



ผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียจากระบวนการskim
ในอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นโดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ
**Effect of pH on Sulfate Removal in Anaerobic Treatment of
Skimed Latex Wastewater**

พีริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร
Pireeporn Preechalertmit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Environmental Management
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการสกิม
ในอุตสาหกรรมน้ำยางข้น โดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

ผู้เขียน นางสาวพิริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | คณะกรรมการสอบ |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์) |ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.บรรจง วิทยวิรศักดิ์) |
| |กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี) |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | |
| (ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง) |กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์) |
| |กรรมการ (ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง) |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ
สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | ผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียกระบวนการสกิมในน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำยางข้นโดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ |
| ผู้เขียน | นางสาวพิริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร |
| สาขาวิชา | การจัดการสิ่งแวดล้อม |
| ปีการศึกษา | 2553 |

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตยางสกิมมีการใช้กรดซัลฟูริกในการจับตัวเนื้อยางในทางน้ำยาง ส่งผลให้น้ำเสียสกิมซึ่งมีสภาพเป็นกรดสูง พีเอชเฉลี่ย 2.4 ± 0.5 ความเข้มข้นของซีโอดีและซัลเฟตสูงถึง $14,911 \pm 1,819$ และ $6,506 \pm 1,038$ มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อรวมกับน้ำเสียส่วนอื่นๆ เข้าสู่ระบบบำบัดที่มีสภาวะไร้อากาศจะก่อให้เกิดปัญหาจากการรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งกัดกร่อนโลหะและเป็นพิษยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของพีเอชในน้ำเสียสกิมต่อการกำจัดซัลเฟต โดยแยกบำบัดขั้นต้นเฉพาะส่วนของน้ำเสียสกิมด้วยระบบแบบไร้อากาศเพื่อให้ระบบแบบไร้อากาศที่ตามมามีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยแบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ การศึกษาผลของพีเอชน้ำเสียต่อการกำจัดซัลเฟตในโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่พีเอชตั้งแต่ 2.4 (ไม่ปรับพีเอช) ถึง 7 และการทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบยูเอเอสบีและเอเอสบีอาร์ ทำการเดินระบบทั้ง 2 ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน ผลจากการทดลองที่ 1 พบว่าระบบที่รับน้ำเสียที่ไม่ปรับพีเอชกำจัดซัลเฟตได้ $7.25 \pm 4.01\%$ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด และเมื่อปรับพีเอชเป็น 7 พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตได้สูงที่สุดเทียบกับระดับพีเอชอื่น มีค่าเท่ากับ $45.45 \pm 3.75\%$ ซึ่งแตกต่างกับที่ระดับพีเอชอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และในการทดลองที่ 2 ปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 7 ป้อนเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีและเอเอสบีอาร์ พบว่าระบบทั้งสองมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างมากกว่า 0.8 และเกิดการล้มเหลวหลังจากเดินระบบได้ 97 วัน เมื่อปรับพีเอชเป็น 8 พบว่าระบบยูเอเอสบีและระบบเอเอสบีอาร์มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตได้ $27.37 \pm 2.55\%$ และ $46.58 \pm 1.98\%$ ตามลำดับ ลักษณะการเดินระบบระบบเอเอสบีอาร์ในเฟสการตกตะกอนก่อนปล่อยน้ำทิ้งอาจสามารถรักษาจุลินทรีย์ชนิดซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียที่อยู่ในระบบได้ดีกว่าระบบยูเอเอสบี เนื่องจากเชื้อชนิดนี้รวมตัวเป็นเม็ดได้ไม่ดีเทียบกับจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทน

| | |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Thesis Title | Effect of pH on Sulfate Removal in Anaerobic Treatment of Skimmed Latex Wastewater |
| Author | Miss Pireeporn Preechalertmit |
| Major Program | Environmental Management |
| Academic Year | 2010 |

ABSTRACT

In rubber skim block production process, use of sulfuric acid is a general practice that makes this rubber skim wastewater to be acidic (pH 2.4 ± 0.5) and high in organics (COD $14,911\pm 1,819$ mg/L) and sulfate ($6,506\pm 1,038$ mg/L). This wastewater when combined with those from other parts of the factory will cause difficulty in anaerobic treatment systems due to the hydrogen sulfide (H_2S) produced from the reduction of sulfate. This gas is odorous, corrosive to metals and toxic to microorganisms in the treatment system, thus, pretreatment of this wastewater in separate prior to combining with other wastewaters could facilitate efficient anaerobic digesters that follow. The objectives of this work were first to study the effects of pH of skim wastewater in separate (pH 2.4 to 7) to sulfate removal in anaerobic digestion, and secondly to compare efficiency of upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) and anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) under similar operating regime. Results from the first part indicated that anaerobic digester accepting unadjusted skim rubber wastewater (pH 2.43 ± 0.50) has the lowest sulfate removal at only $7.25\pm 4.01\%$ while at pH 7 the system posed sulfate removal at $45.45\pm 3.75\%$ that is significantly higher than other pH's ($p < 0.05$). In the second part, rubber skim wastewater adjust to pH 7 was used as feed. It was found that both UASB and ASBR could barely maintain the internal pH and finally failed after 97 days of operation. When the wastewater pH was adjusted to 8, sulfate removal at $27.37\pm 2.55\%$ and $46.58\pm 1.98\%$ could be sustained for UASB and ASBR, respectively. Characteristics of ASBR operation that allows settling phase was thought to enable better retention of sulfate reducing bacteria which generally do not granulate well compared to acidogens and methanogens in the granule forming anaerobic digesters.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาอย่างสูงในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ และตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอดจากคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ และดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บรรจง วิทยวิรัตติกดิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วิระศักดิ์ ทองลิ้มปี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ และเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการตลอดจนข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณกัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรณ (พี่ขวัญ) คุณวรรณฤดี หวันเซ่ง (พี่ปุก) คุณอิสรา รังงาม (พี่แอร์) และพี่น้องสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมรุ่นที่ 18 ที่ให้คำปรึกษาตลอดจนให้กำลังใจ และความช่วยเหลือในงานวิจัยมาด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเจียชัชยิม แซ่เจีย (บิดา) คุณแม่สุ่ยเก็ง แซ่เฮ้า (มารดา) คุณณรงค์ชัย ปรีชาเลิศมิตร (พี่จ๋วง) คุณศุภชัย ปรีชาเลิศมิตร (พี่หมี) และคุณดวงหทัย ปรีชาเลิศมิตร ที่คอยเป็นแรงบันดาลใจ ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการต่อสู้กับปัญหา และอุปสรรคต่าง ๆ มาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

พีริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| สารบัญ | (6) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการตารางผนวก | (10) |
| รายการภาพประกอบ | (11) |
| รายการภาพประกอบผนวก | (13) |
| สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ | (14) |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำตั้งเรื่อง | 1 |
| 1.2 ตรวจสอบเอกสาร | 4 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 18 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 19 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย | 19 |
| 2. วิธีการวิจัย | 20 |
| 2.1 วิธีการวิจัย | 20 |
| 2.1.1 การศึกษาลักษณะน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น ในส่วน ของกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก (น้ำเสียสกิม) | 19 |
| 2.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง | 21 |
| 2.1.3 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชน้ำเสียก่อนเข้าระบบต่อ กระบวนการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสกิม | 22 |
| 2.1.4 การทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตโดยใช้ ระบบ UASB (upflow anaerobic sludge bed) และ ASBR (anaerobic sequencing batch reactor) | 23 |
| 2.2 วัสดุ | 28 |
| 2.2.1 สารปรับพีเอช | 28 |
| 2.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการเดินระบบ | 28 |
| 2.2.3 ตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) | 28 |
| | (6) |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.2.4 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ | 28 |
| 2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย | 29 |
| 2.3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำ | 29 |
| 2.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ | 29 |
| 3. ผล และวิจารณ์ผลการวิจัย | 30 |
| 3.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง | 30 |
| 3.2 การทดลองที่ 1 ผลของพีเอชต่อกระบวนการกำจัดซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในน้ำเสียสกิมในระบบไร้อากาศ | 31 |
| 3.2.1 VFA (volatile fatty acid), สภาพด่าง (alkalinity) และพีเอช | 32 |
| 3.2.2 ซัลเฟต (sulfate: SO_4^{2-}) | 35 |
| 3.2.3 COD (chemical oxygen demand) | 38 |
| 3.3 การทดลองที่ 2 ผลของระบบไร้อากาศแบบ UASB และ ASBR ในระดับห้องปฏิบัติการ | 39 |
| 3.3.1 VFA (volatile fatty acid), สภาพด่าง (alkalinity) และพีเอช | 39 |
| 3.3.2 ซัลเฟต (sulfate: SO_4^{2-}) | 43 |
| 3.3.3 COD (chemical oxygen demand) | 45 |
| 3.3.4 องค์ประกอบของมีเทน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ | 47 |
| 3.4 การเปรียบเทียบการทำงานของระบบไร้อากาศที่รับน้ำเสียอุตสาหกรรมยางพาราที่แตกต่างกัน | 47 |
| 3.4.1 VFA (volatile fatty acid), สภาพด่าง (alkalinity) และพีเอช | 49 |
| 3.4.2 ซัลเฟต (sulfate: SO_4^{2-}) | 49 |
| 3.4.3 COD (chemical oxygen demand) | 50 |
| 4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 51 |
| 4.1 บทสรุป | 51 |
| 4.2 ข้อเสนอแนะในการทำการวิจัยเพิ่มเติม | 51 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|-----------------|------|
| บรรณานุกรม | 53 |
| ภาคผนวก | 60 |
| ประวัติผู้เขียน | 82 |

รายการตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1-1 | ปริมาณน้ำเสียจากการบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น | 5 |
| 1-2 | สมบัติของน้ำเสียรวมจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น | 5 |
| 1-3 | สมบัติน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกิมจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น | 5 |
| 2-1 | พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย | 20 |
| 2-2 | ความถี่ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR | 27 |
| 3-1 | ลักษณะน้ำเสียสกิมจากโรงงานอุตสาหกรรมและเมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็นระดับต่าง ๆ ด้วยเถ้าไม้ยางพารา | 30 |
| 3-2 | ค่า COD และซัลเฟตในน้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว | 38 |
| 3-3 | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียเข้าระบบปรับพีเอชเป็น 8 ณ สภาวะคงตัว | 42 |
| 3-4 | เปรียบเทียบลักษณะน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ UASB 1, UASB 2 และ ABR | 48 |
| 3-5 | เปรียบเทียบลักษณะน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของระบบ UASB 1, UASB 2 และ ABR | 48 |

รายการตารางผนวก

| ตารางผนวก | | หน้า |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก-1 | ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย น้ำทิ้ง และประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกิมที่ปรับพีเอชด้วยถ้ำไม้อย่างพาราที่ระดับต่าง ๆ | 61 |
| ก-2 | ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง, ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ UASB และ ASBR, พีเอช 7 | 70 |
| ก-3 | ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง, ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ UASB และ ASBR, พีเอช 8 | 73 |
| ก-4 | ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง, ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ UASB 1 | 75 |
| ก-5 | ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง, ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ ASBR | 76 |
| ข-1 | ตารางแสดงค่า pK' ที่ระดับ Ionic Strength และอุณหภูมิต่าง ๆ | 79 |

รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1-1 การจับตัวของจุลินทรีย์เป็นเม็ดตะกอน | 9 |
| 1-2 แบบจำลองแสดงการทำงานของระบบ UASB | 9 |
| 1-3 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ขนาด 0.5-2 mm) | 10 |
| 2-1 ถังเก็บรวบรวมน้ำเสีย (Storage Tank) และจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | 21 |
| 2-2 ไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง (ชุดการทดลองขั้นต้น) | 22 |
| 2-3 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย UASB ในห้องปฏิบัติการ | 24 |
| 2-4 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย ASBR ในห้องปฏิบัติการ | 26 |
| 3-1 สภาพความเป็นกรดในระบบกะกึ่งต่อเนื่อง ที่รับน้ำเสียที่ระดับพีเอชต่าง ๆ (a) พีเอช 2.43, (b) พีเอช 4, (c) พีเอช 5, (d) พีเอช 6 และ (e) พีเอช 7 | 33 |
| 3-2 ปริมาณ VFA ในน้ำเสียที่ปรับพีเอชระดับต่าง ๆ และน้ำทิ้งจากระบบไร้อากาศ แบบกะกึ่งต่อเนื่อง ณ สภาวะคงตัว | 34 |
| 3-3 พีเอช และสภาพต่างในน้ำทิ้งจากระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกิมปรับ พีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว | 34 |
| 3-4 พีเอช และ VFA/ALK ratio ของระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกิมปรับ พีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว | 35 |
| 3-5 ประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตของระบบกะกึ่งต่อเนื่องโดย (a) พีเอช 2.43, (b) พีเอช 4, (c) พีเอช 5, (d) พีเอช 6 และ (e) พีเอช 7 | 37 |
| 3-6 ประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตของระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสีย ปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว | 37 |
| 3-7 VFA และพีเอชในน้ำเสียเข้า และน้ำทิ้งจากระบบ UASB | 40 |
| 3-8 VFA และพีเอชในน้ำเสียเข้า และน้ำทิ้งจากระบบ ASBR | 41 |
| 3-9 VFA/ALK ratio ของน้ำเสียเข้า และน้ำทิ้งจากระบบ UASB และ ASBR | 42 |
| 3-10 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ UASB | 44 |
| 3-11 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ ASBR | 44 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3-12 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ UASB | 46 |
| 3-13 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ ASBR | 46 |

รายการภาพประกอบผนวก

| ภาพประกอบผนวก | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับการเปลี่ยนแปลงของซัลไฟด์ | 77 |
| ข-2 สัดส่วนของ H_2S และ HS^- ของซัลไฟด์ในน้ำ | 78 |
| ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ionic Strength กับการเปลี่ยนแปลง ร้อยละไฮโดรเจนซัลไฟด์ | 80 |

สัญลักษณ์คำย่อ และตัวย่อ

- ALK. = alkalinity คือ ความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอนซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต
- Ash = เถ้าจากไม้ยางพารา
- COD = chemical oxygen demand คือ ความต้องการออกซิเจนทั้งหมดในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ด้วยวิธีทางเคมี
- Eff = effluent คือ น้ำทิ้งจากระบบ
- HRT = hydraulic retention time คือ ระยะเวลาที่น้ำเสียถูกกักพอกอยู่ในระบบ
- H₂S = hydrogen sulfide คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นสารประกอบซัลไฟด์ที่สามารถอยู่ในรูปละลายน้ำ (dissolved H₂S) หรืออยู่ในรูปของก๊าซซึ่งไม่แตกตัวเป็นไอออน มีกลิ่นเหม็นหรือที่เรียกว่าก๊าซไข่เน่า
- Inf = influent คือ น้ำเสียที่เข้าระบบ
- Mean = ค่าเฉลี่ย
- MPB = methane production bacteria คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนจากการใช้ VFA เป็นอาหารได้มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิตสุดท้าย
- Range = ช่วงของข้อมูลต่ำสุด และสูงสุด
- SRB = sulfate reducing bacteria คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์ซัลเฟต โดยสามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย และได้ซัลไฟด์เป็นผลผลิตสุดท้าย
- SRR = sulfate reducing reactor คือ ระบบบำบัดไร้อากาศกำจัดซัลเฟตจากน้ำเสีย โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต
- SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- SO₄²⁻ = sulfate คือ ปริมาณซัลเฟต
- S²⁻ = sulfide คือ ซัลเฟตที่แตกตัวเป็นซัลไฟด์ จากกระบวนการรีดิวซ์ซัลเฟต
- S_T = total Sulfide คือ ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย H₂S, HS- และ S²⁻
- UASB = upflow anaerobic sludge blanket reactor คือ ระบบชั้นตะกอนไร้อากาศแบบไหลขึ้น มีลักษณะเป็นถังสูง โดยอาศัยการไหลขึ้นของน้ำเสียภายในระบบผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณส่วนล่างของถัง
- VFA = volatile fatty acid, กรดไขมันระเหยง่าย คือ กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 6 ตัว สามารถละลายน้ำได้ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถกลั่นตัวได้ที่ความดันบรรยากาศ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ยางพาราถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีเนื้อที่กรีดยางได้ 11,371,417 ไร่ ให้ผลผลิต 3,166,843 ตัน และได้มีการพยากรณ์เนื้อที่กรีดยางได้ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2552 ประมาณ 11,581,65 ไร่ ให้ผลผลิตประมาณ 3,175,813 ตัน โดยคิดเป็นพื้นที่ในจังหวัดสงขลาประมาณ 1,186,738 ไร่ ให้ผลผลิตประมาณ 342,967 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2552) โดยในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีการส่งออกยางพาราสูงถึง 2,966,128 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 194,356.37 ล้านบาท และในปี พ.ศ. 2551 มีปริมาณการส่งออกยางพาราถึง 2,832,172 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 223,628.3 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2552) การส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทยนั้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง น้ำยางข้น ยางผสม และอื่นๆ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นเป็นอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันค่อนข้างสูงทั้งในและต่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีการผลิตน้ำยางข้น 663,926 ตัน และส่งออกสูงถึง 51,448.9 ตัน และในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีการผลิตน้ำยางข้น 587,147 ตัน และส่งออกสูงถึง 5,937.5 ตัน (สถาบันวิจัยยาง 2552)

อุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ถุงมือยาง ลูกโป่ง เครื่องมือทางการแพทย์ และพื้นรองพองน้ำ เป็นต้น ในกระบวนการผลิตน้ำยางข้น และยางสกิมที่มีการใช้กรดซัลฟูริก (sulfuric acid H_2SO_4) ในการจับตัวกับเศษเนื้อยาง ก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากทำให้คุณลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าพีเอช (pH) ต่ำ และมีปริมาณซัลเฟต (sulfate SO_4^{2-}) สูง สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในการจัดการน้ำเสียส่วนใหญ่นิยมใช้บ่อหมักไร้อากาศ แต่ยังคงก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นได้ ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญของประชาชนที่อาศัยอยู่โดยรอบ (กรมควบคุมมลพิษ 2548) กล่าวคือกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้นมักมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide H_2S) ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศโดยกลุ่มซัลเฟตรีดิวซ์ซิงแบคทีเรีย (sulfate reducing bacteria SRB) ทำหน้าที่รีดิวซ์ซัลเฟต ไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้ผู้ประกอบการ

ตัดสินใจที่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิมอากาศ เพื่อเป็นการลดปัญหาเรื่องกลิ่นไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องรับภาระต้นทุนที่สูงขึ้นจากการเดิมอากาศให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย โดยที่ระบบบำบัดแบบเดิมอากาศนั้นจะไม่มีกำจัดซัลเฟต แต่จะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ให้เป็นซัลเฟต (Lens *et al.*, 1998) นอกจากปัญหาเรื่องกลิ่นจากไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเสีย เมื่อเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จะแตกตัวเป็นซัลไฟด์ ซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะ MPB (methane production bacteria) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมสูง เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ของจุลินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว (Bitton ๒๐๑๕) ปริมาณ และความเป็นพิษของซัลไฟด์จะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ดังนั้นการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียที่แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 กำจัดซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเสียออกไป (sulfate reducing reactor (SRR) ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ และส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่รับน้ำเสียจากส่วนแรกเข้าสู่ระบบไร้อากาศเพื่อทำการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งการแยกการบำบัดเป็น 2 ส่วนนี้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการผลิตก๊าซชีวภาพอีกทางหนึ่ง (Lopes *et al.*, 2๐๑๖) จากเหตุผลข้างต้น ระบบไร้อากาศแบบปิดจึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกที่สามารถช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นและต้นทุนในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียได้ พร้อมทั้งยังให้ก๊าซชีวภาพ (biogas) เป็นผลพลอยได้อีกด้วย

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมน้ำยางขุ่นนั้นจะมีค่าพีเอชที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตของอุตสาหกรรมนั้น ๆ โดยที่น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตยางสกิมเครพ และน้ำยางขุ่น ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่ดำเนินควบคู่กันไปนั้น มีค่าพีเอชที่แตกต่างกันมาก หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย อาจส่งผลให้มีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียลดลงได้ เนื่องจากจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีที่พีเอชระหว่าง 6-9 (ดวงพร คันธโชติ ๒๕๔๕) โดยน้ำเสียนั้นจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.7-5.1 ในขณะที่น้ำล้าง และน้ำเสียสกิมมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.1-8.3 และ 3.2-4.9 ตามลำดับ (พัฒน์วรรณ วิทยากุล ๒๕๔๕) ดังนั้นการปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียจึงมีความสำคัญ มีการปฏิบัติ 2 ขั้นตอน คือ การปรับพีเอชก่อนเข้าสู่บ่อดักยาง และการปรับพีเอชของน้ำเสียหลังจากบ่อดักยาง หรือก่อนน้ำเสียนั้นจะเข้าสู่ระบบบำบัดแบบชีวภาพให้ค่าพีเอชสูงขึ้นจนสู่สภาพเป็นกลาง (วันชัย แก้วยอด ๒๕๔๖) เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถทำงานได้ดีขึ้น นอกจากนั้นการปรับพีเอชยังเป็นการป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นโดยให้เกิดการรีดักชันของซัลเฟตด้วยแบคทีเรียให้อยู่ในรูป HS^- ที่ไม่มีกลิ่น เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อบำบัดน้ำเสียซึ่งมีกลิ่นเหม็น แต่จากการศึกษาของ Lopes และคณะ (2๐๑๗)

พบว่าที่พีเอชต่ำ (4-6) ระบบยังคงสามารถรีดิวซ์ซัลเฟตได้ ในการปรับพีเอชของน้ำเสียมีวัสดุปรับพีเอชหลากหลายให้เลือกใช้ โดยส่วนใหญ่สารปรับพีเอชที่นิยมใช้ คือ ปูนขาว นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัสดุปรับพีเอชชนิดอื่นได้ เช่น โซดาไฟ (NaOH) โซดาแอช (Na₂CO₃) และเถ้าไม้ยางพารา (parawood ash) โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้ปูนขาวในการปรับพีเอชของน้ำเสีย ปริมาณการใช้ปูนขาวเฉลี่ยของแต่ละโรงงานนั้นอยู่ในช่วง 3-5 kg/day

ในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น น้ำเสียแต่ละส่วนจะถูกปล่อยออกมาไม่พร้อมกัน น้ำเสียจากกระบวนการผลิตทางสกิมจะถูกปล่อยเมื่อสิ้นสุดการผลิตในแต่ละวัน ทำให้มีเพียงน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นที่เข้าระบบบำบัดโดยไม่มีการผสมกับน้ำเสียจากการผลิตทางสกิม ส่วนกระบวนการเติมปูนขาวนั้นยังคงดำเนินไปตามปกติ ทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูงเกินความต้องการของระบบ ส่งผลให้ระบบทำงานได้ไม่เต็มที่ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสำหรับปูนขาว และระบบบำบัดน้ำเสียอาจตื่นเงินเร็วกว่าปกติอันเกิดจากการสะสมของปูนขาวที่ใช้ นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะและปริมาณของน้ำเสียที่แตกต่างกันร่วมกัน กล่าวคือน้ำเสียสกิมมีความเข้มข้นของซัลเฟตและ COD สูงกว่าน้ำเสียจากกระบวนการล้างเครื่องปั้นน้ำยางชั้น เมื่อนำน้ำเสียทั้ง 2 ส่วนผสมกันจะเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำเสีย ส่งผลให้ขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วยเพื่อเพียงพอต่อการรองรับปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด และยังเป็น การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียรวมให้มีความเข้มข้นของ COD และซัลเฟตสูงขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการแยกจัดการเฉพาะส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต COD และความเป็นกรดสูง จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถลดขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียลง

การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ COD และซัลเฟตในน้ำเสียสูงนั้น จึงเหมาะที่จะใช้ระบบไร้อากาศแบบปิด เนื่องจากในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพสูง โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบ upflow anaerobic sludge blanket (UASB) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง มีระยะกักพักทางชลศาสตร์สั้น และมีความสามารถในการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในระบบได้ โดยมีการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจึงเป็นการรักษาความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบ อีกระบบที่มีการพัฒนาอย่างมากในปัจจุบันคือ ระบบ anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) เป็นระบบที่มีการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นสูงเช่นกัน อีกทั้งยังใช้ได้กับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอย การก่อสร้างระบบไม่ซับซ้อน ระบบมีความยืดหยุ่นสามารถปรับการทำงานให้สอดคล้องกับน้ำเสีย เนื่องจากเป็นระบบที่มีการป้อนน้ำเสียแบบกะ (batch) ซึ่งแตกต่างกับระบบ UASB ที่มีการป้อนน้ำแบบต่อเนื่อง ดังนั้นหากโรงงานอุตสาหกรรมจะทำการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบ UASB และระบบ ASBR จึงเป็นอีกตัวเลือกที่น่าสนใจไม่น้อยเลยทีเดียว

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสังเกตเห็นว่าการศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำเสียน้ำเสียโดยการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียก่อนทำการบำบัดด้วยถ่านไม้อย่างพารา และทำการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยเลือกศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ UASB และ ASBR ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียน้ำเสีย เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในการปรับพีเอช ลดค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เพิ่มความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบไร้อากาศที่รับน้ำเสียผ่านการกำจัดซัลเฟตแล้ว และเป็นแนวทางในการจัดการน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูงได้ต่อไป

1.2 ตรวจสอบเอกสาร

1.2.1 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น และยางสติกมเครพ

จากการสำรวจความสามารถในการผลิตของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมยางในจังหวัดสงขลาของวันชัย แก้วยอด (254) พบว่าความสามารถในการผลิตมีความแตกต่างกัน ขึ้นกับขนาดกำลังการผลิตของเครื่องจักร ฤดูกาล และความสามารถในการแข่งขันเรื่องราคา อันเป็นสาเหตุให้ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตมีปริมาณที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 1-1 อย่งไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดน้ำเสียจากการผลิตน้ำยางข้น 1 ตัน จะมีค่าประมาณ $2.71-5.46 \text{ m}^3 / \text{ton}_{\text{product}}$ ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากการล้างทำความสะอาดเครื่องปั้น และพื้นที่มีการปั้นแยก บางส่วนมาจาก การทำความสะอาดบ่อพักน้ำยาง และภาชนะบรรจุน้ำยาง ซึ่งมีปริมาณไม่มากนัก ส่วนของการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก มีอัตราการเกิดน้ำเสียประมาณ $24.91-65.33 \text{ m}^3 / \text{ton}_{\text{product}}$ หรือคิดเป็นร้อยละ 24 ของน้ำเสียทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ 2548) เป็นน้ำเสียในบ่อจับตัวภายหลังจากการคัดแยกเนื้อยางออกไปแล้ว ซึ่งประกอบด้วยน้ำขี้ผึ้งจากน้ำยาง และกรดซัลฟูริกที่ผสมลงไปเพื่อจับเนื้อยาง น้ำเสียทั้ง 2 ส่วนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1-2 และ 1-3 เนื่องจากน้ำเสียจากการผลิตน้ำยางข้นมีอนุภาคของเนื้อยางปนอยู่มาก และมีการปนเปื้อนของแอมโมเนีย ($\text{ammonia } \text{NH}_3$) ที่ใช้รักษาสภาพน้ำยาง แต่น้ำเสียจากกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก เกิดจากการคัดแยกเนื้อยางโดยใช้กรด และมีความปนเปื้อนที่สูงกว่า

ปัญหาสำคัญที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้น (กรมควบคุมมลพิษ 2548) ที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ คือ เรื่องกลิ่นเหม็นจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อให้เกิดความรำคาญแก่ประชาชนโดยรอบ เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการใช้กรดซัลฟูริก ส่งผลให้น้ำเสียน้ำเสียมีปริมาณซัลเฟตสูง เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น

ตารางที่ 1-1 ปริมาณน้ำเสียจากการบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น

| กระบวนการผลิต | ผลผลิต (ton/day) | ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น (m ³ /day) | อัตราการเกิดน้ำเสียต่อผลผลิต (m ³ /ton _{product}) |
|---------------|---------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| น้ำยางข้น | 15.56-52.74 | 55.76-215.3 | 2.71-5.46 |
| ยางสกีเมทรพ | 7.8-3.56 | 26.63-26.18 | 24.91-65.33 |

ที่มา: คัดแปลงจาก วันชัย แก้วยอด (254)

ตารางที่ 1-2 สมบัติของน้ำเสีบรวมจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น

| Parameter | น้ำเสีบรวม | |
|--------------------------|-------------|-------------|
| | Range | Mean±SD |
| BOD ₅ (mg/L) | 245 - 82 | 4486 ± 1534 |
| COD (mg/L) | 476 - 12177 | 8217 ± 2152 |
| SS (mg/L) | 35 - 268 | 1226 ± 653 |
| Sulfate (mg/L) | 44 - 2262 | 1198 ± 616 |
| Total Sulfide (mg/L) | 8.1 | 2.55 ± 5.64 |
| Dissolved Sulfate (mg/L) | 3 | 49 ± 94 |
| Hydrogen Sulfide (mg/L) | 2.87 | 27 ± 78 |
| pH | 3.72 - 7.96 | 5.7 ± 1.26 |

ที่มา : คัดแปลงจาก พัฒนวรรณ วิทยกุล (2544)

ตารางที่ 1-3 สมบัติน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกีเม จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น

| Parameter | น้ำซีรัม | |
|------------------------------------|------------|-------|
| | Range | Mean |
| BOD ₅ (mg/L) | 11282-1852 | 15247 |
| COD (mg/L) | 28756-3815 | 3256 |
| SS (mg/L) | 3-52 | 44 |
| TKN (mg/L) | 49-5992 | 5371 |
| TP (mg/L) | 399-597 | 533 |
| VFA (mg/L as CH ₃ COOH) | 1.25-1518 | 1338 |
| Sulfate (mg/L) | 4924-691 | 5411 |
| pH | 3.2-4.9 | 4.5 |

ที่มา: คัดแปลงจาก พืชราภรณ์ จำแก้ว (2546) และวรพันธ์ ราชวัตร (2545)

1.2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ทำการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ (anaerobic bacteria) ที่ดำรงชีพไม่ต้องการออกซิเจนอิสระ ดังนั้นจึงไม่มีการเติมอากาศให้กับน้ำเสียในระบบบำบัด ปฏิบัติการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบใช้หรือไม่ใช้อากาศ ต่างมีกลไกพื้นฐานร่วมกันคือ เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) (กรมควบคุมมลพิษ 2546) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (e^-) ความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาที่ใช้อากาศ และไม่ใช้อากาศ อยู่ที่ประเภทของสารรับอิเล็กตรอน สำหรับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (anaerobic respiration) จะมีสารรับอิเล็กตรอน คือ ซัลเฟต ไนเตรต (NO_3^-) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หากใช้ชนิดอิเล็กตรอนเป็นเกณฑ์ในการแบ่งเป็นหลักสามารถแบ่งแบคทีเรียออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรีย denitrifier แบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) และแบคทีเรียรีดิวซิงซัลเฟต (SRB) หากแบ่งชนิดของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของจุลินทรีย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามสารรับอิเล็กตรอน คือ

