | 245.5 | 148.6 | 148.6 | 44.4 | 37.1 | 27/11/54 | 63.0 | 896.7 | 179.3 | 164.7 | 76.6 | 59.5 | 44.8 | 32.6 |
| 12/12/54 | 78.0 | | 189.7 | 160.4 | 101.9 | 110.0 | 32.8 | 17.2 | 12/12/54 | 78.0 | 925.2 | 87.3 | 80.8 | 84.0 | 69.4 | 29.9 | 16.3 |
| 3/1/55 | 100.0 | 971.7 | 103.8 | 63.0 | 51.6 | 67.9 | 38.8 | 28.0 | 3/1/55 | 100.0 | 888.6 | 85.9 | 64.7 | 72.8 | 67.9 | 41.7 | 25.1 |
| 11/1/55 | 107.8 | 1042.0 | 112.7 | 81.1 | 58.1 | 59.0 | 21.7 | 19.8 | 11/1/55 | 107.8 | 888.8 | 59.0 | 58.1 | 74.4 | 81.1 | 33.2 | 44.7 |
| 23/1/55 | 120.0 | 935.0 | 149.9 | 88.5 | 58.2 | 31.9 | 37.7 | 18.2 | 23/1/55 | 120.0 | 905.7 | 33.8 | 37.7 | 35.8 | 41.6 | 27.0 | 22.1 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 26/9/54 | 1.0 | 846.6 | 768.9 | 745.6 | 644.7 | 761.2 | 652.4 | 605.8 |
| 1/10/54 | 6.1 | 1069.6 | 658.7 | 671.7 | 639.1 | 671.7 | 587.0 | 502.2 |
| 6/10/54 | 11.1 | 715.9 | 518.2 | 545.5 | 545.5 | 525.0 | 368.2 | 293.2 |
| 11/10/54 | 16.0 | 818.6 | 604.9 | 618.1 | 604.9 | 604.9 | 315.6 | 276.2 |
| 17/10/54 | 22.0 | 986.7 | 593.3 | 493.3 | 540.0 | 613.3 | 120.0 | 293.3 |
| 26/10/54 | 31.0 | 929.2 | 461.3 | 421.2 | 334.3 | 320.9 | 90.3 | 70.2 |
| 9/11/54 | 45.0 | 807.7 | 240.7 | 213.2 | 206.6 | 186.8 | 42.9 | 23.1 |
| 17/11/54 | 53.0 | 889.3 | 181.8 | 187.3 | 190.6 | 184.0 | 27.1 | 29.1 |
| 27/11/54 | 63.0 | 813.6 | 198.9 | 159.8 | 145.1 | 145.1 | 27.7 | 27.7 |
| 12/12/54 | 78.0 | 1059.2 | 117.9 | 100.3 | 170.7 | 212.3 | 46.7 | 39.0 |
| 3/1/55 | 100.0 | 874.6 | 81.4 | 47.5 | 35.6 | 32.2 | 17.3 | 13.2 |
| 11/1/55 | 107.8 | 1047.0 | 60.2 | 45.9 | 42.1 | 49.7 | 34.4 | 24.9 |
| 23/1/55 | 120.0 | 912.7 | 83.9 | 78.3 | 40.7 | 25.7 | 12.5 | 13.5 |

ตารางที่ ข-2 ค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | 27/10/54 | 6.2 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 8 |
| 27/9/54 | 3.7 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 6.3 | 6.3 | 6.7 | 29/10/54 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7 | 8 |
| 28/9/54 | 8 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 6 | 6.6 | 31/10/54 | 6.2 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 7.8 |
| 29/9/54 | 5 | 5.5 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 6.1 | 6.8 | 1/11/54 | 6.8 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| 30/9/54 | 4.8 | 5.4 | 5.6 | 5.7 | 5.7 | 6 | 6.7 | 2/11/54 | 6.1 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 7.8 |
| 2/10/54 | 6.2 | 6 | 6.1 | 6 | 6.2 | 6.3 | 7.1 | 4/11/54 | 7.5 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| 3/10/54 | 6.1 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 6.6 | 7.1 | 6/11/54 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.8 |
| 5/10/54 | 5.9 | 6 | 6 | 6 | 6.1 | 6.5 | 7.1 | 7/11/54 | 7.4 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 7.7 |
| 6/10/54 | 5.8 | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.6 | 7.2 | 8/11/54 | 5.9 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 7.6 |
| 8/10/54 | 6.9 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 6.5 | 6.7 | 7.6 | 9/11/54 | 6.4 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.7 |
| 9/10/54 | 6.1 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 6.6 | 7.5 | 11/11/54 | 6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 7.6 |
| 11/10/54 | 6.2 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.8 | 7.6 | 14/11/54 | 6.3 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.7 |
| 12/10/54 | 6.3 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.9 | 7.8 | 15/11/54 | 6.1 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 7.5 |
| 13/10/54 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.9 | 7.9 | 17/11/54 | 6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.7 |
| 15/10/54 | 6.4 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.1 | 8 | 21/11/54 | 6.5 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 7.9 |
| 16/10/54 | 6.9 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.3 | 7.9 | 23/11/54 | 6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 7.5 |
| 18/10/54 | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.2 | 8.1 | 27/11/54 | 6.3 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.8 |
| 19/10/54 | 6.2 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7.2 | 8.1 | 29/11/54 | 6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 7.7 |
| 21/10/54 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 6.5 | 6.9 | 8 | 6/12/54 | 8.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 8.1 |
| 22/10/54 | 5.9 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 7 | 7.9 | 9/12/54 | 6.4 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.8 |
| 24/10/54 | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 6.8 | 7.7 | 12/12/54 | 6.9 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7.7 |
| 25/10/54 | 6.1 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.7 | 7.6 | 15/12/54 | 5.9 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.8 |
| 26/10/54 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.6 | 6.8 | 7.6 | 19/12/54 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.8 |

ตารางที่ ข-2 ค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 26/12/54 | 6.6 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.9 | 18/10/54 | 6.1 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7.4 | 8 |
| 27/12/54 | 6.1 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 7.7 | 19/10/54 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7.4 | 8.1 |
| 3/1/55 | 5.9 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7.6 | 21/10/54 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.2 | 8.2 |
| 7/1/55 | 6.6 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.7 | 22/10/54 | 6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.1 | 7.9 |
| 9/1/55 | 6.2 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.6 | 24/10/54 | 5.9 | 6.5 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 7.7 |
| 15/1/55 | 6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.7 | 25/10/54 | 5.9 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.8 | 7.7 |
| 21/1/55 | 6.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.9 | 26/10/54 | 6.2 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | 27/10/54 | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.9 | 8 |
| 27/9/54 | 3.7 | 5 | 5 | 5 | 5.1 | 6.1 | 6.4 | 29/10/54 | 6.9 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.1 | 8.2 |
| 28/9/54 | 7.7 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.9 | 6.3 | 31/10/54 | 6.2 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| 29/9/54 | 5.2 | 5.6 | 5.6 | 5.7 | 5.7 | 5.9 | 6.6 | 1/11/54 | 6.8 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| 30/9/54 | 5 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 5.8 | 5.9 | 6.5 | 2/11/54 | 6 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.9 |
| 2/10/54 | 6.1 | 6.2 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.7 | 4/11/54 | 7.4 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 7.8 |
| 3/10/54 | 5.8 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 7 | 6/11/54 | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.7 |
| 5/10/54 | 5.8 | 6 | 6 | 6 | 6.1 | 6.4 | 7 | 7/11/54 | 6.6 | 6.7 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 7.7 |
| 6/10/54 | 5.8 | 6.2 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.5 | 7.1 | 8/11/54 | 5.9 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 7.6 |
| 8/10/54 | 6.8 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.7 | 7.2 | 9/11/54 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 7.9 |
| 9/10/54 | 6 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.7 | 7.2 | 11/11/54 | 5.8 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 7.7 |
| 11/10/54 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.9 | 7.5 | 14/11/54 | 6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.7 |
| 12/10/54 | 6.2 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.9 | 7.6 | 15/11/54 | 6.2 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.6 |
| 13/10/54 | 6.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7 | 7.8 | 17/11/54 | 5.9 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.8 |
| 15/10/54 | 6.2 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.3 | 7.9 | 21/11/54 | 6.3 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 8 |
| 16/10/54 | 6.6 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.2 | 7.5 | 7.8 | 23/11/54 | 5.9 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 7.7 |

