

จลนศาสตร์การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัส
แอนแอโรบิก

นางสาว จารุณี เรียมพิมพ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา พ.ศ. 2545
ISBN 974-533-167-8

**KINETICS OF TAPIOCA - STARCH WASTEWATER TREATMENT USING ANAEROBIC
CONTACT PROCESS**

Jarunee Reampim

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2002

ISBN 974-533-167-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

จลนศาสตร์การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก
KINETIC OF TAPIOCA - STARCH WASTEWATER TREATMENT USING ANAEROBIC CONTACT

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ)
ประธานกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ดร. ธรรมรัตน์ คุณตะเทพ)

กรรมการ

.....
(ดร. ศาโรจน์ บุญยกิจสมบัติ)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร. วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จารุณี เรียมพิมพ์ : จลนศาสตร์การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก (KINETICS OF TAPIOCA - STARCH WASTEWATER TREATMENT USING ANAEROBIC CONTACT PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ, 59 หน้า. ISBN 974-533-167-8

มลพิษจากน้ำทิ้งโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง ซึ่งหากขาดการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีก็จะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก (Anaerobic Contact Process) ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งค่า COD ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง 3,000 – 15,000 mg/L โดยมีระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน จากการศึกษาพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลด COD อยู่ระหว่างร้อยละ 32 – 80 และได้ศึกษาหาค่าตัวแปรทางวิศวกรรมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ กล่าวคืออัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลชีพ (k) และค่าคงที่ครึ่งความเร็ว (K_s) คือ 2 mg/(mg-d) และ 2253 mg/L ตามลำดับ ตลอดจนศึกษาชนิดกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ คือ กรดแลคติก, กรดอะเซติก, กรดโพรไพโอนิก และ กรดบิวทิลิก ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยดังนี้ คือ 107.2 ± 92 , 496.8 ± 290 , 1639.2 ± 321 และ 888.1 ± 407 mg/L ตามลำดับ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

JARUNEE REAMPIM : KINETICS OF TAPIOCA - STARCH WASTEWATER
TREATMENT USING ANAEROBIC CONTACT PROCESS WITH STEEL PLATES
ADVISOR : CHONGGIN POLPRASERT , 59 PP. ISBN 974-533-167-8

KINETIC OF TAPIOCA - STARCH WASTEWATER TREATMENT USING ANAEROBIC CONTACT

Starch wastewater contains such a high content of organics that, unless proper control, can severely pollute the environment of the receiving-water bodies. In this study, an anaerobic contact process was used to treat the tapioca-starch wastewater containing COD in the range of 3,000–15,000 mg/L with a series of hydraulic retention times (HRT) of 10, 7, 5, 2.5, and 1 days. The process operation was found to have the COD removal between 32 – 80% with the maximum substrate utilization rate coefficient (k) and the half-velocity constant (K_s) of 2 mg/(mg-d) and 2253mg/L, respectively. Resulting from the degradation of organic complexes, the following average concentrations of organic acids present in the reactors at various HRT's were : lactic acid equi 107.2 ± 92 , acetic acid equi 496.8 ± 290 , propionic acid equi 1639.2 ± 321 , and butyric acid equi 888.1 ± 407 mg/L.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน) ประจำปี 2544 เพื่อเป็นทุนอุดหนุนการวิจัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้ความรู้ แนะนำแนวทางในการวิจัย และให้คำปรึกษาในด้านวิชาการต่างๆ ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ดร. ชรรมรัตน์ กุตตะเทพ และ ดร. ศาโรช บุญยกิจสมบัติ คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทำให้การทดลองวิจัยเป็นไปด้วยดีและขอขอบคุณ บริษัทเจ้าพระยาพีชไร้ ซึ่งให้น้ำจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง มาใช้ในการวิจัย

ความดีทั้งหลายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บุพการีซึ่งให้การสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาตลอด

จารุณี เรียมพิมพ์

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ฅ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 บทนำ..... | 3 |
| 2.1.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง..... | 3 |
| 2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง | 3 |
| 2.2 กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก | 5 |
| 2.2.1 ระบบสัมผัสแอนแอโรบิก (Anaerobic Treatment Process) | 5 |
| 2.2.2 ถังแบบฟิล์มตรึง (Fixed-Film Reactor) | 5 |
| 2.2.3 ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิด ไคซ์ (Fluidised Bed Reactor)..... | 6 |
| 2.2.4 ถังไร้อากาศแบบชั้นตะกอน (Anaerobic Sludge Banket Reactor) | 6 |
| 2.2.5 ถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Baffled Reactor) | 7 |
| 2.3 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก | 8 |
| 2.3.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ | 8 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | ชีวเคมีของกระบวนการสร้างมีเทน | 10 |
| 2.4 | ทฤษฎีจลนศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา..... | 12 |
| 2.4.1 | จลนศาสตร์ของการเจริญเติบโตของจุลชีพ | 12 |
| 2.4.2 | จลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบกวนตีที่ไม่มีกรไหลวนกลับ | 17 |
| 2.5 | สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมของระบบ | 18 |
| 2.5.1 | อุณหภูมิ..... | 18 |
| 2.5.2 | สารอาหารจำเป็นสำหรับการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ | 20 |
| 2.5.3 | สภาพความเป็นกรดและด่าง | 19 |
| 2.5.4 | สารพิษ | 19 |
| 2.6 | ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก | 19 |
| 2.7 | ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระบบแอนแอโรบิก..... | 20 |
| 2.7.1 | ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ | 20 |
| 2.7.2 | ระดับความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตและระดับ pH..... | 21 |
| 2.7.3 | อัตราการผลิตมีเทน | 21 |
| 2.7.4 | อื่นๆ..... | 21 |
| 2.8 | สาเหตุของการเสียสมดุลย์ของระบบแอนแอโรบิก | 22 |
| 3 | วิธีดำเนินการวิจัย..... | 23 |
| 3.1 | การเตรียมน้ำตัวอย่าง..... | 23 |
| 3.2 | การวิเคราะห์น้ำ..... | 23 |
| 3.3 | การสร้างแบบจำลองของกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก..... | 23 |
| 3.4 | ขั้นตอนการทดลอง | 24 |
| 3.4.1 | ลักษณะทางชลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์..... | 24 |
| 3.4.2 | การเริ่มต้นระบบ..... | 25 |
| 3.4.3 | ขั้นตอนการทดลอง | 25 |
| 3.5 | กลุ่มตัวอย่าง | 26 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.6 | ตัวแปรที่ทำการวิจัย | 26 |
| 4 | ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล..... | 27 |
| 4.1 | ผลการวิเคราะห์ตัวแปรของน้ำเสีย | 27 |
| 4.2 | ผลการทดลอง | 27 |
| 4.2.1 | ลักษณะทางชลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ | 27 |
| 4.2.2 | ผลการทดลอง | 29 |
| 4.3 | จลนศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง | 38 |
| 5 | สรุปผลการวิจัย..... | 41 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย | 41 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 41 |
| | เอกสารอ้างอิง | 42 |
| | ภาคผนวก | |
| | ภาคผนวก ก..... | 43 |
| | ภาคผนวก ข..... | 45 |
| | ประวัติผู้เขียน | 59 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นการกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง3 |
| 2.2 | ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิค19 |
| 3.1 | ตัวแปรและวิธีการวิเคราะห์23 |
| 4.1 | ตัวแปรของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....27 |
| 4.2 | ค่าการกระจายของไหล.....28 |
| 4.3 | ค่าเฉลี่ยอัตราส่วน BOD : COD.....32 |
| 4.4 | ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ34 |
| 4.5 | ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ 38 |
| 4.6 | ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ.....36 |
| 4.7 | ความสัมพันธ์ของกรดอินทรีย์และความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีที่จุดสมดุล.....38 |
| 4.8 | สรุปค่าสัมประสิทธิ์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง40 |
| ข.1 | ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน46 |
| ข.2 | ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน47 |
| ข.3 | ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน48 |
| ข.4 | ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 2.5 วัน49 |
| ข.5 | ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน50 |
| ข.6 | ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน.....51 |
| ข.7 | ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน.....52 |
| ข.8 | ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน.....53 |
| ข.9 | ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 2.5 วัน.....54 |
| ข.10 | ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน.....55 |
| ข.11 | พารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ56 |
| ข.12 | การทดลองทางศาสตร์ของถึงปฏิกรณ์57 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.1 | กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง..... 4 |
| 2.2 | ระบบสัมผัสแบบแอนแอโรบิค..... 6 |
| 2.3 | ระบบสัมผัสแบบแอนแอโรบิค..... 7 |
| 2.4 | ระบบถังกรองแอนแอโรบิคแบบไหลลง..... 7 |
| 2.5 | ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิดไดซ์..... 8 |
| 2.6 | ถังไร้อากาศแบบชั้นตะกอน..... 8 |
| 2.7 | ถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น..... 9 |
| 2.8 | ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการแบบแอนแอโรบิค..... 11 |
| 2.9 | ปฏิกิริยาออกซิเดชันต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการสังเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์..... 12 |
| 2.10 | ลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สำหรับปริมาณอาหารต่าง ๆ..... 13 |
| 2.11 | ถังปฏิกรณ์แบบกวนตีที่ไม่มีการไหลวนกลับ..... 17 |
| 3.1 | รูปของถังปฏิกรณ์..... 24 |
| 4.1 | ลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์..... 29 |
| 4.2 | ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 30 |
| 4.3 | ค่าเฉลี่ย COD และ BOD ที่เหลืออยู่ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 31 |
| 4.4 | ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 31 |
| 4.5 | ค่าเฉลี่ยอัตราส่วน BOD : COD..... 32 |
| 4.6 | ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 33 |
| 4.7 | ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 35 |
| 4.8 | ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 36 |
| 4.9 | ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 37 |
| 4.10 | ความสัมพันธ์ของ COD และ Acetic Acid..... 37 |
| 4.11 | ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ..... 39 |
| 4.12 | ความสัมพันธ์ระหว่าง 1/U กับ 1/S..... 39 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|------------------|---|--|
| มก. | = | มิลลิกรัม |
| ชม. | = | ชั่วโมง |
| BOD ₅ | = | ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี |
| C _i | = | ความเข้มข้นของ CI ⁻ ที่ออกจากระบบที่เวลาหนึ่ง |
| COD | = | ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี |
| d | = | สัมประสิทธิ์การกระจาย |
| D | = | ค่าสัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน |
| HRT | = | ระยะเวลาเก็บกักน้ำ |
| k | = | อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลชีพ |
| K _s | = | สัมประสิทธิ์ในการใช้อาหารของจุลชีพ |
| L _i | = | ระยะของไหลจากทางเข้าถึงทางออก |
| SS | = | ค่าของแข็งแขวนลอย |
| TDS | = | ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะแวดล้อมปัจจุบัน แหล่งอุตสาหกรรมและชุมชนได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว สิ่งหนึ่งในหลายสิ่งๆ ที่สร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม คือ น้ำเสียที่ระบายออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเกินกว่าที่แหล่งน้ำจะสามารถรองรับได้ จึงทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย ถ้าเกิดในสภาพที่รุนแรงอาจทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้ ส่วนสิ่งที่ย่อยสลายไม่หมดจะเกิดการตกตะกอนทับถมกัน ทำให้แหล่งน้ำนั้นเกิดการตื้นเขินและไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีโรงงานผลิตแบริ่งน้ำมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำเสียตามมา ทางเลือกของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบริ่งน้ำมันสำปะหลังที่นิยมใช้ คือ ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามระบบบ่อบำบัดน้ำเสียเป็นระบบที่มีความต้องการพื้นที่มาก จึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงในการหาที่ดินเพื่อการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย ฉะนั้น ในการบำบัดน้ำเสียให้ได้น้ำสะอาดเราจึงต้องทราบวิธีทางกายภาพ วิธีทางชีวภาพหรือชีวเคมี วิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพเคมี โดยในแต่ละวิธีจะมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกัน บางวิธีเป็นเพียงการแยกขยะออกจากน้ำเสีย บางวิธีเป็นการกำจัดแยกสารละลายที่อยู่ในน้ำเสียออกมาและบางวิธีเป็นการย่อยสลายด้วยจุลินชีพ เพื่อแปรสภาพจากสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) ในการเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้ได้ถูกต้องเหมาะสมกับน้ำเสียนั้น ๆ จำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการการทำงานของวิธีบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ ดังนั้นการเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นศาสตร์ทั้งทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ควบคู่กันเสมอ

จากปัญหาดังกล่าว เราได้ตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลภาวะน้ำเสีย ดังนั้นเราจึงควรเลือกระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้ผลผลิตกลับมาใช้ได้เช่น แก๊สชีวภาพ ซึ่งในที่นี้จะใช้ระบบแอนแอโรบิกโดยเลือกใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก (Anaerobic Contact Process) จุดประสงค์หลักของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้คือการกำจัดหรือลดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ลงให้ได้มากที่สุด นั่นคือ ต้องการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย โดยอาศัยหลักการที่ใช้จุลินชีพต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลพลอยได้ของระบบแอนแอโรบิก คือ แก๊สมีเทน (CH₄)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1.2.1 ศึกษาจลนศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก
- 1.2.2 ศึกษาตัวแปรทางวิศวกรรมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการของวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1.3.1 เพื่อศึกษาสมการที่ใช้ในการอธิบายการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก
- 1.3.2 เพื่อหาค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก
- 1.3.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาเก็บกักและอัตราภาระอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก
- 1.3.4 เพื่อศึกษาหาชนิดกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