1) การหมัก (Fermentation) คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่ไม่มีสารรับอิเล็กตรอนภายนอก

2) การหายใจ (Respiration) คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีสารภายนอกเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย

การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้น และเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ มีลักษณะเป็นขั้นตอน ด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์ 2543) โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1) กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

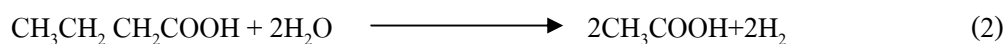
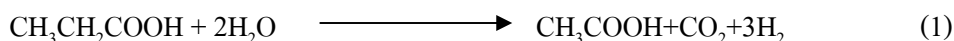
ในกระบวนการนี้สารโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าแบคทีเรียจะซึมเข้าเซลล์ได้ จะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นสารโมเลกุลที่เล็กลง เช่น น้ำตาล กลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมันสามารถซึมเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า hydrolyzing bacteria ที่ผลิตเอนไซม์ และปล่อยออกมาจากเซลล์ (สุบัตติต นิมรัตน์ 2548) กระบวนการนี้จะไม่มีการลดค่า COD (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2545) เพราะเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็กลงเท่านั้น (สันตติศรีอนันต์ไพบูลย์ 2549) กระบวนการที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นค่อนข้างช้า และเป็นขั้นตอนที่ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ตั้งต้น ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พีเอช พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์กับเอนไซม์ เป็นต้น (มันสิน ตันฑกุลเวศม์ 2546)

2) กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

ในกระบวนการนี้จะเกิดการย่อยสลายสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากกระบวนการแรก (น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน) ด้วยกระบวนการหมัก (fermentation) จะได้ผลผลิตคือ กรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid (VFA) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีคาร์บอนอะตอม (carbon atom) ไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวไทริก (butyric acid) เป็นต้น และอาจเกิดผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียสร้างกรดจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี แต่หากมีการสร้างกรดในระบบมากเกินไปจะมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เพราะจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของ MPB เนื่องจากปริมาณกรดที่สะสมในระบบที่มากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง

3) กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยง่าย (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยง่ายจากกระบวนการสร้างกรดจะถูกแบคทีเรียอะซิโตเจนิค (acetogenic) เปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน การย่อยสลายกรดบิวไทริก และกรดโพรพิโอนิก จะเกิดขึ้นดังสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญของการย่อยสลายในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากการลดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย และในการบวนการสร้างมีเทนนั้นจะใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนจำนวน 1-2 คาร์บอนเท่านั้น ถ้า VFA ที่สร้างขึ้นมีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม MPB จะไม่สามารถนำไปใช้ได้ และเกิดการสะสมในระบบ



4) กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

เป็นการเปลี่ยนกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ด้วย MPB ที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก และไม่สามารถใช้กรดอินทรีย์มากกว่า 2 อะตอมเป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทนได้ และยังมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก รวมถึงดำรงชีวิตได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (obligate anaerobic bacteria)

1.2.2.1 ข้อดีของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ 2543)

- 1) ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในปริมาณสูงเพื่อทำการเติมอากาศ แต่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งสามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อมทุกระบบ
- 2) การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ไร้อากาศจะมีการเจริญเติบโตช้ากว่าจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ ดังนั้นปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อย ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน
- 3) ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ สามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายได้บางส่วน
- 4) สามารถรับภาระบรรทุกที่สูงได้ถึง 5-1 เท่าของกระบวนการย่อยสลายแบบเติมอากาศ เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง

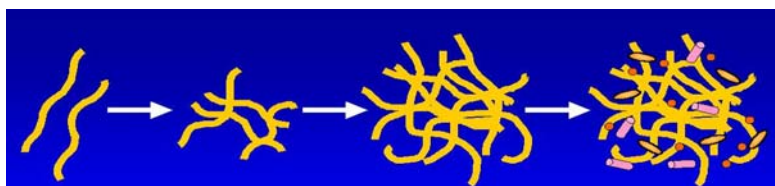
1.2.2.2 ข้อเสียของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ 2543)

- 1) ใช้เวลาในการย่อยสลาย และเริ่มต้นระบบ (start-up) นานกว่าการย่อยสลายแบบใช้อากาศ เนื่องจากการเจริญเติบโตช้ากว่า
- 2) ความสามารถในการปรับตัวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเสีย ค่า BOD อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ต่ำ
- 3) เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีกลิ่นเหม็นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหรือโลหะหนักทำให้น้ำทิ้งมีสีดำ และไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจส่งผลให้ระบบย่อยสลายล้มเหลวได้
- 4) มีแบคทีเรียที่สร้างมีเทนซึ่งมีความไวต่อสารพิษ ดังนั้นจึงทำให้การย่อยสลายแบบไร้อากาศจึงมีความไวต่อสารพิษมากกว่าการย่อยสลายแบบใช้อากาศ

1.2.3 ระบบชั้นตะกอนแอนแอโรบิกไหลขึ้น (upflow anaerobic sludge blanket, UASB)

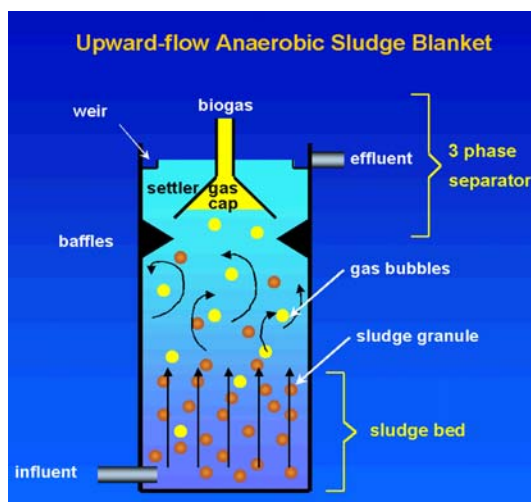
ระบบชั้นตะกอนแอนแอโรบิกไหลขึ้น หรือเรียกว่า ระบบ UASB เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ที่ไม่มีตัวกลางรองรับ อาศัยการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยตะกอนจุลินทรีย์แบบแขวนลอย ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของระบบ UASB (กรมควบคุมมลพิษ 2545) ตะกอนจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ด (ภาพประกอบ 1-1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 mm (สุब्ธชาติ นิรมรัตน์ 2548) หลักการพื้นฐาน คือ สร้างสภาวะทางฟิสิกส์ และเคมีให้เหมาะแก่การจับตัวเป็นเม็ดของจุลินทรีย์ (ธีระ เกรอต 2539) อาจมีการเพิ่ม CaCO_3 หรือ FeS ซึ่งเป็นสารช่วยสร้างตะกอน ระบบบำบัด

สามารถรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ดีแม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C การทำงานของระบบ (ภาพประกอบ 1-2) คือ น้ำเสียจะไหลเข้าจากทางด้านล่างของถังขึ้นสู่ด้านบน (upflow) อย่างช้าๆ สัมผัสชั้นตะกอนที่อยู่บริเวณด้านล่าง ทำให้เม็ดตะกอนแขวนลอยขึ้นภายในถัง เกิดการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกทางด้านบนด้วยอุปกรณ์แยกก๊าซ (gas-solid-separator (GSS) ความยุ่งยากของระบบ คือ ต้องใช้เวลาในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์



ภาพประกอบ 1-1 การจับตัวของจุลินทรีย์เป็นเม็ดตะกอน

ที่มา: <http://www.uasb.org/discover/granules.htm#granulation> (15/8/2559)



ภาพประกอบ 1-2 แบบจำลองแสดงการทำงานของระบบ UASB

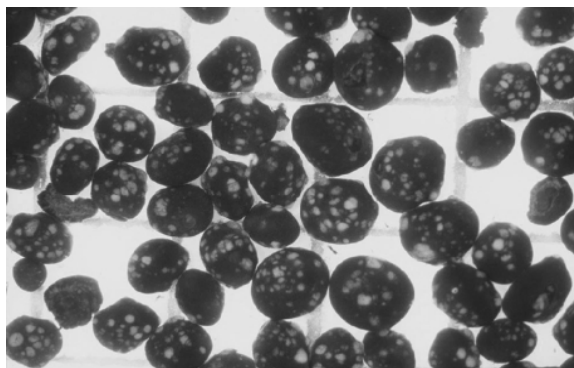
ที่มา: <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm#uasb> (15/8/2559)

เมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายแล้ว ระบบ UASB จะถูกปล่อยให้กวนผสมในถัง เกิดการตกตะกอนแยกตัวออกเป็นชั้น ดังนี้

- 1) ชั้นบนสุด หรือชั้นที่ทำหน้าที่เก็บสะสมก๊าซด้วยเครื่องแยกก๊าซ
- 2) ชั้นที่เป็นน้ำใสผ่านกระบวนการย่อยสลาย และออกจากระบบ
- 3) ชั้นของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ

3.1) ชั้นเม็ดตะกอนขนาดเล็ก หรืออาจเรียกว่าชั้นเม็ดตะกอนลอย เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดเล็กจึงทำให้ชั้นนี้มีตะกอนสะสมอยู่ด้านบน

3.2) ชั้นเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ หรือเรียกว่าชั้นตะกอนล่าง คือ ชั้นของเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ที่มีการสะสมอยู่ส่วนล่าง มีลักษณะเป็นเม็ดเกิดจากจุลินทรีย์เกาะติดแน่น ลักษณะของเม็ดตะกอนแสดงดังภาพประกอบ 1-3



ภาพประกอบ 1-3 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (ขนาด 0.5-2 mm)

ที่มา: <http://www.uasb.org/discover/granules.htm#granules> (15/8/2 009)

การบำบัดด้วยระบบ UASB นิยมใช้กับกระบวนการบำบัดอัตราสูงโดยมีจุลินทรีย์ที่ไวต่อการทำงาน และระบบยังคงสามารถรักษาตะกอนจุลินทรีย์ไว้ได้ที่ระยะกักพักทางชลศาสตร์เพียง 2 ชั่วโมง (Yan and Tay 1996) ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้สูงมาก เมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบอื่น อีกทั้งฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการไหลในถังปฏิกิริยาเป็นแบบปั่นป่วนช่วยในการผสม นอกจากนี้จากการศึกษาของ Nidal *et al.* (2004) ยังพบว่าตะกอนส่วนเกินจากถังย่อยแบบ UASB มีปริมาณน้อย ง่ายต่อการรีดน้ำออก และทำให้เสถียรอีกด้วย

Rintala and Lepistö (1998) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ โดยใช้ระบบ UASB ที่อุณหภูมิ 55 °C COD และซัลเฟต ของน้ำเสียเท่ากับ 8000-10000 mg/L และ 340-850 mg/L ตามลำดับโดย COD/SO₄²⁻ ratio เป็น 3.4-5.3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าเป็นร้อยละ 60-74 และซัลเฟตในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นเป็น 150-250 mg/L

Yamaguchi *et al.* (1999) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีซัลเฟตสูงด้วยระบบบำบัดแบบ UASB อุณหภูมิ 35 °C ที่ COD และซัลเฟตมีค่าเป็น 20000 mg/L 10000 mg/L ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ภาระบรรทุกซัลเฟต 1.3 kg_{sulfate}/m³/day มีค่าสูงถึงร้อยละ 90

1.2.4 ระบบเอเอสบีอาร์ (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR)

ระบบ ASBR มีลักษณะเดียวกับระบบ UASB หรือถังหมักไร้อากาศ แต่เป็นบ่อหมักขนาดเล็กที่มีการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้นสูงมาก (กรมควบคุมมลพิษ 2545) ไม่มีการกวนน้ำ และมีการเติมน้ำเสียเป็นแบบกะ (batch) การทำงานคือ เมื่อระบบรับน้ำเสียจะทำการกวนโดยใช้ก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลาย COD ในระบบ ทำให้เกิดการฟุ้งตัวของชั้นตะกอนคล้ายกับการใช้ใบพัดกวน ปริมาณก๊าซจะลดลง เมื่อ COD ในระบบลดลงทำให้เกิดการตกตะกอนของชั้นตะกอนในระบบ ซึ่งจะได้น้ำส่วนใสที่อยู่ส่วนบนของระบบสามารถปล่อยทิ้งออกได้ ในทางปฏิบัติอาจมีการใช้ถังบำบัดน้ำเสียมากกว่า 2 ถังขึ้นไป เพื่อเป็นการดำเนินการบำบัดอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ระบบ ASBR ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี และ COD สูงถึงร้อยละ 90 และ 85 ตามลำดับ (Ilgi and Oztekin 2006 และ Rodrigues. et al. 2011)

1.2.4.1 ข้อดีของระบบ ASBR

- 1) ปริมาณตะกอนที่ต้องนำไปกำจัดน้อย
- 2) ใช้ได้กับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอย
- 3) เป็นระบบที่ก่อสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน เนื่องจากเป็นถังใบเดียวมีการสูบน้ำเข้า-ออก การทำปฏิกิริยา การตกตะกอน และการกวนภายในถังใบเดียวกัน
- 4) ระบบมีความยืดหยุ่นในการบำบัด และสามารถที่จะปรับการทำงานให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบได้
- 5) มีระยะกักพักทางจุลชีววิทยาสั้น
- 6) สามารถสร้างสภาวะที่เอื้ออำนวยในการตกตะกอนชีวภาพในถังปฏิกิริยาได้ดี
- 7) มีมวลชีวภาพที่่องไวในการทำงาน

1.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

1.2.5.1 อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจาก MPB มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังนั้นต้องมีการระมัดระวังให้การเปลี่ยนแปลงมีความแปรผันไม่เกิน \pm ร้อยละ 5 (สุเมธ 2529 อ้างถึงใน สุบัณฑิต นิมรัตน์ 2548) การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการทำงานของ มี mesophilic bacteria ซึ่งอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40°C และช่วงการทำงานของ thermophilic bacteria ซึ่งอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45 – 55 °C (Rittmann and McCarty 2001) โดยปกติเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา และการทำงานของจุลินทรีย์ภายในเซลล์จะเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งมีอัตราการเจริญเติบโตเร็วขึ้น (Gray 1989) แต่ถ้า

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินกว่าที่เซลล์จะทำงานได้ ส่วนประกอบบางส่วนของเซลล์อาจจะถูกทำลาย อีกทั้งยังทำให้การทำงาน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลดลง

1.2.5.2 พีเอช เป็นปัจจัยที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าค่าพีเอชไม่เหมาะสมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยั้ง ทำให้การทำงานของระบบบำบัดล้มเหลวได้ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อ MPB ควรอยู่ในช่วง 6.7 – 7.4 (Bitton 2005) ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน จะอยู่ในช่วง 6.0-7.0 (Eike et al., 1996) ทั้งนี้การผลิตมีเทนจะถูกยับยั้งเกือบทั้งหมดที่พีเอช เท่ากับ 6.2 (ธีระ เกรอต 2539) ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศส่วนใหญ่มักประสบปัญหาในการควบคุมค่าพีเอช เนื่องจากแบคทีเรียในระบบนั้นมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตแตกต่างกัน แบคทีเรียผลิตกรดจะทำงานได้ในช่วงพีเอช 5.5-6.5 (Khanal 2008) ดังนั้นในการเดินระบบไร้อากาศที่มีการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิด อาจจะทำให้การควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8-7.4 กระบวนการปรับพีเอชของน้ำเสียที่มีความเป็นกรด หรือด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่วนใหญ่จะอาศัยวิธีการทำให้เป็นกลางทางเคมี (chemical neutralization) น้ำเสียดังนั้นมีสภาพเป็นกรด จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง ในการปรับพีเอชต่างที่นิยมใช้ในการปรับพีเอชของน้ำเสีย ได้แก่ ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซดาแอช (Na_2CO_3) และสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตัวแปรในการเลือกใช้สารปรับพีเอชนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ราคา อัตราการเกิดปฏิกิริยา วิธีการใช้งาน วิธีการเก็บรักษา ผลผลิตสุดท้าย และค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เถ้าไม้ยางพารา (parawood ash) เป็นวัสดุในการปรับพีเอชของน้ำเสียดังนี้ ซึ่งเถ้าไม้ยางพาราเป็นกากของเสียที่มีปริมาณมากในพื้นที่ เนื่องจากมีการใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อน เช่น การเผาไหม้สำหรับหม้อต้มไอน้ำ หรือการอบ/รมยาง เป็นต้น เถ้าไม้ยางพารานั้นจะมีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียดสีน้ำตาลคล้ายดิน มี CaO เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 59.52 (พนาลี ชิวกิตการ และคณะ 2548) ดังนั้นเถ้าไม้ยางพาราจึงน่าจะมีคุณสมบัติในการปรับพีเอชของน้ำเสียดังนี้ได้ และจากการศึกษาของ พนาลี ชิวกิตการ และคณะ (2548) ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตในน้ำเสียโรงงานน้ำตาลขุ่น โดยใช้เถ้าลอย เตาเผาขยะของจังหวัดภูเก็ต ปูนขาว และเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และซัลเฟตได้ดีที่สุด นอกจากนี้จากการศึกษาของกัญญารัตน์ สฤกษ์พงษ์ศิริธรม (2550) และ ยศวิรส เขตอนันต์ (2551) เมื่อเปรียบเทียบการใช้ ปูนขาว โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าไม้ยางพารา ปรับพีเอชของน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำตาลขุ่น แล้วทำการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศแบบ ABR และ UASB ตามลำดับพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตของระบบ เมื่อใช้สาร

ปรับพีเอชต่าง ๆ นั้นไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกเอาไม่ย่างพาราเป็นสารปรับพีเอช

1.2.5.3 ระยะกักพักชลศาสตร์ (hydraulic retention time, HRT) และระยะเวลา กักพักของแข็ง (solid retention time \square SRT) จะต้องเหมาะสม และเพียงพอที่จะทำการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ การลดระยะเวลากักน้ำจะทำให้ขนาดของระบบบำบัดลดลง แต่ถ้าต่ำเกินไปแบคทีเรียจะถูกชะออกจากระบบ อายุ Sludge ที่เหมาะสมในการทำงานควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1 \square วัน เนื่องจาก MPB มีอัตราการเจริญเติบโตช้า ดังนั้นอายุ sludge ที่มีค่ามากจึงมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูง

1.2.5.4 สภาพความเป็นด่าง (alkalinity) มีความสำคัญต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ สภาพด่างที่สำคัญ คือ สภาพด่างไบคาร์บอเนต (bicarbonate \square HCO₃) เพราะจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) แสดงถึงความสามารถในการต้านทานความเป็นกรดในระบบ เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้น สภาพความเป็นด่างมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญ คือ อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างไบคาร์บอเนต ถ้าหากมีอัตราส่วนน้อยกว่า \square 4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์ (Buffer) สูง ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า \square 8 พีเอชของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้น แม้จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ระบบไร้อากาศควรมีสภาพด่างอยู่ระหว่าง 1 \square 5-5 \square mg/L CaCO₃ (Metcalf and Eddy \square 2004)

1.2.5.5 ความเป็นพิษ

1) กรดระเหยง่าย โดยทั่วไประบบไร้อากาศควรมีปริมาณ 5 \square 5 \square mg/L as CH₃COOH. หากมีการสะสมจะทำให้พีเอชลดลง กรดโพพิโอนิกที่ความเข้มข้น 1 \square g/m³ ที่พีเอชเป็นกลางจะแสดงความเป็นพิษต่อระบบ และจะรุนแรงยิ่งขึ้นเมื่อพีเอชลดลง (ธีระ เกรอต 2539)

2) แอมโมเนีย เกิดจากการสลายตัวของโปรตีนจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (ammonium ion \square NH₄⁺) หรือแอมโมเนียอิสระ (ammonia \square NH₃) ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับพีเอชของระบบ ดังสมการ (3)



ถ้าระบบมีพีเอช เท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่าแอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีความเป็นพิษน้อย ถ้าความเข้มข้นของแอมโมเนียเกิน 15 \square g/L จะเกิดความเป็นพิษรุนแรง ขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมต้องมากกว่า 3 \square g/L

3) ไอออนบวกของโลหะเบา เนื่องจากการรักษาระดับพีเอชของระบบต้องมีการเติมเบส ส่งผลให้ปริมาณไอออนบวกของโลหะเบาที่เกี่ยวข้องกับเบส ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีสิียมสูงขึ้น และสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษได้

4) โลหะหนัก MPB ต้องการธาตุจำเป็น 4 ชนิด คือ เหล็ก โคบอล นิกเกิล และซัลเฟอร์ในปริมาณต่ำมาก ขณะเดียวกันปริมาณโลหะหนักที่สูงเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ สังกะสี แมงกานีส แคลเซียม โคบอล นิกเกิล โครเมียม และทองแดง ซึ่งอยู่ในรูปไอออน โดยลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือ ทองแดง เหล็ก แคลเซียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ถ้ามีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้

5) ศักยภาพการให้ และรับอิเล็กตรอน (oxidation – reduction potential) เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เรียกอีกอย่างว่า โออาร์พี (ORP) ถ้าเป็นบวกมาก แสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี เช่น มีออกซิเจนละลาย แต่ถ้าค่า ORP เป็นลบ แสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ในระบบไร้อากาศที่ดี ต้องมีค่า ORP ในช่วง -300 ถึง -500 mV

6) ธาตุอาหาร (nutrient) ระบบไร้อากาศต้องการธาตุในสัดส่วนที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้ อากาศ โดยมีอัตราส่วน $BOD_5/N/P$ ที่ต้องการมีค่าประมาณ $100/1.1/2$ หากพบว่าอัตราส่วนของธาตุอาหารในระบบมีค่าต่ำกว่าอัตราดังกล่าว ต้องทำการเติมให้ครบ สารเคมีที่นิยมใช้ คือ ยูเรีย เพื่อเพิ่มไนโตรเจน และกรดฟอสฟอริกในการเพิ่มฟอสฟอรัส (สมทิพย์ ด่านธีรวิชย์ และคณะ 2541)

7) ซัลไฟด์เกิดจากการรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบ หรือจากการสลายตัวของโปรตีน ซัลไฟด์ในปริมาณเล็กน้อยจะเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อ MPB (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2545) ถ้าความเข้มข้นของซัลไฟด์มากกว่า 200 g/m³ MPB จะถูกยับยั้งอย่างรุนแรง (ธีระ เกรอด 2539) ซัลไฟด์สามารถแยกออกในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความเข้มข้นของซัลไฟด์จะขึ้นกับพีเอช และส่วนประกอบของก๊าซ

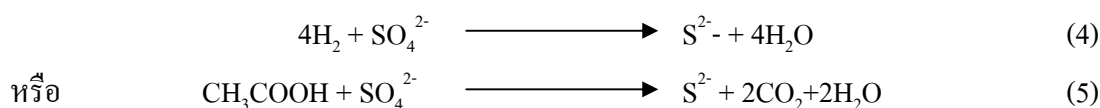
Omil *et al.* (1996) ศึกษาผลของปริมาณซัลไฟด์ต่อการย่อยกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ UASB เปรียบเทียบการทำงานของ MPB และ SRB โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีค่า COD/SO₄²⁻ ratio เป็น 5 โดย COD มีค่า $500-2600$ mg/L และซัลเฟตมีค่า $100-500$ mg/L ที่อัตราเร็วไหลขึ้น เท่ากับ 2 m/hr และค่าพีเอช เท่ากับ 8 พบว่า COD จะถูกกำจัดโดย SRB มีประสิทธิภาพการกำจัด อยู่ในช่วงร้อยละ 93-97 โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วไหลขึ้น ที่ความเร็วไหลขึ้น 6 m/hr ที่พีเอช เท่ากับ 8 COD ที่ถูกกำจัดโดย MPB จะมีประสิทธิภาพการกำจัดเหลือร้อยละ 23 เมื่อซัลเฟตมีค่ามากกว่า 200 mg/L ที่พีเอชเท่ากับ 7 ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของ MPB

O'Flaherty *et al.* (1998) ศึกษาผลของพีเอช และความเป็นพิษของซัลไฟด์ที่มีต่อการเติบโตของ MPB และ SRB พบว่าที่พีเอชระหว่าง 7.0-7.5 อัตราการเจริญเติบโตของ MPB และ

SRB มีค่าเท่ากับ ที่พีเอชระหว่าง 7.2-8.5 โดย SRB ที่ใช้กรดโพรฟิโอนิกมีความอ่อนไหวสูงสุด ที่ความเข้มข้นของซัลไฟด์สูง และที่พีเอชระหว่าง 6.8-7.2 ระดับของซัลไฟด์ที่ยับยั้งการเจริญเติบโต ได้ร้อยละ 5 ของ MPB และ SRB มีค่าเท่ากัน

1.2.6 ซัลเฟตรีดักชัน (sulfate reduction)

ในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่มีซัลเฟต (ซัลไฟด์ (sulfide S^{2-}) ไธโอซัลเฟต (thiosulfate $S_2O_3^{2-}$) หรือสารประกอบซัลเฟอร์ ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมี 2 อย่าง คือ ปฏิกิริยาที่สร้างมีเทน (methanogenesis) และปฏิกิริยารีดักชันซัลเฟต ที่ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด โดยอาศัย sulfate reducing bacteria (SRB) ที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้ กลายเป็นซัลไฟด์ได้ (มันลิน และมันรักษ์ ดัชนีอุตสาหกรรม 2545) ดังสมการ (4) และ (5)

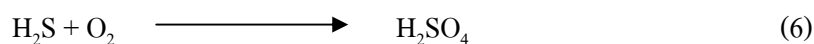


ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่แต่ใน SRB เท่านั้น ซึ่ง SRB นั้นสามารถใช้สาอาหารได้หลายชนิด โดยจะใช้ซัลเฟตที่มีอยู่ในระบบให้หมดก่อนจึงจะหันไปใช้กระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งจะต่างกับ MPB ที่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 1 อะตอมได้ แต่ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์กลุ่มเมทิลได้ (กรมควบคุมมลพิษ 2546)

ถึงแม้ว่าแม้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมุ่งที่ผลิตมีเทน หากน้ำเสียนั้นมีซัลเฟตหรือซัลไฟด์ (SO_3^{2-}) SRB อาจแบ่งเป็น 3 พวก คือ SRB ที่กำจัดไฮโดรเจน SRB ที่กำจัดอะซิเตท และ SRB ที่กำจัดกรดอินทรีย์ระเหยโมเลกุลใหญ่ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันซัลเฟต และสร้างซัลไฟด์ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลง เนื่องจากในน้ำทิ้งจะมีซัลไฟด์อยู่ ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 g สามารถวัดเป็น COD ได้ 2 g
- 2) ซัลไฟด์ บางส่วนกลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้ามีการนำก๊าซชีวภาพไปใช้จะต้องทำการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออก หากนำก๊าซชีวภาพไปเผาจะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide SO_2)
- 3) การเกิดซัลเฟตรีดักชันต้องใช้สารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก มีผลให้แหล่งคาร์บอนสำหรับสร้างมีเทนลดลง ผลผลิตก๊าซมีเทนจะลดน้อยลงด้วย

4) การเกิดซัลไฟด์ในน้ำทิ้ง และก๊าซชีวภาพ สร้างปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น และปัญหาการกัดกร่อนดังสมการ (6)

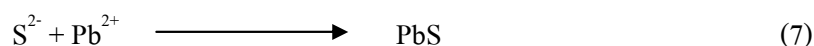


5) ซัลไฟด์เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้ามีความเข้มข้นซัลไฟด์สูง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดต่ำลง

นอกจากปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ปฏิกริยารีดักชันซัลเฟตยังคงมีข้อดี ดังนี้

1) ใช้กำจัดซัลเฟต แต่ควรระวัง และให้ความสำคัญกับการกำจัดซัลไฟด์ เพื่อไม่ให้น้ำทิ้งมีซัลไฟด์มากเกินไป

2) ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น สามารถกำจัดโลหะหนักโดยอาศัยปฏิกิริยาตกตะกอน (precipitation) ดังตัวอย่างสมการ (7)



1.2.7 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการทำงานของ SRB

1.2.7.1 อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิผลต่อ SRB ก่อนข้างมาก โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม จะส่งผลให้การเกิดรีดักชันซัลเฟตในตะกอนดินน้ำกึ่งลดลงถึง 2-3.9 เท่า โดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ SRB บริสุทธิ์ อยู่ในช่วง 28-32 °C (Mara and Horan [2][3])

1.2.7.2 ความต้องการเกลือ และความทนต่อเกลือของ SRB นั้น ขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำที่มาของแบคทีเรีย ซึ่งแยกได้เป็นพวกที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย กับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด SRB ที่ได้จากแหล่งน้ำเค็ม หรือน้ำกร่อยมักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่งจึงเจริญเติบโตได้ดี ชนิด และปริมาณเกลือที่เหมาะสม คือ โซเดียมคลอไรด์ 2 g/L และ แมกนีเซียมคลอไรด์ 1.5 g/L บางสายพันธุ์อาจต้องการแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นต่ำ 5 g/L การนำแบคทีเรียกลุ่มนี้มาเลี้ยงที่สภาพความเค็มต่ำ อาจส่งผลทางลบต่อการเจริญเติบโตได้ ส่วนแบคทีเรียที่มาจากน้ำจืดนั้น อาจมีการยับยั้งการเจริญเติบโต ถ้ามีโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับที่มีอยู่ในทะเล (27 g/L) แต่อาจมี SRB บางสายพันธุ์ที่มีความสามารถในการปรับตัว สามารถทนอยู่ได้ในตัวกลางที่มีระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเท่ากับระดับความเข้มข้นในน้ำทะเล และบางพวกสามารถอยู่ได้ทั้งที่ระดับโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 6 g/L หรือไม่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่เลย

1.2.7.3 พีเอชที่เหมาะสมต่อ SRB อยู่ในช่วงเป็นกลาง คือ ประมาณ 7 และมักจะถูกยับยั้งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 แต่ยังคงพบว่าปฏิกิริยารีดักชันซัลเฟตสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำประมาณ 3-4 เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันซัลเฟต โดย SRB เป็นปฏิกิริยาที่ใช้โปรตอน หรือไฮโดรเจนไอออน การใช้สารอาหารของ SRB จึงสร้างสภาพด่างให้ระบบ ทำให้ SRB สามารถดำรงชีวิตได้แม้พีเอชโดยรวมของระบบจะมีค่าต่ำ