ตารางที่ ข-2 ค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 27/11/54 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.8 | 8/10/54 | 6.7 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.6 | 6.7 | 7.4 |
| 29/11/54 | 5.8 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.7 | 9/10/54 | 5.9 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.5 | 6.7 | 7.4 |
| 6/12/54 | 8.2 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7 | 8.1 | 11/10/54 | 6.3 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.9 | 7.5 |
| 9/12/54 | 6.1 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.8 | 12/10/54 | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7 | 7.6 |
| 12/12/54 | 6.9 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.7 | 13/10/54 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7 | 7.6 |
| 15/12/54 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.7 | 15/10/54 | 6.2 | 6.9 | 7 | 7.1 | 7.1 | 7.4 | 7.8 |
| 19/12/54 | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.8 | 16/10/54 | 6.6 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.3 | 7.5 | 7.6 |
| 26/12/54 | 6.5 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 7.8 | 18/10/54 | 6 | 6.9 | 7 | 7 | 7.1 | 7.6 | 7.8 |
| 27/12/54 | 6 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.8 | 19/10/54 | 6.1 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.9 | 7.9 |
| 3/1/55 | 5.9 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.6 | 21/10/54 | 6.2 | 6.2 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 7 | 7.6 |
| 7/1/55 | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.7 | 22/10/54 | 6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.2 | 7.7 |
| 9/1/55 | 6 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.8 | 24/10/54 | 6 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.9 | 7.5 |
| 15/1/55 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.8 | 25/10/54 | 5.9 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.5 |
| 21/1/55 | 6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.7 | 26/10/54 | 6.4 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.9 | 7.6 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | 27/10/54 | 6.1 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7.6 |
| 27/9/54 | 3.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.7 | 5.9 | 6.2 | 29/10/54 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.1 | 7.9 |
| 28/9/54 | 7.8 | 5.6 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.6 | 5.9 | 31/10/54 | 6.4 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.8 |
| 29/9/54 | 6.6 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.7 | 5.9 | 6.3 | 1/11/54 | 6.9 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.9 | 7.7 |
| 30/9/54 | 5.1 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.5 | 2/11/54 | 5.9 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7.7 |
| 2/10/54 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.5 | 4/11/54 | 7.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.7 |
| 3/10/54 | 5.7 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 7 | 6/11/54 | 6.2 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.6 |
| 5/10/54 | 5.7 | 6 | 6 | 6 | 6.1 | 6.4 | 7 | 7/11/54 | 6.9 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.5 |
| 6/10/54 | 5.6 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.5 | 7.2 | 8/11/54 | 5.9 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.5 |

ตารางที่ ข-2 ค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 9/11/54 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.7 |
| 11/11/54 | 5.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.6 |
| 14/11/54 | 6.1 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 7.6 |
| 15/11/54 | 6.2 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.5 |
| 17/11/54 | 5.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.5 |
| 21/11/54 | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.6 |
| 23/11/54 | 6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.4 |
| 27/11/54 | 6.2 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.8 |
| 29/11/54 | 5.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.7 |
| 6/12/54 | 7.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7 | 8 |
| 9/12/54 | 6.1 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.6 |
| 12/12/54 | 6.3 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.5 |
| 15/12/54 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.6 |
| 19/12/54 | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.8 | 7.8 |
| 26/12/54 | 6.6 | 7 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 7.7 |
| 27/12/54 | 6 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.6 |
| 3/1/55 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.7 |
| 7/1/55 | 6.4 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.7 |
| 9/1/55 | 6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.7 |
| 15/1/55 | 5.9 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.7 |
| 21/1/55 | 6.1 | 6.6 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.8 |

ตารางที่ ข-3 ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซีติก/ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | | ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 4/10/54 | 9.3 | 25.0 | 468.8 | 478.1 | 431.3 | 496.9 | 300.0 | 168.8 | 4/10/54 | 9.3 | 25.0 | 496.9 | 468.8 | 450.0 | 515.6 | 337.5 | 375.0 |
| 13/10/54 | 18.0 | 562.5 | 712.5 | 637.5 | 609.4 | 581.3 | 137.5 | 106.3 | 13/10/54 | 18.0 | 478.1 | 525.0 | 590.6 | 571.9 | 468.8 | 125.0 | 112.5 |
| 21/10/54 | 26.1 | 759.4 | 721.9 | 740.6 | 675.0 | 693.8 | 281.3 | 156.3 | 21/10/54 | 26.1 | 834.4 | 721.9 | 637.5 | 740.6 | 646.9 | 346.9 | 175.0 |
| 31/10/54 | 36.0 | 543.8 | 328.1 | 300.0 | 365.6 | 309.4 | 62.5 | 37.5 | 31/10/54 | 36.0 | 534.4 | 290.6 | 168.8 | 143.8 | 150.0 | 62.5 | 68.8 |
| 8/11/54 | 44.0 | 450.0 | 318.8 | 143.8 | 150.0 | 118.8 | 112.5 | 37.5 | 8/11/54 | 44.0 | 478.1 | 175.0 | 318.8 | 143.8 | 106.3 | 56.3 | 25.0 |
| 15/11/54 | 51.1 | 487.5 | 131.3 | 87.5 | 81.3 | 75.0 | 112.5 | 62.5 | 15/11/54 | 51.1 | 440.6 | 131.3 | 125.0 | 87.5 | 75.0 | 31.3 | 37.5 |
| 23/11/54 | 59.0 | 459.4 | 93.8 | 137.5 | 81.3 | 62.5 | 62.5 | 81.3 | 23/11/54 | 59.0 | 562.5 | 100.0 | 93.8 | 81.3 | 87.5 | 56.3 | 81.3 |
| 9/12/54 | 75.0 | 431.3 | 56.3 | 150.0 | 106.3 | 81.3 | 100.0 | 37.5 | 9/12/54 | 75.0 | 496.9 | 81.3 | 137.5 | 50.0 | 62.5 | 100.0 | 31.3 |
| 20/12/54 | 86.0 | 137.5 | 87.5 | 125.0 | 68.8 | 87.5 | 81.3 | 106.3 | 20/12/54 | 86.0 | 309.4 | 75.0 | 68.8 | 87.5 | 43.8 | 25.0 | 106.3 |
| 9/1/55 | 105.9 | 412.5 | 50.0 | 43.8 | 56.3 | 93.8 | 25.0 | 56.3 | 9/1/55 | 105.9 | 459.4 | 37.5 | 43.8 | 37.5 | 75.0 | 25.0 | 56.3 |
| 21/1/55 | 117.9 | 506.3 | 125.0 | 75.0 | 81.3 | 37.5 | 50.0 | 62.5 | 21/1/55 | 117.9 | 459.4 | 50.0 | 50.0 | 62.5 | 56.3 | 75.0 | 50.0 |

ตารางที่ ข-3 ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 4/10/54 | 9.3 | 356.3 | 459.4 | 534.4 | 543.8 | 543.8 | 403.1 | 412.5 |
| 13/10/54 | 18.0 | 562.5 | 703.1 | 675.0 | 693.8 | 693.8 | 281.3 | 328.1 |
| 21/10/54 | 26.1 | 740.6 | 778.1 | 646.9 | 628.1 | 656.3 | 365.6 | 365.6 |
| 31/10/54 | 36.0 | 534.4 | 393.8 | 346.9 | 309.4 | 156.3 | 118.8 | 56.3 |
| 8/11/54 | 44.0 | 543.8 | 328.1 | 125.0 | 118.8 | 106.3 | 68.8 | 25.0 |
| 15/11/54 | 51.1 | 562.5 | 106.3 | 125.0 | 131.3 | 131.3 | 87.5 | 37.5 |
| 23/11/54 | 59.0 | 609.4 | 137.5 | 137.5 | 143.8 | 118.8 | 62.5 | 56.3 |
| 9/12/54 | 75.0 | 468.8 | 118.8 | 93.8 | 43.8 | 56.3 | 62.5 | 31.3 |
| 20/12/54 | 86.0 | 384.4 | 62.5 | 50.0 | 75.0 | 37.5 | 25.0 | 18.8 |
| 9/1/55 | 105.9 | 450.0 | 81.3 | 75.0 | 87.5 | 43.8 | 50.0 | 56.3 |
| 21/1/55 | 117.9 | 421.9 | 100.0 | 62.5 | 43.8 | 50.0 | 31.3 | 75.0 |

ตารางที่ ข-4 ค่าความเป็นต่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | | ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 4/10/54 | 9.3 | 687.5 | 587.5 | 587.5 | 587.5 | 575.0 | 625.0 | 625.0 | 4/10/54 | 675.0 | 575.0 | 575.0 | 575.0 | 575.0 | 600.0 | 600.0 | 675.0 |
| 13/10/54 | 18.0 | 887.5 | 975.0 | 975.0 | 512.5 | 987.5 | 1025.0 | 1000.0 | 13/10/54 | 825.0 | 950.0 | 962.5 | 937.5 | 950.0 | 987.5 | 975.0 | 825.0 |
| 21/10/54 | 26.1 | 600.0 | 700.0 | 662.5 | 662.5 | 600.0 | 575.0 | 600.0 | 21/10/54 | 700.0 | 750.0 | 712.5 | 687.5 | 650.0 | 600.0 | 550.0 | 700.0 |
| 31/10/54 | 36.0 | 687.5 | 962.5 | 962.5 | 962.5 | 900.0 | 950.0 | 937.5 | 31/10/54 | 662.5 | 925.0 | 900.0 | 937.5 | 937.5 | 950.0 | 937.5 | 662.5 |
| 8/11/54 | 44.0 | 550.0 | 962.5 | 975.0 | 975.0 | 975.0 | 1000.0 | 975.0 | 8/11/54 | 537.5 | 937.5 | 950.0 | 950.0 | 950.0 | 962.5 | 962.5 | 537.5 |
| 15/11/54 | 51.1 | 575.0 | 1000.0 | 1000.0 | 1000.0 | 1000.0 | 1012.5 | 1000.0 | 15/11/54 | 600.0 | 962.5 | 962.5 | 975.0 | 962.5 | 975.0 | 962.5 | 600.0 |
| 23/11/54 | 59.0 | 562.5 | 937.5 | 1000.0 | 1000.0 | 987.5 | 1000.0 | 975.0 | 23/11/54 | 525.0 | 950.0 | 962.5 | 962.5 | 962.5 | 975.0 | 962.5 | 525.0 |
| 9/12/54 | 75.0 | 656.3 | 1000.0 | 1012.5 | 1006.3 | 1000.0 | 1000.0 | 993.8 | 9/12/54 | 637.5 | 981.3 | 987.5 | 981.3 | 981.3 | 987.5 | 968.8 | 637.5 |
| 20/12/54 | 86.0 | 818.8 | 1000.0 | 1025.0 | 1012.5 | 1000.0 | 1012.5 | 968.8 | 20/12/54 | 743.8 | 975.0 | 993.8 | 975.0 | 975.0 | 975.0 | 956.3 | 743.8 |
| 9/1/55 | 105.9 | 525.0 | 987.5 | 975.0 | 993.8 | 987.5 | 993.8 | 962.5 | 9/1/55 | 575.0 | 975.0 | 975.0 | 962.5 | 962.5 | 962.5 | 943.8 | 575.0 |
| 21/1/55 | 117.9 | 181.3 | 993.8 | 1006.3 | 1012.5 | 1006.3 | 1006.3 | 981.3 | 21/1/55 | 618.8 | 975.0 | 987.5 | 968.8 | 968.8 | 968.8 | 950.0 | 618.8 |