2.1.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยรากมันสำปะหลังจะถูกขนส่งเข้าสู่โรงงานและนำเข้าสู่กระบวนการผลิต เศษดินทรายที่ติดมากับหัวมันจะถูกกำจัดออกโดยอุปกรณ์หมุนเหวี่ยง มีการปอกเปลือกออกโดยเครื่องปอกเปลือก รากมันสำปะหลังที่ถูกปอกเปลือกจะถูกล้างอีกครั้งในขั้นตอนนี้จะมือน้ำเสียเกิดขึ้น หลังจากนั้น รากมันสำปะหลังจะถูกบดให้เป็นชิ้นละเอียดและนำไปแยกด้วยเครื่องแยกน้ำแป้ง ในขั้นตอนนี้จะมือน้ำเสียเกิดขึ้น เมื่อผ่านเครื่องแยกน้ำแป้งแล้วน้ำแป้งจะถูกนำไปสกัดแป้งด้วยการเติมน้ำกำมะถัน เมื่อผ่านกระบวนการสกัดแป้งแล้วก็จะทำการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้งซึ่งในขั้นตอนนี้จะมือน้ำเสียเกิดขึ้น นำน้ำแป้งขั้นนี้ไปทำให้แห้งซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายแล้วก็จะได้แป้งมันสำปะหลัง

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ดังนั้น จึงทำให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมากเช่นกัน จากตารางที่ 2.1 ได้แสดงลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

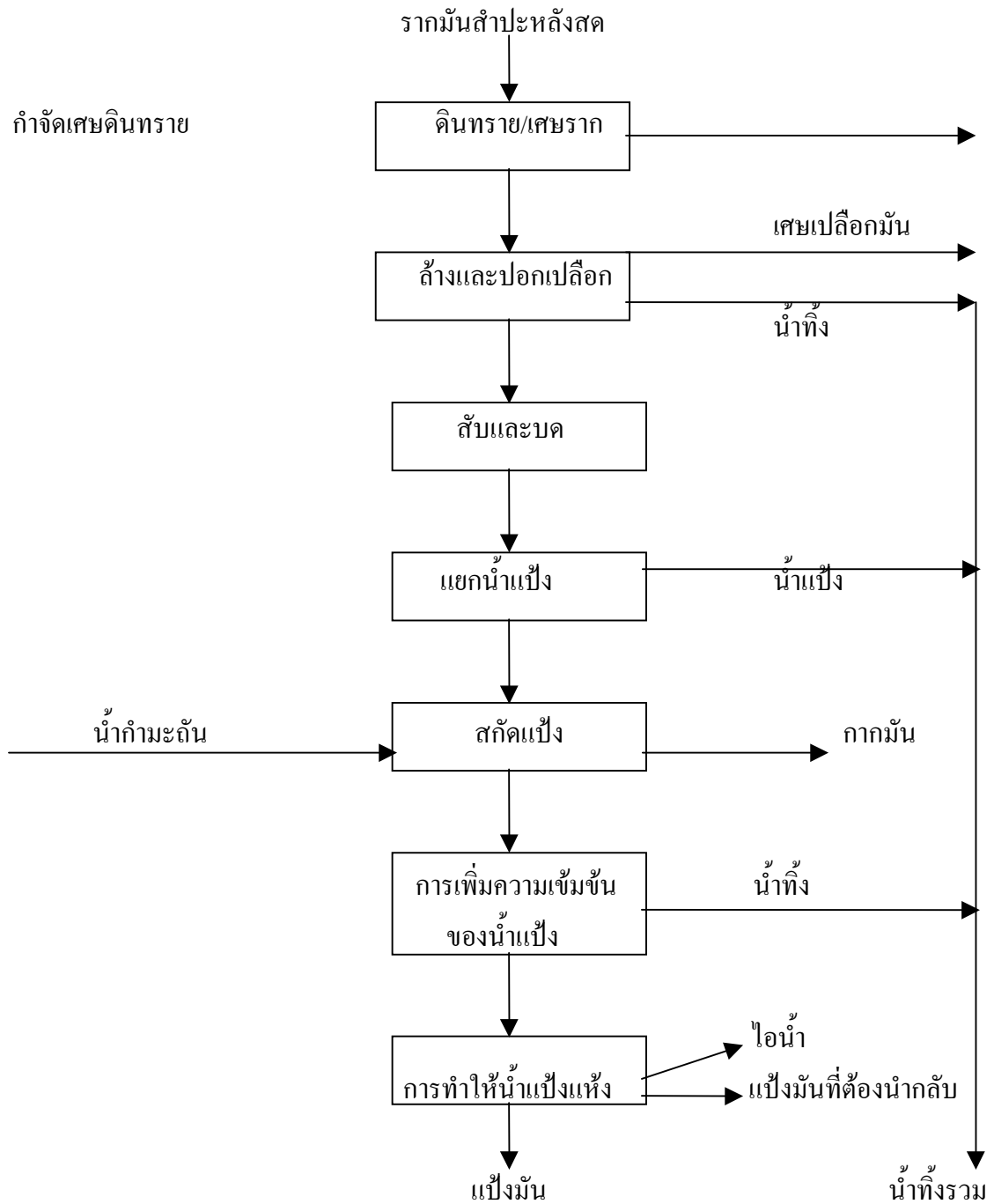
ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| ตัวแปร | ปริมาณ |
|--|--------------|
| ค่าความเป็นกรด-ด่าง | 4.00- 6.50 |
| ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (5 วัน), BOD ₅ (mg /L) | 4,110-27,220 |
| ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, TDS (mg/L) | 954 – 20,886 |
| ค่าของแข็งแขวนลอย, SS (mg/L) | 126 – 4,486 |

ที่มา : การรายงานผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

(Polprasert, 1996)

จากลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง จะเห็นได้ว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแปรงมันสำปะหลังมีค่าความต้องการออกซิเจนที่สูงมาก ซึ่งถ้าใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ประสิทธิภาพอาจจะทำให้เกิดปัญหามลภาวะต่อแหล่งน้ำขึ้นได้ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้จึง



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแปรงมันสำปะหลัง

เลือกกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก ซึ่งพบว่า การใช้ระบบบำบัดแบบนี้จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดสูง และเกิดแก๊สมีเทนซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มีลักษณะจำเพาะคือการเกิดแก๊สมีเทนจากผลสุดท้ายของปฏิกิริยาแก๊สนี้จะแยกออกจากระบบอย่างรวดเร็ว เพราะความสามารถในการทำละลายน้ำต่ำ ดังนั้นจึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีความคงตัวค่อนข้างสูง กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิกจึงมีหน้าที่ในการสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนอินทรีย์และทำลายสารอินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็งและสารละลายในน้ำเสีย ในการออกแบบและการควบคุมการดำเนินการของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกในปัจจุบันนั้นนิยมใช้เป็นขั้นตอนสำหรับลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลง ก่อนส่งต่อไปยังระบบบำบัดแบบแอโรบิก ทำการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือวิธีนี้ทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดน้ำเสียได้มาก (มันสิน ตันฑกุลเวศน์, 2534)

2.2 กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก เป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมออกซิเจน ระบบนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อย ๆ เพราะสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และยังได้พลังงานที่เกิดจากระบบแอนแอโรบิก ได้แก่ แก๊สมีเทน เป็นต้น ซึ่งเป็นแก๊สที่ใช้ในการหุงต้มทำอาหารได้ และใช้ในการต้มน้ำในหม้อต้มน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมได้

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิกมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งทั้งหมดมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

2.2.1 ระบบสัมผัสแอนแอโรบิก

เป็นถังหมักที่ดัดแปลงมาจากถังหมักชนิดอัตรากำจัดสูง ดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นระบบสัมผัสแอนแอโรบิก จึงมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกับระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge : AS) จนกระทั่งในบางครั้งอาจเรียกระบบนี้ว่าเป็นระบบตะกอนเร่งแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic Activated Sludge) ในทางปฏิบัติระดับของซีโอดี (COD) ที่เหมาะสมคือ 4,000-50,000 มิลลิกรัม/ลิตร (เพชรพร เขาวกิจเจริญ, 2539)

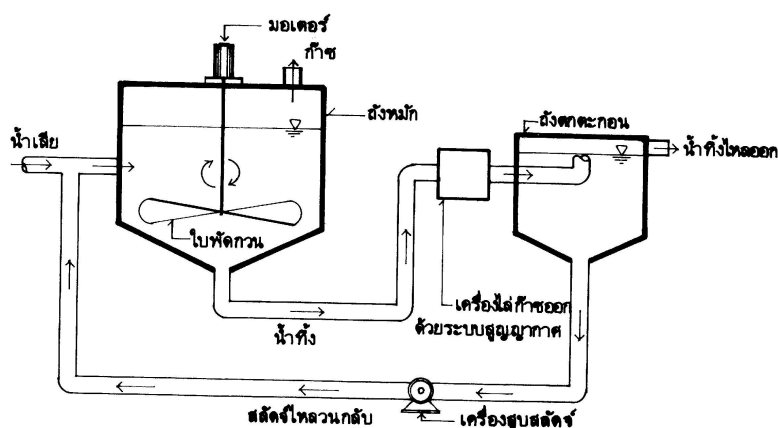
2.2.2 ถังแบบฟิล์มตรึง

ระบบนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ตัวกลางบรรจุภายในระบบ ทั้งนี้เพื่อให้มีอายุตะกอนหรือเวลาเก็บกักของตะกอนยาวนาน ระบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

(1) ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น

ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น มีรูปลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยจุลชีพที่บรรจุอยู่ภายในระบบจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งตัวจุลชีพจะเกาะอยู่บนริ

เวณผิวดักกลาง และบางส่วนจะอาศัยอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวกลาง ทำให้ระบบนี้ไม่ต้องมีการกวนน้ำเสียภายในถัง การกำจัด COD ของน้ำเสียโดยระบบนี้จะใช้กระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) การกรอง และปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวเคมี ระบบนี้จะใช้เวลาเก็บกักของน้ำเสียประมาณ 1-10 วัน โดยสามารถรับ COD ของน้ำเสียได้ตั้งแต่ 4,000-16,000 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 2.2 ระบบสัมผัสแบบแอนแอโรบิก

(2) ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลลง

ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลลง มีรูปลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 จะมีตัวกลางบรรจุอยู่ในระบบ สำหรับระบบนี้จะมีปริมาณสารแขวนลอยไม่มากเท่ากับระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วไหลออกทางส่วนก้นถัง และน้ำทิ้งบางส่วนควรสูบกลับไปที่ระบบอีกครั้งเพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดียิ่งขึ้น

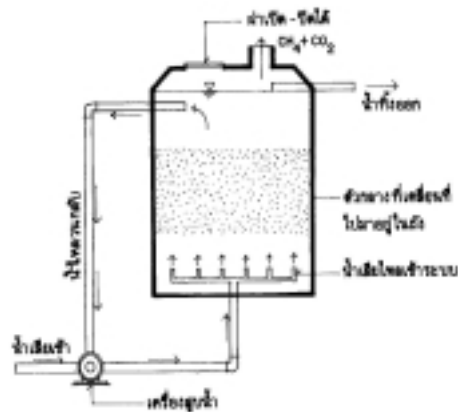
2.2.3 ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิดไดซ์

ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิดไดซ์ เป็นระบบที่ได้พัฒนามาจากระบบถังกรองแอนแอโรบิก ที่มักจะมีปัญหาการอุดตันการเกิดไหลลัดวงจรและการสูญเสียความดัน ทำให้มีการคัดแปลงโดยใช้ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวมาก ๆ โดยจะให้ตัวกลางมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาทำให้สามารถป้องกันการอุดตันได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5

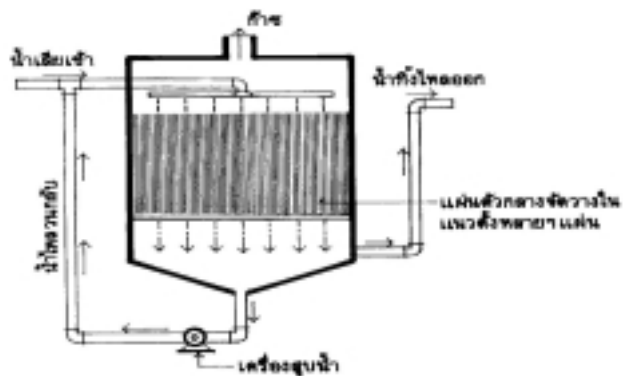
2.2.4 ถังไร้อากาศแบบชั้นตะกอน

ระบบนี้จะให้น้ำไหลขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ระบบนี้จึงนิยมเรียกว่า Upflow Anaerobic Sludge Blanket Treatment (UASB) จะอาศัยตะกอนจุลชีพแขวนลอย โดยที่หลังการดำเนินการได้ระยะหนึ่งภายในถังปฏิกรณ์จะเกิดตะกอนจุลชีพที่มีลักษณะเป็นเม็ด ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติ

บัตินในการตกตะกอนได้ดีมาก ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้สูงมาก แต่ระบบนี้ต้องพยายามควบคุมระบบให้ได้ตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ด ๆ จึงจะกล่าวได้ว่าระบบนี้ทำงาน



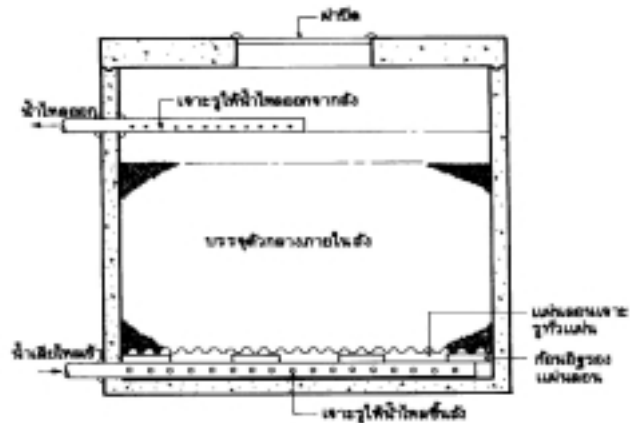
รูปที่ 2.3 ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น



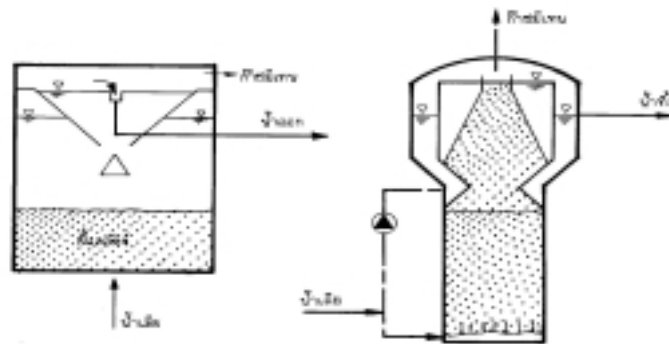
รูปที่ 2.4 ระบบถังกรองแอนแอโรบิกแบบไหลลง