Lopes *et al.* (2007) ศึกษาสภาวะการสร้างกรด และรีดิวซ์ซัลเฟต ภายใต้สภาวะพีเอชต่ำ (6.5 และ 4) COD/SO₄²⁻ ratio เท่ากับ 3.5 และ 9 ที่อุณหภูมิ 55 °C โดยใช้ระบบ UASB พบว่าที่พีเอชทุกระดับ และทุก COD/SO₄²⁻ ratio ระบบมีปฏิกิริยาการสร้างกรด และการกำจัดซัลเฟตที่ใกล้เคียงร้อยละ 100 ที่พีเอชเท่ากับ 6 และ COD/SO₄²⁻ ratio เท่ากับ 9 ซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เมื่อพีเอชเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพการรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 ทั้งสอง COD/SO₄²⁻ ratio ที่พีเอช เท่ากับ 4 COD/SO₄²⁻ ratio เท่ากับ 3.5 และ 9 มีประสิทธิภาพการรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 30-40 และ 55-65 ตามลำดับ

Moosa *et al.* (2002) ศึกษาผลของความเข้มข้นของซัลเฟตต่ออัตราการรีดิวซ์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นซัลเฟตเริ่มต้นที่ 1000-10000 mg/L พบว่าอัตราการกำจัดซัลเฟตมีค่าเป็น 0.168-4.8 kg/m³/day และความเข้มข้นของซัลเฟตเริ่มต้น ไม่มีผลต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ หรือค่าคงที่ของการย่อยสลาย

1.2.7.4 COD/ SO₄²⁻ ratio (COD to Sulfate Ratio)

COD/SO₄²⁻ ratio เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการแข่งขันระหว่าง MPB และ SRB ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดย COD/SO₄²⁻ ratio สูงหากความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียมีอยู่ในปริมาณน้อยจะเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของ SRB ส่งผลให้ SRB ที่ใช้ไฮโดรเจนแย่งใช้ซัลเฟต ทำให้ SRB ที่ออกซิไดซ์กรดอินทรีย์โดยตรงไม่อาจแข่งขันกับจุลินทรีย์ที่สร้างอะซิเตทได้ การย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงเกิดผ่านการทำงานร่วมกันระหว่างจุลินทรีย์สร้างกรด จุลินทรีย์สร้างอะซิเตท และ MPB ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดย COD/SO₄²⁻ ratio ที่เกิดมีเทน และกำจัดซัลเฟตร่วมกัน คือ 0.67 (Lens *et al.*, 1998) หาก COD/SO₄²⁻ ratio สูงกว่า 1 จะส่งผลต่อ MPB ได้ (O'Flaherty *et al.*, 1998 และ Percheron *et al.*, 1997)

หาก COD/SO₄²⁻ ratio ต่ำ โดยที่น้ำเสียนี้อาจมีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง SRB แต่ละกลุ่มจึงไม่ต้องแย่งชิงซัลเฟต อย่างไรก็ตาม SRB กลุ่มย่อยสลายไม่สมบูรณ์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์จึงอาจเกิดจาก SRB กลุ่มย่อยสลายไม่สมบูรณ์ และ SRB กลุ่มใช้อะซิเตทจะได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลไฟด์

Lopes *et al.* (2007) ศึกษาผลของ COD/SO₄²⁻ ratio และความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อประสิทธิภาพของระบบ UASB ที่ 55 °C ที่เอชเท่ากับ 6 โดยใช้ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน กำหนดให้ระบบมี OLR เท่ากับ 4.5 g_{COD}/L/day ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตที่ COD/SO₄²⁻ ratio เท่ากับ 4 และ 1 มีค่าเป็นร้อยละ 65 และ 25-35 ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ทุก COD/SO₄²⁻ ratio นอกจากนั้นยังพบว่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลไฟด์ในระบบ

Velasco *et al.* (2007) ศึกษาความสัมพันธ์ของความสามารถในการสร้างไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลไฟด์ โดย SRB กับการเกิดปฏิกิริยากับโลหะเพื่อใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซึ่งการควบคุมการผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยแบคทีเรียที่ขึ้นอยู่กับการยับยั้งด้วยกัน เช่น OLR ภาระบรรทุกซัลเฟต และ COD/SO₄²⁻ ratio ที่เข้าระบบ

โดยที่การทดลองของ Antonio *et al.* (2007) นั้นจะดูความสัมพันธ์ของ COD/SO₄²⁻ ratio ที่เข้าระบบกับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น และตะกั่วที่เกิดการตกผลึกที่ใช้เอธานอลเป็นแหล่งคาร์บอนในระบบ UASB ผลจากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นซัลไฟด์สูงสุดที่ระบบสร้างได้ คือ 47 ± 1 mg/L as S ที่ COD/SO₄²⁻ ratio เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 2.5 โดยมีการลดลงของซัลเฟต และเอธานอลร้อยละ 94 และ 87 ตามลำดับ และความเข้มข้นของซัลไฟด์ต่ำสุดที่ระบบผลิตได้ คือ 145 ± 1 mg/L as S ที่ COD/SO₄²⁻ ratio มีค่าเท่ากับ 0.67

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่า SRB นั้นยังคงสามารถทำงานได้เมื่อระบบมี COD/SO₄²⁻ ratio ต่ำ และจะทำงานได้ดีขึ้นเมื่ออัตราส่วนนี้สูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า การยับยั้งการทำงานของ SRB นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยจากความเข้มข้นของซัลไฟด์ในระบบมากกว่าปัจจัยจาก COD/SO₄²⁻ ratio

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาหาผลของพีเอชต่อกระบวนการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการจับตัวหาน้ำอย่างด้วยกรดซัลฟูริก (น้ำเสียสกิน) ของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้นด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง

1.3.2 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสกิน โดยใช้ระบบ UASB และระบบ ASBR

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของพีเอช และปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำยางข้นในส่วนของกระบวนการจับหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก โดยใช้ระบบบำบัดไร้อากาศแบบ UASB และระบบ ASBR ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด การผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียถัดไปที่รับน้ำเสียระบบนี้

1.4.2 ข้อมูลที่ได้นำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน และปรับใช้ในการออกแบบการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกิม หรือน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงให้เหมาะสมต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 น้ำเสียที่ใช้ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้น้ำมาจาก โรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้น ในจังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บรวบรวมน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกิม ในการทดลองที่ 1 ศึกษาหาผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟต ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วย ถ้ำไม้ยางพารา บำบัดโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2 นำค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาทำการเดินระบบเปรียบเทียบระหว่างระบบ UASB และ ASBR ทำการเดินระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 ภายใต้สภาวะเดียวกัน

1.5.2 วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบแล้ว โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังนี้ พีเอช VFA สภาพด่าง (alkalinity) COD และซัลเฟต ตามวิธีใน APHA AWWA and WEF (1998)

บทที่ 2 วิธีการวิจัย

2.1 วิธีการวิจัย

2.1.1 การศึกษาลักษณะน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น ในส่วนของกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก (น้ำเสียสกิม) มีรายละเอียดดังนี้

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริก (น้ำเสียสกิม) ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียพื้นฐาน คือ พีเอช (pH), กรดไขมันระเหยง่าย (VFA), สภาพด่าง (alkalinity), COD และซัลเฟต (sulfate: SO_4^{2-}) โดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบจ้วง (grab Sampling) จากถังเก็บรวบรวม น้ำเสียของโรงงาน (storage tank) ดังภาพประกอบที่ 2-1 จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีการใน standard methods for the examination of water and wastewater 20th edition ของ APHA, AWWA and WEF (1998) และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2535) ซึ่งทำการวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 พารามิเตอร์ และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย

| Parameter | Method |
|------------------------|--------------------------|
| pH | pH meter |
| Chemical oxygen demand | Close reflux method |
| Alkalinity | Direct titration method* |
| Volatile fatty acid | Direct titration method* |
| Sulfate | Turbidimetric method |

ที่มา: APHA, AWWA and WEF, 1998

* สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย และ World Environmental Center, 2535



ภาพประกอบ 2-1 ถังเก็บรวบรวมน้ำเสีย (storage tank) และจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

2.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

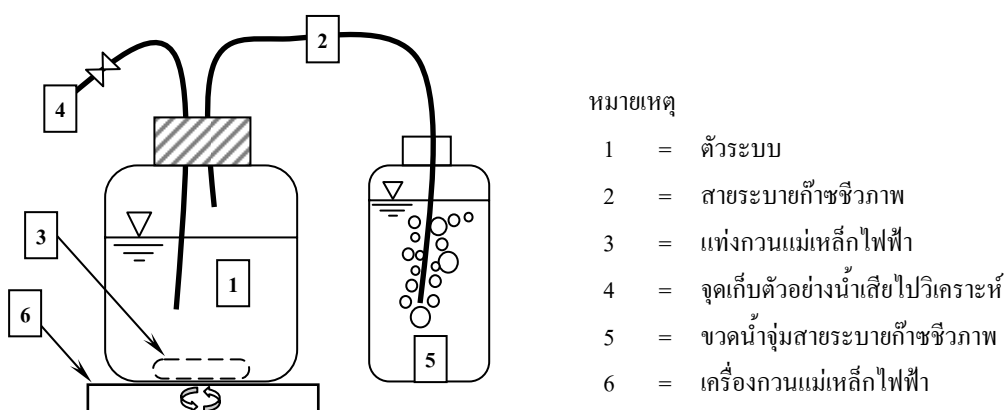
1) ทำการเตรียมแถ้ไม้ยางพารา (parawood ash) เพื่อใช้ในการปรับพีเอชของตัวอย่างน้ำเสีย โดยเก็บตัวอย่างแถ้ไม้ยางพาราจากเตาอบรมควันข้างแผ่นดินของสหกรณ์ยางแผ่นรมควันแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดสงขลา นำมาร่อนด้วยตะแกรงละเอียดขนาด $500\ \mu\text{m}$ อบไล่ความชื้นที่ $103-105\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสำหรับใช้ในการทดลอง โดยนำตัวอย่างน้ำเสียมาปรับพีเอชด้วยแถ้ไม้ยางพารา และทำการตีควนพร้อมวัดค่าพีเอชจนกระทั่งได้ค่าพีเอชที่ต้องการ คือ 4, 5, 6, 7, และ ไม่ปรับพีเอช (2.43) ตามลำดับ จากนั้นทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน และแยกน้ำเสียส่วนใสเพื่อใช้สำหรับการทดลอง

2.1.3 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของพีเอชน้ำเสียก่อนเข้าระบบต่อกระบวนการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสกิน

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษา โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียสกินก่อนเข้าระบบ เป็น 4, 5, 6 และ 7 โดยมีน้ำเสียสกินที่ไม่ปรับพีเอชเป็นชุดควบคุม ทำการทดลองโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ ดังนี้

2.1.3.1 ตัวระบบ (reactor) ใช้ขวดแก้วปริมาตรรวม 2.5 L ปริมาตรการใช้งานจริงในการหมัก (working volume) 2.0 L ส่วนบนของขวดเป็นฝาเกลียวปิดสนิท ฝาเจาะรูต่อด้วยสายยางสองเส้น เส้นหนึ่งสำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียเข้า-ออกจากระบบ สายยางอีกเส้นหนึ่งสำหรับระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบออกภายนอก โดยปลายสายยางจุ่มอยู่ใต้ผิวน้ำของขวดน้ำอีกใบหนึ่ง เพื่อรักษาสภาวะไร้อากาศภายในระบบ แสดงดังภาพประกอบ 2-2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ ดังนี้



ภาพประกอบ 2-2 ระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง (ชุดการทดลองขั้นต้น)

1) เส้นท่อทรงกลม ใช้สายส่งลมออกซิเจน สำหรับหรับปลาตู้ เป็นท่ออ่อน (PVC) ไส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 mm สำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำเสีย เก็บตัวอย่าง และระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบ

2) แท่งกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic bar) ขนาด 8×70 mm

3) เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic stirrer) ผลิตภัณฑ์ Framo รุ่น M 21/1 สำหรับการกวนผสม ให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (completely mix)

4) ขวดน้ำ สำหรับจุ่มสายยางระบายก๊าซชีวภาพจากขวดหมัก เพื่อรักษาภาวะไร้อากาศของขวดหมัก ขวดน้ำใช้ขวดแก้วใส ขนาดปริมาตร 1 L บรรจุน้ำจนถึงคอขวด ไม่ปิดฝาขวด

2.1.3.2 การเริ่มเดิน และการทำงานของระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง

เริ่มจากการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการหมัก โดยทำการเก็บตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา ทำการวัดค่าความเข้มข้นของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ ในรูป MLSS หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำที่ปรับพีเอชที่ระดับค่าต่าง ๆ แล้ว และตะกอนจุลินทรีย์ (seed) ซึ่งมีค่า MLSS เท่ากับ 11,950 mg/L มาบรรจุลงในระบบ ใช้อัตราส่วนการผสมที่ ตัวอย่างน้ำเสีย 1,600 mL ต่อตะกอนจุลินทรีย์ที่ทราบความเข้มข้นแล้ว 400 mL ไล่อากาศภายในระบบออกด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) และปิดฝาให้สนิท เพื่อรักษาภาวะไร้อากาศของระบบ ทำการถ่ายน้ำทิ้งออกจากระบบเป็นปริมาตร 1.0 L ทุก 5 วัน และทำการเติมน้ำเสียใหม่ที่ปรับพีเอชแล้ว เป็นปริมาตร 1.0 L ทุก 5 วัน (HR \square มีค่าเป็น 10 วัน) จนกระทั่งระบบมีการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพไม่มากกว่าร้อยละ 10 (Mahmoud, *et al.*, 2004) จะถือว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (stable condition) ทำการตรวจวิเคราะห์พีเอช, COD, ซัลเฟต, VFA และ สภาพต่าง โดยใช้วิธีการใน standard methods for the examination of water and wastewater 20th edition ของ APHA, AWWA and WEF (1998) และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2535) ซึ่งทำการวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-1

2.1.4 การทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต โดยใช้ระบบ UASB (Upflow anaerobic sludge bed) และ ASBR (Anaerobic sequencing batch reactor)

หลังจากที่ทำการทดลองข้อ 2.1.3 เสร็จแล้วนั้น ก็จะได้ค่าพีเอชที่ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตที่เหมาะสมในช่วงพีเอชระหว่าง 2.43-7 เพื่อนำมาเดินระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR ต่อไป โดยรูปแบบหลักของการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR มีการเดินระบบพร้อมกัน และศึกษาภายใต้สภาวะเดียวกัน

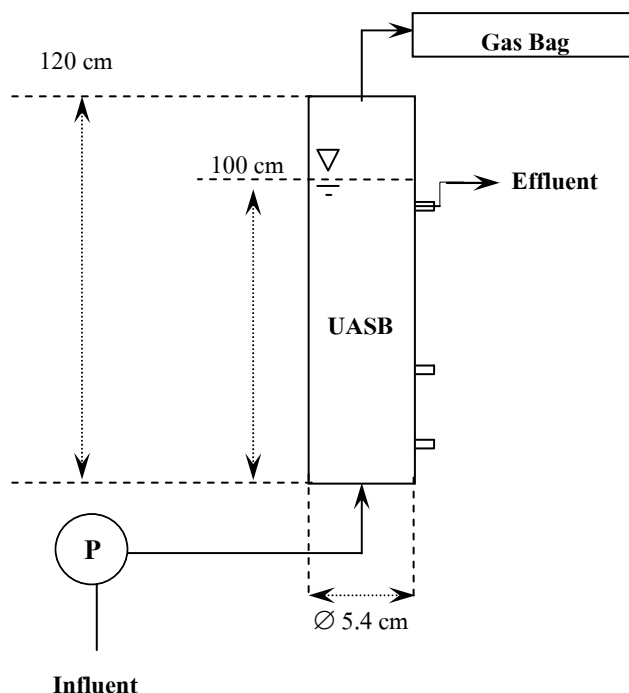
2.1.4.1 ระบบบำบัดน้ำเสีย UASB จำลองในห้องปฏิบัติการ การเริ่มเดินระบบ และการทำงานของระบบ UASB

1) การสร้างระบบ UASB มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1.1) อังปฏิกรณ์ UASB (UASB reactor) ดำเนินการสร้าง 1 ระบบ ตัวระบบทำจากท่ออะคริลิกทรงกลมใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.0 cm หนา 0.3 cm สูง 120 cm มีขนาด

ใช้งานจริง (working volume) 2.3 L ส่วนบนของระบบมีอุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซที่เกิดขึ้น จาก ระบบ แสดงดังภาพประกอบ 2-3

1.2) ปั๊มคูดของเหลว (peristaltic pump) สามารถปรับความเร่งสำหรับปรับ ความเร็วของน้ำเสียได้ตามความต้องการ จำนวน 1 ตัว สำหรับปั้มน้ำเสียเข้าสู่ระบบ UASB



ภาพประกอบ 2-3 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย UASB ในห้องปฏิบัติการ

หมายเหตุ: (P) คือ peristaltic pump

1.3) นาฬิกาตั้งเปิด-ปิดเวลา (timer) สำหรับควบคุมเวลาในการปั้มน้ำเสียเข้าสู่ ระบบ UASB

1.4) ขวดป้อนน้ำเสีย (feed tank) ใช้ขวดพลาสติกปริมาตร 600 mL จำนวน 1 ขวด สำหรับใช้เป็นที่เก็บน้ำเสียก่อนเพื่อปั้มน้ำเสียสู่ระบบ UASB

1.5) ขวดรองรับน้ำทิ้ง (effluent) ใช้ขวดพลาสติก ปริมาตร 600 mL จำนวน 1 ขวด ใช้รองรับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบ UASB

1.6) ถุงเก็บก๊าซ ขนาด 1 L จำนวน 2 ใบ สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากระบบ เพื่อหาปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ ระบบ UASB ผลิตขึ้น

2) การเริ่มเดินระบบ และการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย UASB

2.1) การเริ่มต้นเดินระบบ UASB โดยทำการเติมตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้นในพื้นที่จังหวัดสงขลาลงในระบบทั้ง 2 โดยกำหนดให้ค่า MLSS ในแต่ละระบบมีค่าประมาณ 22,000 mg/L (ยศวริศ เขตอนันต์, 2551, กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ศิริชม, 2550 และ Hur. *et. al.*, 1999) จากนั้นทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้ได้ตามปริมาตรใช้งานทั้งหมด (2.3 L) ชั่งน้ำเสียทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการปรับตัวจนมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่จะทำการป้อนเข้าระบบเพื่อป้องกันการเกิด Shock Load ทำการเดินระบบที่ ระยะกักพักทางชลศาสตร์ (HR) เท่ากับ 7 วัน (ยศวริศ เขตอนันต์, 2551 และ ศันสนีย์ วงศ์ชนะ, 2553) ทำการเดินระบบที่อุณหภูมิห้องตลอดการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว นั่นคือระบบมีการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพไม่มากกว่าร้อยละ 10

2.2) การทำงานของระบบ UASB การป้อนน้ำเสียเข้าระบบ UASB จะถูกควบคุมด้วยปั๊มคูดของเหลว (peristaltic pump) น้ำเสียจะถูกปั๊มเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของระบบ ไหลผ่านชั้นตะกอนภายในระบบ และไหลออกทางด้านบนของระบบที่ความสูง 100 cm

2.1.4.2 ระบบบำบัดน้ำเสีย ASBR จำลองในห้องปฏิบัติการ การเริ่มเดินระบบ และการทำงานของระบบ UASB

1) การสร้างระบบ ASBR มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1.1) ถังปฏิกรณ์ ASBR (ASBR reactor) ดำเนินการสร้างจำนวน 1 ระบบ ปริมาตรใช้งานจริง (working volume) 2.3 L ด้วยท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.0 cm หนา 0.3 cm สูง 120 cm ส่วนบนของถังมีอุปกรณ์เก็บก๊าซที่เกิดจากระบบ ดังภาพประกอบ 2-4

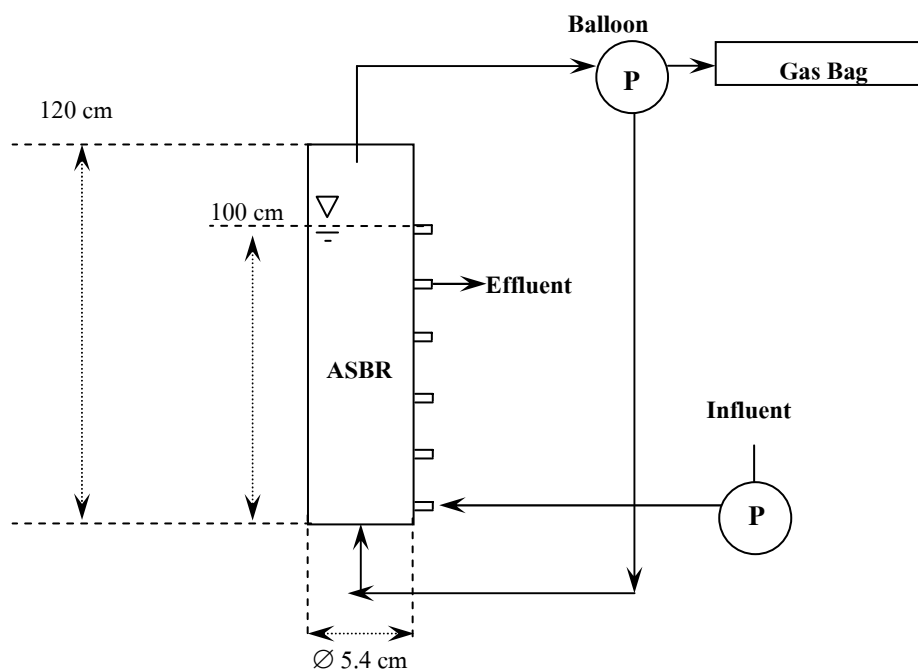
1.2) ปั๊มคูดของเหลว (peristaltic pump) สามารถปรับความแรงสำหรับปรับความเร็วของน้ำเสียได้ตามความต้องการ จำนวน 2 ตัว สำหรับปั๊มน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ASBR และใช้สำหรับวนก๊าซ (gas recirculation) เพื่อใช้ในการกวนผสมน้ำเสียในระบบ ASBR ให้ผสมกันอย่างทั่วถึง

1.3) นาฬิกาตั้งเปิด-ปิดเวลา (timer) สำหรับควบคุมเวลาในการปั๊มน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ASBR

1.4) ขวดป้อนน้ำเสีย (feed tank) ใช้ขวดพลาสติกปริมาตร 300 mL จำนวน 1 ขวด สำหรับใช้ใส่น้ำเสียเพื่อปั๊มน้ำเสียสู่ระบบ ASBR

1.5) ขวดรองรับน้ำทิ้ง (effluent) ขวดพลาสติกปริมาตร 300 mL จำนวน 1 ขวด สำหรับใช้รองรับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบ ASBR

1.6) ฝูงเก็บก๊าซ ขนาด 1 L จำนวน 1 ใบ สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ระบบ ASBR ผลิตขึ้น



ภาพประกอบ 2-4 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย ASBR ในห้องปฏิบัติการ

หมายเหตุ: คือ peristaltic pump

1.7) บอลลูนขยายหด (balloon) ใช้สำหรับรวบรวมและพักก๊าซ เพื่อใช้สำหรับกวนผสมในระบบ ASBR

1.8) เส้นท่อ เป็นท่อซิลิโคน (silicone) ใส ทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.9 cm และ 0.3 cm ใช้สำหรับเป็นทางน้ำเสียเข้า-ออกจากระบบ ส่งก๊าซชีวภาพไปยังฝูงเก็บก๊าซ และหมุนเวียนก๊าซกลับมากวนผสมน้ำเสียในระบบ ASBR

2) การเริ่มเดินระบบ และการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย ASBR

2.1) การเริ่มต้นเดินระบบ ASBR โดยทำการเติมตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชันในพื้นที่จังหวัดสงขลาลงในระบบทั้ง 2 โดยกำหนดให้ค่า MLSS ในแต่ละระบบมีค่าประมาณ 22,000 mg/L (ยศวริศ เขตอนันต์, 2551, กัญญารัตน์ สฤษฎ์พงษ์ศิริชม, 2550 และ Hur. *et al.*, 1999) จากนั้นทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้ได้ตามปริมาณใช้งานทั้งหมด (2.3 L) ชั่งน้ำเสียทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการ

ปรับตัวจนมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่จะทำการป้อนเข้าระบบเพื่อป้องกันการเกิด Shock Load ทำการเดินระบบที่ระยะกักพักทางชลศาสตร์ (HR₀) เท่ากับ 7 วัน (ยศวริศ เขตอนันต์, 2551 และ ศันสนีย์ วงศ์ชนะ, 2553) ทำการเดินระบบที่อุณหภูมิห้องตลอดการทดลอง จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (stable condition)

2.2) การทำงานของระบบ ASBR มีรอบการทำงาน เท่ากับ 12 ชั่วโมง รายละเอียดการทำงานแต่ละรอบมีดังนี้ คือ เริ่มจากการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของระบบภายใน 15 นาทีแรก หลังจากนั้นจะทำการกวนผสมน้ำเสีย และจุลินทรีย์ด้วยการกวนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาด้วยการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ เป็นเวลาทั้งหมด 660 นาที โดยทำการกวน 1 นาที ทุกๆ 30 นาที ทำการพักน้ำเสียในระบบเพื่อให้เกิดการตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และทำการปล่อยน้ำเสียออกจากระบบทางด้านบนภายใน 15 นาทีสุดท้ายตามลำดับ

2.1.4.3 ความถี่การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้ง 2 แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ความถี่ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR

| Parameter | Frequency of Monitoring |
|------------------------|-------------------------|
| pH | สัปดาห์ละ 1 ครั้ง |
| Chemical Oxygen Demand | สัปดาห์ละ 1 ครั้ง |
| Alkalinity | สัปดาห์ละ 1 ครั้ง |
| Volatile Fatty Acid | สัปดาห์ละ 1 ครั้ง |
| Sulfate | สัปดาห์ละ 1 ครั้ง |
| Biogas Composition | สิ้นสุดการทดลอง |

2.1.4.4 การศึกษาก๊าซชีวภาพ

1) วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน โดยใช้ถุงเก็บก๊าซเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซจากระบบบำบัดน้ำเสีย UASB (ภาพประกอบที่ 2-2) และระบบบำบัดน้ำเสีย ASBR (ภาพประกอบ 2-3) วัดปริมาณก๊าซด้วยหลักการแทนที่น้ำ จะทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นประจำทุกวัน

2) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ด้วยการใส่ถุงเก็บก๊าซเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ UASB และ ASBR เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ H_2S ด้วยวิธี Cadmium Sulfide Method (Jacobs, 1960) ส่วนก๊าซ Methane (CH_4) จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) ใช้ Detector ชนิด Thermal Conductivity Detector (TCD) ผลิตภัณฑ์ของ Hewlett Packard รุ่น HP 6890

3) การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศแบบ UASB และ ASBR ในรูปแบบของร้อยละ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบบำบัดน้ำเสีย UASB และ ASBR

2.2 วัสดุ

2.2.1 สารปรับพีเอช คือ เถ้าไม้ยางพารา ซึ่งนำมาจากเตาอบยางแผ่นรมควันจากสหกรณ์อบยางแผ่นรมควันแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดสงขลา

2.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการเดินระบบ คือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น ในส่วนของกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟิวริก ที่ทำการปรับค่าพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพารา ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 60 นาที และนำส่วนใสมาใช้ในการเดินระบบในการทดลอง

2.2.3 ตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา

2.2.4 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ (ตารางที่ 2-1) ตามวิธีใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 1998)

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย

2.3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำ ได้แก่

- 1) ขวด โพลีเอทิลีนขนาด 1 L
- 2) แกลลอนพลาสติกขนาด 25 และ 30 L

2.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ ได้แก่

- 1) ตะแกรงร่อน (Sieve) ละเอียด ขนาด 500 μm
- 2) UV-VIS Spectrophotometer ผลิตภัณฑ์ Shimadzu รุ่น UV 1601
- 3) Refrigerated Super speed Centrifuge ผลิตภัณฑ์ Sorvall รุ่น Super 21
- 4) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Mettler Toledo รุ่น PB 1502
- 5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Mettler Toledo รุ่น AB 204
- 6) เครื่องพีเอช (pH Meter) ผลิตภัณฑ์ WTW รุ่น 526
- 7) ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ผลิตภัณฑ์ Contherm รุ่น 240M
- 8) เตาเผา (Furnace) ผลิตภัณฑ์ Thermolyne รุ่น 6000
- 9) เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer) และเตาไฟฟ้า (Hot Plate) ผลิตภัณฑ์ Framo รุ่น M 21/1
- 10) เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump) ผลิตภัณฑ์ GAS รุ่น 0296
- 11) โถดูดความชื้น (Desiccators) ผลิตภัณฑ์ Sanplatee
- 12) เตาหย่อยตัวอย่างสำหรับซีโอดี แบบปิด (Heating Blocks)
- 13) Gas Chromatography ผลิตภัณฑ์ Hewlett Packard รุ่น HP 6890

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นในเขตจังหวัดสงขลา เฉพาะส่วนของกระบวนการผลิตยางสกิม โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (grab sampling) จากถังเก็บรวบรวมน้ำเสีย (ภาพประกอบ 2-1) ซึ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยางสกิมโดยไม่มีการผสมกับน้ำเสียจากกระบวนการอื่น ๆ ของโรงงาน การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสียพบว่าน้ำเสียสกิมมีความเป็นกรดสูงโดยมีค่าพีเอชเฉลี่ย 2.43 ± 0.50 และมีปริมาณซัลเฟต (sulfate, SO_4^{2-}) สูงมีค่าเฉลี่ย $6,506 \pm 1,038$ mg/L เนื่องจากกระบวนการผลิตยางสกิมนั้นมีการใช้กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) ในการจับตัวเนื้อยางที่อยู่ในหางน้ำยาง โดยลักษณะน้ำเสียสกิมก่อนและหลังการปรับพีเอชแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ลักษณะน้ำเสียสกิมจากโรงงานอุตสาหกรรมและเมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็นระดับต่าง ๆ ด้วยถ้ำไม้ยางพารา

| Sample | pH | COD (mg/L) | Sulfate (mg/L) | VFA (mg/L as CH_3COOH) | Alkalinity (mg/L as CaCO_3) | $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ |
|--------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|
| A | 2.43 ± 0.50 | $14,911 \pm 1,819$ | $6,506 \pm 1,038$ | $2,018 \pm 387$ | - | 2.11 ± 0.10 |
| B | 4.00 ± 0.05 | $14,524 \pm 1,828$ | $7,058 \pm 1,377$ | $2,066 \pm 459$ | - | 2.97 ± 0.35 |
| C | 5.01 ± 0.06 | $14,728 \pm 1,785$ | $7,079 \pm 1,177$ | $2,058,483$ | 771 ± 83 | 3.00 ± 0.50 |
| D | 6.00 ± 0.06 | $14,560 \pm 1,777$ | $6,803 \pm 1,002$ | $1,947 \pm 511$ | $1,434 \pm 179$ | 2.76 ± 0.16 |
| E | 6.98 ± 0.05 | $14,498 \pm 1,714$ | $6,899 \pm 900$ | $1,789 \pm 448$ | $2,035 \pm 312$ | 2.75 ± 0.24 |