ตารางที่ ข-4 ค่าความเป็นต่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 4/10/54 | 9.3 | 450.0 | 587.5 | 587.5 | 600.0 | 600.0 | 625.0 | 625.0 |
| 13/10/54 | 18.0 | 837.5 | 950.0 | 962.5 | 962.5 | 962.5 | 1000.0 | 987.5 |
| 21/10/54 | 26.1 | 587.5 | 675.0 | 662.5 | 650.0 | 650.0 | 600.0 | 600.0 |
| 31/10/54 | 36.0 | 462.5 | 925.0 | 962.5 | 962.5 | 950.0 | 950.0 | 887.5 |
| 8/11/54 | 44.0 | 537.5 | 962.5 | 912.5 | 875.0 | 975.0 | 987.5 | 950.0 |
| 15/11/54 | 51.1 | 712.5 | 1000.0 | 987.5 | 987.5 | 987.5 | 1012.5 | 1000.0 |
| 23/11/54 | 59.0 | 562.5 | 987.5 | 987.5 | 975.0 | 975.0 | 1000.0 | 1000.0 |
| 9/12/54 | 75.0 | 612.5 | 975.0 | 968.8 | 968.8 | 962.5 | 968.8 | 931.3 |
| 20/12/54 | 86.0 | 750.0 | 1000.0 | 1006.3 | 987.5 | 993.8 | 987.5 | 975.0 |
| 9/1/55 | 105.9 | 600.0 | 981.3 | 981.3 | 981.3 | 950.0 | 962.5 | 950.0 |
| 21/1/55 | 117.9 | 612.5 | 981.3 | 993.8 | 981.3 | 968.8 | 975.0 | 956.3 |

ตารางที่ ข-5 ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | | ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 26/9/54 | 1.0 | 180 | 620 | 220 | 540 | 620 | 760 | 140 | 26/9/54 | 1.0 | 120 | 4080 | 780 | 1200 | 2700 | 1160 | 80 |
| 1/10/54 | 6.1 | 200 | 220 | 200 | 180 | 200 | 200 | 140 | 1/10/54 | 6.1 | 40 | 1980 | 200 | 280 | 260 | 120 | 40 |
| 6/10/54 | 11.1 | 260 | 180 | 160 | 120 | 100 | 240 | 60 | 6/10/54 | 11.1 | 600 | 360 | 20 | 100 | 200 | 220 | 100 |
| 11/10/54 | 16.0 | 80 | 140 | 120 | 80 | 180 | 280 | 40 | 11/10/54 | 16.0 | 80 | 1020 | 140 | 240 | 460 | 120 | 40 |
| 17/10/54 | 22.0 | 0 | 140 | 200 | 20 | 200 | 40 | 0 | 17/10/54 | 22.0 | 0 | 340 | 160 | 100 | 700 | 80 | 0 |
| 26/10/54 | 31.0 | 160 | 160 | 160 | 120 | 200 | 140 | 0 | 26/10/54 | 31.0 | 180 | 320 | 200 | 400 | 580 | 40 | 0 |
| 2/11/54 | 38.1 | 80 | 80 | 140 | 120 | 380 | 40 | 60 | 2/11/54 | 38.1 | 100 | 280 | 40 | 140 | 680 | 0 | 0 |
| 9/11/54 | 45.0 | 220 | 100 | 140 | 110 | 260 | 20 | 7 | 9/11/54 | 45.0 | 180 | 160 | 70 | 80 | 180 | 27 | 20 |
| 17/11/54 | 53.0 | 100 | 80 | 70 | 60 | 50 | 13 | 47 | 17/11/54 | 53.0 | 140 | 60 | 40 | 90 | 80 | 27 | 20 |
| 27/11/54 | 63.0 | 190 | 180 | 130 | 80 | 270 | 40 | 40 | 27/11/54 | 63.0 | 190 | 200 | 50 | 60 | 170 | 10 | 40 |
| 12/12/54 | 78.0 | 110 | 70 | 40 | 90 | 60 | 33 | 20 | 12/12/54 | 78.0 | 130 | 100 | 80 | 100 | 70 | 13 | 13 |
| 3/1/55 | 100.0 | 140 | 50 | 70 | 30 | 20 | 7 | 13 | 3/1/55 | 100.0 | 110 | 110 | 40 | 40 | 50 | 0 | 0 |
| 11/1/55 | 107.8 | 133 | 67 | 53 | 60 | 27 | 33 | 47 | 11/1/55 | 107.8 | 93 | 80 | 27 | 33 | 27 | 33 | 13 |
| 23/1/55 | 120.0 | 95 | 80 | 75 | 90 | 70 | 40 | 40 | 23/1/55 | 120.0 | 105 | 75 | 60 | 60 | 65 | 55 | 50 |

ตารางที่ ข-5 ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3-50 ชั่วโมง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 26/9/54 | 1.0 | 240 | 900 | 540 | 780 | 560 | 280 | 120 |
| 1/10/54 | 6.1 | 120 | 160 | 160 | 220 | 140 | 80 | 20 |
| 6/10/54 | 11.1 | 120 | 40 | 160 | 100 | 200 | 40 | 120 |
| 11/10/54 | 16.0 | 240 | 140 | 120 | 60 | 280 | 140 | 160 |
| 17/10/54 | 22.0 | 100 | 120 | 40 | 140 | 640 | 20 | 80 |
| 26/10/54 | 31.0 | 40 | 80 | 140 | 80 | 860 | 20 | 40 |
| 2/11/54 | 38.1 | 140 | 120 | 180 | 140 | 1400 | 100 | 40 |
| 9/11/54 | 45.0 | 140 | 120 | 60 | 60 | 480 | 33 | 33 |
| 17/11/54 | 53.0 | 180 | 20 | 50 | 40 | 290 | 13 | 40 |
| 27/11/54 | 63.0 | 160 | 110 | 60 | 110 | 440 | 80 | 70 |
| 12/12/54 | 78.0 | 120 | 30 | 30 | 20 | 50 | 13 | 20 |
| 3/1/55 | 100.0 | 170 | 80 | 70 | 90 | 90 | 13 | 53 |
| 11/1/55 | 107.8 | 127 | 67 | 47 | 47 | 60 | 33 | 53 |
| 23/1/55 | 120.0 | 115 | 65 | 60 | 70 | 60 | 50 | 40 |