2.2.5 ถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีลักษณะเป็นถังที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ในถังยาวดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 การไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นในลักษณะไหลขึ้นไหลลงสลับกันไปหลายครั้ง ลักษณะการทำงานของระบบจะมีหลักการเช่นเดียวกับของระบบ UASB ระบบนี้สามารถรับปริมาณ COD ได้สูงถึง 110 กก. COD/(ลบ.ม. วัน) (เกรียงศักดิ์ม 2539 ข)



รูปที่ 2.5 ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิดไดซ์



รูปที่ 2.6 ถังไร้อากาศแบบชั้นตะกอน

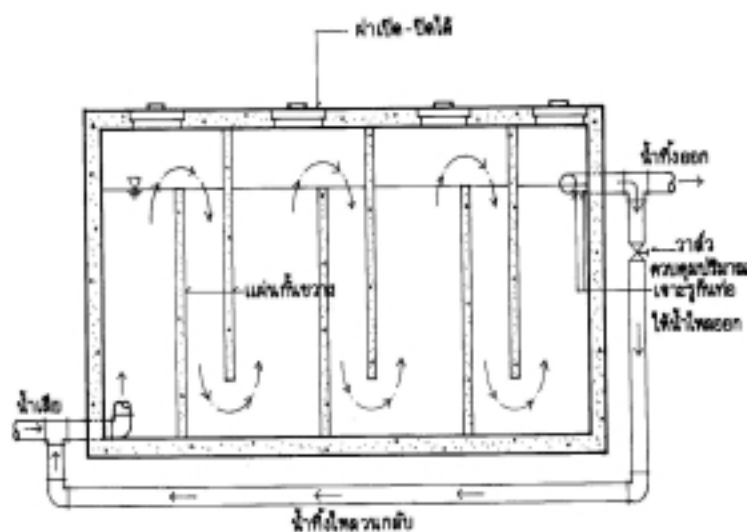
2.3 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก

2.3.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์

ธรรมชาติของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอนแอโรบิก แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.8

ขั้นที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer break down) ในขั้นนี้สารประกอบอินทรีย์ประเภทซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันจะถูกทำให้ละลายน้ำ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออก



รูปที่ 2.7 ถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

มาสู่ภายนอกเซลล์ของแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ในขั้นกระบวนการนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ยังไม่มีการลดซีโอดี ในขั้นตอนนี้

ขั้นที่ 2 กระบวนการแอซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำ ที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียประเภทที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative Bacteria) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยกระบวนการหมัก (fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดระเหย (volatile acid) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัวเช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดวาเลอริก (valeric acid) แบคทีเรียจำพวกนี้เรียกว่าแบคทีเรียสร้างกรด (acid formers) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย

ขั้นที่ 3 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดระเหย (volatile acid) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแอซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) จะถูกเปลี่ยนโดยแบคทีเรียโฮโมอะซิโตเจนิค (Homoacetogenic Bacteria) ให้เป็นอะซิเตท (acetate) ฟอร์มเมท (formate) ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ ในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดระเหย (volatile acid) และไฮโดรเจน ในปริมาณที่สูงพอจะยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

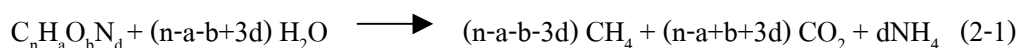
แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่า แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Forming Bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้ แต่ตัวที่สร้างกรดได้อาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน จึงถือว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจรวมเรียกได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (Non-Methanogenic Bacteria)

ขั้นที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

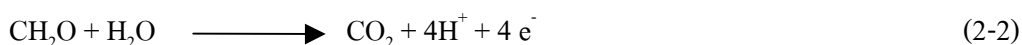
ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก ซึ่งเป็นผลปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างกรดและไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่ง เพื่อสร้างมีเทนแบคทีเรียประเภทนี้เรียกว่า แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria)

2.3.2 ชีวเคมีของกระบวนการสร้างมีเทน

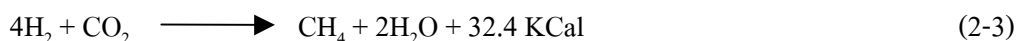
การเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเขียนเป็นสมการสัดส่วนทางเคมีของ Buswell ได้ดังนี้



แบคทีเรียแอนแอโรบิกจัดเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอน ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ ตามปฏิกิริยาดังนี้



แบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ ได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจำนวนมากจากไฮโดรเจน



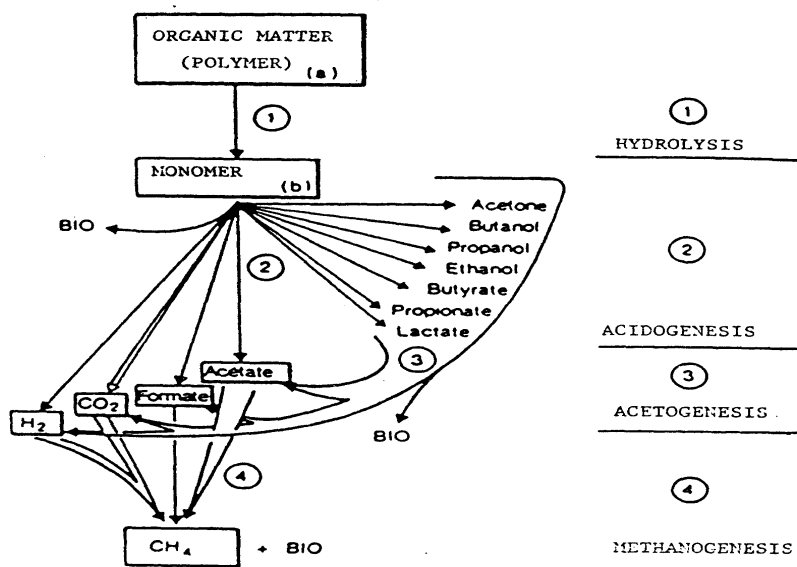
แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นอาหาร (Substrate) เพียงอย่างเดียวได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิก สามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย



แบคทีเรียชนิดที่สอง สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก จากการทดลองที่ใช้กัมมันตภาพรังสีเป็นตัววัดร่องรอย ได้พบว่ามีเมเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติก ดังนี้



แต่อย่างไรก็ดี ยังมีข้อสงสัยว่าสมการที่ (2-5) นี้จะสามารถให้พลังงานพอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์หรือไม่ ทั้งนี้เพราะตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์อาจพิสูจน์ได้ว่า สมการที่ (2-5) ได้พลังงานไม่พอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์การเปลี่ยนอะซิเตทให้เป็นมีเทนอาจเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานดังนี้



BIO : Biomass

(a) : Protein, lipid, carbohydrate

(b) : Sugar, amino acid, volatile acid

รูปที่ 2.8 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการแบบแอนแอโรบิก (Perrier, 1990)



ในสมการที่ (2-6) อะซิติกเป็นสารตัวสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน

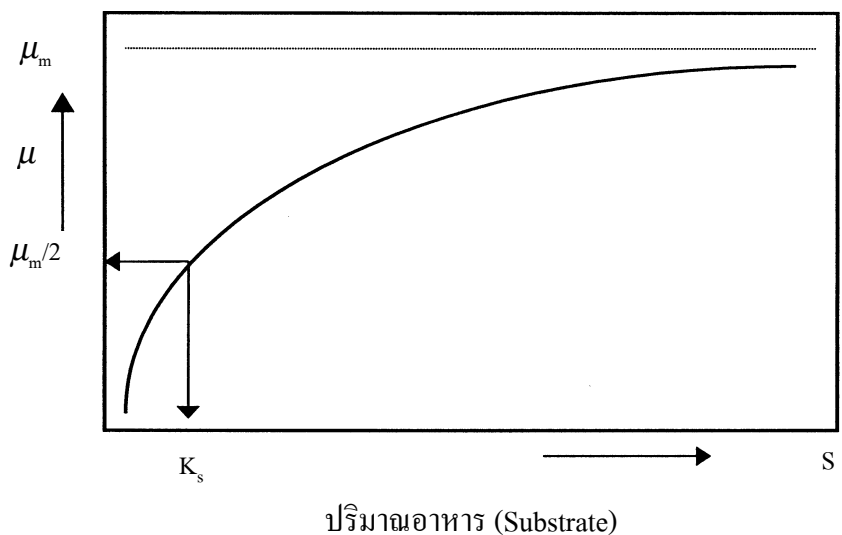
Monod ได้ทำการทดลองศึกษาถึงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพ รูปที่ 2.10 ได้แสดงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพสำหรับปริมาณอาหารต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.10 ค่า μ คือ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลชีพ

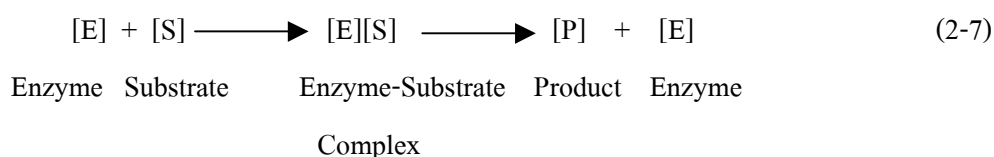
ค่า μ_m คือ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพหรือเรียกง่าย ๆ ว่าค่า μ สูงสุด

ค่า K_s คือ ค่าปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีค่า μ เท่ากับ $0.5 \mu_m$

จากรูปที่ 2.10 มีเส้นโค้งคล้ายกับลักษณะปฏิกิริยาชีวเคมีของเอนไซม์กับอาหารดังแสดงไว้ในสมการที่ (2-7) โดยสมการที่แสดงปฏิกิริยาชีวเคมีดังกล่าวถูกสร้างโดย Michaelis-Menten ดังสมการ (2-8) ซึ่งเอนไซม์ในปฏิกิริยาชีวเคมีก็คือ ตัวแทนจุลชีพในระบบบำบัดน้ำ ซึ่งจากสมการที่ (2-8) จะได้สมการที่ (2-9) โดยให้ r_s คืออัตราการเจริญเติบโตของ จุลชีพต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพสำหรับปริมาณอาหารต่าง ๆ



$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_m X S}{K_s + S} \quad (2-8)$$

$$r_g = \frac{dx}{dt} = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} \quad (2-9)$$

จาก $\frac{dx}{dt} = \mu X \quad (2-10)$

เมื่อ : X = ความเข้มข้นของจำนวนจุลชีพ, มก./ลิตร
 t = ระยะเวลาที่จุลชีพอยู่ในระบบ, เวลา
 μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ, 1/เวลา

เมื่อนำสมการที่ (2-10) มาแทนค่าลงในสมการที่ (2-9) จะได้สมการที่ (2-11) ซึ่งเป็นสมการที่ Monod ได้สร้างขึ้นมา

$$\mu = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} \quad (2-11)$$

ซึ่งสมการที่ (2-11) จะเป็นตัวแทนที่ดีสมการหนึ่งสำหรับเส้นโค้งในรูปที่ 2.10 และในการศึกษาครั้งนี้จะใช้สมการที่ (2-11) มาใช้ในการอธิบายและศึกษาจลนศาสตร์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังโดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก เพราะเป็นสมการที่นิยมใช้กันมากที่สุดสมการหนึ่ง

จากสมการที่ (2-9) นำมาศึกษาวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

1. เมื่อค่า S มีค่ามากกว่า K_s มาก ๆ จะได้ $r_g = \mu_m X$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง จุลชีพจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยอาหาร ทำให้อัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีจะมีสูงสุด
2. เมื่อค่า S มีค่าเท่ากับ K_s มาก ๆ จะได้ $r_g = \mu_m X / 2$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง แต่จะมีอัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีครึ่งหนึ่งของอัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีสูงสุด
3. เมื่อค่า S มีค่าน้อยกว่า K_s มาก ๆ จะได้ $r_g = \frac{\mu_m XS}{K_s + S}$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับที่สอง โดย

จะขึ้นอยู่กับทั้ง X และ S

นอกจากที่กล่าวมาแล้วนั้นอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการกินอาหารของจุลชีพ อัตราการใช้พลังงานในการดำรงชีพ อัตราการตายของตัวจุลชีพ และสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

อัตราการใช้อาหารของจุลชีพ

จุลชีพได้อาหารที่อยู่ในน้ำเสียเพื่อการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนขึ้น โดยใช้ สม

การที่ (2-12) อธิบาย

$$r_g = -Yr_{SU} \quad (2-12)$$

เมื่อ : r_g = อัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพต่อหน่วยเวลา, มก./ (ลิตร.ชม.)
 r_{SU} = อัตราการใช้อาหารในการดำรงชีพของจุลชีพ, มก./ (ลิตร.ชม.)
 Y = ค่า Yield Coefficient มากที่สุด ณ ช่วง Log (เป็นช่วงที่จุลชีพได้รับความคุ้นเคยกับระบบแล้ว) มาแทนค่าลงในสมการที่ (2-12) เพื่อให้ได้สมการที่ (2-13)

$$r_g = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} = -Yr_{SU}$$

$$r_{SU} = - \frac{\mu_m XS}{Y (K_s + S)} \quad (2-13)$$

ให้ $\frac{\mu_m}{Y} = k$ คือ ค่าของอัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลชีพ

$$r_{SU} = \frac{-kXS}{K_s + S} \quad (2-14)$$

ผลของอัตราการลดลงของจุลชีพ

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้จุลชีพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะมีปริมาณของจุลชีพค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จุลชีพต้องการพลังงานเพื่อการบำรุงรักษาในอัตราคงที่ต่อเซลล์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารที่ให้แก่จุลชีพ ขนาดของถังบำบัดน้ำเสียและสภาวะแวดล้อมอื่น เมื่อพิจารณาในลักษณะมวลของเซลล์จะได้ว่าปริมาณมวลของเซลล์ลดลงโดยแปรผันกับปริมาณของจุลชีพที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยกำหนดว่าอัตราการลดลงของจุลชีพเท่ากับ r_d ซึ่งนิยมเรียกว่า Endogenous decay โดยทั่ว ๆ ไปแล้วสามารถสมมติได้ว่าอัตราการลดลงของจุลชีพเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2-15)

$$r_d = -k_d X \quad (2-15)$$

- เมื่อ : r_d = Endogenous decay, มก./ (ลิตร.ชม.)
 K_d = ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของจุลชีพ (Endogenous decay coefficient), ต่อ ชม.
 X = ความเข้มข้นของจุลชีพ, มก./ลิตร

จากผลของอัตราการลดลงของจุลชีพ เมื่อรวมกันเข้ากับสมการที่ (2-9) จะเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2-16) ซึ่งคืออัตราการเพิ่มขึ้นของจุลชีพ

$$r'_g = r_g - r_d$$

$$r'_g = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} - K_d X \quad (2-16)$$

และจากสมการที่ (2-12) $r_g = -Yr_{SU}$ จะได้

$$r'_g = -Yr_{SU} - K_d X \quad (2-17)$$

เมื่อ : r'_g = อัตราการเพิ่มขึ้นสุทธิของจุลชีพ, มก./ (ลิตร.ชม.)