หมายเหตุ :
 A คือ ตัวอย่างน้ำเสียสกิมจากโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ผ่านการปรับพีเอช
 B คือ ตัวอย่างน้ำเสียสกิมที่ผ่านการปรับพีเอชเป็น 4 ด้วยถ้ำไม้ยางพารา
 C คือ ตัวอย่างน้ำเสียสกิมที่ผ่านการปรับพีเอชเป็น 5 ด้วยถ้ำไม้ยางพารา
 D คือ ตัวอย่างน้ำเสียสกิมที่ผ่านการปรับพีเอชเป็น 6 ด้วยถ้ำไม้ยางพารา
 E คือ ตัวอย่างน้ำเสียสกิมที่ผ่านการปรับพีเอชเป็น 7 ด้วยถ้ำไม้ยางพารา
 - คือ ไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากน้ำเสียนี้ออกฤทธิ์น้อยกว่า 4

เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียสภิมด้วยเถ้าไม้ยางพารา (parawood ash) เป็นระดับ 4, 5, 6, 7 และ 2.43 (ไม่ปรับพีเอช, unadjusted pH) พบว่าหลังจากปรับพีเอชความเข้มข้นของซัลเฟตและ COD นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังตารางที่ 3-1 ถึงแม้ว่าเถ้าไม้ยางพาราจะมีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับซัลเฟตและ COD ได้ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 5.32 และ 4.82 ตามลำดับ แต่ในขณะที่เดียวกันเถ้าไม้ยางพาราก็สามารถปลดปล่อยซัลเฟตได้ด้วย (วีรชาติ อินทร์ทอง, 2551) อีกทั้งการปรับพีเอชของน้ำเสียสภิมด้วยเถ้าไม้ยางพารายังเป็นการเพิ่มสภาพต่างของน้ำเสียให้สูงขึ้น เนื่องจากเถ้าไม้ยางพารามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 59.52 (พนาลี ชีวักดาการและคณะ, 2548) โดยน้ำเสียที่ทำการปรับพีเอชเป็นระดับต่าง ๆ นั้นจะนำไปใช้ในการทดลองที่ 1

นอกจากนี้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง เมื่อทำการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ในระบบ เช่น จุลินทรีย์ผลิตกรด (acid producing bacteria), จุลินทรีย์ผลิตมีเทน (methane producing bacteria, MPB) และจุลินทรีย์รีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria, SRB) ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ในระบบ คือ COD/SO₄²⁻ ratio โดยค่า COD/SO₄²⁻ ratio ต่ำสุดที่สามารถเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้คือ 0.67 (Lens *et al.*, 1998) ซึ่งน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับพีเอชก่อนทำการป้อนเข้าระบบมี COD/SO₄²⁻ ratio เท่ากับ 2.11±0.10 เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 4 พบว่าค่า COD/SO₄²⁻ ratio เพิ่มขึ้นเป็น 2.97±0.35 และเมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 5, 6 และ 7 พบว่า มี COD/SO₄²⁻ ratio อยู่ในช่วง 2.71-2.88 (ตารางที่ 3-1) โดย COD/SO₄²⁻ ratio ของน้ำเสียที่ปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จะเห็นได้ว่าการปรับพีเอชของน้ำเสียสภิมก่อนทำการบำบัดด้วยเถ้าไม้ยางพารานั้นไม่มีผลทำให้ ความเข้มข้นของ COD, ซัลเฟต และ COD/SO₄²⁻ ratio ของน้ำเสียสภิมเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งก่อนและหลังการปรับพีเอชมี COD/SO₄²⁻ ratio > 0.67 ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน

3.2 การทดลองที่ 1 ผลของพีเอชต่อกระบวนการกำจัดซัลเฟต (SO₄²⁻) ในน้ำเสียสภิมในระบบไร้อากาศ

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราเป็น 5 ระดับ คือ 2.43 (ไม่ปรับพีเอช) 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศในการกำจัดซัลเฟต (sulfate removal) โดยการป้อนน้ำเสียแบบกะกึ่งต่อเนื่อง (semi-batch continuous) ได้ผลการทดลอง ดังนี้

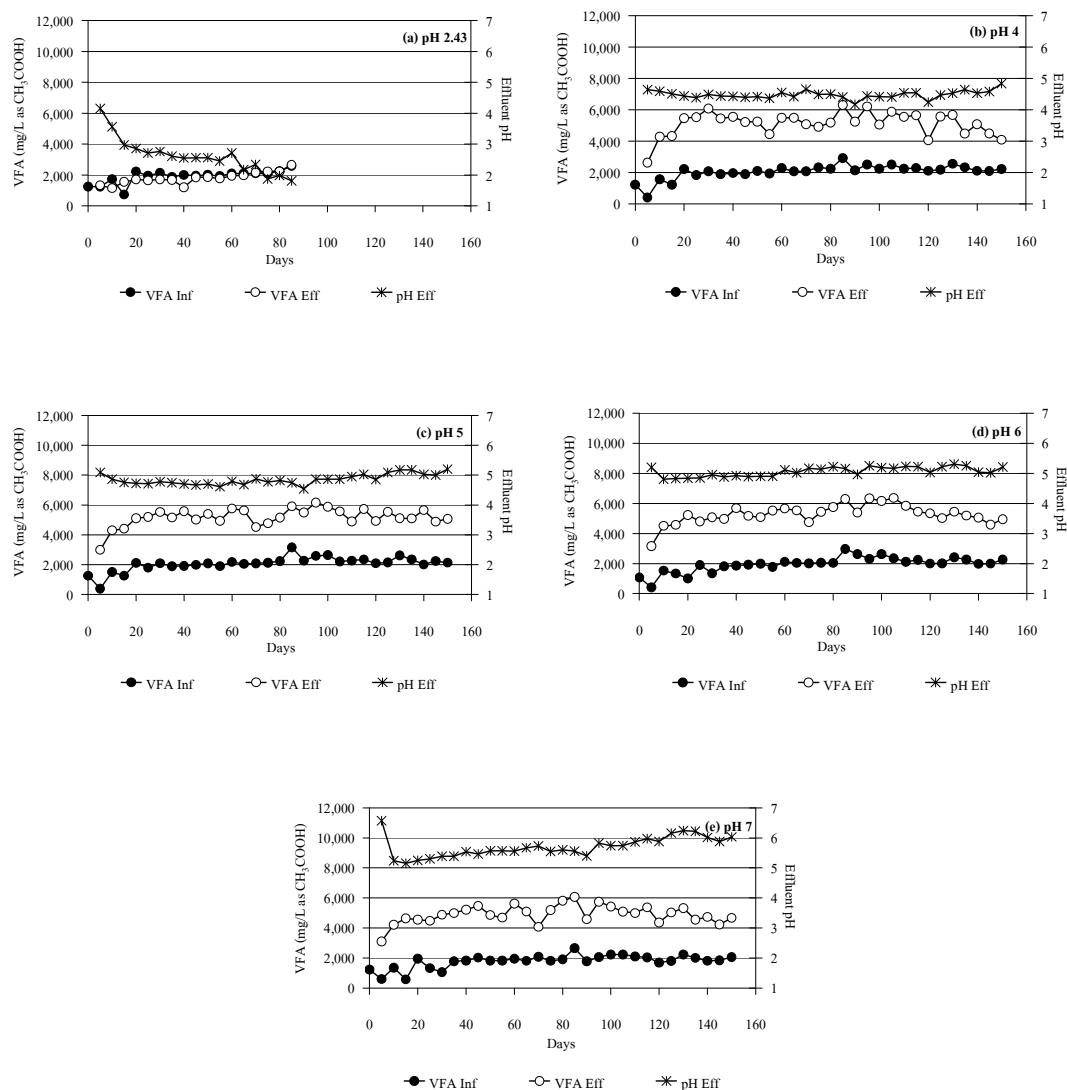
3.2.1 VFA (Volatile Fatty Acid), สภาพด่าง (Alkalinity) และพีเอช (pH)

ผลการศึกษาเมื่อป้อนน้ำเสียไม่มีการปรับพีเอชเข้าระบบพบว่า เมื่อเดินระบบได้เพียง 20 วัน พีเอชของน้ำทิ้งมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว (ภาพประกอบ 3-1 (a)) และมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งวันที่ 85 ระบบมีพีเอชอยู่ที่ 1.81 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ VFA ในระบบที่รับน้ำเสียไม่ผ่านการปรับพีเอชนั้นมีค่าเท่ากับ $2,318 \pm 225$ mg/L as CH_3COOH ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณ VFA ในน้ำเสียป้อนเข้าระบบ $2,256 \pm 226$ mg/L as CH_3COOH อีกทั้งประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตลดลงเหลือเพียงร้อยละ 2.6 และ 0.3 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 3-4 (a)) ทั้งนี้เป็นผลมาจากพีเอชของน้ำเสียสกิมเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 2.43 ± 0.50 (ตารางที่ 3-1) และพีเอชในระบบมีค่าต่ำ (2.00 ± 0.24) ด้วยเหตุนี้เองจึงส่งผลให้เกิดสถานะไม่เหมาะสมแก่การทำงานของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ จนกระทั่งจุลินทรีย์ผลิตกรดเองก็ยังไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงหยุดการป้อนน้ำเสียสกิมที่ไม่ผ่านการปรับพีเอช

สำหรับระบบที่รับน้ำเสียปรับพีเอชระดับอื่น ๆ (4, 5, 6, และ 7) ผลการศึกษาพบว่า พีเอชของน้ำทิ้งจากระบบที่รับน้ำเสียปรับพีเอชเป็น 4, 5 และ 6 มีลักษณะคงที่ เนื่องจากในช่วงต้นของการเดินระบบจุลินทรีย์ที่ทำงานอยู่ในระบบจะทำการปรับตัวให้สามารถทำงานได้ในสภาวะที่ป้อนน้ำเสียนั้น ๆ เมื่อจุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในระบบได้แล้วจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวระบบที่รับน้ำเสียสกิมปรับพีเอช 4, 5 และ 6 มีพีเอชเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 4.65 ± 0.14 , 5.10 ± 0.10 และ 5.13 ± 0.12 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 3-3) แต่สำหรับพีเอชของระบบที่รับน้ำเสียพีเอช 7 เท่ากับ 6.57 ในวันที่ 5 และลดลงเหลือ 5.24 ในวันที่ 10 หลังจากนั้นพีเอชของระบบก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบมีพีเอชเท่ากับ 6.03 ในวันที่ 150 ของการเดินระบบ (ภาพประกอบ 3-1 (e))

เมื่อทำการเดินระบบจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชของน้ำเสียป้อนเข้าระบบเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 ปริมาณ VFA ในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น (เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่รับน้ำเสียสกิมโดยไม่ผ่านการปรับพีเอชดังภาพประกอบ 3-2) โดยค่า VFA ที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดขึ้นจากแบคทีเรียผลิตกรดในระบบยังสามารถย่อยสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ให้เป็น VFA ได้แสดงถึงการทำงานได้ดีขึ้นของจุลินทรีย์ชนิดผลิตกรด ในขณะที่ MPB ยังไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เห็นได้จากการที่ระบบเกิดการสะสมของ VFA ที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ถูกใช้ในการสร้างมีเทนและการบอนด์ออกไซด์ด้วย MPB จากการที่พีเอชในระบบไม่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของ MPB เมื่อปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 6 และ 7 พบว่าปริมาณ VFA ในน้ำทิ้งลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการเข้าไปของ VFA โดย MPB เนื่องจากพีเอชของระบบที่รับน้ำเสียปรับพีเอชเป็น 7 เฉลี่ย

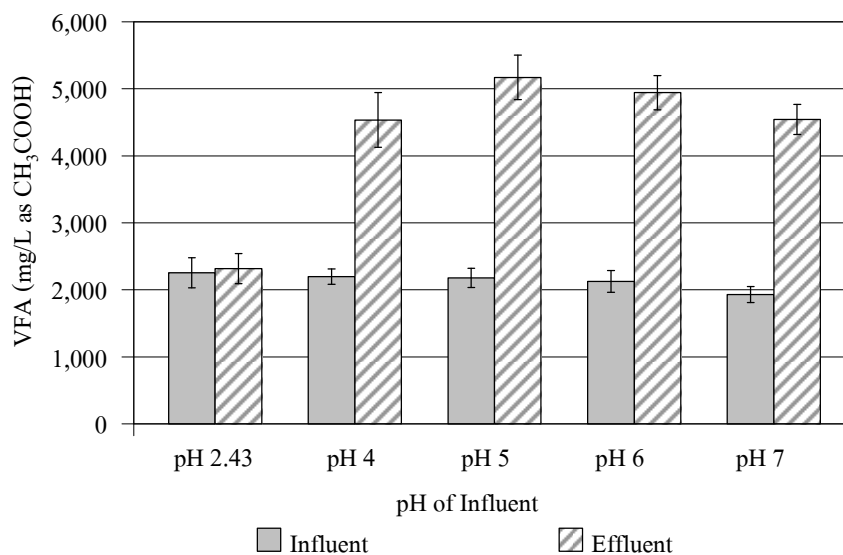
เท่ากับ 6.04 ± 0.14 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการทำงานของ MPB มากกว่าระบบที่รับน้ำเสียปรับพีเอชระดับต่ำกว่า



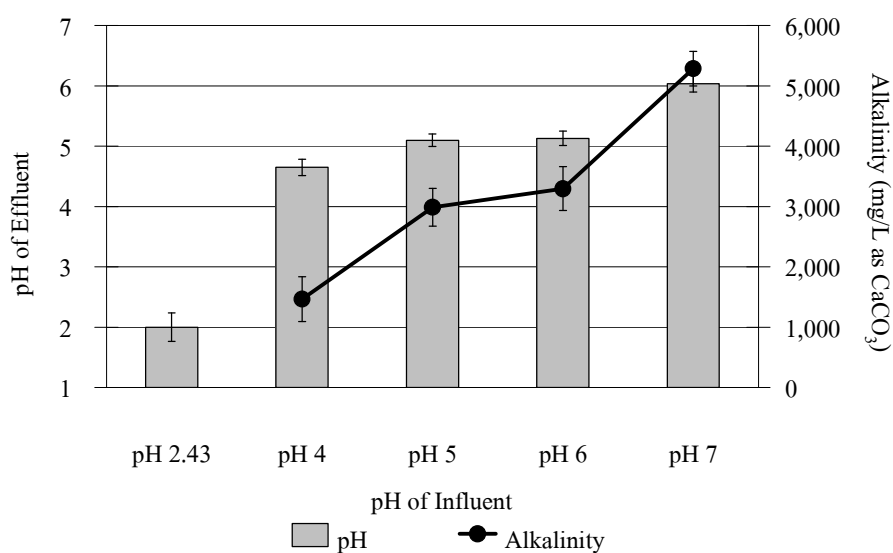
ภาพประกอบ 3-1 สภาพความเป็นกรดในระบบบกกิ่งต่อเนื่อง ที่รับน้ำเสียที่ระดับพีเอชต่าง ๆ โดย (a) พีเอช 2.43, (b) พีเอช 4, (c) พีเอช 5, (d) พีเอช 6 และ (e) พีเอช 7

เมื่อเปรียบเทียบพีเอชและสภาพต่างของน้ำทิ้ง พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามพีเอชของน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าระบบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับพีเอชน้ำเสียก่อนเข้าระบบด้วยเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 59.5 (พนาดี ชิวกิตาดาร และคณะ, 2548) เป็นการเพิ่มสภาพด่าง (alkalinity) ให้กับระบบ เมื่อระบบมีสภาพด่างทำให้ระบบมีความสามารถต้านทานต่อการลดลงของพีเอชอันเป็นผลมาจากการสะสมของ VFA ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของ

จุลินทรีย์ผลิตกรด (ภาพประกอบ 3-3) แต่ระบบที่รับน้ำเสียสกินไม่ผ่านการปรับพีเอชนั้น ไม่สามารถวัดสภาพความเป็นด่างได้เนื่องจากน้ำทิ้งมีพีเอชน้อยกว่า 4

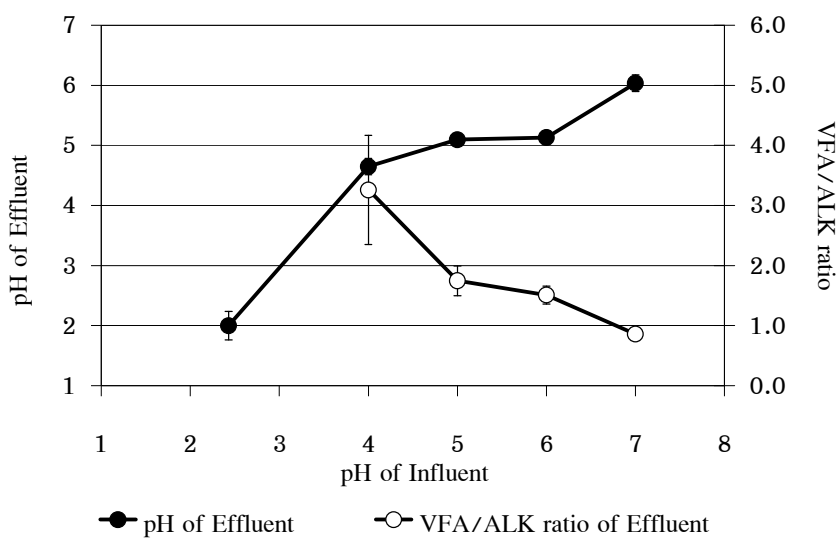


ภาพประกอบ 3-2 ปริมาณ VFA ในน้ำเสียที่ปรับพีเอชระดับต่าง ๆ และน้ำทิ้งจากระบบไร้อากาศ แบบกะกึ่งต่อเนื่อง ณ สภาวะคงตัว



ภาพประกอบ 3-3 พีเอช และสภาพด่างในน้ำทิ้งจากระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกิน ปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการควบคุมการเดินระบบคือ VFA/ALK ratio ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการต้านทานการลดลงของพีเอชในระบบอันเกิดจากการสะสมของ VFA ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบ (buffer capacity) โดย Khanal (2008) กล่าวว่าระบบจะมีความสามารถในการต้านทานการลดลงของพีเอชได้ดีเมื่อ VFA/ALK ratio มีค่าระหว่าง 0.1-0.25 แต่ขณะที่ทำการเดินระบบ VFA/ALK ratio อาจจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.4 ซึ่งถือว่าระบบยังคงมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หาก VFA/ALK ratio มากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำมาก นั่นหมายถึงถ้ามีการเพิ่มขึ้นของ VFA ภายในระบบเพียงเล็กน้อย ระบบจะมีความเสี่ยงต่อการลดลงของพีเอชอย่างรวดเร็ว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ในการทดลองครั้งนี้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่า ระบบไร้อากาศกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกินปรับพีเอชเป็น 4, 5, 6 และ 7 นั้นมี VFA/ALK ratio ลดลงตามลำดับแสดงดังภาพประกอบ 3-4 โดยมีค่าเท่ากับ 3.26 ± 0.91 , 1.75 ± 0.25 , 1.51 ± 0.15 และ 0.86 ± 0.04 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า VFA/ALK ratio ของระบบมีค่ามากกว่า 0.8 ถึงแม้ว่าจะทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเป็น 7 แล้วก็ตาม



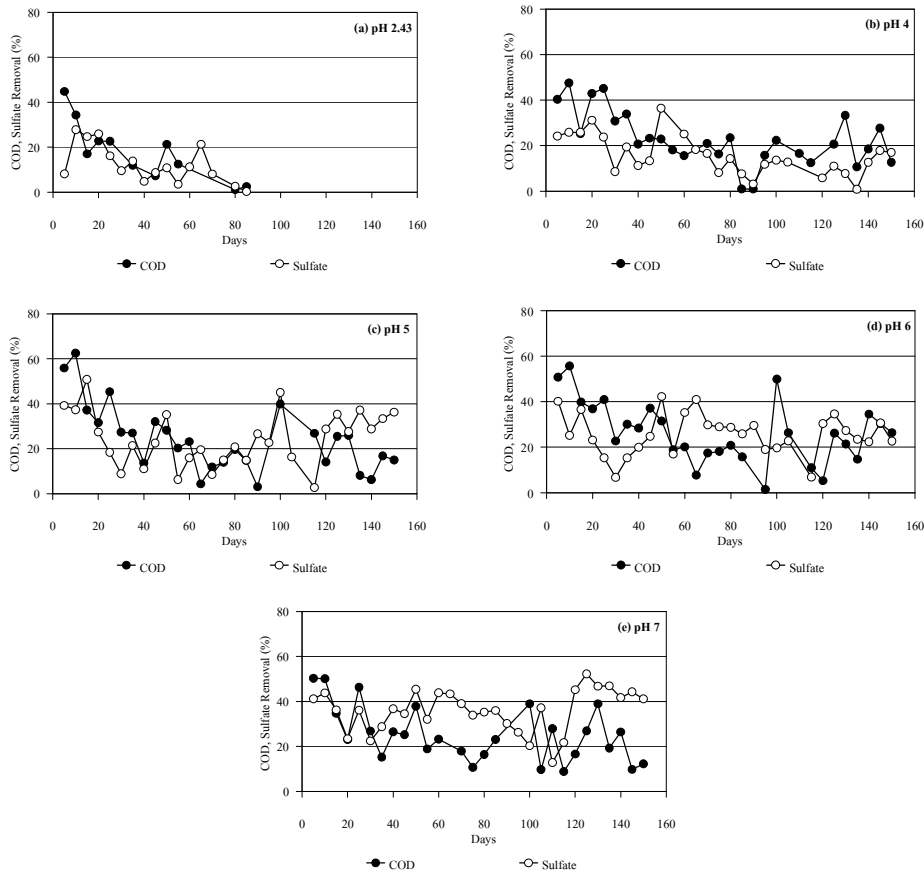
ภาพประกอบ 3-4 พีเอช และ VFA/ALK ratio ของระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกินปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว

3.2.2 ซัลเฟต (Sulfate: SO_4^{2-})

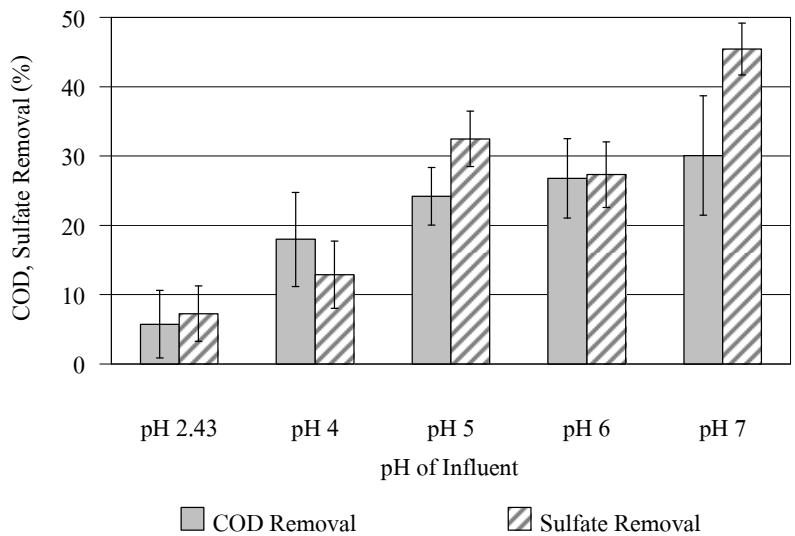
เมื่อทำการเดินระบบไร้อากาศกะกึ่งต่อเนื่องโดยระบบที่รับน้ำเสียไม่ปรับพีเอชมีแวนโวล์มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 8.1 (วันที่ 5) เป็นร้อยละ 27.8 ในวันที่ 10 ของการเดินระบบ หลังจากนั้นแวนโวล์มลดลงจนกระทั่งระบบมีประสิทธิภาพเหลือเพียงร้อยละ 9.5 ในวันที่ 30 (ภาพประกอบ 3-5 (a)) และเมื่อทำการเดินระบบจนถึงวันที่ 85 ระบบมีประสิทธิภาพเหลือเพียงร้อยละ 0.3 เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง ($6,506 \pm 1,038 \text{ mg/L}$) ซึ่งเมื่อถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้ว จะทำให้เกิดความเป็นพิษกับจุลินทรีย์ได้ อีกทั้งระบบมีพีเอชอยู่ในระดับที่ต่ำมาก (2.00 ± 0.24) ซึ่งไม่เหมาะกับการเกิดปฏิกิริยา sulfidogenesis ดังนั้นจึงหยุดเดินระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบมีค่าเท่ากับร้อยละ 7.25 ± 4.01 แต่เมื่อทำการปรับพีเอชน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบเป็น 4, 5, 6 และ 7 พบว่าหลังจากเดินระบบผ่านไป 120 วันระบบเริ่มมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตคงตัวจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (ภาพประกอบ 3-5 (b), (c), (d) และ (e))

เมื่อเดินระบบกะกึ่งต่อเนื่องจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ระบบที่รับน้ำเสียพีเอช 5 และ 6 มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตร้อยละ 32.46 ± 3.99 และ 27.33 ± 4.73 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และระบบที่รับน้ำเสียพีเอชเป็น 7 มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตร้อยละ 45.45 ± 3.75 แสดงถึงแวนโวล์มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงขึ้นเมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 3-6) หากพิจารณาในภาพรวมแล้ว พบว่าทุกๆ ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตน้อยกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากจุลินทรีย์ถูกยับยั้งการทำงานด้วยความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปไปตามพีเอชที่เปลี่ยนแปลง ร้อยละการเปลี่ยนแปลงรูปของซัลไฟด์แสดงดังสมการ (8) หากระบบมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า $150\text{-}200 \text{ mg/L}$ จะมีความเป็นพิษและมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ (Bitton, 2005) โดยที่ MPB มีความอ่อนไหวต่อความเป็นพิษจากไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าจุลินทรีย์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่สามารรถคำนวณได้จากการสมการ (9) (Speece, 1996) โดยซัลเฟต (SO_4^{2-}) 96 g จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ (HS^-) 33 g ปริมาณของซัลไฟด์ในระบบที่ได้จากการคำนวณแสดงในตาราง 3-2





ภาพประกอบ 3-5 ประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตของระบบกะกึ่งต่อเนื่อง โดย (a) พีเอช 2.43, (b) พีเอช 4, (c) พีเอช 5, (d) พีเอช 6 และ (e) พีเอช 7



ภาพประกอบ 3-6 ประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตของระบบแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียปรับพีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3-2 ค่า COD และซัลเฟตในน้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียปรับ
พีเอชระดับต่าง ๆ ณ สภาวะคงตัว

| pH of Influent | COD (mg/L) | | Sulfate (mg/L) | | S _T * (mg/L) | H ₂ S (mg/L) |
|-------------------|---------------|--------------|-------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|
| | Influent | Effluent | Influent | Effluent | Effluent | Effluent |
| pH 2.43 | 16,386±922 | 14,787±835 | 7,339±540 | 6,730±712 | 176±94 | 176±94 |
| pH 4 | 16,409±1,276 | 12,627±830 | 5,485±169 | 4,892±271 | 228±96 | 227±95 |
| pH 5 | 15,585±1,592 | 13,264±555 | 5,722±502 | 3,865±396 | 638±98 | 630±96 |
| pH 6 | 15,676±869 | 11,670±930 | 5,725±331 | 4,150±184 | 541±121 | 533±119 |
| pH 7 | 15,966±1,528 | 12,135±1,705 | 5,942±236 | 3,239±229 | 929±98 | 825±76 |

หมายเหตุ : * ได้จากการคำนวณจากสมการ (8) แสดงในภาคผนวก ข

S_T คือ Total Sulfide

3.2.3 COD (Chemical Oxygen Demand)

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของน้ำเสียในการทดลองครั้งนี้ทั้งที่ไม่ปรับและปรับพีเอช มีแนวโน้มลดลงในช่วงประมาณ 30 วันแรก (ภาพประกอบ 3-5) เมื่อเดินระบบต่อไปพบว่าระบบที่บำบัดน้ำเสียไม่ผ่านการปรับพีเอชมีการกำจัด COD ต่ำมาก และมีความแปรผันค่อนข้างสูง เนื่องจากความเข้มข้นของ COD น้ำเสียที่ป้อนสู่ระบบมีการแปรผันสูง เพราะเป็นน้ำเสียจริงที่เก็บรวบรวมมาจากโรงงาน การกำจัด COD จะเกิดเมื่อสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถของ MPB

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับพีเอช ของน้ำเสียป้อนเข้าระบบที่เพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 3-6) น้ำเสียป้อนเข้าระบบที่ไม่ทำการปรับพีเอช มีปริมาณ COD เท่ากับ 16,386±922 mg/L (ตารางที่ 3-2) ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ เท่ากับร้อยละ 5.72±4.88 เนื่องจากการกำจัด COD นั้นเป็นผลมาจากการผลิตมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ของ MPB และการรีดิวซ์ซัลเฟตของ SRB ดังนั้นการปรับพีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้นจึงส่งผลให้ระบบมี พีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์มากขึ้น สภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์จึง มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD โดยเมื่อป้อนน้ำเสียที่ระดับพีเอชเป็น 7 ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เป็นร้อยละ 30.08±8.61

จากการทดลองที่ 1 ในการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย จากกระบวนการผลิตยางสกิมด้วยระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่องปรับพีเอชของน้ำเสียก่อน ป้อนเข้าระบบที่ระดับต่าง ๆ คือ 4, 5, 6, 7 และไม่ปรับพีเอช (2.43) ด้วยถ้ำไม้ยางพาราพบว่า เมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบเป็น 7 ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีค่าเท่ากับร้อยละ 45.45 ± 3.75 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำผลที่ได้จากการทดลองที่ 1 ไปศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศแบบ UASB และ ASBR ในการทดลองที่ 2 ต่อไป