การทดลองส่วนที่ 2 การหาผลของอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ข-6 ค่าซีไอที่ละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | | | | | | | | อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 13/2/55 | 140.8 | 997.8 | 135.3 | 91.6 | 91.6 | 62.5 | 41.4 | 27.8 | 13/2/55 | 140.8 | 944.5 | 70.6 | 64.2 | 49.6 | 39.9 | 29.8 | 22.0 |
| 21/2/55 | 149.0 | 948.9 | 142.4 | 88.4 | 60.0 | 42.0 | 29.7 | 23.1 | 21/2/55 | 149.0 | 944.2 | 52.4 | 56.2 | 40.1 | 39.2 | 24.0 | 23.1 |
| 28/2/55 | 156.0 | 920.6 | 175.0 | 118.5 | 70.0 | 46.8 | 31.6 | 16.5 | 28/2/55 | 156.0 | 925.7 | 117.5 | 77.1 | 46.8 | 33.7 | 23.6 | 20.5 |
| 8/3/55 | 165.0 | 913.7 | 123.8 | 46.9 | 38.9 | 36.9 | 23.0 | 16.0 | 8/3/55 | 165.0 | 918.7 | 141.8 | 115.8 | 79.9 | 28.0 | 29.0 | 20.0 |
| 23/3/55 | 180.0 | 1007.4 | 299.5 | 170.2 | 74.5 | 27.2 | 13.9 | 19.6 | 23/3/55 | 180.0 | 898.4 | 109.6 | 89.7 | 51.8 | 22.4 | 12.0 | 9.2 |
| 4/4/55 | 192.0 | 926.4 | 235.0 | 129.9 | 54.4 | 20.1 | 16.1 | 10.1 | 4/4/55 | 192.0 | 921.4 | 71.5 | 71.5 | 32.2 | 29.2 | 16.1 | 14.1 |
| 12/4/55 | 200.1 | 889.5 | 266.5 | 102.4 | 52.0 | 27.9 | 18.8 | 18.8 | 12/4/55 | 200.1 | 919.7 | 89.3 | 72.2 | 35.9 | 31.9 | 23.8 | 20.8 |
| 19/4/55 | 207.1 | 1018.0 | 338.4 | 118.0 | 32.5 | 18.7 | 15.7 | 12.8 | 19/4/55 | 207.1 | 963.9 | 90.5 | 89.5 | 24.6 | 32.5 | 14.8 | 11.8 |
| 1/5/55 | 219.1 | 1022.0 | 219.4 | 67.2 | 38.7 | 22.1 | 19.3 | 11.0 | 1/5/55 | 219.1 | 976.0 | 81.9 | 83.8 | 26.7 | 18.4 | 12.9 | 9.2 |
| 9/5/55 | 227.1 | 1020.2 | 319.3 | 40.1 | 15.2 | 20.4 | 23.5 | 19.4 | 9/5/55 | 227.1 | 932.0 | 74.4 | 38.0 | 27.7 | 44.3 | 11.1 | 19.4 |
| 25/5/55 | 243.2 | 839.1 | 188.1 | 22.6 | 9.7 | 4.6 | 8.9 | 4.6 | 25/5/55 | 243.2 | 899.3 | 51.0 | 26.1 | 13.2 | 21.8 | 8.0 | 4.6 |
| 5/8/55 | 315.0 | 911.3 | 357.9 | 81.2 | 42.1 | 42.1 | 27.1 | 19.8 | 5/8/55 | 315.0 | 672.2 | 171.4 | 111.3 | 66.2 | 39.1 | 24.4 | 26.2 |
| 15/8/55 | 325.0 | 1051.2 | 329.2 | 85.6 | 43.1 | 34.9 | 27.8 | 21.9 | 15/8/55 | 325.0 | 1095.4 | 12.0 | 2.2 | 13.6 | 5.4 | 17.0 | 3.3 |
| 28/8/55 | 338.0 | 1187.2 | 389.3 | 78.9 | 59.7 | 34.1 | 29.1 | 23.4 | 28/8/55 | 338.0 | 1144.0 | 285.3 | 130.1 | 90.1 | 35.7 | 22.4 | 22.4 |
| 7/9/55 | 348.0 | 901.2 | 387.5 | 151.0 | 84.0 | 43.6 | 29.9 | 26.1 | 7/9/55 | 348.0 | 831.1 | 275.5 | 146.3 | 85.6 | 31.1 | 21.5 | 22.4 |

ตารางที่ ข-7 ค่าซีไอดีละลายน้ำในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 13/2/55 | 140.8 | 962.0 | 89.4 | 79.3 | 55.9 | 49.2 | 32.5 | 28.5 |
| 21/2/55 | 149.0 | 969.9 | 95.8 | 58.0 | 41.6 | 23.2 | 13.0 | 19.1 |
| 28/2/55 | 156.0 | 919.2 | 101.6 | 67.5 | 35.4 | 24.4 | 15.4 | 18.4 |
| 8/3/55 | 165.0 | 921.9 | 135.7 | 74.2 | 48.3 | 21.5 | 11.6 | 11.6 |
| 23/3/55 | 180.0 | 1058.6 | 224.7 | 181.9 | 53.9 | 15.5 | 17.4 | 19.4 |
| 4/4/55 | 192.0 | 1033.1 | 140.8 | 105.7 | 40.4 | 21.4 | 18.4 | 13.4 |
| 12/4/55 | 200.1 | 943.7 | 87.9 | 76.9 | 48.9 | 18.0 | 19.0 | 24.0 |
| 19/4/55 | 207.1 | 1020.5 | 113.4 | 96.4 | 42.5 | 22.7 | 14.2 | 11.3 |
| 1/5/55 | 219.1 | 1103.3 | 117.8 | 105.8 | 78.4 | 28.1 | 10.6 | 13.9 |
| 9/5/55 | 227.1 | 946.8 | 123.3 | 96.7 | 55.2 | 40.4 | 16.8 | 12.8 |
| 25/5/55 | 243.2 | 913.2 | 92.6 | 55.1 | 34.3 | 42.2 | 14.5 | 10.5 |
| 5/8/55 | 315.0 | 918.3 | 108.1 | 92.9 | 67.0 | 33.5 | 22.8 | 17.4 |
| 15/8/55 | 325.0 | 786.9 | 46.8 | 28.8 | 27.2 | 27.2 | 21.2 | 15.3 |
| 28/8/55 | 338.0 | 1196.8 | 143.2 | 139.9 | 112.6 | 41.8 | 23.2 | 21.2 |
| 7/9/55 | 348.0 | 924.2 | 147.2 | 116.0 | 97.9 | 32.3 | 22.3 | 18.4 |

ตารางที่ ข-8 ค่าพีเอช ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า 2 เท่า และ 4 เท่า

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|-------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | | | | | | | 6/4/55 | 6.6 | 7 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.6 |
| 13/2/55 | 6.1 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.6 | 9/4/55 | 6.5 | 7 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.5 |
| 15/2/55 | 6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.5 | 10/4/55 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.7 |
| 18/2/55 | 6.1 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.6 | 11/4/55 | 6.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.7 |
| 20/2/55 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.5 | 15/4/55 | 6.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.5 |
| 23/2/55 | 6.6 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.8 | 16/4/55 | 6.1 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.6 |
| 26/2/55 | 6.5 | 7 | 7 | 6.9 | 7 | 7 | 7.6 | 18/4/55 | 6.6 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.8 |
| 27/2/55 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.6 | 19/4/55 | 6.2 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7 | 7.6 |
| 1/3/55 | 6.5 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.6 | 21/4/55 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.1 | 7 | 7.6 |
| 2/3/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.6 | 23/4/55 | 5.7 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.3 |
| 5/3/55 | 5.8 | 6.7 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.6 | 24/4/55 | 6.6 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.6 |
| 9/3/55 | 6.9 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.2 | 7.5 | 26/4/55 | 6.2 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.6 |
| 12/3/55 | 6.8 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.2 | 7.5 | 27/4/55 | 6.7 | 7.1 | 7.1 | 7 | 7.1 | 7.1 | 7.5 |
| 14/3/55 | 6.2 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.4 | 30/4/55 | 6.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7.1 |
| 21/3/55 | 6.2 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.8 | 2/5/55 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7 |
| 23/3/55 | 6.2 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7.6 | 3/5/55 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 7 | 7.2 |
| 25/3/55 | 6.6 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.3 | 5/5/55 | 6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7 |
| 28/3/55 | 6.9 | 7.1 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.2 | 9/5/55 | 6.6 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.4 |
| 29/3/55 | 6.4 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.8 | 15/5/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.6 |
| 30/3/55 | 6.4 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.7 | 16/5/55 | 6.7 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.6 |
| 31/3/55 | 6.9 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.8 | 18/5/55 | 6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.5 |
| 2/4/55 | 6.3 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 21/5/55 | 6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 |
| 3/4/55 | 6.7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.6 | 22/5/55 | 6.9 | 7 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.3 |

ตารางที่ ข-8 ค่าพีเอช ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า 2 เท่า และ 4 เท่า (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|-------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 23/5/55 | 6.3 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 7.2 | 2/3/55 | 5.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 7 | 6.9 | 7.1 |
| 25/5/55 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7 | 5/3/55 | 5.8 | 6.9 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.1 |
| 29/5/55 | 6.3 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.8 | 6.8 | 7.6 | 9/3/55 | 6.6 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.4 |
| 1/8/55 | 6.5 | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 7 | 12/3/55 | 6.7 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.4 |
| 3/8/55 | 6.4 | 6.6 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.8 | 14/3/55 | 5.9 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.4 |
| 5/8/55 | 5 | 6.1 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 6.4 | 7 | 21/3/55 | 5.9 | 7 | 6.9 | 7 | 7 | 7 | 7.6 |
| 7/8/55 | 4.4 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.1 | 6.6 | 23/3/55 | 6.2 | 6.9 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.5 |
| 10/8/55 | 5 | 5 | 5.4 | 5.4 | 5.6 | 5.7 | 6.3 | 25/3/55 | 6.3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.5 |
| 14/8/55 | 3.9 | 4.6 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.7 | 6.2 | 28/3/55 | 6.3 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.5 |
| 15/8/55 | 4.4 | 5.2 | 5.8 | 5.8 | 5.9 | 5.8 | 6.4 | 29/3/55 | 6.1 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7.4 |
| 28/8/55 | 6.3 | 5.1 | 5.6 | 5.6 | 5.4 | 5.4 | 6 | 30/3/55 | 5.7 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.5 |
| 3/9/55 | 6.7 | 4.8 | 5.3 | 5.3 | 5.4 | 5.6 | 6 | 31/3/55 | 6.5 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.6 |
| 7/9/55 | 4 | 4.9 | 5.5 | 5.4 | 5.5 | 5.4 | 5.7 | 2/4/55 | 5.6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.5 |
| 16/9/55 | 4.2 | 4.9 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.8 | 3/4/55 | 6.2 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7.1 | 7.6 |
| อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | | | | | | | 6/4/55 | 6.2 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.6 |
| 13/2/55 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.7 | 9/4/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.1 |
| 15/2/55 | 5.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.5 | 10/4/55 | 6.1 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.1 |
| 18/2/55 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7.5 | 11/4/55 | 5.6 | 6.9 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.1 |
| 20/2/55 | 6.6 | 7.1 | 7.1 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.4 | 15/4/55 | 5.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 |
| 23/2/55 | 6.3 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.3 | 7.2 | 7.4 | 16/4/55 | 5.8 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 7.1 |
| 26/2/55 | 6.1 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.2 | 18/4/55 | 6.2 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7.1 | 7.2 |
| 27/2/55 | 6.1 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 19/4/55 | 5.8 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.4 |
| 1/3/55 | 6.2 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 21/4/55 | 6.5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.7 |