จากสมการที่ (2-13) และ (2-17) จะได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลชีพ

$$\frac{r'_g}{X} = \frac{-Yr_{SU}}{X} - K_d \quad (2-18)$$

$$\frac{r'_g}{X} = \frac{\mu_m XS}{K_s + S} - K_d = \mu' \quad (2-19)$$

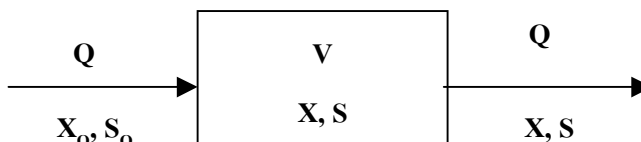
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการลดลงของจุลชีพทำให้สมการที่ (2-12) จำเป็นต้องถูกดัดแปลงใหม่ได้เป็น

$$r'_g = -Y_{obs} r_{SU} \quad (2-20)$$

เมื่อ : Y_{obs} = observed yield

2.4.2 จลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบกวนดีที่ไม่มีการไหลวนกลับ

ถังปฏิกรณ์แบบนี้จะมีน้ำเสียและตะกอนจุลชีพผสมกันดีทั่วทั้งถังตลอดเวลา โดยน้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์จะมีคุณลักษณะเหมือนกับน้ำที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ โดยมีการไหลเข้าออกแบบต่อเนื่องสม่ำเสมอและไม่มีการไหลวนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ถังปฏิกรณ์แบบกวนดีที่ไม่มีการไหลวนกลับ

จากสมการสมดุลของมวลสาร

สะสมอยู่ในถัง = เข้า - ออก + ปริมาณเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาชีวเคมี

เมื่อพิจารณาอาหารจะได้สมการสมดุลมวลของอาหารดังสมการที่ (2-21)

$$\frac{ds}{dt}V = QS_0 - QS + Vr_{su}$$

$$\frac{ds}{dt}V = QS_0 - QS + V \left(\frac{-kXS}{K_s + S} \right) \quad (2-21)$$

เมื่อพิจารณาจุลชีพจะได้สมการสมดุลของจุลชีพดังสมการที่ (2-22)

$$\frac{dx}{dt}V = QX_0 - QX + Vr'_g$$

$$\frac{dx}{dt}V = QX_0 - QX + V \left(\frac{\mu_m XS}{K_s + S} - K_d X \right) \quad (2-22)$$

เมื่อ : V = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์
 Q = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย
 จากความรู้ข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่า X ในถังปฏิกรณ์และ S ของน้ำที่ไหลออกจากระบบ

การวิเคราะห์หาค่า X ในถังปฏิกรณ์

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{k(1 + k_d)} \quad (2-23)$$

การวิเคราะห์หาค่า Effluent S

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(\mu_m - K_d) - 1} \quad (2-24)$$

2.5 สถานะแวดล้อมที่เหมาะสมของระบบ

เนื่องจากระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกประกอบด้วยจุลชีพ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเซน และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างมีเซน จุลชีพทั้ง 2 กลุ่มนี้ทำงานอย่างต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสถานะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลชีพเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากจะต้องรักษาระบบให้อยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

2.5.1 อุณหภูมิ

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบแอนแอโรบิกมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ ระหว่าง $30-38^{\circ}\text{C}$ ช่วงหนึ่ง จุลชีพที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า “เมโซฟิลิก แบคทีเรีย” (Mesophilic Bacteria) อุณหภูมิระหว่าง $48-57^{\circ}\text{C}$ อีกช่วงหนึ่ง จุลชีพที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า “เทอร์โมฟิลิก แบคทีเรีย” (Thermophilic Bacteria) โดยที่การทำงานของจุลชีพ ในช่วงเทอร์โมฟิลิกจะดีกว่าช่วงเมโซฟิลิก

2.5.2 สารอาหารจำเป็นสำหรับการสร้างเซลล์จุลินทรีย์

ปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วนดังนี้ $\text{BOD} : \text{N} : \text{P}$ เท่ากับ $100 : 1.1 : 0.2$ ระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกจะให้ปริมาณจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อยกว่าระบบแอโรบิกมาก ดังนั้นจึงมีปัญหานในการจัดการตะกอนส่วนเกินน้อยกว่า จุลินทรีย์ที่สร้างมีเซนยังมีความต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยมาก

แต่ขาดไม่ได้ ธาตุดังกล่าว ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิลและซัลเฟอร์(ในรูปซัลไฟด์) ดังนั้น ถ้าในน้ำเสียดขาดธาตุต่างๆ ดังกล่าว ปฏิิกยาแบบแอนแอโรบิกจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ หรือเท่ากับไม่สามารถเลี้ยงจุลินทรีย์แบบแอนแอโรบิกได้นั่นเอง

2.5.3 สภาพความเป็นกรดและด่าง

pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.6-7.6 ถ้าค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้า pH ต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่า pH ที่นิยมใช้ในการควบคุมระบบแบบแอนแอโรบิกอยู่ในช่วง 6.8-7.2 ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมปริมาณกรดระเหย และปริมาณด่าง โดยให้อัตราส่วนระหว่างกรดระเหยและสภาพความเป็นด่างต้องไม่เกิน 0.3-0.4

2.5.4 สารพิษ

ในระบบบำบัดต้องไม่มีสารพิษต่อจุลชีพในระบบ อาทิเช่น โลหะหนักต่าง ๆ เกลืออนินทรีย์ แอมโมเนียและซัลไฟด์ เป็นต้น ความรุนแรงของพิษขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ๆ

2.6 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก

ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก

| ข้อดี | ข้อเสีย |
|--|--|
| 1.เหมาะสำหรับบำบัดน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูง | 1.ระบบต้องการการดูแล และควบคุมอย่างใกล้ชิด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มจุลชีพหลักไม่คงที่ |
| 2.เป็นระบบที่ทำงานได้อย่างดีที่อุณหภูมิห้อง | 2.อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพค่อนข้างต่ำทำให้การตอบรับการเปลี่ยนแปลงของระบบค่อนข้างช้า |
| 3.เหมาะสำหรับใช้ย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ ตะกอนที่เกิดขึ้นไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ และใช้ประโยชน์สามารถนำตะกอนมาปรับสภาพดินหรือเป็นปุ๋ยได้ | 3.สารอินทรีย์สังเคราะห์บางอย่างด้านทานการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกจึงจำกัดการใช้ระบบ และโดยทั่วไปน้ำที่ออกจากระบบจะมีสารอินทรีย์ละลายที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้มากพอทำให้ไม่สามารถทิ้งโดยตรงได้ |
| 4.ปฏิกริยาขั้นสุดทำยได้แก๊สมีเทนซึ่งเป็นผลผลิตหลักที่มีค่า | 4.ในบางสภาพต้องการการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้เงินทุนเริ่มแรกค่อนข้างสูง |

2.7 ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระบบแอนแอโรบิก

เมื่อปฏิบัติการแอนแอโรบิกเกิดการเสียดุลยขึ้น จะต้องมีการแก้ไขทันที มิฉะนั้นแล้วการแก้ไขภายหลังจะกระทำได้ยากและกินเวลาเนื่องจากการเสียดุลยจะเกิดขึ้น โดยมีสัญญาณเตือนหลายอย่าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรู้จักสัญญาณเหล่านั้นให้ดี

2.7.1 ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

โดยปกติความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ประมาณ 200-400 มิลลิกรัม/ลิตร (ในเทอมของกรดอะซิติก) อาจถือเป็นสัญญาณที่แสดงว่าระบบแอนแอโรบิกทำงานได้ดี อย่างไรก็ตามปริมาณของกรดยังไม่สำคัญเท่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรด ถึงหมักอาจทำงานได้ดีแม้จะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่า 1000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณให้เห็นถึงการเสียดุลยเกิดขึ้นกับถังหมัก การเพิ่มขึ้นรวดเร็วของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ แสดงว่า มีบางอย่างเกิดขึ้นทำให้เกิดการชะลอการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่สร้างมีเทน หรือทำให้การเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น

นอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของกรดอินทรีย์ก็มีความสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิกสูงกว่า 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ก็จะมีปัญหาเรื่องพิษเพิ่มขึ้นมาอีกอย่างหนึ่ง นอกจากปัญหาเรื่องการมี pH ต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามที่ pH มีค่าเป็นกลางปัญหาต่าง ๆ จะเกิดขึ้นน้อย แม้ว่าระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์อย่างอื่นจะสูงก็ตาม และโดยทั่วไปแล้ว ควรตระหนักว่าการที่กรดอินทรีย์มีระดับความเข้มข้นสูงมักเป็นผลมาจากการขาดสมดุลระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิด (เพ็ชรพร, 2539)

2.7.2 ระดับความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต (Bicarbonate Alkalinity) และระดับ pH

ข้อมูลในเรื่องสภาพความเป็นด่าง บอกเราให้ทราบถึงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) เหลืออยู่เท่าใดในระบบแอนแอโรบิก เรื่องนี้ถือว่าสำคัญเพราะถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ pH ลดลงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนของกรดระเหยได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อที่อื่นให้กับ pH มากนัก ระดับของสภาพความเป็นด่างควรจะสูงเท่าใดจึงจะทำให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมนั้น กำหนดให้แน่นอนได้ยากเพราะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความเข้มข้นของน้ำทิ้ง ถ้าน้ำทิ้งมีความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสที่จะผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้มาก อาจเป็นผลให้กำลังบัฟเฟอร์ ของระบบเพิ่มขึ้นได้โดยทั่วไป ระบบแอนแอโรบิกควรมีสภาพความเป็นด่างประมาณ 1,500-2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปัจจัยที่สำคัญกว่าระดับของสภาพความเป็นด่างก็คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดระเหย (มิลลิกรัม/ลิตรของกรดอะซิติก) ต่อระดับของความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต (มิลลิกรัม/ลิตรของ CaCO₃) ทราบ

ใดที่อัตราส่วนนี้ต่ำกว่า 0.4 ระบบแอนแอโรบิกจัดว่ามีกำลังบัฟเฟอร์สูง การเพิ่มของอัตราส่วนนี้เป็นสัญญาณของการเสถียรของระบบ และแสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ที่มีอยู่เดิมลดน้อยลง และไม่พอเพียง ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่า ระบบแอนแอโรบิกกำลังอยู่ในขั้นที่ pH จะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ามีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของกรดระเหย ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการควบคุมระบบแอนแอโรบิก เราจึงต้องเอาใจใส่กับค่าของอัตราส่วนดังกล่าวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอื่น ๆ ด้วย

pH ไม่ใช่ค่าที่เร็วพอจะบอกถึงการทำงานของระบบแอนแอโรบิกได้ทันทั่วทั้งที่ ทั้งนี้เพราะความเสียหายเกิดขึ้นเสียก่อนที่ pH จะลดลง อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ pH ก็ยังมีความสำคัญเพราะว่าแบคทีเรียทั้งสองชนิดโดยเฉพาะชนิดที่สร้างมีเซนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงแคบ ๆ ของ pH เท่านั้น ถ้าไม่มีการควบคุมให้ pH มีค่าเป็นกลางการเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเซนก็จะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้ นอกจากนี้การรักษาระดับ pH ให้เป็นกลางยังเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง ถ้าเรากำลังจะแก้ไขให้ระบบฟื้นตัวจากความเสถียร และถือว่าเป็นเรื่องแรกที่ต้องกระทำก่อนเรื่องใด ๆ

2.7.3 อัตราการผลิตมีเซน

อัตราการสร้างมีเซนเป็นเครื่องวัดโดยตรงของ Metabolic Activity ของแบคทีเรียที่สร้างมีเซนและถือเป็นเครื่องวินิจฉัยสมรรถนะของระบบแอนแอโรบิกที่มีความสำคัญมาก การเปลี่ยนแปลงของอัตราการการผลิตมีเซนมีความสำคัญกว่าค่าปริมาณการผลิต เพราะเป็นสัญญาณที่บอกว่ามี ความผิดปกติเกิดขึ้นกับแบคทีเรียที่สร้างมีเซน

2.7.4 อื่น ๆ

สิ่งที่อาจบอกถึงการเสถียรของระบบแอนแอโรบิกอีก 2 ชนิด ได้แก่ ส่วนประกอบของแก๊สรวมและอัตราการผลิตแก๊ส เนื่องจากสัญญาณทั้งสองชนิดนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาร่วมกันอย่างซับซ้อนของแบคทีเรียทั้งสองประเภท การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและการเสถียรของแบคทีเรียเพียงเล็กน้อยมักไม่เป็นเครื่องชี้สมรรถนะของระบบที่น่าเชื่อถือได้ การเสถียรของแบคทีเรียมักทำให้อัตราการสร้างมีเซนลดลงและการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สูงขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากส่วนประกอบของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเกิดขึ้นก่อนมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สทั้งหมดที่ผลิตได้ (เพ็ชรพร, 2539)