3.3 การทดลองที่ 2 ผลของระบบไร้อากาศแบบ UASB และ ASBR ในระดับห้องปฏิบัติการ

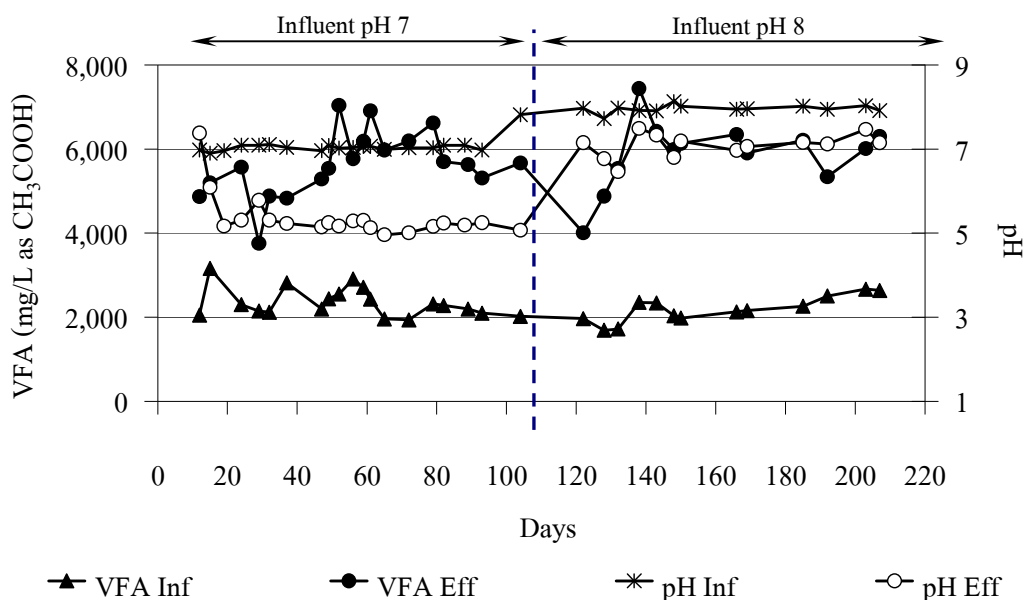
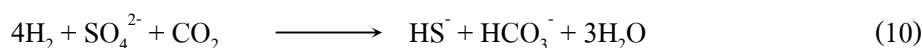
3.3.1 VFA (volatile fatty acid) สภาพด่าง (alkalinity) และพีเอช

จากการทดลองพบว่าใน 16 วันแรกพบว่าพีเอชของระบบ UASB มีค่าอยู่ที่ 7.38 และลดลงเหลือ 5.31 ในวันที่ 28 ของการเดินระบบ หลังจากนั้นพีเอชของระบบ UASB ก็คงตัวตลอดการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบได้ 97 วัน พีเอชของระบบมีค่าเป็น 5.25 (ภาพประกอบ 3-7) หลังจากนั้นได้ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเป็น 8 ทำให้ระบบเกิดการปรับตัว พีเอชของระบบเพิ่มขึ้นจาก 5.07 (วันที่ 108) เป็น 7.25 ในวันที่ 126 ของการเดินระบบ เมื่อระบบ UASB เข้าสู่ภาวะคงตัวมี VFA เท่ากับ $5,885 \pm 493$ mg/L as CH_3COOH (ตารางที่ 3-3)

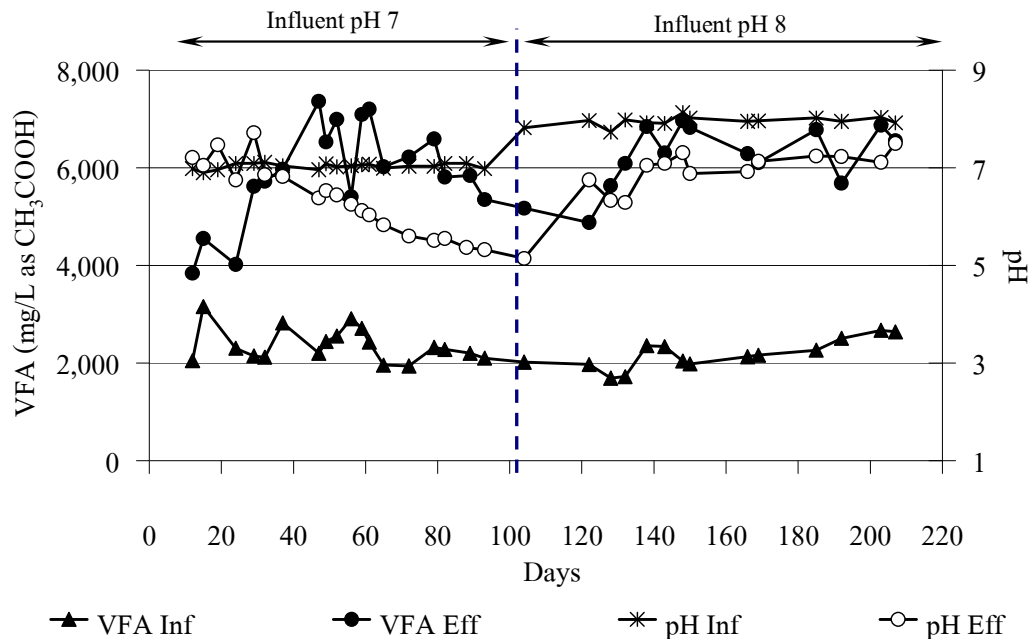
เมื่อเดินระบบ ASBR พบว่าพีเอชของระบบลดลงต่ำกว่า 7 เมื่อเดินระบบได้ 40 วัน และลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งพีเอชของระบบมีค่าเป็น 5.60 ± 0.25 ปริมาณ VFA เพิ่มขึ้นจาก $4,137 \pm 369$ mg/L as CH_3COOH เป็น $6,049 \pm 568$ mg/L as CH_3COOH ในวันที่ 16-28 ของการเดินระบบ (ภาพประกอบ 3-8) เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบจาก 7 เป็น 8 ทำให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 7.28 ± 0.20 และมี VFA เท่ากับ $6,370 \pm 614$ mg/L as CH_3COOH (ตารางที่ 3-3)

เมื่อระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียปรับพีเอชเป็น 8 เข้าสู่ภาวะคงตัวพบว่าระบบทั้งสองจะมีพีเอชใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าปริมาณ VFA ของระบบ ASBR จะสูงกว่าระบบ UASB ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ทั้งนี้เนื่องจากระบบ UASB มีสภาพความเป็นด่างน้อยกว่าระบบ ASBR ซึ่งมีค่าเท่ากับ $7,683 \pm 1,151$ mg/L as CaCO_3 และ $8,963 \pm 674$ mg/L as CaCO_3 ตามลำดับ เพราะสภาพความเป็นด่างภายในระบบจะเป็นบัฟเฟอร์ป้องกันการลดลงอันเกิดจากปริมาณ VFA ที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ภายในระบบ สภาพความเป็นด่างของระบบนอกจากจะเกิดจากการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยถ้ำไม้ยางพาราที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบแล้ว ยังมาจาก

ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันได้อีกด้วย (Mara and Horan, 2003 และ Greben *et. al.*, 2005) สามารถแสดงได้ดังสมการ (10), (11) และ (12) โดย 2 mole ของสภาพต่าง (100 g) จะเกิดจากการรีดิวซ์ของซัลเฟต 1 mole (96 g) หรือ ซัลไฟต์ 2 mole (Speece, 1996) ดังนั้นระบบ ASBR จึงมีสภาพต่างมากกว่าระบบ UASB เนื่องจากระบบ ASBR มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงกว่าระบบ ASBR (ตารางที่ 3-3)

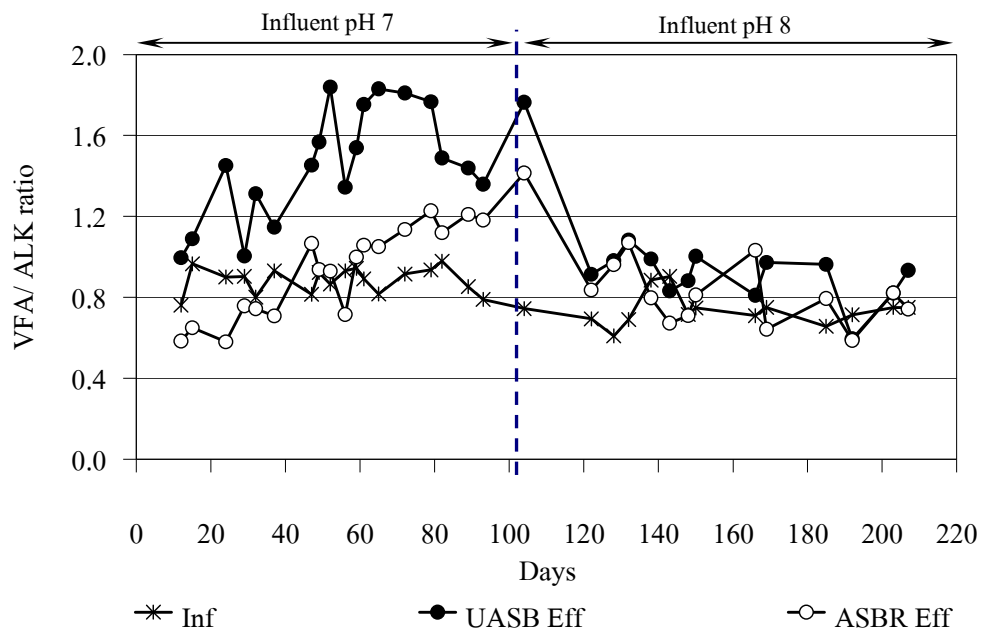


ภาพประกอบ 3-7 VFA และพีเอชในน้ำเสียเข้า และน้ำทิ้งจากระบบ UASB



ภาพประกอบ 3-8 VFA และพีเอชในน้ำเสียเข้าและน้ำทิ้งจากระบบ ASBR

นอกจากนั้น VFA/ALK ratio เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบไร้อากาศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ซึ่ง Khanal (2008) ได้กล่าวว่าโดยทั่วไประบบไร้อากาศควรมี VFA/ALK ratio อยู่ในช่วง 0.1-0.25 จึงไม่มีความเสี่ยงต่อการลดลงของพีเอชที่เกิดจากการสะสมของ VFA ในระบบ ขณะเดินระบบ VFA/ALK ratio อาจเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอยู่ในช่วง 0.3-0.4 ถือว่าระบบยังคงมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่เมื่อระบบมีค่า VFA/ALK ratio มากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำมาก (Zhao. and Viraraghavan, 2004) พีเอชของระบบอาจจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมี VFA สะสมในระบบและส่งผลให้ MPB ถูกยับยั้งการทำงานได้ ซึ่งในช่วงแรกของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียพีเอชเท่ากับ 7 พบว่าระบบทั้งสองมี VFA/ALK ratio มากกว่า 0.8 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 โดยมีค่าเป็น 1.64 ± 0.20 และ 1.14 ± 0.07 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 3-9) ทำให้ระบบไม่มีความสามารถในการต้านทานการลดลงของพีเอช เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเป็น 8 พบว่า VFA/ALK ratio ของระบบ UASB และ ASBR มีค่าเป็น 0.78 ± 0.17 และ 0.72 ± 0.12 ตามลำดับ เป็นผลมาจากการระบบมีสภาพต่างเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบทั้งสองสามารถต้านทานการลดลงของพีเอชได้ดีขึ้น



ภาพประกอบ 3-9 VFA/ALK ratio ของน้ำเสียเข้าและน้ำทิ้งจากระบบ UASB และ ASBR

ตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียเข้าระบบปรับพีเอชเป็น 8 ณ สภาวะคงตัว

| Parameter | UASB | ASBR |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| | Average±SD | Average±SD |
| pH | 7.25±0.19 | 7.28±0.20 |
| VFA (mg/L as CH ₃ COOH) | 5,885±493 | 6,370±614 |
| Alkalinity (mg/L as CaCO ₃) | 7,683±1,151 | 8,963±674 |
| VFA/Alkalinity Ratio | 0.78±0.17 | 0.72±0.12 |
| COD Removal (%) | 33.09±0.99 | 24.44±1.29 |
| Sulfate Removal (%) | 27.37±2.55 | 46.58±1.98 |
| Biogas production (mL/day) | 240±44 | 86±5 |
| Observed CH ₄ Yield (L CH ₄ /g COD _{removal}) | 7.52±1.55 | 0.52±0.19 |
| CH ₄ in Biogas (%) | 60.0±1.1 | 8.6±2.2 |
| H ₂ S in Biogas (ppm) | 6,136±2,355 | 9,784±1,161 |
| Dissolved H ₂ S* (mg/L) | 341±229 | 592±396 |

หมายเหตุ: * ๖ ได้จากการคำนวณจากสมการ (8) แสดงในภาคผนวก ข

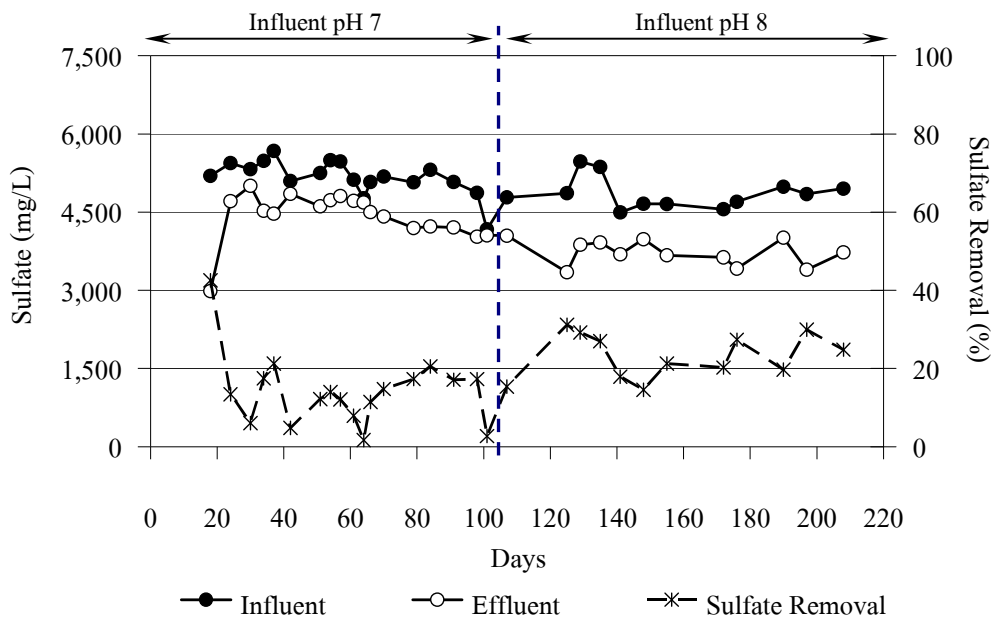
3.3.2 ซัลเฟต (Sulfate: SO_4^{2-})

เมื่อทำการเดินระบบ UASB ด้วยน้ำเสียสกินปรับพีเอชเป็น 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตต่ำอยู่ที่ร้อยละ 14.43 ± 5.87 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพีเอชของระบบมีค่าต่ำ (5.13 ± 0.11) ซึ่ง SRB จะถูกยับยั้งการทำงานเมื่อพีเอชต่ำกว่า 5.5 หรือมากกว่า 9 (Mara and Horan, 2003) เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเป็น 8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นจากร้อยละ 15.3 (วันที่ 107) เป็นร้อยละ 31.2 ในวันที่ 129 เมื่อระบบ UASB เข้าสู่ภาวะคงตัวประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าเท่ากับร้อยละ 27.37 ± 2.55 (ภาพประกอบ 3-10) ถึงแม้ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะการป้อนน้ำเสียที่ทำให้ส่วนล่างของระบบ UASB รับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตที่สูง และการสะสมของ VFA ภายในระบบ

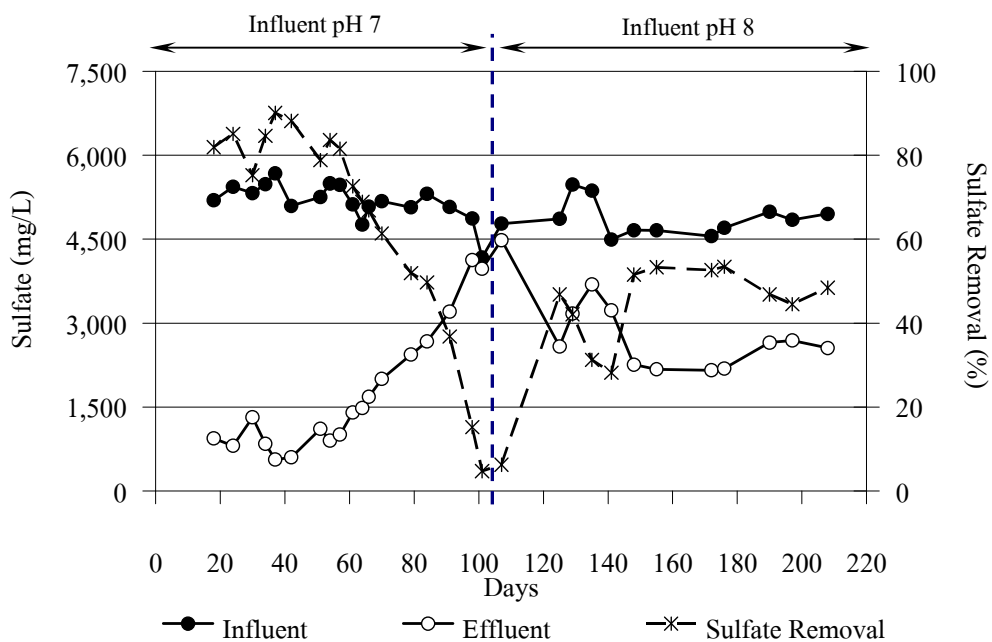
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบ ASBR ที่รับน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบปรับพีเอชเป็น 7 พบว่า 60 วันแรกระบบมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 80 หลังจากนั้นประสิทธิภาพของระบบ ASBR ในการกำจัดซัลเฟตมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 (ภาพประกอบ 3-11) เกิดจากการสะสมของ VFA ที่ส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงแสดงดังภาพประกอบ 3-7 ทำให้เกิดสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ และยังเป็นผลมาจากการที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งมีความเป็นพิษต่อ SRB ในระบบ (Maillacheruvu and Parkin, 1996) เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเป็น 8 ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้นและที่สถานะคงตัวระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 46.58 ± 1.98

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตที่สถานะคงตัวพบว่าระบบ ASBR มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงกว่าระบบ UASB (ตารางที่ 3-3) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจเกิดจากการที่ระบบ ASBR มีการกวนผสมภายในระบบ เมื่อทำการป้อนน้ำเสียเข้าระบบทำให้เกิดการเจือจางของน้ำเสียขึ้นภายในระบบ ในขณะที่ระบบ UASB ไม่มีการกวนผสม เมื่อระบบ UASB ได้รับน้ำเสียทำให้ไม่เกิดการเจือจางทั่วทั้งระบบเหมือนระบบ ASBR ดังนั้นส่วนล่างของระบบ UASB จึงต้องรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากกว่าระบบ ASBR อีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบ UASB คือ การที่ SRB ไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (granular) เช่นเดียวกับ MPB แต่จะมีลักษณะเป็นการรวมตะกอน (flocculants) (Visser *et al.*, 1993) SRB จึงมีโอกาที่จะถูกชะ (wash out) ออกจากระบบ UASB ได้ง่าย (De Smul *et al.*, 1999 และ Shayegan *et al.*, 2005) ขณะที่ระบบ ASBR นั้นจะมีการ

ปล่อยให้เกิดการตกตะกอนก่อนที่จะถ่ายน้ำทิ้งออกจากระบบทำให้ระบบ ASBR มีความเสี่ยงต่อการสูญเสีย SRB ในระบบน้อยกว่าระบบ UASB



ภาพประกอบ 3-10 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ UASB

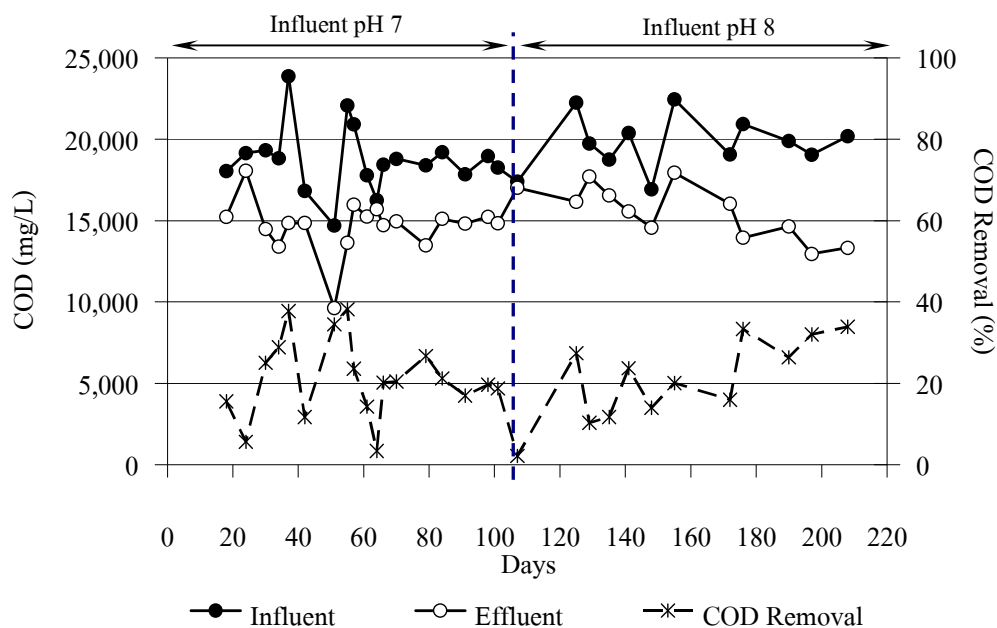


ภาพประกอบ 3-11 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ ASBR

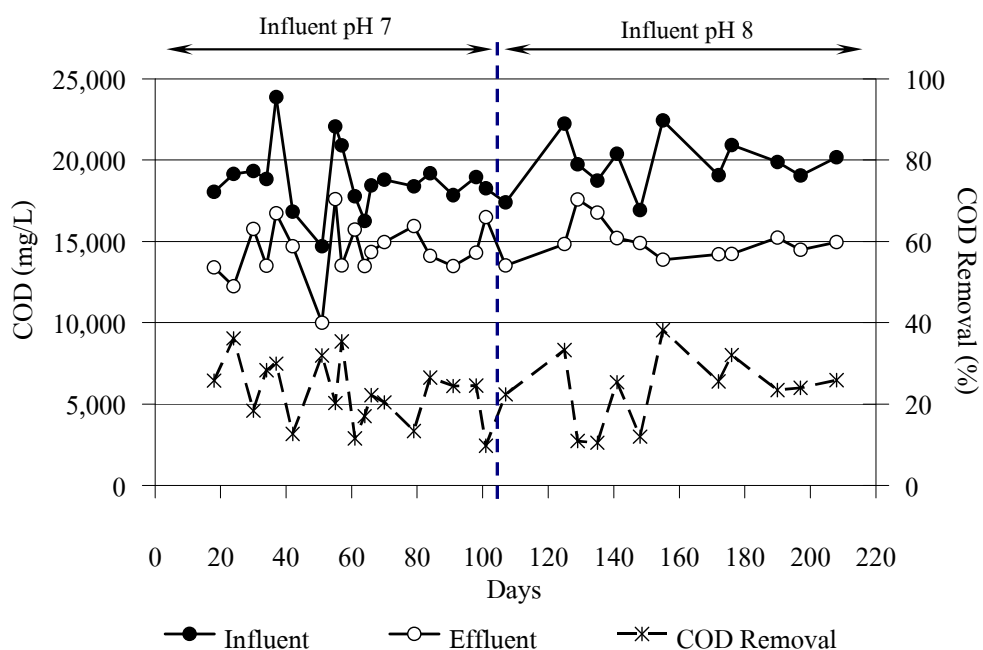
3.3.3 COD (Chemical Oxygen Demand)

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียปรับพีเอชเป็น 7 มีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 20.56 ± 3.04 และ 20.17 ± 6.28 ตามลำดับ โดยช่วง 65 วันแรกที่ทำกรเดินระบบ UASB พบว่าจากการที่น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมีความแปรผันของ COD ทำให้ระบบมีความแปรผันของประสิทธิภาพการกำจัด COD หลังจากวันที่ 79 ระบบมีความเสถียรสูงขึ้น (ภาพประกอบ 3-12) และมีค่าร้อยละ 25.09 ± 8.45 หลังจากนั้นทำการปรับพีเอชน้ำเสียเข้าระบบเป็น 8 พบว่า ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยระบบมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นจากวันที่ 107-172 จนกระทั่งระบบมีความคงตัวและมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับร้อยละ 33.09 ± 0.99 อีกทั้งระบบ UASB มีค่า VFA/ALK ratio เท่ากับ 1.64 ± 0.20 เมื่อมีการสะสม VFA ในระบบที่เกิดจากจุลินทรีย์สร้างกรดขณะที่ระบบมีสภาพต่างไม่เพียงพอต่อการต้านทานการลดลงของพีเอชในระบบ (VFA/ALK ratio > 0.8) เมื่อพีเอชของระบบลดลงส่งผลให้เกิดสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของ MPB ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมทำให้ MPB ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบ UASB จึงมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ไม่สูงมากนัก ถึงแม้จะปรับพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเพื่อให้เหมาะสมต่อการทำงานของ MPB แต่จุลินทรีย์ผลิตภัณฑ์ก็ยังคงผลิต VFA เช่นกัน ซึ่ง VFA ที่เกิดขึ้นนั้นยังคงสามารถวัดได้ในรูปของ COD ทำให้ค่า COD ของระบบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับระบบ ASBR ที่รับน้ำเสียสกิมปรับพีเอชเป็น 7 เข้าระบบพบว่าในช่วง 65 วันแรกของการเดินระบบประสิทธิภาพการกำจัด COD มีความแปรผันเช่นเดียวกับระบบ UASB โดยมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลง (ภาพประกอบ 3-13) โดยพีเอชของระบบลดต่ำลง (ภาพประกอบ 3-8) มีค่าเท่ากับ 5.60 ± 0.25 ซึ่งเป็นระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ทำงานอยู่ภายในระบบ และยังส่งผลต่อการทำงานของ SRB ทำให้การรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบลดลง (ภาพประกอบ 3-12) โดยในการรีดิวซ์ซัลเฟตนั้นจำเป็นต้องใช้ COD ร่วมด้วยในสัดส่วน COD 0.67 g ต่อการรีดิวซ์ซัลเฟต 1 g (Lens *et al.*, 1998) หากระบบมีการรีดิวซ์ซัลเฟตลดลงก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบลดลงด้วย โดยที่สถานะคงตัวของระบบ ASBR มีร้อยละของการบำบัด COD อยู่ที่ 24.44 ± 1.29 เมื่อทำการปรับพีเอชของน้ำเสียป้อนเข้าระบบ ASBR เป็น 8 ทำให้ระดับพีเอชของระบบ ASBR เพิ่มขึ้นเป็น 7.14 ± 0.12 ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์มากขึ้น



ภาพประกอบ 3-12 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ UASB



ภาพประกอบ 3-13 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสียเข้าระบบ และน้ำทิ้งจากระบบ ASBR

ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า COD ในระบบ UASB ถูกเปลี่ยนไปเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเป็นมีเทนร้อยละ 60.0 ± 1.1 ส่วนระบบ ASBR จะใช้ COD ในการรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเป็นมีเทนเท่ากับร้อยละ 8.6 ± 2.2

3.3.4 องค์ประกอบของมีเทนและไฮโดรเจนซัลไฟด์

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ระบบผลิตขึ้นและองค์ประกอบของมีเทนในก๊าซชีวภาพถือเป็นอีกดัชนีที่สามารถบ่งชี้ถึงการทำงานของ MPB ในระบบ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบมีเทนของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากระบบ UASB และ ASBR พบว่าระบบ UASB มีองค์ประกอบของมีเทนมากกว่าคือร้อยละ 60.0 ± 1.1 ส่วนระบบ ASBR มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 8.6 ± 2.2 และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ระบบผลิตขึ้นระหว่างระบบ UASB และ ASBR มีค่าเฉลี่ยเป็น 240 ± 44 mL/day และ 86 ± 5 mL/day ตามลำดับ และมีค่า observed CH_4 Yield เฉลี่ย 7.52 ± 1.55 L $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{removal}}$ และ 0.52 ± 0.19 L $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{removal}}$ ตามลำดับ แสดงถึงการทำงานที่มีประสิทธิภาพหรือปริมาณของ MPB ในระบบ UASB ที่มากกว่าระบบ ASBR อีกสาเหตุที่ทำให้ระบบ ASBR มีปริมาณก๊าซชีวภาพ และมีเทนต่ำกว่าคือปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันที่เกิดขึ้นในระบบ ASBR ส่งผลให้มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพของระบบ ASBR สูงกว่าระบบ UASB (ตารางที่ 3-3) ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นมีความเป็นพิษสามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบได้ และทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบลดลงถึงร้อยละ 70 เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบมีความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/L (McCartney and Oleszkiewicz. 1993)

3.4 การเปรียบเทียบการทำงานของระบบไร้อากาศที่รับน้ำเสียอุตสาหกรรมยางพาราที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบการทำงานของระบบไร้อากาศ UASB ASBR และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (ABR) ที่บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้นในส่วนของการผลิตยาง สกิมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางขึ้นที่มีคุณลักษณะน้ำเสียแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 3-4 โดยเปรียบเทียบกับการศึกษาของยศวริศ เขตอนันต์ (2551) ที่ทำการศึกษาการพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้นที่ระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 7 วัน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR) เท่ากับ 0.79 kg COD/m^3 ปรับพีเอชเป็น 7 ด้วยเถ้าไม้ยางพารา มีประสิทธิภาพการกำจัด COD เฉลี่ยร้อยละ 86.10 ± 3.42 กับการศึกษาของกัญญารัตน์ สฤษฏ์พงษ์ศิริ (2550) สมรรถภาพการทำงานของ ABR ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำยางขึ้น อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.60 kg COD/m^3 ปรับพีเอชเป็น 7.6 ด้วยเถ้าไม้ยางพารา

ระยะกักพักทางชลศาสตร์รวม 10 วัน โดยระบบ ABR จะประกอบด้วย 4 หน่วยย่อย (compartment) แต่จะนำมาเปรียบเทียบกับระบบ UASB 1 และ UASB 2 เพียง 3 หน่วยย่อยแรกเท่านั้น ซึ่งจะได้ระยะกักพักทางชลศาสตร์ของระบบเท่ากับ 7.5 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด COD เฉลี่ยร้อยละ 79.34 ± 1.66 แสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-4 เปรียบเทียบลักษณะน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ UASB 1, UASB 2 และ ABR

| Parameter | UASB 1 ^a | ABR ^b | UASB 2 | UASB 3 | ASBR |
|-----------------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Wastewater | Combine | Combine | Skim | Skim | Skim |
| pH | 7.20 ± 0.04 | 7.61 ± 0.02 | 7.04 ± 0.05 | 7.97 ± 0.06 | 7.97 ± 0.06 |
| VFA (mg/L as CH ₃ COOH) | 695 ± 41 | $1,022 \pm 66.0$ | $2,176 \pm 185$ | $2,605 \pm 88$ | $2,605 \pm 88$ |
| Alkalinity (mg/L as CaCO ₃) | $2,752 \pm 317$ | $2,279 \pm 287$ | $2,471 \pm 209$ | $3,530 \pm 26$ | $3,530 \pm 26$ |
| COD (mg/L) | $5,720 \pm 916$ | $6,259 \pm 580$ | $18,552 \pm 458$ | $20,009 \pm 777$ | $20,009 \pm 777$ |
| Sulfate (mg/L) | $2,012 \pm 80$ | $2,330 \pm 102$ | $4,964 \pm 376$ | $4,871 \pm 130$ | $4,871 \pm 130$ |
| COD/SO ₄ ²⁻ Ratio | 2.85 ± 0.51 | 2.70 ± 0.35 | 3.76 ± 0.30 | 4.11 ± 0.23 | 4.11 ± 0.23 |
| OLR (kg COD/m ³ .d) | 0.79 | 0.60 | 2.66 | 2.87 | 2.87 |
| HRT (days) | 7 | 7.5 | 7 | 7 | 7 |