ตารางที่ ข-8 ค่าพีเอช ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า 2 เท่า และ 4 เท่า (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 23/4/55 | 5.5 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.4 | 15/8/55 | 4.4 | 5.9 | 6 | 6 | 6 | 5.9 | 6.4 |
| 24/4/55 | 6.3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.6 | 28/8/55 | 5.8 | 5.2 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.7 | 6 |
| 26/4/55 | 5.5 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.6 | 3/9/55 | 6.6 | 5 | 5.2 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 6 |
| 27/4/55 | 6.4 | 7.1 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.6 | 7/9/55 | 4 | 5 | 5.2 | 5.4 | 5.5 | 5.5 | 5.9 |
| 30/4/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 7 | 16/9/55 | 4.1 | 4.9 | 5.3 | 5.5 | 5.6 | 5.5 | 6 |
| 2/5/55 | 5.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | | | | | | | |
| 3/5/55 | 6.3 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.9 | 6.8 | 7.1 | 13/2/55 | 6 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.2 | 7.6 |
| 5/5/55 | 5.7 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 15/2/55 | 5.9 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7.1 | 7.4 |
| 9/5/55 | 6.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7 | 18/2/55 | 6 | 7 | 7 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.5 |
| 15/5/55 | 5.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 20/2/55 | 6.5 | 7 | 7.3 | 7.2 | 7.3 | 7.3 | 7.3 |
| 16/5/55 | 5.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 23/2/55 | 5.9 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.6 |
| 18/5/55 | 6 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7 | 26/2/55 | 6.4 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.4 |
| 21/5/55 | 5.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 27/2/55 | 5.8 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.3 |
| 22/5/55 | 6.3 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 1/3/55 | 6.2 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.3 |
| 23/5/55 | 5.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.9 | 2/3/55 | 5.5 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.3 |
| 25/5/55 | 6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7 | 5/3/55 | 5.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.3 |
| 29/5/55 | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.4 | 9/3/55 | 7 | 7.1 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.2 |
| 1/8/55 | 6 | 6.2 | 6 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.7 | 12/3/55 | 6.7 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.4 |
| 3/8/55 | 5.1 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.3 | 6.7 | 14/3/55 | 5.7 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.3 |
| 5/8/55 | 4.5 | 6.3 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 7 | 21/3/55 | 5.6 | 6.9 | 6.8 | 7 | 7 | 6.9 | 7.4 |
| 7/8/55 | 4.2 | 5.9 | 5.9 | 6 | 6.1 | 6.1 | 6.6 | 23/3/55 | 6.1 | 6.8 | 6.6 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.3 |
| 10/8/55 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.6 | 5.8 | 5.9 | 6.3 | 25/3/55 | 6.2 | 7 | 7 | 7 | 7.1 | 7 | 7.4 |
| 14/8/55 | 4 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 5.7 | 5.7 | 6.2 | 28/3/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 |

ตารางที่ ข-8 ค่าพีเอช ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า 2 เท่า และ 4 เท่า (ต่อ)

| วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | น้ำ เข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 29/3/55 | 5.9 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 5/5/55 | 5.4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 7 |
| 30/3/55 | 5.5 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7 | 9/5/55 | 5.8 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.2 |
| 31/3/55 | 6.3 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.1 | 15/5/55 | 5.6 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.2 |
| 2/4/55 | 5.3 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 16/5/55 | 5.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.3 |
| 3/4/55 | 6 | 7 | 6.9 | 6.9 | 7 | 7 | 7.2 | 18/5/55 | 5.6 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.1 |
| 6/4/55 | 6.1 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 21/5/55 | 5.4 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7 |
| 9/4/55 | 5.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7 | 22/5/55 | 6.2 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.3 |
| 10/4/55 | 5.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 23/5/55 | 5.7 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 7 |
| 11/4/55 | 5.5 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 25/5/55 | 6.2 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.6 | 7.1 |
| 15/4/55 | 5.8 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 29/5/55 | 6.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 7.2 |
| 16/4/55 | 5.4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.1 | 1/8/55 | 5.7 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.6 |
| 18/4/55 | 6.1 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.3 | 3/8/55 | 4.7 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.6 |
| 19/4/55 | 5.5 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.3 | 5/8/55 | 4.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.8 |
| 21/4/55 | 6.3 | 6.9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7.4 | 7/8/55 | 4.3 | 6.1 | 6 | 6 | 6.1 | 6.2 | 6.4 |
| 23/4/55 | 5.1 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 7.1 | 10/8/55 | 6.1 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 5.8 | 5.8 | 6.1 |
| 24/4/55 | 6 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.9 | 7.3 | 14/8/55 | 3.7 | 5.5 | 5.6 | 5.6 | 5.8 | 5.8 | 6.1 |
| 26/4/55 | 5.7 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 7.1 | 15/8/55 | 4.4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6.4 |
| 27/4/55 | 6.5 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 7.3 | 28/8/55 | 5.7 | 5.4 | 5.5 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.8 |
| 30/4/55 | 5.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 7.1 | 3/9/55 | 6.6 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.5 | 5.6 | 5.9 |
| 2/5/55 | 5.5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.7 | 6.9 | 7/9/55 | 3.8 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.9 |
| 3/5/55 | 6.4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 16/9/55 | 4 | 5.4 | 5.5 | 5.5 | 5.6 | 5.6 | 5.9 |

ตารางที่ ข-9 ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | | | | | | | | อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 18/2/55 | 146.0 | 450.0 | 100.0 | 37.5 | 31.3 | 31.3 | 31.3 | 100.0 | 18/2/55 | 146.0 | 478.1 | 56.3 | 37.5 | 50.0 | 50.0 | 62.5 | 37.5 |
| 26/2/55 | 154.0 | 431.3 | 93.8 | 68.8 | 56.3 | 43.8 | 75.0 | 75.0 | 26/2/55 | 154.0 | 393.8 | 62.5 | 50.0 | 25.0 | 25.0 | 50.0 | 37.5 |
| 14/3/55 | 170.9 | 450.0 | 100.0 | 62.5 | 75.0 | 37.5 | 25.0 | 43.8 | 14/3/55 | 170.9 | 384.4 | 31.3 | 50.0 | 56.3 | 18.8 | 12.5 | 18.8 |
| 22/3/55 | 179.0 | 440.6 | 81.3 | 68.8 | 43.8 | 18.8 | 18.8 | 18.8 | 22/3/55 | 179.0 | 328.1 | 50.0 | 43.8 | 43.8 | 25.0 | 18.8 | 25.0 |
| 29/3/55 | 186.0 | 361.9 | 92.5 | 56.3 | 57.5 | 38.8 | 17.5 | 32.5 | 29/3/55 | 186.0 | 343.1 | 66.3 | 66.3 | 56.3 | 26.3 | 40.0 | 42.5 |
| 6/4/55 | 194.0 | 410.6 | 145.0 | 81.3 | 110.0 | 85.0 | 78.8 | 31.3 | 6/4/55 | 194.0 | 369.4 | 60.0 | 45.0 | 68.8 | 35.0 | 40.0 | 36.3 |
| 17/4/55 | 205.1 | 427.5 | 162.5 | 108.8 | 62.5 | 52.5 | 55.0 | 76.3 | 17/4/55 | 205.1 | 384.4 | 76.3 | 50.0 | 55.0 | 41.3 | 41.3 | 62.5 |
| 26/4/55 | 213.9 | 455.6 | 117.5 | 58.8 | 38.8 | 30.0 | 33.8 | 42.5 | 26/4/55 | 213.9 | 397.5 | 55.0 | 52.5 | 57.5 | 31.3 | 30.0 | 17.5 |
| 3/5/55 | 221.0 | 388.1 | 85.0 | 67.5 | 65.0 | 40.0 | 32.5 | 50.0 | 3/5/55 | 221.0 | 281.3 | 57.5 | 58.8 | 56.3 | 61.3 | 47.5 | 31.3 |
| 18/5/55 | 235.9 | 423.8 | 175.0 | 47.5 | 88.8 | 46.3 | 48.8 | 48.8 | 18/5/55 | 235.9 | 386.3 | 72.5 | 52.5 | 46.3 | 48.8 | 70.0 | 21.3 |
| 29/5/55 | 246.9 | 300.0 | 167.5 | 60.0 | 53.8 | 33.8 | 37.5 | 28.8 | 29/5/55 | 246.9 | 125.0 | 41.3 | 57.5 | 67.5 | 40.0 | 36.3 | 36.3 |
| 4/8/55 | 314.0 | 395.6 | 343.1 | 97.5 | 57.5 | 58.8 | 50.0 | 48.8 | 4/8/55 | 314.0 | 53.8 | 102.5 | 113.8 | 62.5 | 58.8 | 52.5 | 75.0 |
| 15/8/55 | 325.0 | 401.3 | 140.0 | 55.0 | 53.8 | 47.5 | 41.3 | 42.5 | 15/8/55 | 325.0 | 303.8 | 67.5 | 46.3 | 51.3 | 55.0 | 55.0 | 38.8 |
| 16/9/55 | 357.1 | 95.0 | 82.5 | 40.0 | 27.5 | 32.5 | 18.8 | 17.5 | 16/9/55 | 357.1 | 120.0 | 65.0 | 35.0 | 18.8 | 18.8 | 16.3 | 16.3 |