2.8 สาเหตุของการเสถียรของระบบแอนแอโรบิก

สาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเสียหรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนให้กับกระบวนการบำบัดระบบแอนแอโรบิก ผลที่เกิดขึ้นคือทำให้มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงขึ้น และติดตามด้วยการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสร้างมีเซน ถ้าอัตราการสร้างมีเซนไม่เปลี่ยนแปลง แสดง

ว่าการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนมิได้ถูกยับยั้ง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลากักน้ำ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสร้างมีเทนลดลงได้อย่างเด่นชัด การมีสารพิษอยู่ในน้ำหรือตะกอน ก็จะเป็นสาเหตุที่สำคัญมากที่จะทำให้ระบบต้องเสถียรสมดุล การลดลงของอัตราการสร้างมีเทนโดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของกรดอินทรีย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ pH เป็นเครื่องแสดงว่ามีสารพิษยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองประเภท สารพิษเหล่านี้อาจได้แก่ โลหะหนักหรือ ซัลไฟด์ ในกรณีเช่นนี้เราต้องพยายามหาแหล่งกำเนิดของสารพิษและหยุดยั้งมันให้ได้ แต่ก่อนอื่นจะต้องแก้ปัญหาเฉพาะหน้าด้วยการเติมสารเคมีเพื่อทำลายพิษที่มีอยู่เสียก่อน ถ้าอัตราการสร้างมีเทนลดลงพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ แสดงว่าการเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนถูกยับยั้งด้วยสารพิษบางอย่าง ซึ่งอาจเป็นแอมโมเนียก็ได้ การแก้ไขที่จะกระทำได้อีกคือ ลดปริมาณน้ำเสียหรือตะกอนที่ป้อนเข้าถังหมักให้เหลือน้อยลง เพื่อป้องกันมิให้ระบบทั้งหมดเกิดความเสียหายและล้มเหลว ในขณะเดียวกันก็พยายามค้นหาสาเหตุที่แท้จริงและแก้ไขให้เรียบร้อย สิ่งสำคัญที่สุดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือ ในระหว่างการค้นหาและแก้ไขสาเหตุ จะต้องควบคุม pH ให้มีระดับเป็นกลางตลอดเวลา การกระทำเช่นนี้จะช่วยบรรเทาความเสียหายและช่วยให้ระบบฟื้นตัวได้เร็ว

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมน้ำตัวอย่าง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้น้ำตัวอย่างน้ำที่รวมจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างทุกวัน เพื่อให้มีค่าการระเหยอินทรีย์ที่คงที่ตลอดการทดลอง

3.2 การวิเคราะห์น้ำ

นำตัวอย่างน้ำเสียมาทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของตัวแปรต่าง ๆ ตามวิธีการทดลองของ Standard Methods ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้วิธีการ ดังตารางที่ 3.1

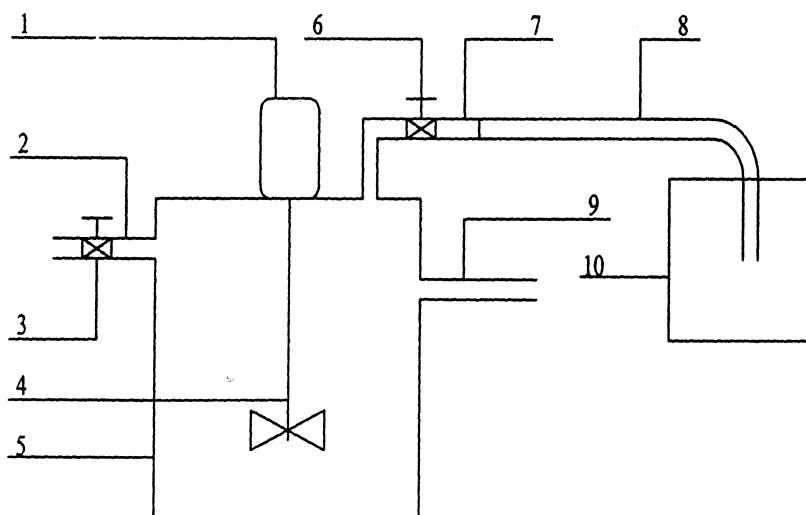
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและวิธีการวิเคราะห์

| ตัวแปร | วิธีการวิเคราะห์ |
|---|---|
| BOD ₅ | Membrane Electrode |
| COD | Dichromate Reflux Method |
| Organic acids - acetic acid - propionic acid - butyric acid - lactic acid | เครื่อง High-Pressure Liquid Chromatograph (HPLC) |
| Methane gas | เครื่อง Gas Chromatograph (GC) |

3.3 การสร้างแบบจำลองของกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก

แบบจำลองของกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก จะประกอบด้วยถึง 3 ใบ สำหรับเป็นถึงรวบรวมน้ำเสีย ถึงปฏิกรณ์ ถึงเก็บแก๊สชีวภาพ และมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น วาล์ว มอเตอร์ ใบพัดแบบ Propeller ซึ่งแสดงรูปของถึงปฏิกรณ์แบบกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก ในรูปที่ 3.1 และ

รายละเอียด ขนาดของถังปฏิกรณ์แบบกระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก สรุปไว้ในตารางที่ 3.2



- หมายเลข 1 : มอเตอร์ (motor)
 หมายเลข 2 : ท่อทางน้ำเข้า ทำจากพีวีซี (PVC) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว
 หมายเลข 3 : วาล์วที่ใช้ควบคุมน้ำเข้าถังปฏิกรณ์
 หมายเลข 4 : ใบพัดแบบ Propeller
 หมายเลข 5 : ถังปฏิกรณ์
 หมายเลข 6 : วาล์วที่ใช้ควบคุมแก๊ส
 หมายเลข 7 : ท่อทางแก๊สออก ทำจากท่อพีวีซี (PVC) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว
 หมายเลข 8 : สายยาง
 หมายเลข 9 : ท่อทางน้ำออก ทำจากท่อพีวีซี (PVC) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว
 หมายเลข 10 : ถังที่ใช้ในการเก็บแก๊สแบบแทนทีน้ำ

รูปที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.4.1 ลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์

การหาลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ ได้จากการทดสอบสารติดตาม (Tracer Study)

(Paul, 1995) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 10 g NaCl/L ปริมาตร 8.5 ลิตร ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านน้ำสะอาดที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 11.5 ml/s แล้วทำการวัดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ทางน้ำออก พร้อมกับการจับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของถังปฏิกรณ์

| รายละเอียดอุปกรณ์ของถังปฏิกรณ์ | ลักษณะ/ขนาด |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. วัสดุที่ใช้ในการทำถังปฏิกรณ์ | เหล็ก |
| 2. ลักษณะรูปร่าง | สี่เหลี่ยมจัตุรัส |
| 3. กว้าง x ยาว x สูง | 0.50 x 0.50 x 0.50 ลบ.ม. |
| 4. ความหนาของแผ่นเหล็ก | 3 มม. |
| 5. ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ | 125 ลิตร |
| 6. ปริมาตรของน้ำเสีย | 85 ลิตร |

3.4.2 การเริ่มต้นระบบ

นำตะกอนจุลชีพชนิดที่เจริญเติบโตในสถานะแอนแอโรบิก ใส่ในถังปฏิกรณ์ และเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นควรให้อัตราการระสารอินทรีย์ต่ำ การเติมสารอินทรีย์ในปริมาณต่ำในช่วงการเริ่มต้นระบบ จะทำให้เกิดสมดุลของแบคทีเรียที่ใช้อะซิเตทในการผลิตมีเทน และแบคทีเรียที่ใช้อะซิเตทและเมทานอลในการผลิตมีเทน ซึ่งเป็นผลดีกับเสถียรภาพของระบบในระยะยาวและเพื่อให้ทราบค่า COD ของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบที่แท้จริง จะทำการทดลองหาค่า COD ทุกวัน

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

(1) หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในช่วง 4,000 ถึง 50,000 mg COD/L โดยให้ระบบมีอัตราการไหล ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1, 2.5, 5, 7 และ 10 วัน ตามลำดับ

(2) เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ ที่กำหนดในข้อ (1) ทำการวัด COD จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

(3) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ และทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เก็บแก๊สแบบแทนที่น้ำในแต่ละระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ (น้ำที่ออกจากระบบเพื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ยกเว้นค่าของแข็ง จะต้องทำการกรองก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ)

3.5 กลุ่มตัวอย่าง

ในการทดลอง ได้ใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมี ค่า COD อยู่ในช่วง 3,000 – 15,000 mg/L

3.6 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรที่ทำการศึกษาที่ใช้ในการวิจัย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

| ลักษณะตัวแปร | ตัวแปรที่ทำการวิจัย |
|-------------------------------------|--|
| ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) | - ระยะเวลาเก็บกักน้ำ |
| ตัวแปรตาม (Dependent Variables) | - COD - Organic acids - Acetic acid - Propionic - Butyric - Lactic - Methane gas |
| ตัวแปรควบคุม (Control Variable) | - pH |

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรของน้ำเสีย

ผลการวิเคราะห์ตัวแปรของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยเก็บน้ำเสียแบบ จ้วงตัก (Grab Sample) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| ตัวแปร | หน่วย | ช่วงค่า | ค่าเฉลี่ย |
|----------------------|----------------------|--------------|-----------------|
| BOD ₅ | mg O ₂ /L | 2,400-13,720 | 8,060 ± 5,660 |
| COD | mg O ₂ /L | 4,024-27,290 | 15,657 ± 11,633 |
| ไนโตรเจน (TKN) | mg N/L | 59.6-297.9 | 178.8 ± 119.2 |
| ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) | mg P/L | 41-235 | 138 ± 97 |
| ของแข็งแขวนลอย (SS) | mg/L | 2,520-7,810 | 5,165 ± 2,645 |

จากการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ของน้ำเสีย จะเห็นได้ว่า ค่าตัวแปรต่างๆ ของน้ำเสีย มีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก.1 เนื่องจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นโรงงานที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตค่อนข้างมาก คิดแล้วใช้น้ำประมาณ 5-10 เท่าของวัตถุดิบ

4.2 ผลการทดลอง

ในการทดลองได้แบ่งขั้นตอนการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

4.2.1 ลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์

ลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ หาได้จากการทดสอบสารติดตาม โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 10 g NaCl/L ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ด้วยอัตราการไหล 11.5 mL/s แล้วทำการวัดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ทางน้ำออก เพื่อหาระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยที่เหมาะสม และเป็นการตรวจสอบว่าระบบจะเกิดการไหลแบบลัดวงจร (Short Circuit) หรือไม่ จากการหาลักษณะทางศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ สามารถสรุปรายการคำนวณได้ดังตารางที่ ข.12 สมการที่ใช้ดังต่อไปนี้

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (4-1)$$

$$\delta^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 \quad (4-2)$$

$$d + 8d^2 = \frac{\delta^2}{T_{\text{mean}}^2} \quad (4-3)$$

$$d = \frac{D}{uL_i} \quad (4-4)$$

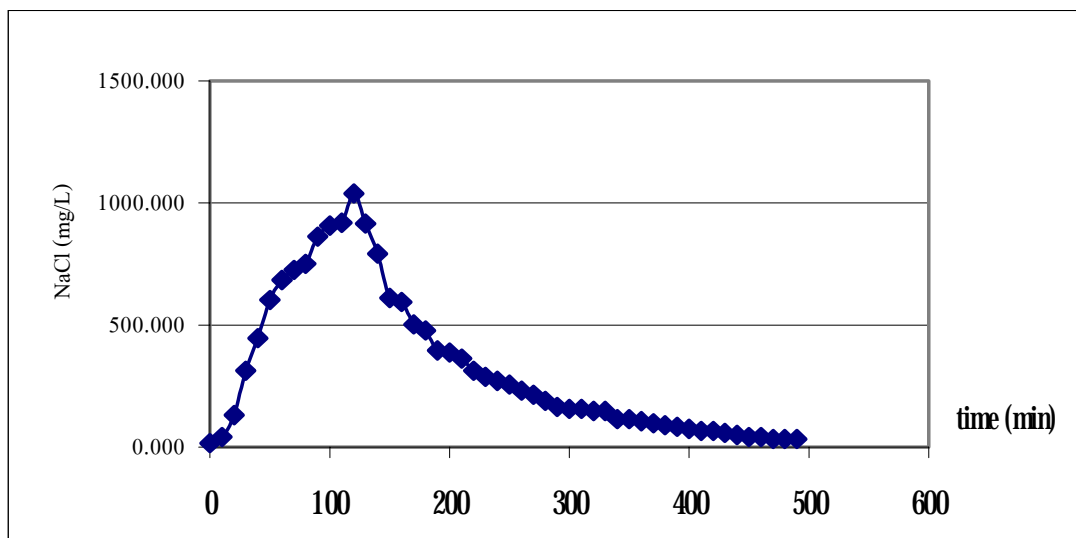
เมื่อ :

| | | |
|-------------------|---|---|
| T_{mean} | = | ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม |
| t_i | = | ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ |
| C_i | = | ความเข้มข้นของ CI ที่ออกจากระบบที่เวลาหนึ่ง |
| Δt | = | ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ |
| d | = | สัมประสิทธิ์การกระจาย |
| D | = | สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน |
| u | = | อัตราการไหล |
| L_i | = | ระยะของไหลจากทางเข้าถึงทางออก |

ตารางที่ 4.2 ค่าการกระจายของไหล

| D/uL_i | คำอธิบาย |
|----------|---|
| 0 | เกิดสถานะ Plug-Flow (เกิดการกระจายตัวน้อยมากหรือไม่มีเลย) |
| 0.002 | เกิดการกระจายตัวเล็กน้อย |
| 0.025 | เกิดการกระจายตัวปานกลาง |
| 0.2 | เกิดการกระจายตัวมาก |
| α | เกิดสถานะการกวน (เกิดการกระจายตัวมาก ๆ) |

จากผลที่แสดงในตารางที่ ข.12 สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl (mg/L) และ เวลา (นาที) (C-t curve) ได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ (C – t curve)