หมายเหตุ: ^a ขสวริศ เขตอนันต์ (2551)

^b กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรม (2550)

ตารางที่ 3-5 เปรียบเทียบลักษณะน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของระบบ UASB 1, UASB 2 และ ABR

| Parameter | UASB 1 | ABR | UASB 2 | UASB 3 | ASBR |
|-----------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| pH | 8.15 ± 0.05 | 7.70 ± 0.02 | 5.13 ± 0.11 | 7.25 ± 0.19 | 7.28 ± 0.20 |
| VFA (mg/L as CH ₃ COOH) | 74 ± 26 | 92.5 ± 45.7 | $6,049 \pm 568$ | $5,885 \pm 493$ | $6,370 \pm 614$ |
| Alkalinity (mg/L as CaCO ₃) | $4,370 \pm 330$ | $3,509 \pm 2,257$ | $3,717 \pm 209$ | $7,683 \pm 1,151$ | $8,963 \pm 674$ |
| VFA/ALK ratio | 0.02 ± 0.01 | 0.02 ± 0.01 | 1.64 ± 0.20 | 0.78 ± 0.17 | 0.72 ± 0.12 |
| COD (mg/L) | 800 ± 279 | $1,286 \pm 19$ | $14,732 \pm 584$ | $13,719 \pm 739$ | $14,718 \pm 454$ |
| Sulfate (mg/L) | 493 ± 19 | 119 ± 11 | $4,232 \pm 173$ | $3,635 \pm 290$ | $2,521 \pm 228$ |
| COD Removal (%) | 86.10 ± 3.42 | 79.34 ± 1.66 | 25.09 ± 8.45 | 33.09 ± 0.99 | 24.44 ± 1.29 |
| Sulfate Removal (%) | 75.45 ± 0.68 | 94.89 ± 0.41 | 22.55 ± 5.19 | 27.37 ± 2.55 | 46.58 ± 1.98 |
| Dissolved H ₂ S* (mg/L) | 26 ± 3 | 96 ± 1 | 247 ± 105 | 341 ± 229 | 592 ± 396 |

หมายเหตุ: ^a ขสวริศ เขตอนันต์ (2551)

^b กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรม (2550)

* ได้จากการคำนวณจากสมการ (8) แสดงในภาคผนวก ข

3.4.1 VFA (volatile fatty acid) สภาพด่าง (alkalinity) และพีเอช

เมื่อทำการพิจารณาการทำงานของระบบบำบัด UASB 1, UASB 2, UASB 3, ASBR และ ABR พบว่า ระบบ UASB 1 และ ABR มีพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบ UASB 2, UASB 3 และ ASBR มีพีเอชในน้ำทิ้งลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของ VFA และสภาพด่างของระบบ ระบบ UASB 1 และ ABR นั้นมีปริมาณ VFA ในน้ำทิ้งลดลง แสดงให้เห็นถึงจุลินทรีย์ภายในระบบมีการใช้ไปของ VFA อีกทั้งระบบยังมีสภาพด่างที่เพียงพอต่อการเพิ่มขึ้นของ VFA ในระบบ จึงทำให้พีเอชของระบบไม่ลดลง แต่ในขณะที่ระบบ UASB 2, UASB 3 และ ASBR จุลินทรีย์ผลิตกรดในระบบสร้าง VFA แต่มีการใช้ไปของ VFA ในระบบน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตขึ้นของ VFA ทำให้เกิดการสะสมในระบบ ถึงแม้ระบบจะมีสภาพด่างที่เพิ่มขึ้นแต่อิทธิพลของปริมาณ VFA มีมากกว่าจึงทำให้ระบบมีพีเอชลดลง ซึ่งความสามารถในการต้านทานการลดลงของพีเอชเมื่อระบบมีปริมาณ VFA เพิ่มขึ้นสามารถประเมินได้จากค่า VFA/ALK ratio โดยระบบจะมีความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนแปลงของพีเอชจากการเพิ่มขึ้นของ VFA ในระบบได้ดีเมื่อมี VFA/ALK ratio อยู่ในช่วง 0.3-0.4 แต่จะไม่มีความเสี่ยงต่อการลดลงของพีเอชเมื่อ VFA/ALK ratio อยู่ในช่วง 0.1-0.25 โดยระบบ UASB 2, UASB 3 และ ASBR นั้นมี VFA/ALK ratio เท่ากับ 1.64 ± 0.20 , 0.78 ± 0.17 และ 0.72 ± 0.12 ตามลำดับ ในขณะที่ระบบ UASB 1 และ ABR มี VFA/ALK ratio น้อยกว่า 0.1 (ตารางที่ 3-5) ซึ่ง VFA/ALK ratio มากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำมาก (Zhao and Viraraghavan, 2004) ทำให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ VFA เพียงเล็กน้อย

3.4.2 ซัลเฟต (sulfate: SO_4^{2-})

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบ UASB 1, UASB 2, UASB 3, ASBR และ ABR แสดงดังตารางที่ 3-5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงที่สุด คือ ระบบ ABR มีค่าร้อยละ 94.89 ± 0.41 โดยที่ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบมีค่าเป็น $2,330 \pm 102$ mg/L ขณะที่ระบบ UASB 2 รับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ $4,964 \pm 376$ mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 14.43 ± 5.87 และระบบ UASB 3 และ ASBR รับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ $4,871 \pm 130$ mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 27.37 ± 2.55 และ 46.58 ± 1.98 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Al-Zuhair *et al.* (2008) ที่กล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตมากกว่า $4,000$ mg/L ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของ SRB ลดลง และอัตราการเจริญเติบโตของ SRB จะมีค่ามากที่สุด เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตเท่ากับ $2,500$ mg/L นอกจากนี้ค่าพีเอชของระบบยังมีผลต่อซัลไฟด์ในระบบด้วย

เช่นกัน เนื่องจากซัลไฟด์จะเปลี่ยนรูปไปตามพีเอช ซึ่งระบบ UASB 1, 2, 3, ASBR และ ABR มีพีเอชของระบบเท่ากับ 8.15 ± 0.05 , 5.13 ± 0.11 , 7.25 ± 0.19 , 7.28 ± 0.20 และ 7.70 ± 0.02 ตามลำดับ (ตารางที่ 3-5) ดังนั้นแบคทีเรียในระบบ UASB 2 จึงถูกยับยั้งด้วยค่าพีเอชที่ต่ำและไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบจะถูกยับยั้งการทำงานเมื่อมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบมากกว่า 200 mg/L (Bitton, 2005) โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบทั้ง 3 แสดงในตารางที่ 3-5

นอกจากปัจจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อีกปัจจัยที่มีความสำคัญ และมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบ คือ COD/SO_4^{2-} ratio เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์สร้างกรด MPB และ SRB ซึ่งค่าต่ำสุดของ COD/SO_4^{2-} ratio ที่สามารถเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้ คือ 0.67 (Lens *et al.*, 1998) ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน เพื่อรีดิวซ์ซัลเฟต 1 g จะต้องใช้ COD อย่างน้อย 0.67 g แต่จากการศึกษาของ Vossoughi *et al.* (2002) ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น COD เริ่มต้นเท่ากับ $3,000 \text{ mg/L}$ โดยใช้ระบบ ABR และเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟต จาก $180\text{-}500 \text{ mg/L}$ มี COD/SO_4^{2-} ratio อยู่ระหว่าง 16.7-6 พบว่า เมื่อ COD/SO_4^{2-} ratio ลดลงไม่มีผลยับยั้งการทำงานของ SRB ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลเฟตและปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการยับยั้งการทำงานของ SRB มากกว่า COD/SO_4^{2-} ratio

3.4.3 COD (chemical oxygen demand)

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง UASB 1, UASB 2 และ ABR พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD จะลดลงเมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ของระบบเพิ่มขึ้น โดยระบบ UASB 2 มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดมีค่าร้อยละ 20.56 ± 3.04 นอกจากความเข้มข้นของ COD ที่สูงถึง $18,552 \pm 458 \text{ mg/L}$ แล้ว อาจจะเป็นผลมาจากปริมาณ VFA ที่สะสมอยู่ในระบบ ส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงเหลือ 5.13 ± 0.11 ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการทำงานของ MPB ในระบบ โดยพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของ MPB อยู่ในช่วง 7.8-8.2 (Khanal, 2008) เมื่อพิจารณา ระบบ UASB 3 และระบบ ASBR พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับร้อยละ 33.09 ± 0.99 และ 24.44 ± 1.29 ตามลำดับ ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ $2.87 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ ทั้งนี้อาจเป็นผลจาก MPB ถูกยับยั้งการทำงานจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากการรีดิวซ์ซัลเฟต เมื่อในระบบมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 200 mg/L (Bitton, 2005) โดยในระบบ UASB 2, UASB 3 และ ASBR มีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ $247 \pm 105 \text{ mg/L}$, $341 \pm 229 \text{ mg/L}$ และ $592 \pm 396 \text{ mg/L}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 3-4) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อ MPB ที่มีความอ่อนไหวต่อปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบมากกว่าจุลินทรีย์ผลิตกรด และ SRB

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ในการศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสกินด้วยระบบแบบไร้อากาศ เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสกินที่ปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราด้วยระบบบำบัดไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง และการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ UASB และระบบ ASBR ได้ผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

ผลการปรับพีเอชตัวอย่างน้ำเสียด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่ระดับต่าง ๆ (2.43, 4, 5, 6 และ 7) พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 7 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ เมื่อทำการป้อนน้ำเสียสกินปรับพีเอชเป็น 7 เข้าระบบ UASB และ ASBR พบว่าระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพการทำงานของระบบได้ เนื่องจากระบบมี VFA/ALK ratio มากกว่า 0.8 เมื่อปรับพีเอชน้ำเสียสกินเป็น 8 ระบบทั้งสองสามารถทำงานได้ ปริมาณ VFA ในระบบ UASB และ ASBR มีค่ามากกว่าในน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลอง แต่เมื่อเปรียบเทียบโดยระบบ ASBR มีสภาพต่างในระบบสูงกว่าระบบ UASB ซึ่งเกิดจากซัลเฟตรีดักชัน เนื่องจากระบบ ASBR มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงกว่าระบบ UASB เพราะลักษณะการทำงานของระบบ ทำให้ระบบ ASBR มีการสูญเสียของ SRB น้อยกว่าระบบ UASB

4.2 ข้อเสนอแนะในการทำการวิจัยเพิ่มเติม

1) ควรมีการศึกษาอัตราสูบน้ำเสียย้อนกลับต่อกระบวนการกำจัดซัลเฟตของน้ำเสียสกิน เนื่องจากน้ำเสียสกินมีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง หากมีการสูบน้ำเสียย้อนกลับจะเป็นการลดภาระบรรทุกของซัลเฟตที่เข้าระบบ โดยระบบไร้อากาศที่จะใช้ศึกษานั้นควรเป็นระบบที่มีความสามารถในการรักษาตะกอนได้ดี เช่นระบบ ABR เป็นต้น เนื่องจากการสูบน้ำเสียย้อนกลับนั้นจะเป็นการเพิ่มภาระบรรทุกทางจุลชีวศาสตร์ หากระบบไม่สามารถรักษาตะกอนจุลินทรีย์ไว้ได้ก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต

2) ศึกษาความเร็วไหลขึ้นของระบบ UASB เนื่องจากการที่ SRB ไม่รวมตัวเป็นเม็ดเหมือน MPB ดังนั้นความเร็วไหลขึ้นของระบบ UASB สูงเกินไปอาจมีผลต่อการถูกชะออกจากระบบของ SRB ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของระบบ แต่ถ้าความเร็วไหลขึ้นมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้น้ำเสียที่เข้าระบบสัมผัสกับจุลินทรีย์ไม่ทั่วทั้งระบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วไหลขึ้น เมื่อระบบมีขนาดเท่ากันและทำการเดินระบบที่ระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากันคือ ความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของระบบ

3) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานแบบลูกผสม ASBR และ UASB ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียสกิม เนื่องจากจากการทดลองพบว่าระบบ ASBR สามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีกว่าระบบ UASB ในขณะที่ระบบ UASB สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบมีเทนสูงถึงร้อยละ 60 ดังนั้นควรจะให้ระบบ ASBR รับน้ำเสียสกิมจากนั้นจึงบำบัดต่อด้วยระบบ UASB เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต และการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบ UASB จากน้ำเสียสกิม

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. กรุงเทพฯ: สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. **การจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานโดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน: ข้อเสนอแนะแนวทางการออกแบบ เล่ม 1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม**. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. **คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1** กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. **คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 2** กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. **แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกัน และลดมลพิษ: อุตสาหกรรมน้ำยางชั้น**. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กัญญารัตน์ สฤษฏ์พงศ์ศิริชฌ 2550. “ผลการปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราและอัตราส่วนการสูบลับน้ำทิ้งต่อสมรรถภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นในการบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำยางชั้น”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2543. **วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ดวงพร คันธโชติ. 2545. **นิเวศวิทยาของจุลินทรีย์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ธีระ เกรอด. 2539. **วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชราภรณ์ จำแก้ว. 2546. “การบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำยางชั้นด้วยระบบตะกอนเร่ง”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัฒนวรรณ วิทยกุล. 2544. “การบำบัดซัลเฟต และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเสียจากโรงงานน้ำยางชั้นด้วยระบบไร้อากาศ และระบบกรองชีวภาพ”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มันสิน ตันกุลเวศม์, มันรัชย์ ตันกุลเวศม์. 2545. **เคมีวิทยาของน้ำ และน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2546. **คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่ม 1**. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยศวิศ เขตอนันต์. 2551. “การพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำยางชั้นโดยระบบยูเอสบี และระบบไบโอฟิล์มที่ควบคุมพารามิเตอร์โออาร์พี”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วรพันธ์ ราชวัตร และศักดิ์ดา สารรัตน์. 2545. “การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการจับหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟิวริก”, รายงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2531. **น้ำยาง (LATEX)**. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง. ศูนย์วิจัยยาง สงขลา. กรมวิชาการเกษตร.
- วันชัย แก้วยอด. 2540. “การตรวจสอบการจัดการน้ำเสียโรงงานยาง: กรณีศึกษาในจังหวัดสงขลา”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วีรชาติ อินทร์ทอง. 2551. “การบำบัดซัลเฟตในน้ำเสียโรงงานน้ำยางชั้นโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะของจังหวัดภูเก็ต”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศันสนีย์ วงศ์ชนะ. 2553. “ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบยูเอสบีจากระบวนการจับตัวเนื้อยางในหางน้ำยางด้วยพอลิเมอร์ A 702”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สถาบันวิจัยยาง. 2552. **ปริมาณ ปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติแยกตามประเภท**. สถาบันวิจัยยาง. <http://www.thainr.com/th/detail-stat.php?statID=97> (สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2552)
- สถาบันวิจัยยาง. 2552. **ผลผลิตยางธรรมชาติแยกตามประเภทของประเทศไทย**. สถาบันวิจัยยาง. <http://www.thainr.com/th/detail-stat.php?statID=15> (สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2552)
- สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์, อุดมผล พิษณุไพบูลย์, เจิดจรรย์ สิริวงศ์ และพนาลี ชีวภิกดาการ. 2541. **น้ำเสีย: การควบคุม และการบำบัด**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. **ปริมาณ และมูลค่าการส่งออกยางพาราของไทย ปี 2546-2552**. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. <http://www.thainr.com/th/detail-stat.php?statID=47> (สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2552)

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ผลพยากรณ์การผลิต ปี 2552 รายจังหวัด (กันยายน 2552).

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. http://www2.oae.go.th/mis/Forecast/03_SEP2552/Thai/table/tbl_t_16.htm (สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2552)

สุบัณฑิต นิมรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สันทัด ศิริอนันต์ไพบุลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. กรุงเทพฯ: ท้อป

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st Edition.** Maryland: American Public Health Association.

Bitton, G. 2005. **Wastewater Microbiology, 3rd Edition.** Florida: Wiley-Liss, Inc.

De Smul, A., Goethals, L. and Verstraete, W. 1999. "Effect of COD to sulphate ratio and temperature in expanded-granular-sludge-blanket reactors for sulphate reduction". **Process Biochemistry.** 34: 407-416

Elke, G., Werner, H. and Christian, M. "Biological removal from tannery wastewater in a two-stage anaerobic treatment". **Water Research.** (30): 2,072-2,078.

Field, J. And Sierra, R. 2005a. **Granulation. Anaerobic Granular Sludge Bed Technology Page** <http://www.uasb.org/discover/granules.htm#granulation> (accessed August 15, 2009).

Field, J. And Sierra, R. 2005b. **Granulation. Anaerobic Granular Sludge Bed Technology Page** <http://www.uasb.org/discover/granules.htm#granules> (accessed August 15, 2009).

Field, J. And Sierra, R. 2005c. **Anaerobic granular sludge bed reactor technology. Anaerobic Granular Sludge Bed Technology Page** <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm#uasb> (accessed August 15, 2009).

Gray, N.F. 1989. **Biological of wastewater treatment.** New York: Oxford Science Publications.

Greben, H.A., Maree, J.P., Eioff, E. and Murray, K. 2005. "Improved sulphate removal rate at increase sulphide concentration in the sulphidogenic bioreactor". **Water SA.** 31(3): 351-358.

Kapdan, I.K. and Oztekin, R. 2006. "The effect of hydraulic residence time and initial COD Concentration on color and COD removal performance of anaerobic-aerobic SRB system". **Journal of Hazardous Materials.** 136(3): 896-901.

- Khanal, S.K. 2008. **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications, 1st Edition**. Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
- Lens, P.N.L., R. Klijn, Lier, J. B. van and Lettinga, G. 2003. "Effect of specific gas loading rate on thermophilic (55°C) acidifying (pH 6) and Sulfate reducing granular sludge reactors". **Water Research**. 37(5): 1033-1047.
- Lens, P.N.L., Visser, A.N.L., Janssen, A.J.H., Hulshoff Pol, L.W., and Lettinga, G. W. 1998. "Biotechnological Treatment of Sulfate-rich Wastewater". **Critical Review in Environmental Science and Technology**. 28(1): 41-88
- Lopes, S.I.C., Sulistyawati, I., Capela, M.I., and Lens, L.P.N. 2007. "Low pH (6, 5 and 4) sulfate reduction during the acidification of sucrose under thermophilic (55°C) condition". **Process Biochemistry**. 42(4): 580-591
- Lopes, S.I.C., Wang, X., Capela, M.I. and Lens, L.P.N. 2007. "Effect of COD/SO₄²⁻ ratio and sulfide on thermophilic (55°C) sulfate reduction during the acidification of sucrose at pH6". **Water Research**. 41(11): 2379-2392
- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H. and Lettinga, G. 2004. "Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digester system". **Water Research**. 38(9): 2348-2358
- Maillacheruvu, K.Y. and Parkin, G.F. 1996. Kinetics of growth, substrate utilization and sulfide toxicity for propionate, acetate, and hydrogen utilizers in anaerobic systems. **Water Environment Federation**. 68 (7): 1,099-1,106
- Mara, Duncan and Horan, N.J. 2003. **Handbook of Water and Wastewater Microbiology**. United Kingdom: Elsevier.
- Metcalf and Eddy. 2004. **Wastewater engineering treatment and reuse**. New York: McGraw-Hill, Inc.
- McCartney, D.M. and Oleszkiewicz, J.A. 1993. Competition between methanogens and sulfate reducers: Effect of COD: Sulfate ratio and acclimation. **Water Environment Federation**. 65 (5): 655-664
- Moosa, S., Nemati, M. and Harrison, S.T.L. 2002. "A kinetic study on anaerobic reduction of sulfate, Part I: Effect of sulfate concentration". **Chemical Engineering Science**. 57 (14): 2773-2788

- O'Flaherty, V., Mahony, T., O'Kennedy, R., and Colleran, E. 1998. "Effect of pH on growth kinetics and sulphide toxicity thresholds of a range of methanogenic, syntrophic and sulphate-reduction bacteria". **Biochemistry**. 33(5): 555-569
- O'Flaherty, V., Lens, P., Leahy, B. and Colleran, E. 1998. "Long-Term competition between sulphate-reducing and methane-producing bacteria during full-scale anaerobic treatment of citric acid production wastewater". **Water Research**. 32(3): 815-825
- Omil, F., Lens, P., Hulshoff Pol, L. and Lettinga, G. 1996. "Effect of upflow velocity and sulphide concentration on volatile fatty acid degradation in a sulphidogenic granular sludge reactor". **Process Biochemistry**. 31(7): 699-710
- Percheron, G., Bernet, N. and Moletta, R. 1997. "Start-up of anaerobic digestion sulfate wastewater". **Bioresource Technology**. 61: 21-27
- Rintala, J.A. and Lepistö, S. 1998. "Thermophilic anaerobic treatment of sulphur rich forest industry wastewater". **Biodegradation**. 9: 225-232
- Rittmann, B.E. and McCarty, P.L. 2001. **Environmental Biotechnology**. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Rodrigues, J.A.D., Ratusznei, S.M., Moraes de Camargo, E.F. and Zaiat, M. 2003. "Influence of agitation rate on the performance of an anaerobic sequencing batch reactor containing granulated biomass treating low-strength wastewater". **Advances in Environmental Research**. 7(2): 405-410
- Schlumberger. 2009. **X-Y plot of sulfide ion species**. Schlumberger Limited. <http://www.glossary.oilfield.slb.com/DisplayImage.cfm?ID=408> (accessed August 15, 2009).
- Shayegan, J., Ghavipanjeh, F. and Mirjafari, P. 2005. The effect of influent COD and upward flow velocity on the behavior of sulphate-reducing bacteria. **Process Biochemistry**. 40: 2,305-2,310
- Speece, R.E. 1996. **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters**. United States of America: Archae Press.
- Velasco, A., Ramirez, M., Volke-Sequiveda, T., Gonzalez-Sanchez, A. and Revah, S. 2007. "Evolution of feed COD/Sulfate ratio as a control criterion for the biological hydrogen sulfide production and lead precipitation". **Journal of Hazardous Materials**. (in press)

- Visser, A., Alphenaar, P.A., Gao, Y., van Rossum, G. and Lettinga, G. 1993. "Granulation and immobilisation of methanogenic and sulfate-reducing bacteria in high-rate anaerobic reactors". **Applied Microbiology and Biotechnology**. 40(4): 575-581
- Vossoughi, M., Shakeri, M. and Alemzadeh, I. 2002. "Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄²⁻ ratio". **Chemical Engineering and Processing**. 42(10): 811-816
- Yamaguchi, T., Harada, H., Hisano, T., Yamazaki, S. and Tseng, I.C. 1999. "Process behavior of UASB reactor treating a wastewater containing high strength sulfate". **Water Research**. 33(14): 3182-3190
- Yan, Y.G., and Tay J.H. 1997. "Characterisation of the granulation process during UASB start-up". **Water Research**. 31(7): 1573-1580
- Zhao, H. W. and Viraraghavan, T. 2004. "Analysis of the performance of an anaerobic digestion system at the Regina wastewater treatment plant". **Bioresource Technology**. 95(3): 301-307

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสียและน้ำทิ้งในการทดลองที่ 1 คือ การทำงานของระบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกินปรับพีเอชระดับต่าง ๆ

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย น้ำทิ้ง และประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดแบบกะกึ่งต่อเนื่องที่รับน้ำเสียสกินที่ปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่ระดับต่าง ๆ (ใช้สำหรับภาพประกอบ 3-1 ถึง 3-6)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|-----|---------|-----|------------|-----|----------|-----|------|---------|-----|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 0 | pH 2.43 | - | 1,245.0 | - | #N/A | - | 13,718.0 | - | - | 5,913.7 | - | - | - | - |
| | pH 4 | - | 1,230.0 | - | #N/A | - | 12,435.9 | - | - | 6,331.8 | - | - | - | - |
| | pH 5 | - | 1,260.0 | - | 550.0 | - | 12,435.9 | - | - | 6,192.5 | - | - | - | - |
| | pH 6 | - | 1,065.0 | - | 840.0 | - | 11,794.9 | - | - | 5,757.9 | - | - | - | - |
| | pH 7 | - | 1,230.0 | - | 1,460.0 | - | 11,538.5 | - | - | 6,329.4 | - | - | - | - |

หมายเหตุ: - คือ ไม่มีการวิเคราะห์ตัวอย่าง * คือ ที่สภาวะคงตัว
 #N/A คือ ไม่สามารถหาค่าได้ Inf คือ น้ำเสียเข้าระบบ (Influent)
 Eff คือ น้ำเสียทิ้งจากระบบ (Effluent) % Re คือ ร้อยละ ของประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ (Removal)
 หน่วยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้

VFA มีหน่วยเป็น mg/L as CH₃COOH COD มีหน่วยเป็น mg/L S²⁻ มีหน่วยเป็น mg/L
 Alkalinity มีหน่วยเป็น mg/L as CaCO₃ Sulfate มีหน่วยเป็น mg/L H₂S มีหน่วยเป็น mg/L