ตารางที่ ข-10 ค่ากรดไขมันระเหยในหน่วยมก.อะซิติก/ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 18/2/55 | 146.0 | 515.6 | 118.8 | 56.3 | 75.0 | 50.0 | 31.3 | 50.0 |
| 26/2/55 | 154.0 | 309.4 | 62.5 | 56.3 | 18.8 | 18.8 | 25.0 | 37.5 |
| 14/3/55 | 170.9 | 328.1 | 56.3 | 50.0 | 31.3 | 18.8 | 12.5 | 18.8 |
| 22/3/55 | 179.0 | 365.6 | 56.3 | 43.8 | 25.0 | 25.0 | 12.5 | 18.8 |
| 29/3/55 | 186.0 | 286.9 | 72.5 | 72.5 | 71.3 | 50.0 | 27.5 | 23.8 |
| 6/4/55 | 194.0 | 322.5 | 85.0 | 68.8 | 40.0 | 35.0 | 33.8 | 45.0 |
| 17/4/55 | 205.1 | 285.0 | 51.3 | 53.8 | 41.3 | 27.5 | 41.3 | 35.0 |
| 26/4/55 | 213.9 | 333.8 | 62.5 | 65.0 | 51.3 | 23.8 | 30.0 | 30.0 |
| 3/5/55 | 221.0 | 316.9 | 70.0 | 55.0 | 52.5 | 27.5 | 13.8 | 15.0 |
| 18/5/55 | 235.9 | 326.3 | 70.0 | 65.0 | 77.5 | 32.5 | 42.5 | 43.8 |
| 29/5/55 | 246.9 | 138.8 | 127.5 | 111.3 | 83.8 | 71.3 | 43.8 | 30.0 |
| 4/8/55 | 314.0 | 97.5 | 75.0 | 83.8 | 70.0 | 50.0 | 55.0 | 50.0 |
| 15/8/55 | 325.0 | 446.3 | 72.5 | 62.5 | 68.8 | 56.3 | 53.8 | 43.8 |
| 16/9/55 | 357.1 | 110.0 | 62.5 | 45.0 | 17.5 | 17.5 | 16.3 | 16.3 |

ตารางที่ ข-11 ค่าความเป็นด่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | | | | | | | | อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 18/2/55 | 146.0 | 625.0 | 943.8 | 968.8 | 962.5 | 968.8 | 968.8 | 956.3 | 18/2/55 | 146.0 | 543.8 | 931.3 | 956.3 | 943.8 | 937.5 | 943.8 | 931.3 |
| 26/2/55 | 154.0 | 512.5 | 787.5 | 787.5 | 825.0 | 837.5 | 837.5 | 818.8 | 26/2/55 | 154.0 | 337.5 | 631.3 | 637.5 | 650.0 | 612.5 | 662.5 | 643.8 |
| 14/3/55 | 170.9 | 500.0 | 818.8 | 818.8 | 825.0 | 837.5 | 806.3 | 812.5 | 14/3/55 | 170.9 | 375.0 | 675.0 | 650.0 | 662.5 | 662.5 | 650.0 | 650.0 |
| 22/3/55 | 179.0 | 700.0 | 837.5 | 831.3 | 800.0 | 837.5 | 850.0 | 825.0 | 22/3/55 | 179.0 | 575.0 | 668.8 | 675.0 | 668.8 | 675.0 | 675.0 | 650.0 |
| 29/3/55 | 186.0 | 500.0 | 775.0 | 800.0 | 781.3 | 818.8 | 812.5 | 806.3 | 29/3/55 | 186.0 | 362.5 | 625.0 | 625.0 | 637.5 | 643.8 | 643.8 | 637.5 |
| 6/4/55 | 194.0 | 487.5 | 756.3 | 768.8 | 775.0 | 787.5 | 793.8 | 781.3 | 6/4/55 | 194.0 | 381.3 | 625.0 | 625.0 | 625.0 | 625.0 | 631.3 | 625.0 |
| 17/4/55 | 205.1 | 412.5 | 737.5 | 775.0 | 787.5 | 793.8 | 781.3 | 768.8 | 17/4/55 | 205.1 | 300.0 | 612.5 | 606.3 | 618.8 | 631.3 | 631.3 | 612.5 |
| 26/4/55 | 213.9 | 375.0 | 775.0 | 737.5 | 793.8 | 793.8 | 787.5 | 775.0 | 26/4/55 | 213.9 | 262.5 | 618.8 | 612.5 | 612.5 | 625.0 | 612.5 | 606.3 |
| 3/5/55 | 221.0 | 562.5 | 731.3 | 700.0 | 700.0 | 687.5 | 700.0 | 668.8 | 3/5/55 | 221.0 | 431.3 | 531.3 | 537.5 | 537.5 | 543.8 | 543.8 | 525.0 |
| 18/5/55 | 235.9 | 362.5 | 700.0 | 718.8 | 718.8 | 712.5 | 718.8 | 693.8 | 18/5/55 | 235.9 | 300.0 | 550.0 | 550.0 | 556.3 | 556.3 | 556.3 | 531.3 |
| 29/5/55 | 246.9 | 431.3 | 693.8 | 675.0 | 700.0 | 675.0 | 687.5 | 656.3 | 29/5/55 | 246.9 | 368.8 | 525.0 | 518.8 | 525.0 | 512.5 | 525.0 | 518.8 |
| 4/8/55 | 314.0 | 212.5 | 275.0 | 356.3 | 368.8 | 368.8 | 381.3 | 362.5 | 4/8/55 | 314.0 | 150.0 | 325.0 | 368.8 | 387.5 | 400.0 | 400.0 | 387.5 |
| 15/8/55 | 325.0 | 50.0 | 68.8 | 100.0 | 93.8 | 93.8 | 106.3 | 81.3 | 15/8/55 | 325.0 | 25.0 | 100.0 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 112.5 | 87.5 |
| 16/9/55 | 357.1 | 25.0 | 25.0 | 75.0 | 81.3 | 81.3 | 87.5 | 68.8 | 16/9/55 | 357.1 | 25.0 | 43.8 | 68.8 | 81.3 | 50.0 | 87.5 | 62.5 |

ตารางที่ ข-12 ค่าความเป็นต่างในหน่วยมก./ล.ของหินปูน ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 18/2/55 | 146.0 | 581.3 | 937.5 | 937.5 | 956.3 | 962.5 | 962.5 | 956.3 |
| 26/2/55 | 154.0 | 275.0 | 512.5 | 512.5 | 518.8 | 425.0 | 518.8 | 500.0 |
| 14/3/55 | 170.9 | 250.0 | 512.5 | 506.3 | 525.0 | 525.0 | 518.8 | 506.3 |
| 22/3/55 | 179.0 | 412.5 | 518.8 | 518.8 | 525.0 | 518.8 | 518.8 | 518.8 |
| 29/3/55 | 186.0 | 243.8 | 481.3 | 481.3 | 487.5 | 493.8 | 493.8 | 493.8 |
| 6/4/55 | 194.0 | 306.3 | 475.0 | 468.8 | 475.0 | 487.5 | 481.3 | 468.8 |
| 17/4/55 | 205.1 | 212.5 | 468.8 | 462.5 | 475.0 | 481.3 | 481.3 | 437.5 |
| 26/4/55 | 213.9 | 218.8 | 456.3 | 456.3 | 468.8 | 468.8 | 475.0 | 437.5 |
| 3/5/55 | 221.0 | 368.8 | 425.0 | 443.8 | 443.8 | 456.3 | 450.0 | 437.5 |
| 18/5/55 | 235.9 | 206.3 | 443.8 | 450.0 | 450.0 | 450.0 | 456.3 | 443.8 |
| 29/5/55 | 246.9 | 375.0 | 425.0 | 431.3 | 437.5 | 456.3 | 456.3 | 412.5 |
| 4/8/55 | 314.0 | 181.3 | 250.0 | 243.8 | 243.8 | 262.5 | 262.5 | 250.0 |
| 15/8/55 | 325.0 | 62.5 | 100.0 | 112.5 | 100.0 | 100.0 | 112.5 | 93.8 |
| 16/9/55 | 357.1 | 50.0 | 37.5 | 68.8 | 75.0 | 75.0 | 81.3 | 68.8 |