จากรายการคำนวณในตารางที่ ข.12 โดยใช้สมการ 4-1 ทำให้ได้ T_{mean} เท่ากับ 157.48 นาที หรือ 2.62 ชั่วโมง และค่าการกระจายของของไหลเท่ากับ 0.2 ซึ่งหมายถึง การกระจายของของไหลมีการกระจายตัวมากหรือกล่าวได้ว่าระบบเป็น CSTR

4.2.2 ผลการทดลอง

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด COD, BOD, SS, TP, TKN และ Organic acids ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ การวิเคราะห์ผลการทดลอง ใช้ค่าผลการทดลองที่ช่วงสภาวะคงที่ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการลดค่าต่างๆ มีค่าค่อนข้างคงที่ ในแต่ละช่วงการทดลอง

การทดลองได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

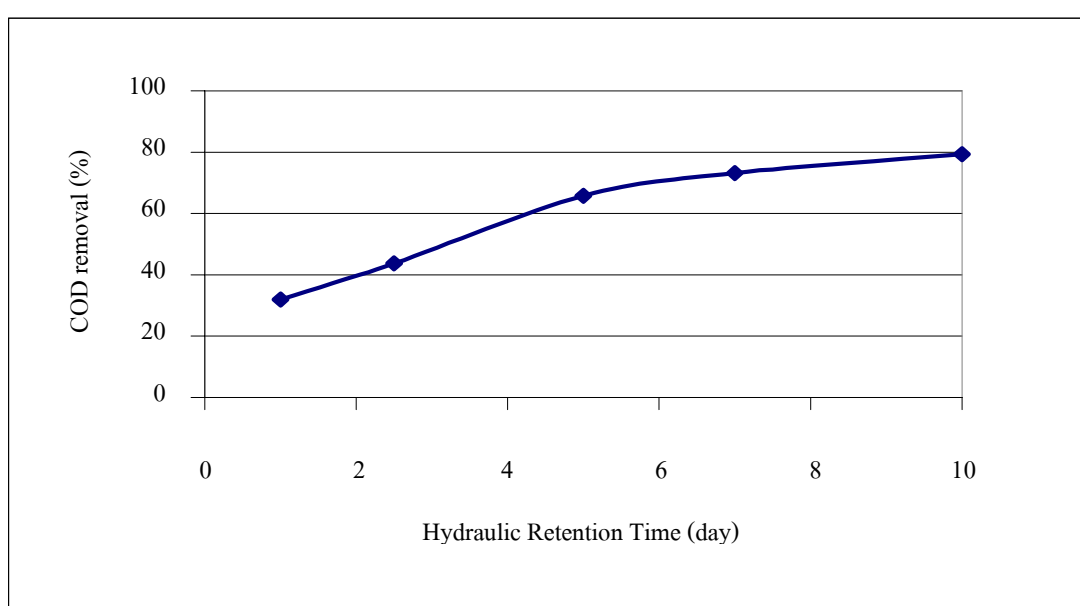
(1) ประสิทธิภาพในการบำบัด COD

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด COD ในถังปฏิกรณ์ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน โดยมีค่า COD ก่อนบำบัดอยู่ในช่วง 4,024–27,290 mg/L ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.5 และผลแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยแสดงในตารางที่ ข.6 ถึง ข.10 โดย สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาเก็บกักน้ำ และประสิทธิภาพ การบำบัด COD ได้ดังรูปที่ 4.2

ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วันมีค่าเฉลี่ยเป็น 79.36, 73.15, 65.83, 43.76 และ 31.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด COD มีค่าสูงสุด คือ 79.36 เปอร์เซ็นต์

เซ็นต์ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน และประสิทธิภาพมีค่าลดลงเมื่อมีการลดระยะเวลาเก็บกัก หรือเพิ่ม Volumetric Loading เป็นเพราะการเพิ่ม Volumetric Loading มีผลทำให้ถังปฏิกรณ์ต้องรับ Loading เพิ่มขึ้น และมีระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในถังลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ลดลง จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของ COD ที่เหลืออยู่ในน้ำออก พบว่า COD ที่เหลืออยู่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ระยะเวลาเก็บกักลดลง หรือเพิ่ม Volumetric Loading โดยมีค่า COD อยู่ในช่วง 2,681-7,205 mg/L ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่า COD ที่เหลืออยู่ในน้ำออก มีค่าต่ำ ควรที่จะบำบัดที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำสูง หรือ ที่ค่า Volumetric Loading ต่ำ



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัด COD ที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

(2) ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD

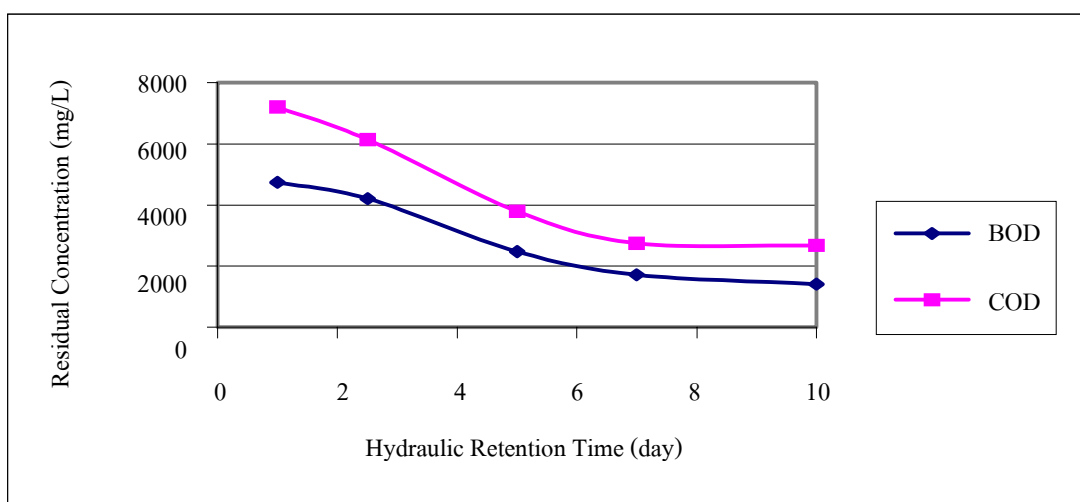
ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ การทดสอบ BOD ความจริงแล้วเป็นการทดลองทางชีวะที่ทำการวัดปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปขณะที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน มีค่าเฉลี่ยเป็น 80.28, 74.14, 68.15, 45.85 และ 38.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

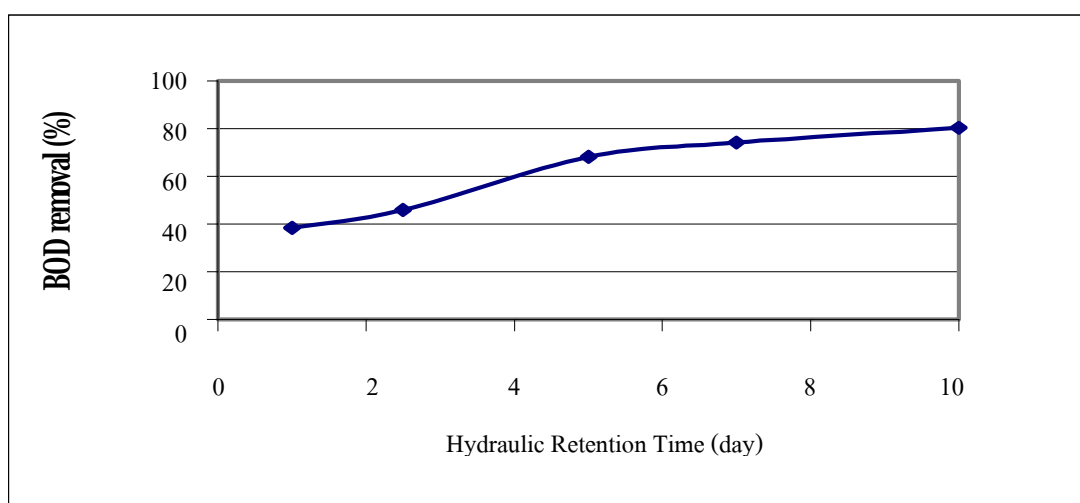
จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD มีค่าสูงสุด 80.28 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน และจะเห็นได้ว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ได้ดีกว่า COD ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีว

วิทยา โดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้น สารอื่นๆ ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้จึงยังคงอยู่ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไม่หมด สามารถตรวจวัดได้ในรูปของ COD แต่ปริมาณสารอื่นๆ ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายไม่ได้ ไม่สามารถตรวจวัดได้ในรูปของ BOD เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยาได้นั่นเอง ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์คุณภาพของน้ำ จึงพบว่า มีค่า BOD ต่ำกว่า COD ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัด BOD สูงกว่า COD

ในการเปรียบเทียบอัตราส่วน BOD : COD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.3 จากผลแสดงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน BOD : COD นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาเก็บกักต่างๆ และอัตราส่วน BOD : COD ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ย COD และ BOD ที่เหลืออยู่ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วน BOD : COD

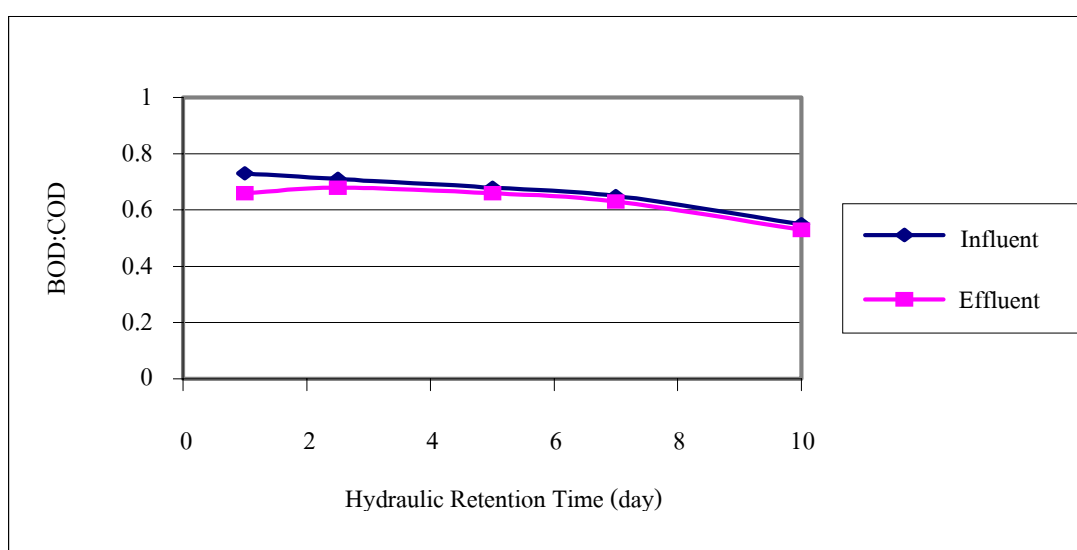
| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน) | BOD : COD | |
|--------------------------|----------------|------------------|
| | น้ำที่เข้าระบบ | น้ำที่ออกจากระบบ |
| 1 | 0.73 | 0.66 |
| 2.5 | 0.71 | 0.68 |
| 5 | 0.68 | 0.66 |
| 7 | 0.65 | 0.63 |
| 10 | 0.55 | 0.53 |

(3) ประสิทธิภาพในการบำบัด SS

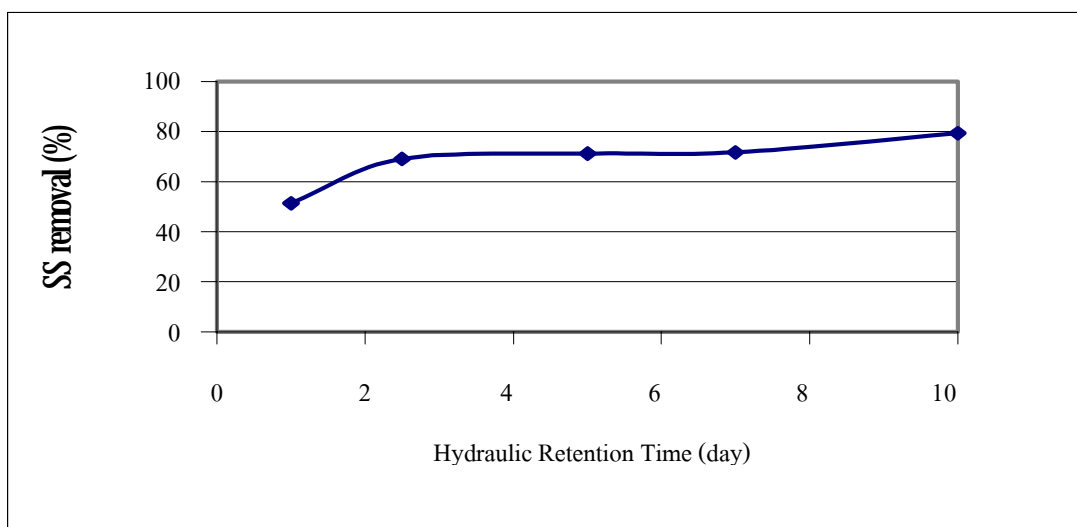
ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด SS ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน ผลการทดลองและผลการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัด SS แสดงในตารางที่ ข.6 ถึง ข.10 ประสิทธิภาพในการบำบัด SS แสดงในรูปที่ 4.6

ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบ ที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน มีค่าเฉลี่ยเป็น 79.33, 71.71, 71.16, 69.09 และ 51.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบมีค่าสูงสุดคือ 79.33 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพมีค่าลดลง เมื่อค่า Volumetric loading เพิ่มขึ้นนั่นคือมีระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยลง



รูปที่ 4.5 อัตราส่วน BOD : COD ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

(4) ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสในระบบ ที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.6 ถึง ข.10

ผลแสดงประสิทธิภาพแสดงในตารางที่ 4.4 นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ได้ดังรูป 4.7

ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน มีค่าเป็น 40.4, 34.4, 51.3, 76.7 และ 88.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัส ในน้ำแ่งมันสำปะหลัง คือ 1 วัน โดยทั่วไป ระบบบำบัดทางชีววิทยาที่ใช้สำหรับบำบัดฟอสฟอรัส โดยตรงนั้น สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ 1 และ 2.5วัน อยู่ในช่วง 70-90 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำอื่นๆ มีค่าต่ำกว่า อันเป็นผลเนื่องมาจากการทดลองนี้ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน โดยถ้ามีการหมุนเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถลดระยะเวลาเก็บกักน้ำในถังปฏิกรณ์ให้เหลือเพียง 2.25 ชั่วโมง และสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น นอกจากนั้นต้องมีการ

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วน BOD : P ของระบบแล้ว พบว่า อัตราส่วนของ BOD : P ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน คือ 100 : 0.76, 100 : 0.80, 100 : 1.17, 100 : 1.86 และ 100 : 1.55 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน และ 7 วัน มีค่า BOD : P น้อยกว่าทางทฤษฎี คือ 100 : 1 ดังนั้น ถ้าต้องการกำจัดฟอสฟอรัสให้ได้ปริมาณมาก ทำได้โดยการ

เพิ่ม Volumetric Loading ที่เข้าระบบให้สูงขึ้น

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน) | TP น้ำเข้า (mg/L) | TP น้ำออก (mg/L) | ประสิทธิภาพ (%) |
|--------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 119.5 | 13.7 | 88.5 |
| 2.5 | 217.9 | 50.8 | 76.7 |
| 5 | 88.7 | 43.2 | 51.3 |
| 7 | 53.1 | 34.8 | 34.4 |
| 10 | 54.5 | 32.5 | 40.4 |

(5) ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน

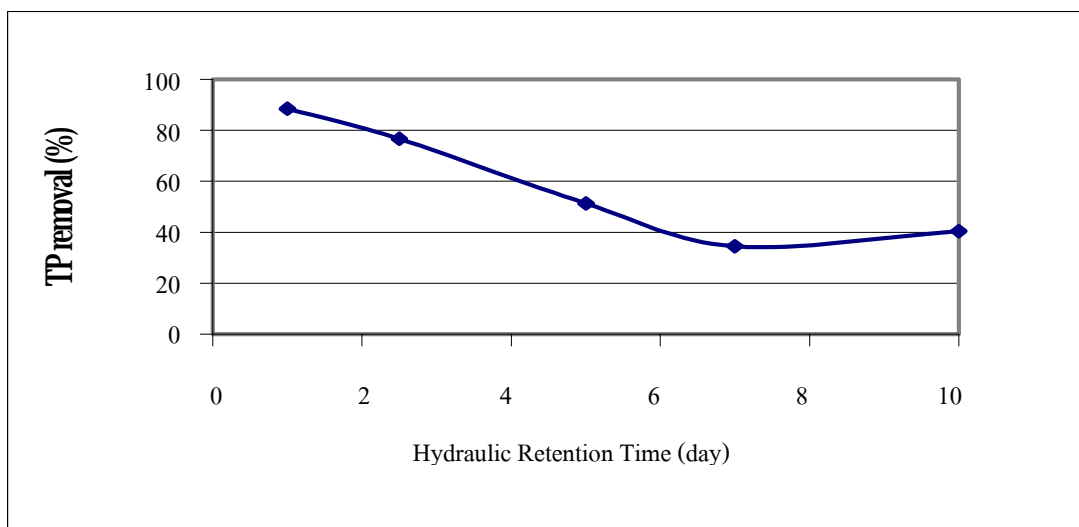
ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของระบบ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.6 ถึง ข.10 จากผลแสดงประสิทธิภาพในตารางที่ 4.5 นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของระบบ ได้ดังรูปที่ 4.8

ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน มีค่าเป็น 44.5, 32.8, 40.4, 71.7 และ 47.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

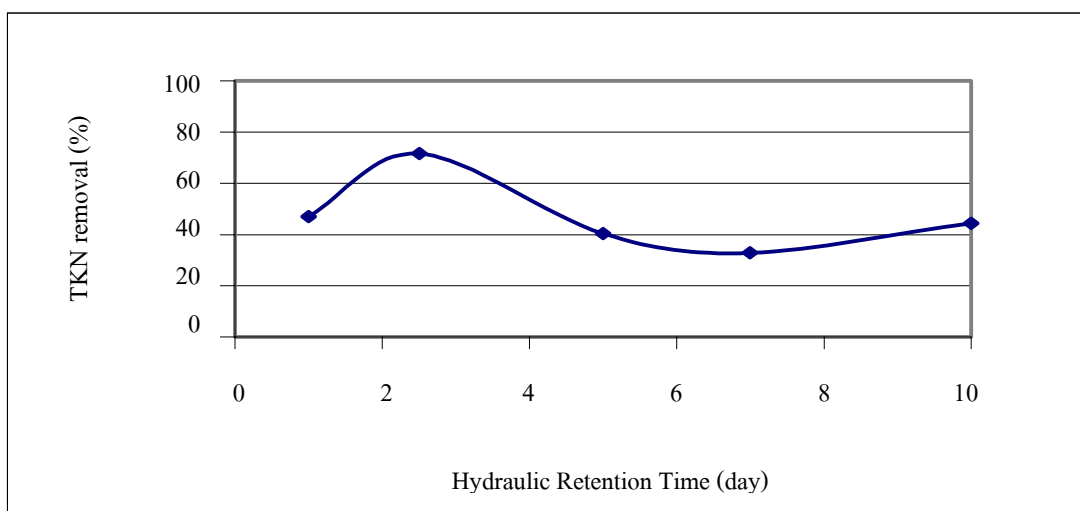
จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของระบบมีค่าสูงสุด 71.7 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจน คือ 2.5 วัน

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

| ระยะเวลาเก็บกัก (วัน) | TKN น้ำเข้า (mg/L) | TKN น้ำออก (mg/L) | ประสิทธิภาพ (%) |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | 159.3 | 84.3 | 47.1 |
| 2.5 | 291.8 | 82.6 | 71.7 |
| 5 | 161.2 | 96.1 | 40.4 |
| 7 | 77.2 | 51.9 | 32.8 |
| 10 | 149.4 | 83.0 | 44.5 |



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

(6) ประสิทธิภาพการสร้างกรดอินทรีย์และสร้างมีเทน

กรดอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยในกระบวนการแอนแอโรบิก ได้แก่ Lactic acid, Acetic acid, Propionic acid และ Butyric acid

ในการเปรียบเทียบปริมาณกรดอินทรีย์ในระบบ ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน

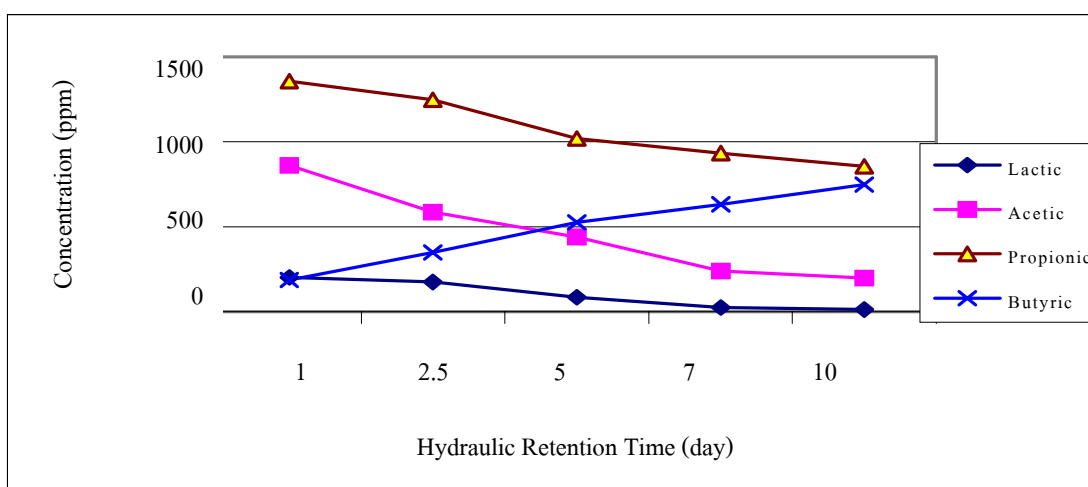
ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.6 ถึง ข.10 จากผลแสดงปริมาณกรด ในตารางที่ 4.6

นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และปริมาณกรดอินทรีย์ แต่ละชนิด ได้ ดังรูปที่ 4.9

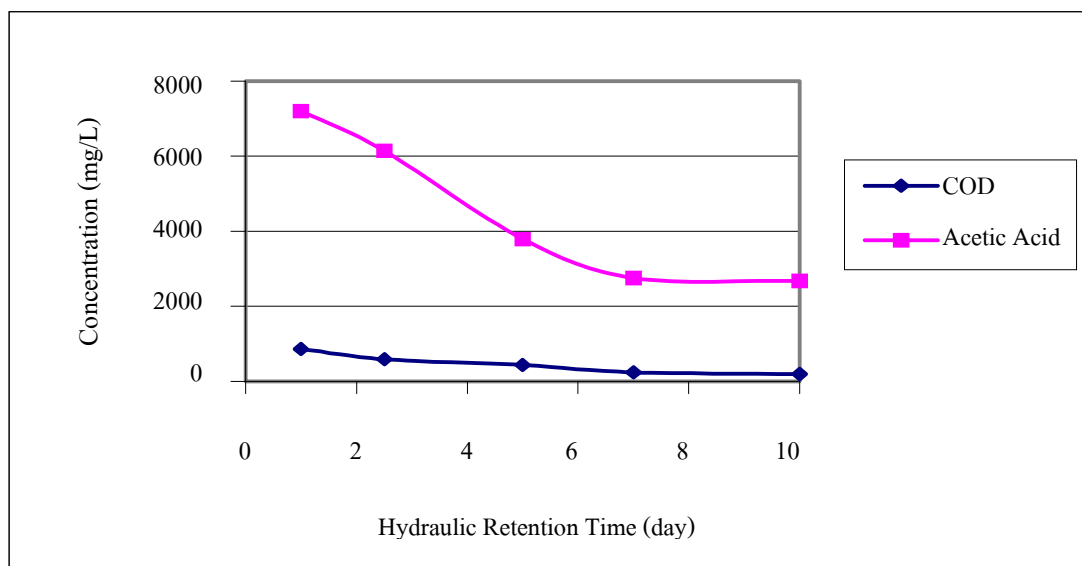
ตารางที่ 4.6 ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน) | Lactic (ppm) | Acetic (ppm) | Propionic (ppm) | Butyric (ppm) | COD _{eq} | COD จริง | % def. COD |
|--------------------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|----------|------------|
| 1 | 202.8 | 862.1 | 1,356.3 | 186.5 | 3,528.0 | 7,204.2 | 51.0 |
| 2.5 | 176.1 | 587.4 | 1,248.3 | 348.2 | 3,337.1 | 6,144.2 | 46.0 |
| 5 | 85.6 | 440.3 | 1,020.2 | 525.9 | 3,061.4 | 3,791.7 | 19.0 |
| 7 | 24.6 | 240.1 | 934.1 | 632.9 | 2,847.1 | 2,750 | 3.0 |
| 10 | 13.3 | 198.5 | 856.2 | 748.6 | 2,883.1 | 2,681.6 | 7.0 |

จากรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ ได้ กล่าวคือที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน พบว่า Acetic Acid และ Propionic Acid ปริมาณมากกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำอื่น ๆ (2.5, 5, 7 และ 10 วัน) เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน (อัตราการไหลมาก) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ยังอยู่ในกระบวนการแอซิโดเจเนซิส และยังส่งผลให้ปริมาณแก๊สมีเทนมีปริมาณน้อยกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำอื่น ๆ ด้วย



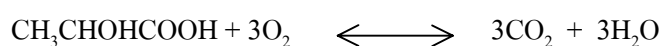
รูปที่ 4.9 ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของ COD และ Acetic Acid

ความสัมพันธ์การย่อยสลายสารอินทรีย์และความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีที่จุดสมดุลที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 และได้สรุปรายการคำนวณดังต่อไปนี้

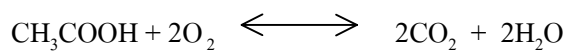
Lactic Acid



มวลโมเลกุล

90 96

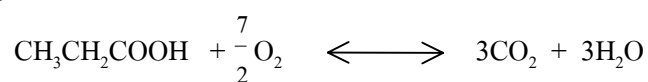
Acetic Acid



มวลโมเลกุล

60 64

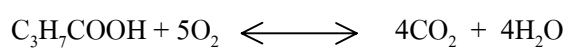
Propionic Acid



มวลโมเลกุล

74 112

Butyric Acid



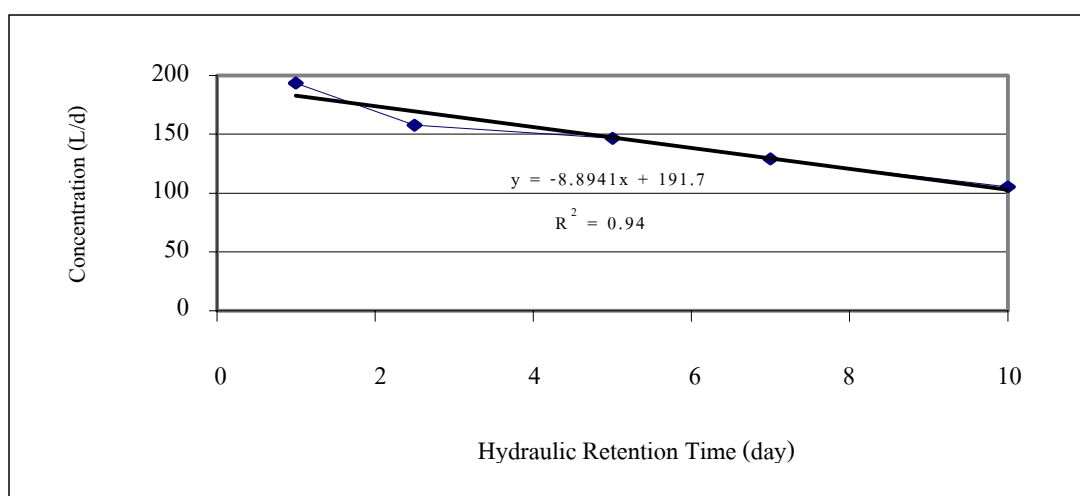
มวลโมเลกุล

88 160

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของกรดอินทรีย์และความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีที่จุดสมดุล

| ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (day) | COD _{eq} (mg/L) | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------|-----------|---------|
| | Lactic | Acetic | Propionic | Butyric |
| 1 | 216.3 | 919.6 | 2052.8 | 339.3 |
| 2.5 | 187.9 | 626.7 | 1889.3 | 633.3 |
| 5 | 91.4 | 469.7 | 1544.1 | 956.2 |
| 7 | 26.4 | 256.1 | 1413.9 | 1150.7 |
| 10 | 14.2 | 211.7 | 1296.0 | 1361.2 |