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 5 | pH 2.43 | 4.15 | 1,245.0 | 1,335.0 | #N/A | 56.7 | 12,669.2 | 6,998.2 | 44.8 | 6,625.2 | 6,088.1 | 8.1 | - | - |
| | pH 4 | 4.64 | 420.0 | 2,630.0 | #N/A | 1,163.3 | 12,158.4 | 7,254.2 | 40.3 | 6,224.6 | 4,717.6 | 24.2 | - | - |
| | pH 5 | 5.09 | 390.0 | 2,985.0 | 160.0 | 1,403.3 | 12,669.2 | 5,593.9 | 55.8 | 6,651.5 | 4,041.5 | 39.2 | - | - |
| | pH 6 | 5.20 | 420.0 | 3,160.0 | 0 | 1,703.3 | 13,690.9 | 6,743.3 | 50.7 | 6,865.7 | 4,110.4 | 40.1 | - | - |
| | pH 7 | 6.57 | 600.0 | 3,095.0 | 540.0 | 3,000.0 | 13,307.8 | 6,615.6 | 50.3 | 6,128.5 | 3,607.2 | 41.1 | - | - |
| 10 | pH 2.43 | 3.56 | 1,725.0 | 1,150.0 | #N/A | #N/A | 14,686.7 | 9,649.1 | 34.3 | 6,913.7 | 4,993.6 | 27.8 | - | - |
| | pH 4 | 4.59 | 1,575.0 | 4,290.0 | #N/A | 996.7 | 12,180.5 | 6,391.0 | 47.5 | 6,883.7 | 5,106.5 | 25.8 | - | - |
| | pH 5 | 4.86 | 1,500.0 | 4,300.0 | 690.0 | 1,670.0 | 15,188.0 | 5,701.8 | 62.5 | 7,027.8 | 4,403.9 | 37.3 | - | - |
| | pH 6 | 4.81 | 1,530.0 | 4,515.0 | 1,120.0 | 1,553.3 | 13,558.9 | 6,015.0 | 55.6 | 6,455.9 | 4,832.2 | 25.2 | - | - |
| | pH 7 | 5.24 | 1,350.0 | 4,215.0 | 1,360.0 | 2,600.0 | 13,558.9 | 6,766.9 | 50.1 | 7,407.5 | 4,165.7 | 43.8 | - | - |
| 15 | pH 2.43 | 2.97 | 735.0 | 1,555.0 | #N/A | #N/A | 13,513.5 | 11,209.8 | 17.0 | 5,768.7 | 4,344.2 | 24.7 | - | - |
| | pH 4 | 4.51 | 1,230.0 | 4,335.0 | #N/A | 823.3 | 13,770.9 | 10,296.0 | 25.2 | 6,109.1 | 4,531.4 | 25.8 | - | - |
| | pH 5 | 4.76 | 1,252.5 | 4,405.0 | 535.0 | 1,580.0 | 14,157.0 | 8,893.2 | 37.2 | 8,877.8 | 4,371.1 | 50.8 | - | - |
| | pH 6 | 4.83 | 1,335.0 | 4,575.0 | 1,040.0 | 1,570.0 | 12,097.8 | 7,284.4 | 39.8 | 5,767.2 | 3,659.0 | 36.6 | - | - |
| | pH 7 | 5.15 | 577.5 | 4,635.0 | 1,835.0 | 2,403.3 | 15,186.6 | 9,922.8 | 34.7 | 6,323.2 | 4,030.5 | 36.3 | - | - |
| 20 | pH 2.43 | 2.86 | 2,220.0 | 1,710.0 | #N/A | #N/A | 15,819.7 | 12,213.1 | 22.8 | 6,527.6 | 4,837.2 | 25.9 | - | - |
| | pH 4 | 4.44 | 2,235.0 | 5,465.0 | #N/A | 1,036.7 | 14,453.6 | 8,251.4 | 42.9 | 6,101.5 | 4,202.4 | 31.1 | - | - |
| | pH 5 | 4.72 | 2,107.5 | 5,100.0 | 1,015.0 | 1,630.0 | 13,360.7 | 9,139.3 | 31.6 | 6,204.8 | 4,503.8 | 27.4 | - | - |
| | pH 6 | 4.84 | 1,005.0 | 5,225.0 | 1,470.0 | 2,256.7 | 14,043.7 | 8,866.1 | 36.9 | 6,218.0 | 4,781.8 | 23.1 | - | - |
| | pH 7 | 5.25 | 1,957.5 | 4,550.0 | 2,425.0 | 3,413.3 | 12,404.4 | 9,549.2 | 23.0 | 5,467.3 | 4,186.3 | 23.4 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 25 | pH 2.43 | 2.71 | 1,950.0 | 1,655.0 | #N/A | #N/A | 14,983.5 | 11,595.9 | 22.6 | 6,966.4 | 5,840.4 | 16.2 | - | - |
| | pH 4 | 4.39 | 1,845.0 | 5,525.0 | #N/A | 940.0 | 15,032.2 | 8,249.7 | 45.1 | 7,525.0 | 5,734.0 | 23.8 | - | - |
| | pH 5 | 4.71 | 1,792.5 | 5,190.0 | 795.0 | 1,823.3 | 14,388.7 | 7,863.6 | 45.3 | 6,920.2 | 5,648.4 | 18.4 | - | - |
| | pH 6 | 4.85 | 1,897.5 | 4,805.0 | 1,345.0 | 2,303.3 | 12,973.0 | 7,670.5 | 40.9 | 6,521.2 | 5,522.4 | 15.3 | - | - |
| | pH 7 | 5.30 | 1,327.5 | 4,475.0 | 1,560.0 | 3,530.0 | 14,646.1 | 7,863.6 | 46.3 | 7,318.0 | 4,677.9 | 36.1 | - | - |
| 30 | pH 2.43 | 2.76 | 2,145.0 | 1,710.0 | #N/A | #N/A | 13,257.6 | 13,775.3 | #N/A | 6,497.3 | 5,879.2 | 9.5 | - | - |
| | pH 4 | 4.49 | 2,085.0 | 6,075.0 | 150.0 | 1,113.3 | 13,888.9 | 9,608.6 | 30.8 | 6,753.5 | 6,171.9 | 8.6 | - | - |
| | pH 5 | 4.78 | 2,092.5 | 5,525.0 | 945.0 | 1,976.7 | 14,267.7 | 10,366.2 | 27.3 | 6,630.9 | 6,042.8 | 8.9 | - | - |
| | pH 6 | 4.95 | 1,342.5 | 5,080.0 | 930.0 | 2,436.7 | 14,141.4 | 10,934.3 | 22.7 | 6,682.6 | 6,234.3 | 6.7 | - | - |
| | pH 7 | 5.39 | 1,057.5 | 4,880.0 | 1,140.0 | 4,003.3 | 14,520.2 | 10,618.7 | 26.9 | 6,829.7 | 5,296.3 | 22.5 | - | - |
| 35 | pH 2.43 | 2.61 | 1,875.0 | 1,680.0 | #N/A | #N/A | 13,170.1 | 11,601.4 | 11.9 | 5,863.9 | 5,052.0 | 13.8 | - | - |
| | pH 4 | 4.44 | 1,897.5 | 5,455.0 | #N/A | 1,076.7 | 16,299.3 | 10,776.6 | 33.9 | 7,625.6 | 6,144.2 | 19.4 | - | - |
| | pH 5 | 4.74 | 1,890.0 | 5,155.0 | 760.0 | 1,893.3 | 14,666.7 | 10,707.9 | 27.0 | 7,310.3 | 5,745.2 | 21.4 | - | - |
| | pH 6 | 4.88 | 1,815.0 | 4,965.0 | 1,465.0 | 2,500.0 | 15,210.9 | 10,639.2 | 30.1 | 7,080.1 | 5,999.1 | 15.3 | - | - |
| | pH 7 | 5.39 | 1,777.5 | 4,995.0 | 2,360.0 | 4,156.7 | 13,034.0 | 11,051.6 | 15.2 | 7,374.8 | 5,255.5 | 28.7 | - | - |
| 40 | pH 2.43 | 2.55 | 2,002.5 | 1,200.0 | #N/A | #N/A | 14,098.8 | 14,814.8 | #N/A | 6,578.8 | 6,265.4 | 4.8 | - | - |
| | pH 4 | 4.43 | 1,972.5 | 5,555.0 | #N/A | 950.0 | 13,234.6 | 10,493.8 | 20.7 | 7,011.8 | 6,219.3 | 11.3 | - | - |
| | pH 5 | 4.70 | 1,905.0 | 5,580.0 | 680.0 | 1,900.0 | 12,864.2 | 11,111.1 | 13.6 | 6,622.4 | 5,890.0 | 11.1 | - | - |
| | pH 6 | 4.92 | 1,860.0 | 5,680.0 | 1,245.0 | 2,670.0 | 14,469.1 | 10,370.4 | 28.3 | 6,934.0 | 5,553.6 | 19.9 | - | - |
| | pH 7 | 5.54 | 1,822.5 | 5,212.5 | 1,800.0 | 4,815.0 | 13,851.9 | 10,185.2 | 26.5 | 7,221.2 | 4,570.1 | 36.7 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|----------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 45 | pH 2.43 | 2.56 | 1,957.5 | 1,850.0 | #N/A | #N/A | 14,761.0 | 13,690.3 | 7.3 | 6,910.9 | 6,307.9 | 8.7 | - | - |
| | pH 4 | 4.40 | 1,905.0 | 5,220.0 | #N/A | 963.3 | 15,015.9 | 11,523.3 | 23.3 | 6,927.6 | 6,005.5 | 13.3 | - | - |
| | pH 5 | 4.67 | 1,980.0 | 5,020.0 | 770.0 | 2,293.3 | 14,888.5 | 10,121.1 | 32.0 | 7,110.6 | 5,510.0 | 22.5 | - | - |
| | pH 6 | 4.89 | 1,927.5 | 5,170.0 | 1,280.0 | 2,693.3 | 14,888.5 | 9,356.3 | 37.2 | 6,878.8 | 5,174.9 | 24.8 | - | - |
| | pH 7 | 5.46 | 2,025.0 | 5,460.0 | 1,985.0 | 4,486.7 | 13,613.8 | 10,184.8 | 25.2 | 6,346.4 | 4,156.1 | 34.5 | - | - |
| 50 | pH 2.43 | 2.56 | 2,017.5 | 1,865.0 | #N/A | #N/A | 17,518.8 | 13,784.5 | 21.3 | 6,810.2 | 6,075.6 | 10.8 | - | - |
| | pH 4 | 4.42 | 2,107.5 | 5,245.0 | #N/A | 1,073.3 | 15,513.8 | 11,967.4 | 22.9 | 9,088.4 | 5,775.0 | 36.5 | - | - |
| | pH 5 | 4.70 | 2,077.5 | 5,395.0 | 900.0 | 1,810.0 | 15,889.7 | 11,401.5 | 28.2 | 8,274.6 | 5,363.0 | 35.2 | - | - |
| | pH 6 | 4.90 | 1,987.5 | 5,085.0 | 1,400.0 | 2,783.3 | 16,265.7 | 11,152.9 | 31.4 | 8,448.2 | 4,879.9 | 42.2 | - | - |
| | pH 7 | 5.57 | 1,822.5 | 4,860.0 | 2,075.0 | 4,665.0 | 16,140.4 | 10,025.1 | 37.9 | 8,039.8 | 4,388.6 | 45.4 | - | - |
| 55 | pH 2.43* | 2.45 | 1,942.5 | 1,770.0 | #N/A | #N/A | 16,577.9 | 14,505.6 | 12.5 | 6,717.5 | 6,482.9 | 3.5 | - | - |
| | pH 4 | 4.37 | 1,942.5 | 4,445.0 | #N/A | 980.0 | 15,393.7 | 12,611.0 | 18.1 | 6,829.1 | 7,724.1 | #N/A | - | - |
| | pH 5 | 4.61 | 1,897.5 | 4,930.0 | 815.0 | 1,693.3 | 15,156.9 | 12,078.2 | 20.3 | 7,030.0 | 6,588.6 | 6.3 | - | - |
| | pH 6 | 4.90 | 1,777.5 | 5,520.0 | 1,375.0 | 2,780.0 | 14,801.7 | 12,019.0 | 18.8 | 7,051.0 | 5,856.8 | 16.9 | - | - |
| | pH 7 | 5.57 | 1,822.5 | 4,690.0 | 2,160.0 | 4,476.7 | 16,341.0 | 13,262.3 | 18.8 | 7,493.8 | 5,093.0 | 32.0 | - | - |
| 60 | pH 2.43* | 2.71 | 2,092.5 | 1,950.0 | #N/A | #N/A | 13,530.1 | 14,563.4 | #N/A | 6,816.5 | 6,048.9 | 11.3 | 244.9 | 244.9 |
| | pH 4 | 4.55 | 2,287.5 | 5,495.0 | #N/A | 1,183.3 | 14,268.1 | 12,041.8 | 15.6 | 8,575.7 | 6,422.6 | 25.1 | - | - |
| | pH 5 | 4.79 | 2,175.0 | 5,760.0 | 790.0 | 2,003.3 | 14,145.1 | 10,873.3 | 23.1 | 7,111.9 | 5,974.9 | 16.0 | - | - |
| | pH 6 | 5.11 | 2,107.5 | 5,660.0 | 1,490.0 | 3,146.7 | 15,006.2 | 11,980.3 | 20.2 | 7,405.1 | 4,797.9 | 35.2 | - | - |
| | pH 7 | 5.56 | 1,950.0 | 5,625.0 | 2,235.0 | 4,903.3 | 14,883.2 | 11,426.8 | 23.2 | 7,511.5 | 4,218.0 | 43.8 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|----------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 65 | pH 2.43* | 2.17 | 2,100.0 | 1,975.0 | #N/A | #N/A | 12,461.5 | 15,256.4 | #N/A | 7,886.7 | 6,205.2 | 21.3 | 78.2 | 78.2 |
| | pH 4 | 4.42 | 2,077.5 | 5,495.0 | #N/A | 693.3 | 11,564.1 | 13,205.1 | #N/A | 7,739.5 | 6,325.4 | 18.3 | - | - |
| | pH 5 | 4.68 | 2,047.5 | 5,630.0 | 805.0 | 1,750.0 | 13,871.8 | 13,269.2 | 4.3 | 8,175.7 | 6,575.2 | 19.6 | - | - |
| | pH 6 | 5.02 | 2,040.0 | 5,530.0 | 1,455.0 | 3,103.3 | 14,512.8 | 13,397.4 | 7.7 | 9,324.8 | 5,507.7 | 40.9 | - | - |
| | pH 7 | 5.67 | 1,815.0 | 5,095.0 | 2,170.0 | 4,756.7 | 12,718.0 | 12,948.7 | #N/A | 8,254.8 | 4,678.3 | 43.3 | - | - |
| 70 | pH 2.43* | 2.34 | 2,107.5 | 2,155.0 | #N/A | #N/A | 13,309.3 | 15,027.0 | #N/A | 7,741.7 | 7,118.2 | 8.1 | 255.9 | 255.9 |
| | pH 4 | 4.65 | 2,085.0 | 5,080.0 | 765.0 | 1,803.3 | 14,991.0 | 11,843.8 | 21.0 | 8,216.1 | 6,857.4 | 16.5 | - | - |
| | pH 5 | 4.87 | 2,077.5 | 4,520.0 | 1,275.0 | 3,156.7 | 13,309.3 | 11,723.7 | 11.9 | 7,476.9 | 6,838.3 | 8.5 | - | - |
| | pH 6 | 5.17 | 2,010.0 | 4,760.0 | 2,600.0 | 5,220.0 | 14,270.3 | 11,783.8 | 17.4 | 7,774.5 | 5,458.3 | 29.8 | - | - |
| | pH 7 | 5.73 | 2,077.5 | 4,070.0 | 4,025.0 | 7,776.7 | 15,231.2 | 12,504.5 | 17.9 | 8,122.2 | 4,951.5 | 39.0 | - | - |
| 75 | pH 2.43* | 1.87 | 2,092.5 | 2,235.0 | #N/A | #N/A | 13,405.0 | 13,406.6 | #N/A | 7,711.9 | 7,722.3 | #N/A | - | - |
| | pH 4 | 4.49 | 2,332.5 | 4,920.0 | #N/A | 960.0 | 11,732.4 | 9,820.8 | 16.3 | 8,357.3 | 7,674.6 | 8.2 | - | - |
| | pH 5 | 4.77 | 2,122.5 | 4,775.0 | 655.0 | 1,906.7 | 12,927.1 | 11,135.0 | 13.9 | 8,733.5 | 7,422.9 | 15.0 | - | - |
| | pH 6 | 5.13 | 2,047.5 | 5,445.0 | 1,270.0 | 3,356.7 | 11,851.9 | 9,701.3 | 18.1 | 7,582.1 | 5,389.6 | 28.9 | - | - |
| | pH 7 | 5.55 | 1,815.0 | 5,190.0 | 1,730.0 | 4,506.7 | 12,329.8 | 11,015.5 | 10.7 | ,910.1 | 5,230.9 | 33.9 | - | - |
| 80 | pH 2.43* | 1.98 | 2,242.5 | 2,230.0 | #N/A | #N/A | 15,303.0 | 15,126.3 | 1.2 | 7,490.8 | 7,290.2 | 2.7 | 207.8 | 207.8 |
| | pH 4 | 4.50 | 2,242.5 | 5,190.0 | #N/A | 963.3 | 15,808.1 | 12,096.0 | 23.5 | 8,602.8 | 7,373.4 | 14.3 | - | - |
| | pH 5 | 4.82 | 2,227.5 | 5,152.5 | 650.0 | 2,000.0 | 15,681.8 | 12,601.0 | 19.6 | 8,188.5 | 6,483.5 | 20.8 | - | - |
| | pH 6 | 5.22 | 2,040.0 | 5,750.0 | 1,695.0 | 3,550.0 | 14,798.0 | 11,717.2 | 20.8 | 8,045.0 | 5,733.9 | 28.7 | - | - |
| | pH 7 | 5.60 | 1,912.5 | 5,815.0 | 2,070.0 | 4,486.7 | 14,166.7 | 11,843.4 | 16.4 | 7,633.9 | 4,946.5 | 35.2 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|----------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 80 | pH 4 | 4.50 | 2,242.5 | 5,190.0 | #N/A | 963.3 | 15,808.1 | 12,096.0 | 23.5 | 8,602.8 | 7,373.4 | 14.3 | - | - |
| | pH 5 | 4.82 | 2,227.5 | 5,152.5 | 650.0 | 2,000.0 | 15,681.8 | 12,601.0 | 19.6 | 8,188.5 | 6,483.5 | 20.8 | - | - |
| | pH 6 | 5.22 | 2,040.0 | 5,750.0 | 1,695.0 | 3,550.0 | 14,798.0 | 11,717.2 | 20.8 | 8,045.0 | 5,733.9 | 28.7 | - | - |
| | pH 7 | 5.60 | 1,912.5 | 5,815.0 | 2,070.0 | 4,486.7 | 14,166.7 | 11,843.4 | 16.4 | 7,633.9 | 4,946.5 | 35.2 | - | - |
| 85 | pH 2.43* | 1.81 | 2,580.0 | 2,650.0 | #N/A | #N/A | 16,144.4 | 15,731.8 | 2.6 | 7,913.0 | 7,891.4 | 0.3 | 66.9 | 66.9 |
| | pH 4 | 4.41 | 2,925.0 | 6,310.0 | #N/A | 856.7 | 14,579.0 | 14,442.3 | 0.9 | 8,815.3 | 8,142.0 | 7.6 | - | - |
| | pH 5 | 4.74 | 3,150.0 | 5,910.0 | 780.0 | 1,923.3 | 14,983.9 | 12,766.0 | 14.8 | 8,681.0 | 7,387.0 | 14.9 | - | - |
| | pH 6 | 5.16 | 2,970.0 | 6,290.0 | 1,355.0 | 3,460.0 | 15,757.6 | 13,281.8 | 15.7 | 8,178.7 | 6,066.2 | 25.8 | - | - |
| | pH 7 | 5.56 | 2,655.0 | 6,070.0 | 1,880.0 | 4,506.7 | 15,757.6 | 12,121.2 | 23.1 | 8,054.2 | 5,159.3 | 35.9 | - | - |
| 90 | pH 2.43 | - | 1,770.0 | - | #N/A | - | 12,865.3 | - | - | 7,065.3 | - | - | - | - |
| | pH 4 | 4.17 | 2,145.0 | 5,240.0 | #N/A | 340.0 | 13,687.5 | 13,561.0 | 0.9 | 8,737.8 | 8,463.4 | 3.1 | - | - |
| | pH 5 | 4.54 | 2,265.0 | 5,490.0 | 660.0 | 1,336.7 | 12,169.5 | 11,790.0 | 3.1 | 8,870.3 | 6,511.4 | 26.6 | - | - |
| | pH 6 | 4.96 | 2,625.0 | 5,390.0 | 1,220.0 | 2,763.3 | 11,157.5 | 11,916.5 | #N/A | 7,735.1 | 5,448.7 | 29.6 | - | - |
| | pH 7 | 5.40 | 1,785.0 | 4,580.0 | 2,185.0 | 3,776.7 | 11,410.5 | 12,675.5 | #N/A | 7,499.6 | 5,235.7 | 30.2 | - | - |
| 95 | pH 2.43 | - | 2,430.0 | - | #N/A | - | 14,231.2 | - | - | 7,569.7 | - | - | - | - |
| | pH 4 | 4.44 | 2,520.0 | 6,210.0 | #N/A | 880.0 | 13,573.6 | 11,439.1 | 15.7 | 9,467.9 | 8,350.5 | 11.8 | - | - |
| | pH 5 | 4.86 | 2,580.0 | 6,150.0 | 755.0 | 2,250.0 | 12,612.6 | 13,530.1 | #N/A | 8,726.2 | 6,745.7 | 22.7 | - | - |
| | pH 6 | 5.25 | 2,310.0 | 6,330.0 | 1,270.0 | 3,853.3 | 12,852.9 | 12,669.1 | 1.4 | 7,221.6 | 5,856.9 | 18.9 | - | - |
| | pH 7 | 5.82 | 2,055.0 | 5,740.0 | 1,770.0 | 4,840.0 | 12,372.4 | 13,407.1 | #N/A | 7,448.6 | 5,491.1 | 26.3 | - | - |
| 100 | pH 2.43 | - | 2,250.0 | - | #N/A | - | 15,501.9 | - | - | 7,664.8 | - | - | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 100 | pH 4 | 4.42 | 2,250.0 | 5,050.0 | #N/A | 953.3 | 15,985.1 | 12,416.4 | 22.3 | 8,239.5 | 7,118.7 | 13.6 | - | - |
| | pH 5 | 4.86 | 2,640.0 | 5,870.0 | 885.0 | 2,340.0 | 15,489.5 | 9,318.5 | 39.8 | 8,385.7 | 4,612.8 | 45.0 | - | - |
| | pH 6 | 5.19 | 2,625.0 | 6,160.0 | 1,515.0 | 3,606.7 | 17,100.4 | 8,575.0 | 49.9 | 7,355.7 | 5,906.4 | 19.7 | - | - |
| | pH 7 | 5.74 | 2,220.0 | 5,420.0 | 2,145.0 | 4,733.3 | 15,861.2 | 9,690.2 | 38.9 | 6,867.1 | 5,470.8 | 20.3 | - | - |
| 105 | pH 2.43 | - | 2,115.0 | - | #N/A | - | 16,324.8 | - | - | 8,237.6 | - | - | - | - |
| | pH 4 | 4.41 | 2,520.0 | 5,880.0 | 300.0 | 1,000.0 | 10,854.7 | 15,099.7 | #N/A | 9,318.8 | 8,131.7 | 12.7 | - | - |
| | pH 5 | 4.86 | 2,205.0 | 5,570.0 | 880.0 | 2,493.3 | 13,846.2 | 18,102.6 | #N/A | 8,442.1 | 7,067.0 | 16.3 | - | - |
| | pH 6 | 5.17 | 2,340.0 | 6,360.0 | 2,010.0 | 3,620.0 | 18,760.7 | 13,817.7 | 26.3 | ,764.4 | 6,000.7 | 22.7 | - | - |
| | pH 7 | 5.74 | 2,220.0 | 5,090.0 | 2,310.0 | 4,826.7 | 14,985.8 | 13,532.8 | 9.7 | 8,564.9 | 5,381.5 | 37.2 | - | - |
| 110 | pH 2.43 | - | 2,205.0 | - | #N/A | - | 16,895.0 | - | - | 5,054.5 | - | - | - | - |
| | pH 4 | 4.54 | 2,250.0 | 5,560.0 | #N/A | 1,153.3 | 16,012.2 | 13,363.8 | 16.5 | 5,545.1 | 7,970.3 | #N/A | - | - |
| | pH 5 | 4.95 | 2,265.0 | 4,890.0 | 755.0 | 2,573.3 | 14,794.5 | 15,038.1 | #N/A | 5,834.7 | 6,736.0 | #N/A | - | - |
| | pH 6 | 5.23 | 2,115.0 | 5,840.0 | 1,310.0 | 3,706.7 | 14,642.3 | 14,885.8 | #N/A | 5,996.0 | 6,520.1 | #N/A | - | - |
| | pH 7 | 5.87 | 2,100.0 | 4,990.0 | 2,065.0 | 4,963.3 | 14,946.7 | 10,776.3 | 27.9 | 6,249.5 | 5,449.2 | 12.8 | - | - |
| 115 | pH 2.43 | - | 2,370.0 | - | #N/A | - | 17,381.5 | - | - | 5,195.2 | - | - | - | - |
| | pH 4 | 4.54 | 2,295.0 | 5,660.0 | #N/A | 1,273.3 | 15,169.3 | 13,273.1 | 12.5 | 5,496.4 | 6,645.8 | #N/A | - | - |
| | pH 5 | 5.02 | 2,340.0 | 5,720.0 | 780.0 | 2,963.3 | 19,985.0 | 14,627.5 | 26.8 | 5,931.3 | 5,768.9 | 2.7 | - | - |
| | pH 6 | 5.22 | 2,250.0 | 5,450.0 | 1,450.0 | 3,886.7 | 14,567.3 | 12,972.2 | 11.0 | 5,764.9 | 5,370.5 | 6.8 | - | - |
| | pH 7 | 5.97 | 2,040.0 | 5,370.0 | 1,725.0 | 5,300.0 | 16,373.2 | 14,928.5 | 8.8 | 5,872.1 | 4,597.4 | 21.7 | - | - |
| 120 | pH 2.43 | - | 1,935.0 | - | #N/A | - | 19,134.2 | - | - | 5,322.2 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.24 | 2,115.0 | 4,070.0 | #N/A | 613.3 | 12,554.1 | 14,314.6 | #N/A | 5,443.1 | 5,126.2 | 5.8 | 105.6 | 104.6 |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 120 | pH 5* | 4.85 | 2,085.0 | 4,920.0 | 650.0 | 2,520.0 | 15,151.5 | 13,015.9 | 14.1 | 5,813.0 | 4,141.7 | 28.8 | 557.1 | 551.5 |
| | pH 6* | 5.03 | 1,995.0 | 5,340.0 | 665.0 | 3,160.0 | 13,131.3 | 12,438.7 | 5.3 | 5,575.0 | 3,883.6 | 30.3 | 563.8 | 558.1 |
| | pH 7* | 5.88 | 1,695.0 | 4,360.0 | 565.0 | 4,976.7 | 14,574.3 | 12,150.1 | 16.6 | 5,739.4 | 3,145.4 | 45.2 | 864.7 | 786.8 |
| 125 | pH 2.43 | - | 2,145.0 | - | #N/A | - | 18,042.6 | - | - | 5,634.7 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.47 | 2,190.0 | 5,570.0 | #N/A | 1,116.7 | 17,900.7 | 14,212.8 | 20.6 | 5,488.4 | 4,883.6 | 11.0 | 201.6 | 199.6 |
| | pH 5* | 5.09 | 2,145.0 | 5,530.0 | 770.0 | 3,104.7 | 18,893.6 | 14,070.9 | 25.5 | 6,126.9 | 3,963.6 | 35.3 | 721.1 | 713.9 |
| | pH 6* | 5.22 | 2,010.0 | 5,020.0 | 1,380.0 | 3,686.7 | 18,468.1 | 13,645.4 | 26.1 | 6,318.1 | 4,132.4 | 34.6 | 728.6 | 721.3 |
| | pH 7* | 6.16 | 1,800.0 | 5,030.0 | 1,970.0 | 5,623.3 | 18,468.1 | 13,503.6 | 26.9 | 6,359.3 | 3,038.6 | 52.2 | 1,106.9 | 1,007.3 |
| 130 | pH 2.43 | - | 2,670.0 | - | #N/A | - | 16,095.6 | - | - | 5,703.7 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.53 | 2,565.0 | 5,670.0 | #N/A | 1,486.7 | 17,556.1 | 11,713.2 | 33.3 | 5,395.8 | 4,976.2 | 7.8 | 139.9 | 138.5 |
| | pH 5* | 5.17 | 2,610.0 | 5,110.0 | 875.0 | 3,286.7 | 17,954.9 | 13,306.8 | 25.9 | 5,682.9 | 4,113.9 | 27.6 | 523.0 | 517.8 |
| | pH 6* | 5.30 | 2,415.0 | 5,450.0 | 1,505.0 | 3,900.0 | 14,900.4 | 11,713.2 | 21.4 | 5,617.6 | 4,083.0 | 27.3 | 511.5 | 506.4 |
| | pH 7* | 6.24 | 2,235.0 | 5,320.0 | 2,420.0 | 5,750.0 | 15,697.2 | 9,588.3 | 38.9 | 5,744.0 | 3,057.1 | 46.8 | 895.6 | 815.0 |
| 135 | pH 2.43 | - | 2,340.0 | - | #N/A | - | 14,480.4 | - | - | 5,012.4 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.64 | 2,340.0 | 4,480.0 | #N/A | 1,250.0 | 15,354.9 | 13,719.5 | 10.7 | 5,337.2 | 5,294.8 | 0.8 | - | - |
| | pH 5* | 5.17 | 2,340.0 | 5,090.0 | 880.0 | 3,106.7 | 14,559.9 | 13,378.8 | 8.1 | 4,785.8 | 3,008.0 | 37.1 | 592.6 | 586.7 |
| | pH 6* | 5.25 | 2,265.0 | 5,190.0 | 1,465.0 | 3,660.0 | 15,014.2 | 12,810.9 | 14.7 | 5,304.1 | 4,060.9 | 23.4 | 414.4 | 410.3 |
| | pH 7* | 6.22 | 2,010.0 | 4,550.0 | 2,340.0 | 5,623.3 | 16,149.9 | 13,038.1 | 19.3 | 5,832.1 | 3,094.2 | 46.9 | 912.6 | 830.5 |
| 140 | pH 2.43 | - | 2,115.0 | - | #N/A | - | 13,131.7 | - | - | 5,724.8 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.53 | 2,115.0 | 5,080.0 | #N/A | 1,213.3 | 15,255.0 | 12,431.8 | 18.5 | 5,296.8 | 4,626.2 | 12.7 | 223.5 | 221.3 |
| | pH 5* | 5.02 | 2,010.0 | 5,650.0 | 685.0 | 2,720.0 | 14,780.5 | 13,855.3 | 6.3 | 5,572.5 | 3,967.3 | 28.8 | 535.1 | 529.7 |

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

| Day | | pH | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | | S ²⁻ | H ₂ S |
|-----|---------|------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------|---------|---------|------|-----------------|------------------|
| | | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re | Eff | Eff |
| 140 | pH 7* | 6.01 | 1,815.0 | 4,730.0 | 1,695.0 | 5,216.7 | 17,864.8 | 13,143.5 | 26.4 | 6,043.1 | 3,525.4 | 41.7 | 839.2 | 763.7 |
| | pH 6* | 5.04 | 1,980.0 | 5,050.0 | 1,195.0 | 2,933.3 | 16,085.4 | 10,533.8 | 34.5 | 5,758.8 | 4,470.0 | 22.4 | 429.6 | 425.3 |
| 145 | pH 2.43 | - | 2,145.0 | - | #N/A | - | 15,632.2 | - | - | 5,931.8 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.58 | 2,100.0 | 4,490.0 | #N/A | 1,390.0 | 17,471.3 | 12,643.7 | 27.6 | 5,494.9 | 4,516.5 | 17.8 | 326.1 | 322.9 |
| | pH 5* | 5.00 | 2,235.0 | 4,880.0 | 785.0 | 2,750.0 | 15,044.7 | 12,516.0 | 16.8 | 5,689.7 | 3,787.9 | 33.4 | 634.0 | 627.6 |
| | pH 6* | 5.02 | 1,995.0 | 4,590.0 | 1,630.0 | 3,036.7 | 16,705.0 | 11,622.0 | 30.4 | 5,963.6 | 4,139.9 | 30.6 | 607.9 | 601.8 |
| | pH 7* | 5.88 | 1,845.0 | 4,230.0 | 1,850.0 | 4,933.3 | 14,150.7 | 12,771.4 | 9.7 | 5,767.3 | 3,214.0 | 44.3 | 851.1 | 774.5 |
| 150 | pH 2.43 | - | 1,785.0 | - | #N/A | | 11,829.5 | - | - | 3,901.4 | - | - | - | - |
| | pH 4* | 4.84 | 2,235.0 | 4,090.0 | #N/A | 2,010.0 | 16,544.2 | 14,446.4 | 12.7 | 5,811.8 | 4,824.2 | 17.0 | 329.2 | 325.9 |
| | pH 5* | 5.20 | 2,130.0 | 5,060.0 | 735.0 | 3,373.3 | 16,435.8 | 13,972.8 | 15.0 | 6,382.6 | 4,072.0 | 36.2 | 770.2 | 762.5 |
| | pH 6* | 5.21 | 2,265.0 | 4,940.0 | 1,445.0 | 3,550.0 | 13,830.7 | 10,183.5 | 26.4 | 5,538.2 | 4,284.3 | 22.6 | 418.0 | 413.8 |
| | pH 7* | 6.03 | 2,055.0 | 4,670.0 | 2,255.0 | 5,366.7 | 13,357.0 | 11,722.9 | 12.2 | 6,109.0 | 3,598.4 | 41.1 | 836.8 | 761.5 |

ภาคผนวก ก-2 ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียสภิมจากกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริกของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้น ปรับพีเอชให้เป็น 7 ด้วยเถ้าไม้ยางพารา ระยะกักพักทางจุลศาสตร์ 7 วัน (ใช้สำหรับภาพประกอบ 3-7 ถึง 3-12)

| Day | pH | | | VFA | | | Alkalinity | | | COD | | | | | Sulfate | | | | CH ₄ | | | |
|-----|------|------|------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|-----------|----------|----------|-------|------|---------|---------|---------|------|-----------------|-------------------|---|---|
| | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | % Re | | Inf | Eff | | % Re | | % CH ₄ | | |
| | | U | A | | U | A | | U | A | | U | A | U | A | | U | A | U | A | | | |
| 16 | 6.98 | 7.38 | 7.21 | 2,050.0 | 4,870.0 | 3,840.0 | 2,693.3 | 4,893.3 | 6,580.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,044.30 | 15,235.0 | 13,398.2 | 15.6 | 25.8 | 5,195.8 | 2,984.9 | 940.4 | 42.5 | 81.9 | - | - | |
| 19 | 6.90 | 6.09 | 7.05 | 3,160.0 | 5,200.0 | 4,550.0 | 3,270.0 | 4,773.3 | 7,006.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 24 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,146.4 | 18,065.9 | 12,231.2 | 5.64 | 36.1 | 5,436.7 | 4,708.0 | 810.8 | 13.4 | 85.1 | - | - | |
| 28 | 7.09 | 5.31 | 6.75 | 2,300.0 | 5,570.0 | 4,020.0 | 2,553.3 | 3,836.7 | 6,930.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 30 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,322.6 | 14,483.9 | 15,774.2 | 25.04 | 18.4 | 5,322.4 | 5,003.1 | 1,317.9 | 6.0 | 75.2 | - | - | |