ตารางที่ ข-13 ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า และ 2 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 1 เท่า | | | | | | | | | อัตราการเวียนน้ำ 2 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง | วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 13/2/55 | 140.8 | 110 | 195 | 95 | 55 | 140 | 25 | 20 | 13/2/55 | 140.8 | 105 | 155 | 25 | 90 | 210 | 25 | 30 |
| 21/2/55 | 149.0 | 100 | 45 | 35 | 35 | 70 | 5 | 20 | 21/2/55 | 149.0 | 85 | 25 | 35 | 30 | 25 | 10 | 35 |
| 28/2/55 | 156.0 | 115 | 25 | 15 | 40 | 5 | 5 | 15 | 28/2/55 | 156.0 | 55 | 55 | 10 | 60 | 50 | 10 | 5 |
| 8/3/55 | 165.0 | 100 | 60 | 30 | 45 | 35 | 25 | 20 | 8/3/55 | 165.0 | 100 | 30 | 20 | 30 | 25 | 20 | 25 |
| 23/3/55 | 180.0 | 75 | 505 | 65 | 30 | 50 | 5 | 40 | 23/3/55 | 180.0 | 75 | 55 | 45 | 35 | 75 | 5 | 35 |
| 4/4/55 | 192.0 | 90 | 870 | 125 | 70 | 25 | 15 | 5 | 4/4/55 | 192.0 | 60 | 110 | 45 | 100 | 450 | 5 | 5 |
| 12/4/55 | 200.1 | 140 | 520 | 35 | 45 | 15 | 25 | 15 | 12/4/55 | 200.1 | 155 | 45 | 30 | 65 | 360 | 15 | 5 |
| 19/4/55 | 207.1 | 140 | 1370 | 80 | 35 | 40 | 15 | 20 | 19/4/55 | 207.1 | 105 | 90 | 70 | 55 | 285 | 25 | 15 |
| 1/5/55 | 219.1 | 90 | 2113 | 55 | 30 | 35 | 5 | 5 | 1/5/55 | 219.1 | 80 | 75 | 60 | 165 | 660 | 10 | 5 |
| 9/5/55 | 227.1 | 170 | 2040 | 30 | 45 | 30 | 10 | 15 | 9/5/55 | 227.1 | 120 | 50 | 60 | 265 | 640 | 30 | 5 |
| 25/5/55 | 243.2 | 170 | 400 | 15 | 10 | 10 | 5 | 30 | 25/5/55 | 243.2 | 110 | 80 | 40 | 130 | 235 | 35 | 10 |
| 5/8/55 | 315.0 | 155 | 215 | 55 | 45 | 140 | 20 | 20 | 5/8/55 | 315.0 | 135 | 105 | 25 | 50 | 50 | 20 | 20 |
| 15/8/55 | 325.0 | 727 | 30 | 15 | 10 | 60 | 10 | 15 | 15/8/55 | 325.0 | 3700 | 35 | 20 | 20 | 45 | 5 | 5 |
| 28/8/55 | 338.0 | 60 | 110 | 75 | 60 | 320 | 35 | 40 | 28/8/55 | 338.0 | 55 | 115 | 70 | 165 | 215 | 35 | 55 |
| 7/9/55 | 348.0 | 215 | 125 | 30 | 35 | 90 | 25 | 15 | 7/9/55 | 348.0 | 270 | 25 | 20 | 30 | 275 | 25 | 15 |

ตารางที่ ข-14 ค่าของแข็งแขวนลอยในหน่วยมก./ล. ที่อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า

| อัตราการเวียนน้ำ 4 เท่า | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| วัน/ เดือน/ปี | เวลา (วัน) | น้ำเข้า | 3 ชั่วโมง | 8 ชั่วโมง | 13 ชั่วโมง | 25 ชั่วโมง | 38 ชั่วโมง | 50 ชั่วโมง |
| 13/2/55 | 140.8 | 110 | 75 | 20 | 40 | 150 | 35 | 20 |
| 21/2/55 | 149.0 | 100 | 70 | 55 | 55 | 45 | 50 | 10 |
| 28/2/55 | 156.0 | 90 | 60 | 50 | 30 | 40 | 35 | 35 |
| 8/3/55 | 165.0 | 140 | 180 | 50 | 75 | 75 | 50 | 45 |
| 23/3/55 | 180.0 | 110 | 425 | 290 | 70 | 80 | 15 | 55 |
| 4/4/55 | 192.0 | 95 | 470 | 340 | 65 | 65 | 20 | 15 |
| 12/4/55 | 200.1 | 110 | 40 | 25 | 20 | 40 | 10 | 15 |
| 19/4/55 | 207.1 | 135 | 415 | 295 | 105 | 110 | 15 | 25 |
| 1/5/55 | 219.1 | 130 | 320 | 345 | 180 | 145 | 10 | 30 |
| 9/5/55 | 227.1 | 280 | 300 | 300 | 130 | 460 | 65 | 50 |
| 25/5/55 | 243.2 | 215 | 175 | 115 | 80 | 375 | 5 | 5 |
| 5/8/55 | 315.0 | 140 | 255 | 210 | 55 | 195 | 35 | 50 |
| 15/8/55 | 325.0 | 1400 | 100 | 80 | 45 | 50 | 35 | 35 |
| 28/8/55 | 338.0 | 40 | 305 | 490 | 280 | 180 | 35 | 30 |
| 7/9/55 | 348.0 | 175 | 95 | 95 | 75 | 130 | 45 | 35 |

การทดลองส่วนที่ 3 การตรวจสอบการอุดตันของระบบถังกรองไร้ออกซิเจน

ตารางที่ ข-15 ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 1 (ระบบไม่มีเชื้อ)

| เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า |
|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 23/8/54 | | | 25/8/54 | | | 2:20 | 53 | 1686 |
| 21:20 | 0 | เริ่มต้น | 0:20 | 27 | 160.1 | 3:20 | 54 | 1635 |
| 22:20 | 1 | 129.6 | 1:20 | 28 | 160.3 | 4:20 | 55 | 1610 |
| 24/8/54 | | | 2:20 | 29 | 160.8 | 5:20 | 56 | 1595 |
| 0:20 | 3 | 129.5 | 3:20 | 30 | 162.1 | 6:20 | 57 | 1562 |
| 1:20 | 4 | 129.4 | 4:20 | 31 | 162.1 | 7:20 | 58 | 1539 |
| 2:20 | 5 | 129.4 | 5:20 | 32 | 162.5 | 8:20 | 59 | 1525 |
| 3:20 | 6 | 129.4 | 6:20 | 33 | 162.3 | 9:20 | 60 | 1512 |
| 4:20 | 7 | 129.1 | 7:20 | 34 | 163.3 | 10:20 | 61 | 1508 |
| 5:20 | 8 | 129.5 | 8:20 | 35 | 163.9 | 11:20 | 62 | 1490 |
| 6:20 | 9 | 129.9 | 9:20 | 36 | 162.6 | 14:20 | 65 | 1478 |
| 7:20 | 10 | 129.4 | 10:20 | 37 | 170.8 | 17:20 | 68 | 1433 |
| 8:20 | 11 | 129 | 11:20 | 38 | 172.3 | 20:20 | 71 | 1323 |
| 9:20 | 12 | 128.9 | 12:20 | 39 | 173.3 | 23:20 | 74 | 1232 |
| 10:20 | 13 | 129.5 | 13:20 | 40 | 174.5 | 28/8/54 | | |
| 11:20 | 14 | 129.6 | 14:20 | 41 | 175.7 | 12:20 | 111 | 429 |
| 12:20 | 15 | 128.8 | 15:20 | 42 | 180 | 15:20 | 114 | 395 |
| 13:20 | 16 | 129.6 | 16:20 | 43 | 181.6 | 18:20 | 117 | 373 |
| 14:20 | 17 | 130 | 17:20 | 44 | 183 | 21:20 | 120 | 338 |
| 15:20 | 18 | 128.5 | 18:20 | 45 | 187 | 29/8/54 | | |
| 16:20 | 19 | 128.2 | 19:20 | 46 | 204 | 9:20 | 132 | 271 |
| 17:20 | 20 | 129.7 | 20:20 | 47 | 1201 | 12:20 | 135 | 269 |
| 18:20 | 21 | 157.9 | 21:20 | 48 | 1904 | 15:20 | 138 | 248 |
| 19:20 | 22 | 158.8 | 22:20 | 49 | 1904 | 18:20 | 141 | 239 |
| 20:20 | 23 | 162.2 | 23:20 | 50 | 1869 | 30/8/54 | | |
| 21:20 | 24 | 160.4 | 26/8/54 | | | 16:20 | 163 | 182.7 |
| 22:20 | 25 | 161.1 | 0:20 | 51 | 1823 | 31/8/54 | | |
| 23:20 | 26 | 160.3 | 1:20 | 52 | 1725 | 16:20 | 187 | 149.7 |

ตารางที่ ข-16 ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 (ระบบไม่มีเชื้อ)

| เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า |
|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 8/9/54 | | | 14/9/54 | | | 13/9/54 | | |
| 16:20 | 0 | เริ่มต้น | 19:20 | 147 | 369 | 10:20 | 114 | 562 |
| 19:20 | 3 | 250 | 15/9/54 | | | 14:20 | 118 | 523 |
| 9/9/54 | | | 19:20 | 171 | 296 | 16:20 | 120 | 499 |
| 10:20 | 18 | 243 | | | | 19:20 | 123 | 476 |
| 13:20 | 21 | 248 | 8/9/54 | | | 14/9/54 | | |
| 16:20 | 24 | 251 | 16:20 | 0 | เริ่มต้น | 19:20 | 147 | 341 |
| 19:20 | 27 | 254 | 19:20 | 3 | 248 | 15/9/54 | | |
| 10/9/54 | | | 9/9/54 | | | 19:20 | 171 | 282 |
| 10:20 | 42 | 291 | 10:20 | 18 | 246 | | | |
| 14:20 | 46 | 2860 | 13:20 | 21 | 254 | | | |
| 15:20 | 47 | 2800 | 16:20 | 24 | 255 | | | |
| 17:20 | 49 | 2720 | 19:20 | 27 | 257 | | | |
| 18:20 | 50 | 2650 | 10/9/54 | | | | | |
| 19:20 | 51 | 2620 | 10:20 | 42 | 2980 | | | |
| 11/9/54 | | | 14:20 | 46 | 2780 | | | |
| 14:20 | 70 | 1798 | 15:20 | 47 | 2710 | | | |
| 16:20 | 72 | 1700 | 17:20 | 49 | 2620 | | | |
| 19:20 | 75 | 1564 | 18:20 | 50 | 2530 | | | |
| 12/9/54 | | | 19:20 | 51 | 2500 | | | |
| 14:20 | 94 | 1012 | 11/9/54 | | | | | |
| 16:20 | 96 | 943 | 14:20 | 70 | 1614 | | | |
| 19:20 | 99 | 896 | 16:20 | 72 | 1579 | | | |
| 13/9/54 | | | 19:20 | 75 | 1431 | | | |
| 10:20 | 114 | 659 | 12/9/54 | | | | | |
| 14:20 | 118 | 603 | 14:20 | 94 | 848 | | | |
| 16:20 | 120 | 582 | 16:20 | 96 | 808 | | | |
| 19:20 | 123 | 548 | 19:20 | 99 | 770 | | | |