หมายเหตุ: - คือ ไม่มีการวิเคราะห์ตัวอย่าง * คือ ที่สภาวะคงตัว
 #N/A คือ ไม่สามารถหาค่าได้ Inf คือ น้ำเสียเข้าระบบ (Influent)
 Eff คือ น้ำเสียทิ้งจากระบบ (Effluent) % Re คือ ร้อยละ ของประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ (Removal)
 U คือ ระบบ UASB A ระบบ ASBR
 หน่วยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้
 VFA มีหน่วยเป็น mg/L as CH₃COOH COD มีหน่วยเป็น mg/L CH₄ มีหน่วยเป็น %
 Alkalinity มีหน่วยเป็น mg/L as CaCO₃ Sulfate มีหน่วยเป็น mg/L H₂S มีหน่วยเป็น mg/L

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

| Day | pH | | | VFA | | | Alkalinity | | | COD | | | | | Sulfate | | | | CH ₄ | | |
|-----|------|------|------|---------|---------|----------|------------|---------|---------|----------|----------|-----------|-------|------|---------|---------|---------|------|-----------------|------|-----|
| | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | % Re | | Inf | Eff | | % Re | | % | |
| | | U | A | | U | A | | U | A | | U | A | U | A | | U | A | U | A | U | A |
| 33 | 7.09 | 5.78 | 7.72 | 2,145.0 | 3,760.0 | 5,620.0 | 2,375.0 | 3,743.3 | 7,410.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 34 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,829.7 | 13,396.0 | 13,500.5 | 28.86 | 28.3 | 5,482.6 | 4,525.1 | 843.9 | 17.5 | 84.6 | - | - |
| 36 | 7.11 | 5.31 | 6.86 | 2,120.0 | 4,880.0 | 5,720.0 | 2,650.0 | 3,716.7 | 7,686.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 37 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 23,872.2 | 14,849.6 | 16,729.3 | 37.8 | 29.9 | 5,674.4 | 4,467.6 | 563.2 | 21.3 | 90. | - | - |
| 41 | 7.04 | 5.23 | 6.82 | 2,820.0 | 4,830.0 | 5,970.0 | 3,030.0 | 4,210.0 | 8,436.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 42 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 16,827.8 | 14,854.9 | 14,700.2 | 11.7 | 12.6 | 5,094.8 | 4,851.2 | 603.2 | 4.8 | 88.2 | - | - |
| 51 | 6.96 | 5.15 | 6.38 | 2,200.0 | 5,290.0 | 7,360.0 | 2,700.0 | 3,640.0 | 6,900.0 | 14,699.2 | 9,624.1 | 10,000.0 | 34.5 | 32.0 | 5,251.1 | 4,612.5 | 1,111.5 | 12.2 | 78.8 | - | - |
| 53 | 7.08 | 5.25 | 6.53 | 2,440.0 | 5,540.0 | 6,530.0 | 2,646.7 | 3,533.3 | 6,966.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 54 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,496.4 | 4,728.5 | 901.1 | 14.0 | 83.6 | - | - |
| 55 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22,069.0 | 13,639.8 | 17,599.0 | 38.2 | 20.2 | - | - | - | - | - | - | - |
| 56 | 7.02 | 5.17 | 6.44 | 2,550.0 | 7,040.0 | 6,990.0 | 2,946.7 | 3,826.7 | 7,520.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 60 | 7.04 | 5.29 | 6.25 | 2,910.0 | 5,770.0 | 5,404.00 | 3,126.7 | 4,293.3 | 7,560.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 61 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17,777.8 | 15,241.5 | 15,724.6 | 14.3 | 11.5 | 5,119.5 | 4,716.0 | 1,402.2 | 7.9 | 72.6 | - | - |
| 63 | 7.06 | 5.3 | 6.12 | 2,710.0 | 6,180.0 | 7,090.0 | 2,873.3 | 4,013.3 | 7,093.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 64 | | | | | | | - | - | - | 16,243.1 | 15,690.6 | 13,480.7 | 3.4 | 17.0 | 4,761.1 | 4,680.6 | 1,481.3 | 1.7 | 68.9 | - | - |
| 65 | 7.07 | 5.13 | 6.03 | 2,430.0 | 6,910.0 | 7,200.0 | 2,726.7 | 3,940.0 | 6,806.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 66 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,438.7 | 14,721.2 | 14,349.44 | 20.2 | 22.2 | 5,078.8 | 4,498.8 | 1,681.7 | 11.4 | 66.9 | - | - |
| 67 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 46.6 | 4.1 |
| 69 | 6.99 | 4.96 | 5.83 | 1,960.0 | 5,980.0 | 6,020.0 | 2,400.0 | 3,266.7 | 5,733.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 70 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,793.4 | 14,954.3 | 14,954.30 | 20.4 | 20.4 | 5,179.5 | 4,416.7 | 2,001.6 | 14.7 | 61.4 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

| Day | pH | | | VFA | | | Alkalinity | | | COD | | | | | Sulfate | | | | CH ₄ | | |
|-----|------|------|------|----------|---------|---------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|------|------|---------|---------|----------|------|-----------------|------|------|
| | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | Eff | | % Re | | Inf | Eff | | % Re | | % | |
| | | U | A | | U | A | | U | A | | U | A | U | A | | U | A | U | A | | |
| 76 | 7.03 | 5.01 | 5.6 | 1,940.00 | 6,190.0 | 6,220.0 | 2,120.0 | 3,420.0 | 5,480.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 79 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,386.0 | 13,473.7 | 15,929.8 | 26.7 | 13.4 | 5,071.2 | 4,194.9 | 2,438.0 | 17.3 | 51.9 | - | - |
| 82 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 33.4 | 13.1 |
| 83 | 7.03 | 5.16 | 5.51 | 2,320.0 | 6,620.0 | 6,590.0 | 2,480.0 | 3,746.7 | 5,366.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 84 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,186.4 | 15,118.6 | 14,101.7 | 21.2 | 26.5 | 5,311.4 | 4,223.2 | 2,672.06 | 20.5 | 49.7 | - | - |
| 86 | 7.09 | 5.24 | 5.55 | 2,280.0 | 5,700.0 | 5,810.0 | 2,330.0 | 3,826.7 | 5,193.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 29.0 | 24.8 |
| 91 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17,840.9 | 14,810.6 | 13,484.9 | 17.0 | 24.4 | 5,073.8 | 4,206.1 | 3,206.5 | 17.1 | 36.8 | - | - |
| 92 | 7.09 | 5.19 | 5.37 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 93 | - | - | - | 2,200.0 | 5,630.0 | 5,840.0 | 2,580.0 | 3,913.3 | 4,826.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.4 | 8.2 |
| 96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17.2 | 29.8 |
| 97 | 6.98 | 5.25 | 5.32 | 2,100.0 | 5,310.0 | 5,350.0 | 2,660.0 | 3,906.7 | 4,526.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 98 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,957.2 | 15,232.8 | 14,301.7 | 19.6 | 24.6 | 4,868.9 | 4,027.4 | 4,128.7 | 17.3 | 15.2 | - | - |
| 101 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,260.3 | 14,831.8 | 16,482.5 | 18.8 | 9.7 | 4,167.6 | 4,055.4 | 3,969.4 | 2.7 | 4.8 | - | - |
| 104 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7.3 | 33.1 |

ภาคผนวก ก-3 ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ UASB และ ASBR ที่รับน้ำเสียสภิมจากกระบวนการจับตัวหางน้ำยางด้วยกรดซัลฟูริกของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้น ปรับพีเอชให้เป็น 8 ด้วยเถ้าไม้ยางพารา ระยะกักพักทางจุลศาสตร์ 7 วัน (ใช้สำหรับภาพประกอบ 3-7 ถึง 3-12)

| Day | pH | | | VFA | | | Alkalinity | | | COD | | | | Sulfate | | | | CH ₄ | | | |
|-----|------|------|------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|------|---------|---------|---------|---------|-----------------|------|---|---|
| | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | % | | % | Eff | | % Re | | Inf | Eff | | % Re | | % | |
| | | U | A | | U | U | | U | A | | U | A | U | A | | U | A | U | A | | |
| 107 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17,393.5 | 17,017.5 | 13,508.8 | 2.2 | 22.3 | 4,779.9 | 4,046.6 | 4,480.9 | 15.3 | 6.3 | - | - |
| 108 | 7.82 | 5.07 | 5.14 | 2,020.0 | 5,670.0 | 5,170.0 | 2,713.3 | 3,213.3 | 3,653.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 125 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22,246.1 | 16,152.9 | 14,838.7 | 27.4 | 33.3 | 4,863.3 | 3,346.7 | 2,584.8 | 31.2 | 46.8 | - | - |
| 126 | 7.97 | 7.15 | 6.75 | 1,970.0 | 4,010.0 | 4,880.0 | 2,840.0 | 4,386.7 | 5,840.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 129 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,737.1 | 17,706.1 | 17,586.6 | 10.3 | 10.9 | 5,471.8 | 3,873.0 | 3,167.9 | 29.2 | 42.1 | - | - |
| 132 | 7.73 | 6.77 | 6.33 | 1,690.0 | 4,880.0 | 5,630.0 | 2,773.3 | 4,973.3 | 5,853.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18,740.6 | 16,545.4 | 16,776.4 | 11.7 | 10.5 | 5,363.4 | 3,916.7 | 3,689.3 | 27.0 | 31.2 | - | - |
| 136 | 7.98 | 6.46 | 6.29 | 1,720.0 | 5,540.0 | 6,090.0 | 2,493.3 | 5,113.3 | 5,693.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 141 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20,379.3 | 15,551.7 | 15,206.9 | 23.7 | 25.4 | 4,495.1 | 3,689.2 | 3,227.0 | 17.9 | 28.2 | - | - |
| 142 | 7.92 | 7.49 | 7.05 | 2,355.0 | 7,440.0 | 6,840.0 | 2,660.0 | 7,520.0 | 8,580.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 147 | 7.91 | 7.33 | 7.09 | 2,340.0 | 6,420.0 | 6,300.0 | 2,590.0 | 7,710.0 | 9,370.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 16,925.7 | 14,560.8 | 14,898.6 | 14.0 | 12.0 | 4,659.7 | 3,980.6 | 2,258.3 | 14.6 | 51.5 | - | - |
| 152 | 8.13 | 6.8 | 7.31 | 2,040.0 | 5,985.0 | 6,960.0 | 2,850.0 | 6,790.0 | 9,810.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 154 | 8.02 | 7.19 | 6.88 | 1,980.0 | 6,135.0 | 6,825.0 | 2,650.0 | 6,120.0 | 8,410.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 155 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22,441.1 | 17,944.3 | 13,875.8 | 20.0 | 38.2 | 4,655.6 | 3,666.2 | 2,174.1 | 21.3 | 53.3 | - | - |

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

| Day | pH | | | VFA | | | Alkalinity | | | COD | | | | | Sulfate | | | | CH ₄ | | |
|-----|------|------|------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|------|------|---------|---------|---------|------|-----------------|------|------|
| | Inf | Eff | | Inf | Eff | | Inf | % | | % | Eff | | % Re | | Inf | Eff | | % Re | | % | |
| | | U | A | | U | U | | U | A | | U | A | U | A | | U | A | U | A | | |
| 170 | 7.95 | 6.97 | 6.92 | 2,130.0 | 6,345.0 | 6,285.0 | 3,000.0 | 7,830.0 | 6,090.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 172 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,066.9 | 16,024.3 | 14,198.8 | 16.0 | 25.5 | 4,553.2 | 3,630.9 | 2,156.8 | 20.3 | 52.6 | - | - |
| 173 | 7.96 | 7.06 | 7.13 | 2,160.0 | 5,910.0 | 6,105.0 | 2,880.0 | 6,080.0 | 9,500.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 176 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20,925.5 | 13,950.4 | 14,218.6 | 33.3 | 32.0 | 4,700.0 | 3,414.4 | 2,189.8 | 27.4 | 53.4 | - | - |
| 189 | 8.02 | 7.16 | 7.24 | 2,265.0 | 6,210.0 | 6,780.0 | 3,450.0 | 6,450.0 | 8,540.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 190 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,883.5 | 14,640.8 | 15,223.3 | 26.4 | 23.4 | 4,988.4 | 4,006.5 | 2,652.3 | 19.7 | 46.8 | - | - |
| 196 | 7.95 | 7.12 | 7.23 | 2,505.0 | 5,340.0 | 5,685.0 | 3,510.0 | 8,970.0 | 9,690.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 197 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 19,047.6 | 12,952.4 | 14,476.2 | 32.0 | 24.0 | 4,845.1 | 3,395.1 | 2,689.2 | 29.9 | 44.5 | - | - |
| 206 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 59.2 | 10.6 |
| 207 | 8.03 | 7.47 | 7.11 | 2,670.0 | 6,015.0 | 6,870.0 | 3,560.0 | 7,330.0 | 8,360.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 59.4 | 9.0 |
| 208 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20,180.2 | 13,333.3 | 14,955.0 | 33.9 | 25.9 | 4,952.3 | 3,723.2 | 2,554.2 | 24.8 | 48.4 | - | - |
| 209 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 61.2 | 6.2 |
| 211 | 7.92 | 7.15 | 7.5 | 2,640.0 | 6,300.0 | 6,555.0 | 3,520.0 | 6,750.0 | 8,840.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ภาคผนวก ก-4 ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์น้ำเสียและน้ำทิ้งของระบบ UASB 1 ที่รับน้ำเสียรวมจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นปรับพีเอชให้เป็น 7 ด้วยถ้ำไม้ยางพารา ระยะกักพักทางชลศาสตร์ 7 วัน (ยศวริศ เขตอนันต์, 2551)

| Day | pH | | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | |
|-----|------|------|-------|-------|------------|---------|---------|---------|------|---------|-------|------|
| | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re |
| 95 | 7.21 | 8.18 | 670.0 | 110.0 | 2,660.0 | 4,490.0 | 5,580.0 | 597.0 | 89.3 | 2,030.8 | 510.4 | 74.9 |
| 102 | 7.17 | 8.07 | 755.0 | 65.0 | 2,860.0 | 3,920.0 | 6,882.0 | 1,209.0 | 82.4 | 2,009.9 | 475.9 | 76.3 |
| 109 | 7.17 | 8.16 | 685.0 | 50.0 | 2,370.0 | 4,370.0 | 5,766.0 | 651.0 | 88.7 | 1,906.3 | 478.4 | 74.9 |
| 116 | 7.25 | 8.18 | 670.0 | 70.0 | 3,120.0 | 4,700.0 | 4,650.0 | 744.0 | 84.0 | 2,099.2 | 509.3 | 75.7 |

- หมายเหตุ:
- คือ ไม่มีการวิเคราะห์ตัวอย่าง
 - * คือ ที่สภาวะคงตัว
 - #N/A คือ ไม่สามารถหาค่าได้
 - Inf คือ น้ำเสียเข้าระบบ (Influent)
 - Eff คือ น้ำเสียทิ้งจากระบบ (Effluent)
 - % Re คือ ร้อยละ ของประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ (Removal)

หน่วยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้

| | | | |
|------------|------------------------------------------|---------|------------------|
| VFA | มีหน่วยเป็น mg/L as CH ₃ COOH | COD | มีหน่วยเป็น mg/L |
| Alkalinity | มีหน่วยเป็น mg/L as CaCO ₃ | Sulfate | มีหน่วยเป็น mg/L |

ภาคผนวก ก-5 ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำเสีย และน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย และน้ำทิ้งของระบบ ABR ที่รับที่รับน้ำเสียรวมจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางชั้นปรับพีเอชให้เป็น 7 ด้วยถ้ำไม้อย่างพารา ระยะกักพักทางชลศาสตร์ 7.5 วัน (กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรรม, 2550)

| Day | pH | | VFA | | Alkalinity | | COD | | | Sulfate | | |
|-----|------|------|---------|-------|------------|---------|---------|---------|------|---------|-------|------|
| | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | Inf | Eff | % Re | Inf | Eff | % Re |
| 181 | 7.60 | 7.73 | 1,114.0 | 118.0 | 2,435.0 | 4,782.0 | 5,575.0 | 1,271.0 | 77.2 | 2,480.0 | 126.0 | 94.9 |
| 188 | 7.64 | 7.69 | 1,014.0 | 114.0 | 2,455.0 | 4,584.0 | 6,943.0 | 1,311.0 | 81.1 | 2,250.0 | 106.0 | 95.3 |
| 195 | 7.61 | 7.69 | 957.0 | 114.0 | 2,376.0 | 4,623.0 | 6,455.0 | 1,291.0 | 80.0 | 2,296.0 | 114.0 | 95.0 |
| 202 | 7.59 | 7.69 | 1,004.0 | 24.0 | 1,851.0 | 4,505.0 | 6,064.0 | 1,271.0 | 79.0 | 2,293.0 | 130.0 | 94.3 |

หมายเหตุ: - คือ ไม่มีการวิเคราะห์ตัวอย่าง
 * คือ ที่สภาวะคงตัว
 #N/A คือ ไม่สามารถหาค่าได้
 Inf คือ น้ำเสียเข้าระบบ (Influent)
 Eff คือ น้ำเสียทิ้งจากระบบ (Effluent)
 % Re คือ ร้อยละ ของประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ (Removal)
 หน่วยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีดังนี้

| | | | |
|------------|------------------------------------------|---------|------------------|
| VFA | มีหน่วยเป็น mg/L as CH ₃ COOH | COD | มีหน่วยเป็น mg/L |
| Alkalinity | มีหน่วยเป็น mg/L as CaCO ₃ | Sulfate | มีหน่วยเป็น mg/L |

ภาคผนวก ข

วิธีคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) จากร้อยละการกำจัดซัลเฟต
ในระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง

1. วิธีการคำนวณหาซัลไฟด์ทั้งหมดจากร้อยละการกำจัดซัลเฟตในระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่องจากสมการเคมีดังนี้ คือ



โดย Sulfate 1 mole \longrightarrow Sulfide 1 mole

Sulfate 96 g \longrightarrow Sulfide 33 g

∴ Sulfate 96 mg \longrightarrow Sulfide 33 mg

Sulfate 1 g \longrightarrow Sulfide $\frac{33}{96}$ g

ถ้า Sulfate X g \longrightarrow Sulfide $\left(\frac{X \times 33}{96}\right)$ g

จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้ คือ

$$S_T = \left(\frac{X \times 33}{96}\right) \quad (13)$$

โดยที่ S_T = ปริมาณ Total Sulfide (g หรือ mg)

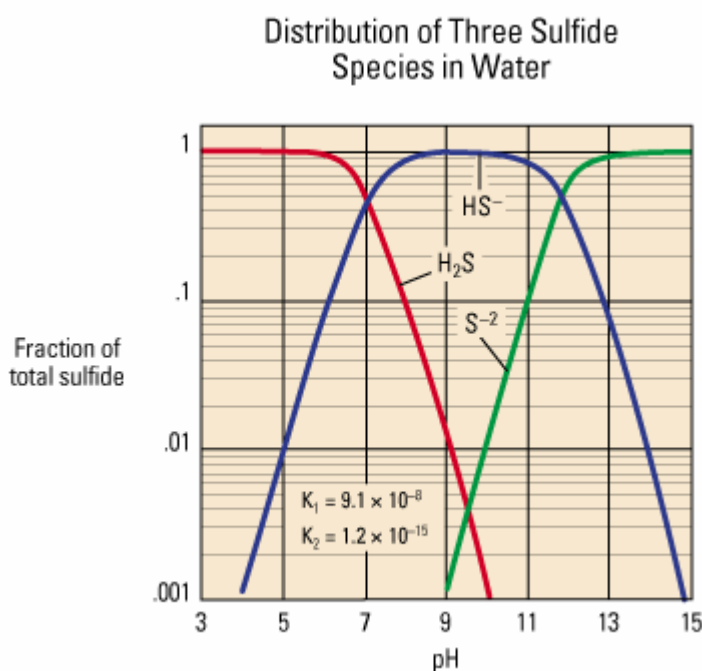
X = ปริมาณซัลเฟตที่ระบบกำจัดได้ (g หรือ mg)

ถ้าในน้ำเสีย 1 L เมื่อเข้าสู่ระบบไร้อากาศ และสามารถกำจัดซัลเฟตได้ 96 mg จะมีซัลไฟด์ในน้ำทิ้ง 33 mg

ดังนั้น Sulfate 96 mg/L \longrightarrow Sulfide 33 mg/L

2. วิธีการคำนวณหาไฮโดรเจนซัลไฟด์จากร้อยละการกำจัดซัลเฟตในระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง

เมื่อได้ปริมาณ Total Sulfide จากข้อ 1. แล้ว แต่ Total Sulfide ประกอบด้วย H_2S และ HS^- ภายใต้เงื่อนไขที่พีเอชของน้ำเสียมีค่าน้อยกว่า 9 แสดงดังภาพประกอบ ข-1 ซึ่ง Total Sulfide สามารถเปลี่ยนรูปตามพีเอชได้ดังสมการต่อไปนี้ คือ



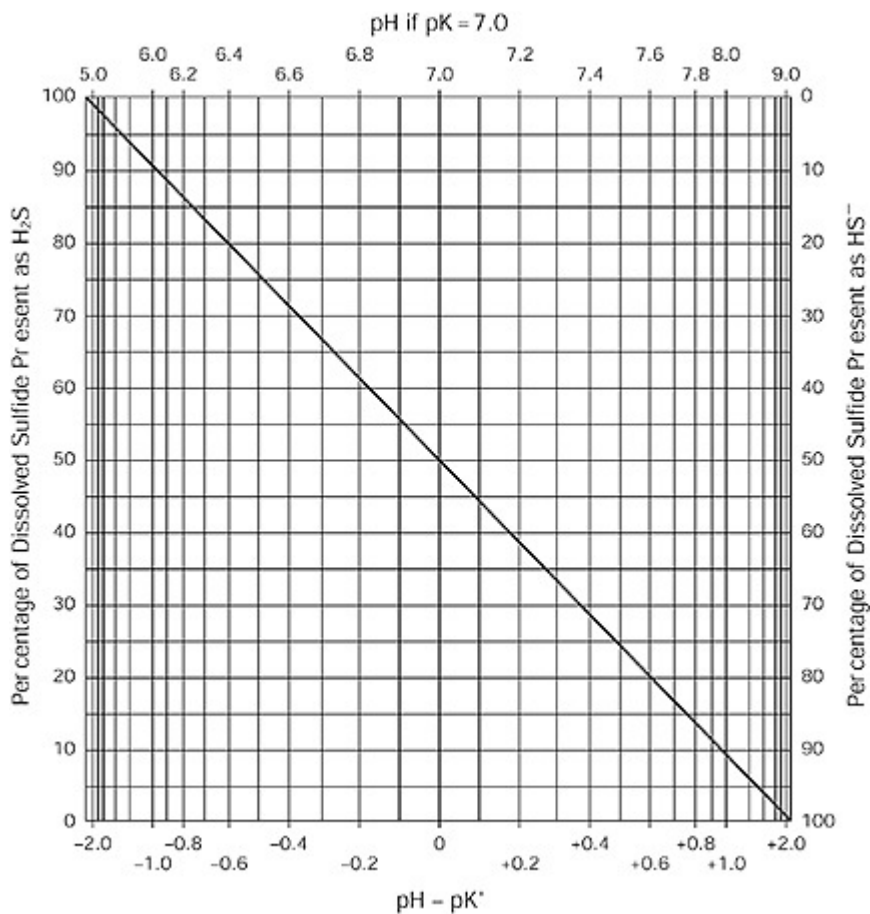
ภาพประกอบ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับการเปลี่ยนแปลงของซัลไฟด์
ที่มา: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/DisplayImage.cfm?ID=408>

จากสมการ (14) จะได้

$$K' = \frac{[H^+][HS^-]}{[H_2S]} \quad (15)$$

$$pH - pK' = \log \frac{[HS^-]}{[H_2S]} \quad (16)$$

จากสมการ (16) เมื่อทราบค่า pK' สามารถนำไปใช้ในสมการ (17) หรือนำไปหาสัดส่วน H_2S / Total Sulfide จากภาพประกอบ ข-2



ภาพประกอบ ข-2 สัดส่วนของ H₂S และ HS⁻ ของซัลไฟด์ในน้ำ

ที่มา: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/DisplayImage.cfm?ID=408>

$$\alpha_{H_2S} = \frac{[H_2S]}{S_T} = \frac{1}{10^{pH-pK'} + 1} \quad (17)$$

โดยที่ S_T = ปริมาณ Total Sulfide (g หรือ mg)
 α_{H_2S} = อัตราส่วนระหว่าง H₂S / Total Sulfide
 pK' = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา ซึ่งได้จากตาราง ข-1

ตาราง ข-1 ตารางแสดงค่า pK' ในสมการ (17) ที่ระดับ Ionic Strength ต่าง ๆ

| Temperature | Ionic Strength | | | | | | |
|-------------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $^{\circ}C$ | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.10 |
| 0 | 7.36 | 7.33 | 7.32 | 7.30 | 7.29 | 7.27 | 7.24 |
| 20 | 7.05 | 7.02 | 7.00 | 6.99 | 6.97 | 6.96 | 6.92 |
| 25 | 6.98 | 6.95 | 6.94 | 6.92 | 6.91 | 6.85 | 6.86 |
| 30 | 6.92 | 6.89 | 6.87 | 6.86 | 6.84 | 6.83 | 6.79 |

หมายเหตุ: คัดแปลงจาก Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2005

$$Ionic\ Strength = 1.6 \times 10^{-5} C \quad (18)$$

โดยที่ $C = \text{Conductivity, } \mu\text{mhos/cm}$

ตัวอย่าง A

กำหนดให้น้ำเสียมีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 4,167.6 mg/L เมื่อผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศ มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 4,055.4 mg/L พีเอชเท่ากับ 5.25 Conductivity เท่ากับ 15,360 $\mu\text{s/cm}$ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบคือ 330 mL/day อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$

$$Sulfate\ Loding \left(\frac{mg}{day} \right) = Sulfate\ Concentration \left(\frac{mg}{L} \right) \times Flow \left(\frac{L}{day} \right) \quad (19)$$

$$\text{จากสมการ (13)} \quad S_T = \left(\frac{X \times 33}{96} \right)$$

ความเข้มข้นของซัลเฟตก่อนบำบัดเท่ากับ 4,167.6 mg/L, ความเข้มข้นของซัลเฟตหลังบำบัดเท่ากับ 4,055.4 mg/L และ อัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ คือ 330 ml/day แทนค่าในสมการ (13)

$$\text{จะได้} \quad S_T = \left(\frac{(4,167.6 - 4,055.4) \times 33}{96} \right)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad S_T = 38.57 \text{ mg/L} \quad \text{นำไปแทนในสมการที่ (17)}$$

$$\alpha_{H_2S} = \frac{[H_2S]}{S_T} = \frac{1}{10^{pH-pK'} + 1}$$

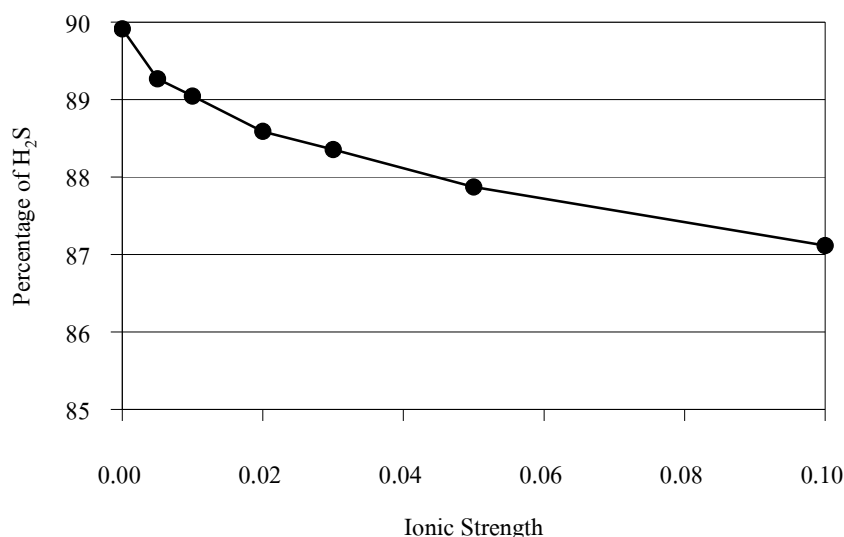
หาค่า pK' จากตาราง ข-1 และ สมการที่ (18)

จากตัวอย่างกำหนดให้ Conductivity = 15,360 $\mu\text{s/cm}$
เปลี่ยนหน่วยโดย $1 \mu\text{mhos/cm} = 1 \mu\text{s/cm}$

จากสมการ (18) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Ionic Strength} &= (1.6 \times 10^{-5}) \times 15,360 \\ &= 0.25 \quad \text{นำไปเทียบค่า } pK' \text{ จากตาราง ข-1} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่า Ionic Strength ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าที่มีในตาราง ข-1 ถึงแม้ว่า Ionic Strength จะ >0.1 แต่ส่งผลให้ α_{H_2S} แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยความสัมพันธ์ ระหว่างค่า Ionic Strength ที่ระดับต่างๆ ในตาราง ข-1 และร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงดัง ภาพประกอบ ข-3



ภาพประกอบ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ionic Strength กับการเปลี่ยนแปลงร้อยละไฮโดรเจนซัลไฟด์
เมื่อได้ค่า $pK' = 6.89$ แล้ว นำไปแทนในสมการ (17)

ในที่นี้จะเลือกใช้ค่า pK' ที่ค่า Ionic Strength = 0.1 ที่อุณหภูมิ = 25 °C จะได้ $pK' = 6.89$

$$\alpha_{H_2S} = \frac{[H_2S]}{S_T} = \frac{1}{10^{pH-pK'} + 1}$$

กำหนดให้ pH = 6.98 จะได้ว่า

$$\alpha_{H_2S} = \frac{1}{10^{6.98-6.89} + 1} = 0.9760$$

$$\alpha_{H_2S} = 0.9760 = \frac{[H_2S]}{38.57}$$

$$[H_2S] = 38.57 \times 0.9760 = 37.64 \text{ mg/L}$$

ดังนั้นถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 4,167.6 mg/L เมื่อผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศ มีความเข้มข้นของซัลเฟต = 4,055.4 mg/L พีเอช = 5.25 Conductivity = 15,360 $\mu\text{s/cm}$ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบคือ 330 mL/day อุณหภูมิ 25 °C จะเกิดซัลไฟด์ 38.57 mg/L และเป็น H₂S = 37.64 mg/L (คิดเป็นร้อยละ 97.6 ของปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด)

ประวัติผู้เขียน

| | | | |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | พีริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร | | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 4910920023 | | |
| วุฒิการศึกษา | | | |
| | วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| | วิทยาศาสตร์บัณฑิต | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2548 |
| (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม) | | | |

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

พีริภรณ์ ปรีชาเลิศมิตร, สุเมธ ไชยประพัทธ์ และปิยรัตน์ บุญแสวง. 2552 “ผลของพีเอชในการบำบัดน้ำเสียที่ซัลเฟตสูงด้วยระบบไร้อากาศแบบกะกึ่งต่อเนื่อง” เอกสารประกอบการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระหว่างวันที่ 10-11 กันยายน 2552