ตารางที่ ข-17 ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (วันที่ 121-136)

| เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า |
|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 31/1/55 | เริ่มต้น | ชุดที่ 1 | 31/1/55 | เริ่มต้น | ชุดที่ 2 | 31/1/55 | เริ่มต้น | ชุดที่ 3 |
| 21:10 | 0 | 275 | 21:10 | 0 | 277 | 21:10 | 0 | 271 |
| 1/2/55 | | | 1/2/55 | | | 1/2/55 | | |
| 16:10 | 19 | 389 | 16:10 | 19 | 380 | 16:10 | 19 | 390 |
| 21:10 | 24 | 409 | 21:10 | 24 | 395 | 21:10 | 24 | 408 |
| 2/2/55 | | | 2/2/55 | | | 2/2/55 | | |
| 13:10 | 40 | 438 | 13:10 | 40 | 413 | 13:10 | 40 | 418 |
| 14:10 | 41 | 1280 | 14:10 | 41 | 463 | 14:10 | 41 | 432 |
| 15:10 | 42 | 3030 | 15:10 | 42 | 956 | 15:10 | 42 | 448 |
| 16:10 | 43 | 3040 | 16:10 | 43 | 2280 | 16:10 | 43 | 456 |
| 17:10 | 44 | 3060 | 17:10 | 44 | 3070 | 17:10 | 44 | 878 |
| 18:10 | 45 | 3010 | 18:10 | 45 | 3030 | 18:10 | 45 | 2400 |
| 19:10 | 46 | 2950 | 19:10 | 46 | 2980 | 19:10 | 46 | 3140 |
| 20:10 | 47 | 2900 | 20:10 | 47 | 2940 | 20:10 | 47 | 3120 |
| 21:10 | 48 | 2850 | 21:10 | 48 | 2900 | 21:10 | 48 | 3070 |
| 3/2/55 | | | 3/2/55 | | | 3/2/55 | | |
| 14:10 | 65 | 2130 | 14:10 | 65 | 2180 | 14:10 | 65 | 2300 |
| 17:10 | 68 | 1990 | 17:10 | 68 | 2040 | 17:10 | 68 | 2160 |
| 21:10 | 72 | 1765 | 21:10 | 72 | 1813 | 21:10 | 72 | 2010 |
| 4/2/55 | | | 4/2/55 | | | 4/2/55 | | |
| 15:40 | 90.5 | 1110 | 15:40 | 90.5 | 1155 | 15:40 | 90.5 | 1305 |
| 18:10 | 93 | 1052 | 18:10 | 93 | 1088 | 18:10 | 93 | 1233 |
| 5/2/55 | | | 5/2/55 | | | 5/2/55 | | |
| 18:40 | 117.5 | 627 | 18:40 | 117.5 | 662 | 18:40 | 117.5 | 732 |
| 21:10 | 120 | 578 | 21:10 | 120 | 597 | 21:10 | 120 | 697 |
| 6/2/55 | | | 6/2/55 | | | 6/2/55 | | |
| 15:10 | 138 | 457 | 15:10 | 138 | 477 | 15:10 | 138 | 541 |
| 18:40 | 141.5 | 440 | 18:40 | 141.5 | 449 | 18:40 | 141.5 | 510 |
| 7/2/55 | | | 7/2/55 | | | 7/2/55 | | |
| 15:40 | 162.5 | 354 | 15:40 | 162.5 | 362 | 15:40 | 162.5 | 395 |
| 21:40 | 168.5 | 337 | 21:40 | 168.5 | 340 | 21:40 | 168.5 | 370 |

ตารางที่ ข-18 ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 (วันที่ 289-306)

| เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า |
|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 10/7/55 | | | 16/7/55 | | | 13/7/55 | | |
| 21:00 | เริ่มต้น | 314 | 18:30 | 141.5 | 734 | 0:00 | 51 | 2890 |
| 11/7/55 | | | 21:00 | 144 | 696 | 1:00 | 52 | 3100 |
| 15:30 | 18.5 | 349 | 17/7/55 | | | 2:00 | 53 | 3070 |
| 19:00 | 22 | 356 | 18:00 | 165 | 517 | 17:00 | 68 | 2530 |
| 21:00 | 24 | 360 | 21:00 | 168 | 504 | 19:00 | 70 | 2440 |
| 12/7/55 | | | 18/7/55 | | | 21:00 | 72 | 2380 |
| 13:30 | 40.5 | 372 | 21:00 | 192 | 419 | 14/7/55 | | |
| 14:00 | 41 | 371 | 19/7/55 | | | 18:30 | 93.5 | 1552 |
| 15:00 | 42 | 374 | 19:00 | 214 | 376 | 15/7/55 | | |
| 16:00 | 43 | 375 | | | | 1:00 | 100 | 1350 |
| 17:00 | 44 | 377 | 10/7/55 | | | 16/7/55 | | |
| 18:00 | 45 | 377 | 21:00 | เริ่มต้น | 332 | 18:30 | 141.5 | 677 |
| 19:00 | 46 | 379 | 11/7/55 | | | 21:00 | 144 | 638 |
| 20:00 | 47 | 386 | 15:30 | 18.5 | 351 | 17/7/55 | | |
| 21:00 | 48 | 397 | 19:00 | 22 | 354 | 18:00 | 165 | 474 |
| 23:00 | 50 | 1763 | 21:00 | 24 | 353 | 21:00 | 168 | 478 |
| 13/7/55 | | | 12/7/55 | | | 18/7/55 | | |
| 0:00 | 51 | 3180 | 13:30 | 40.5 | 368 | 21:00 | 192 | 402 |
| 1:00 | 52 | 3140 | 14:00 | 41 | 368 | 19/7/55 | | |
| 2:00 | 53 | 3090 | 15:00 | 42 | 368 | 19:00 | 214 | 367 |
| 17:00 | 68 | 2560 | 16:00 | 43 | 370 | | | |
| 19:00 | 70 | 2470 | 17:00 | 44 | 371 | | | |
| 21:00 | 72 | 2380 | 18:00 | 45 | 374 | | | |
| 14/7/55 | | | 19:00 | 46 | 375 | | | |
| 18:30 | 93.5 | 1629 | 20:00 | 47 | 380 | | | |
| 15/7/55 | | | 21:00 | 48 | 386 | | | |
| 1:00 | 100 | 1409 | 23:00 | 50 | 1273 | | | |

ตารางที่ ข-19 ค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนส์ ชุดการทดลองที่ 3 (วันที่ 289-306)

| เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า | เวลา | เวลา (ชม.) | ความนำ ไฟฟ้า |
|---------|---------------|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 10/7/55 | | | 16/7/55 | | |
| 21:00 | เริ่มต้น | 314 | 18:30 | 141.5 | 734 |
| 11/7/55 | | | 21:00 | 144 | 696 |
| 15:30 | 18.5 | 349 | 17/7/55 | | |
| 19:00 | 22 | 356 | 18:00 | 165 | 517 |
| 21:00 | 24 | 360 | 21:00 | 168 | 504 |
| 12/7/55 | | | 18/7/55 | | |
| 13:30 | 40.5 | 372 | 21:00 | 192 | 419 |
| 14:00 | 41 | 371 | 19/7/55 | | |
| 15:00 | 42 | 374 | 19:00 | 214 | 376 |
| 16:00 | 43 | 375 | | | |
| 17:00 | 44 | 377 | | | |
| 18:00 | 45 | 377 | | | |
| 19:00 | 46 | 379 | | | |
| 20:00 | 47 | 386 | | | |
| 21:00 | 48 | 397 | | | |
| 23:00 | 50 | 1763 | | | |
| 13/7/55 | | | | | |
| 0:00 | 51 | 3180 | | | |
| 1:00 | 52 | 3140 | | | |
| 2:00 | 53 | 3090 | | | |
| 17:00 | 68 | 2560 | | | |
| 19:00 | 70 | 2470 | | | |
| 21:00 | 72 | 2380 | | | |
| 14/7/55 | | | | | |
| 18:30 | 93.5 | 1629 | | | |
| 15/7/55 | | | | | |
| 1:00 | 100 | 1409 | | | |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภัทร วิวัฒน์สร เกิดเมื่อวันที่ 26 เดือนธันวาคม พ.ศ.2530 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2552 ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 10 “การวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: เรียนรู้วันนี้เพื่อชีวิตที่ดีกว่าวันหน้า” ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต เมื่อวันที่ 31 สิงหาคม 2555 หัวข้อเรื่อง ผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำและการอุดตันต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