กระบวนการสร้างมีเซน คือ การเปลี่ยนอะซิเตทให้เป็นมีเซน โดยมีไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ในการเปรียบเทียบการผลิตแก๊สมีเซน ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10, 7, 5, 2.5 และ 1 วัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.11 สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ และการผลิตแก๊สมีเซน ได้ดังรูปที่ 4.11

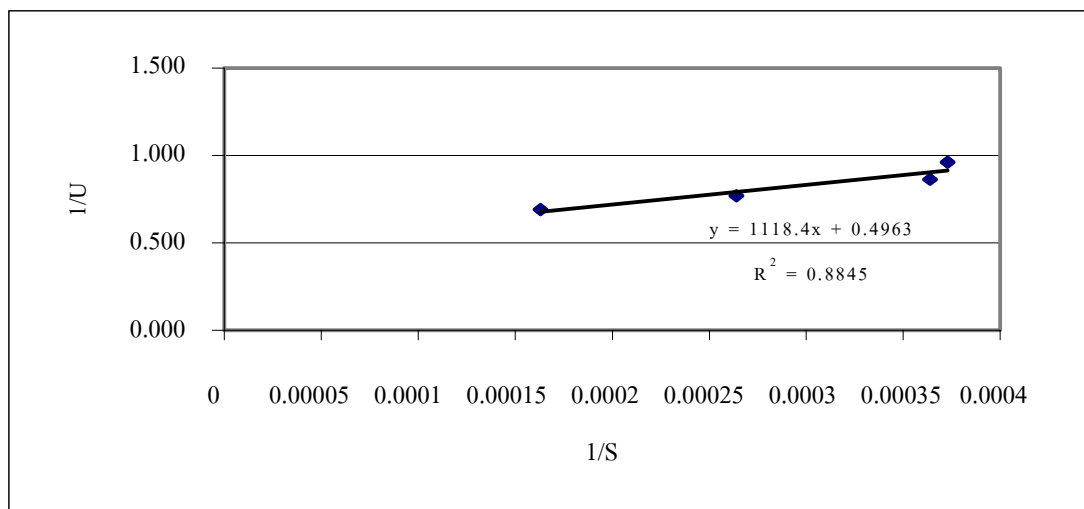


รูปที่ 4.11 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่างๆ

4.3 จลนศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

จากรายการคำนวณตาราง ข.14 สามารถสรุปจลนศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียของ โรงงาน แป้งมันสำปะหลัง ได้ดังนี้

Plot กราฟ $1/U$ กับ $1/S$ เพื่อหาค่า K_s และ k



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/U$ กับ $1/S$

จากสมการ

$$\frac{1}{u} = \left(\frac{K_s}{Sk} \right) + \left(\frac{1}{k} \right)$$

จะได้

$$\frac{1}{k} = \text{จุดตัดแกน } y = 0.4964$$

$$k = 1/0.4964 = 2.0145 \text{ mg/(mg-d)}$$

$$\frac{K_s}{k} = \text{Slope}$$

$$K_s = 1118.2 * 2.0145 = 2252.61 \text{ mg/L}$$

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{k(1 + k_d)}$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(\mu_m - K_d) - 1}$$

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลชีพ (k) สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง คือ 2.0 mg/(mg-d) และ สัมประสิทธิ์ในการใช้อาหารของจุลชีพ (K_s) คือ 2,253.0 mg/L ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน

ตารางที่ 4.8 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| สัมประสิทธิ์ในการบำบัดน้ำเสีย | หน่วย | ค่าสัมประสิทธิ์ | *ค่าสัมประสิทธิ์แอนแอโรบิก |
|---|-----------|-----------------|----------------------------|
| 1. อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลชีพ (k) | mg/(mg-d) | 2.0 | 3.6 |
| 2. สัมประสิทธิ์ในการใช้อาหารของจุลชีพ (K_s) | mg/L | 2,253.0 | 2,130.0 |

ที่มา : การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้แล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ สามารถสรุปข้อมูลสำคัญที่ได้จากการศึกษา ได้ดังต่อไปนี้

(1) กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิคคอนแทกสามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD สูง ๆ ได้ (4,024 – 27,290 mg/L) โดยมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD สูงถึง 79.4 เปอร์เซ็นต์

(2) ประสิทธิภาพในการลดค่า COD จะลดลงตามลำดับ เมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำลดลง และ/หรือ ค่าอายุตะกอนลดลง ดังนั้น จึงควรใช้ค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำในช่วง 7 ถึง 10 วัน

(3) การศึกษาทางจุลนศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิค ได้ค่าคงที่ ดังต่อไปนี้

$$k = 2.0 \text{ mg/(mg-d)}$$

$$K_s = 2,253.0 \text{ mg/L}$$

(4) ความสัมพันธ์ของกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน พบ Acetic Acid และ Propionic Acid ปริมาณมากกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำอื่น ๆ เนื่องจาก ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ยังอยู่ในกระบวนการแอซิโดเจเนซิสและยังส่งผลให้ปริมาณแก๊สมีเทนมีปริมาณน้อยกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำอื่น ๆ

(5) น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้สูงถึง 70.0 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ค่า COD สูงมาก ดังนั้นจึงควรใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ 2 ขั้นตอน (Two – Stage Process) ในการบำบัด เพื่อที่จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ตามมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรม

(2) ควรทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale เพื่อผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). *วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย*. (เล่มที่ 3). มิตรนราการพิมพ์ : กรุงเทพมหานคร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539ก). *การบำบัดน้ำเสีย*. มิตรนราการพิมพ์ : กรุงเทพมหานคร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539ข). *วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). มิตรนราการพิมพ์ : กรุงเทพมหานคร.
- เพชรพร เขาวกิจเจริญ. (2539). *ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. (2534). *การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพมหานคร.
- Albagnac, G. (1990). Biomass Retention in Advanced Anaerobic Reactors, **Water Science and Technology**, Vol 22, No. 1/2, pp 17-24.
- Balch, W.E., G.E. Fox, L.J. Magrum, C.R. Woese and R.S. Wolfe. (1979). Methanogens : Reevaluation of a unique biological group. **Microbiol. Rev.** 43 : 260-296.
- Balch, W.E., R.S. Taner and R.S. Wolfe. (1977). Acetobacterium a new genus of hydrogen-oxidizing, carbondioxide reducing, anaerobic bacteria. **Int. J. Syst. Bacteriol.** 27 : 355- 361.
- Boone, D.R. and M.P. Bryant. (1980). Propionate-degrading Bacterium, Syntrophobacterwolunii sp. nov. gen. nov., from methanogenic ecosystems. **Appl. Environ. Microbiol.** 40(3) : 626-632.
- Braun, M., S. Schoberth and G. Gottschalk. (1979). Enumeration of bacteria forming acetate From H₂ and CO₂ in anaerobic habitats. **Arch. Microbiol.** 120 : 201-204.
- Monod J. (1994). The Growth of Bacterial Cultures, **Ann. Rev. Microbiol.**, vol. 3.
- Polprasert, C. (1996). **Organic Waste Recycling**, 2nd ed., John Wiley & Sons, Singapore.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

| ลำดับ | ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | มาตรฐาน |
|-------|-------------------------------|-------|---------------------------|
| 1. | pH | - | 5.5 – 9.0 |
| 2. | ทีดีเอส (TDS) | mg/l | ≤ 3000 |
| 3. | สารแขวนลอย (Suspended Solids) | mg/l | ≤ 50 |
| 4. | ปรอท (Mercury) | mg/l | ≤ 0.005 |
| 5. | เซเลเนียม (Selenium) | mg/l | ≤ 0.02 |
| 6. | แคดเมียม (Cadmium) | mg/l | ≤ 0.03 |
| 7. | ตะกั่ว (Lead) | mg/l | ≤ 0.2 |
| 8. | อาร์เซนิก (Arsenic) | mg/l | ≤ 0.25 |
| 9. | บาเรียม (Barium) | mg/l | ≤ 1.0 |
| 10. | นิเกิล (Nickel) | mg/l | ≤ 1.0 |
| 11. | ทองแดง (Copper) | mg/l | ≤ 2.0 |
| 12. | สังกะสี (Zinc) | mg/l | ≤ 5.0 |
| 13. | แมงกานีส (Manganese) | mg/l | ≤ 5.0 |
| 14. | ซัลไฟด์ (Sulfide) | mg/l | ≤ 1.0 |
| 15. | ไซยาไนด์ (Cyanide) | mg/l | ≤ 0.2 |
| 16. | ฟอร์มาลดีไฮด์ | mg/l | ≤ 1.0 |
| 17. | สารประกอบฟีนอล (Phenols) | mg/l | ≤ 1.0 |
| 18. | คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) | mg/l | ≤ 1.0 |
| 19. | pesticide (Pesticide) | - | 0 |
| 20. | TKN | mg/l | ≤ 100 |
| 21. | COD | mg/l | ≤ 120 |
| 22. | BOD | mg/l | ≤ 60 |
| 23. | น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) | mg/l | ≤ 5 |
| 24. | สี | - | ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ |
| 25. | กลิ่น | - | ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ |

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน

พ.ศ. 2535

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน

| วันที่ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | |
|--------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) |
| 1 | 7.02 | 28.00 | 8844.88 | 6330.48 | 6.96 | 28.00 | 2592.00 | 1525.83 |
| 2 | 7.09 | 31.40 | 10067.20 | 3960.94 | 6.91 | 31.30 | 2516.80 | 1508.20 |
| 3 | 7.39 | 24.00 | 11727.18 | 7582.29 | 6.97 | 30.90 | 2437.13 | 1446.80 |
| 4 | 7.06 | 27.50 | 15539.20 | 7050.00 | 6.89 | 27.50 | 2575.00 | 1418.60 |
| 5 | 7.42 | 30.40 | 18722.80 | 11700.00 | 6.99 | 30.30 | 2726.00 | 1486.13 |
| 6 | 7.22 | 28.30 | 21504.00 | 12185.70 | 6.98 | 28.30 | 2784.00 | 1589.58 |
| 7 | 7.67 | 28.30 | 9964.00 | 6572.03 | 7.11 | 28.20 | 2720.00 | 1454.00 |
| 8 | 7.04 | 29.40 | 12834.37 | 5550.00 | 6.89 | 29.30 | 2564.80 | 1397.90 |
| 9 | 7.41 | 29.80 | 13164.00 | 2400.00 | 6.99 | 27.70 | 2780.00 | 1440.00 |
| 10 | 7.24 | 21.40 | 12992.24 | 10650.00 | 6.89 | 26.00 | 2700.00 | 1400.00 |

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน

| วันที่ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | |
|--------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) |
| 1 | 6.92 | 24.80 | 6986.40 | 4900.00 | 7.03 | 28.40 | 2804.40 | 1766.77 |
| 2 | 7.36 | 30.10 | 7831.20 | 4845.00 | 7.03 | 28.50 | 2610.40 | 1644.55 |
| 3 | 7.07 | 28.70 | 4024.00 | 3020.40 | 7.04 | 27.60 | 2665.90 | 1679.52 |
| 4 | 7.44 | 28.30 | 5263.30 | 4089.30 | 6.98 | 27.20 | 2708.30 | 1706.23 |
| 5 | 6.97 | 28.30 | 5040.00 | 5155.00 | 6.91 | 29.10 | 2850.00 | 1795.50 |
| 6 | 7.35 | 25.70 | 4958.80 | 5098.20 | 7.03 | 27.90 | 2732.40 | 1721.41 |
| 7 | 7.04 | 32.40 | 7162.80 | 4802.90 | 6.97 | 29.10 | 2754.00 | 1735.02 |
| 8 | 7.25 | 27.10 | 15000.00 | 6540.00 | 6.74 | 29.20 | 2672.00 | 1765.70 |
| 9 | 7.45 | 28.80 | 9800.00 | 8087.60 | 6.89 | 29.50 | 2800.00 | 1691.80 |
| 10 | 7.33 | 31.20 | 5922.50 | 5357.40 | 6.94 | 30.60 | 2778.00 | 1711.62 |

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน

| วันที่ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | |
|--------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) |
| 1 | 8.51 | 27.20 | 15238.80 | 9448.06 | 7.82 | 27.30 | 4830.60 | 2898.36 |
| 2 | 8.67 | 28.50 | 15540.00 | 9634.80 | 7.82 | 28.30 | 4851.00 | 2910.60 |
| 3 | 8.52 | 28.40 | 14553.00 | 9022.86 | 7.83 | 29.20 | 4455.00 | 2673.00 |
| 4 | 8.63 | 28.10 | 14940.00 | 9262.80 | 7.52 | 29.40 | 4083.60 | 2450.16 |
| 5 | 7.61 | 29.30 | 11880.00 | 7365.60 | 7.64 | 29.80 | 4257.00 | 2554.20 |
| 6 | 8.47 | 30.60 | 13147.20 | 8151.26 | 7.51 | 30.90 | 3884.40 | 2330.64 |
| 7 | 8.74 | 28.50 | 14029.60 | 8698.35 | 7.64 | 31.00 | 3984.00 | 2390.40 |
| 8 | 7.58 | 27.20 | 11600.00 | 7500.00 | 7.63 | 26.80 | 3854.00 | 2425.00 |
| 9 | 7.91 | 31.80 | 11389.00 | 7568.00 | 7.52 | 30.90 | 3700.00 | 2510.00 |
| 10 | 8.04 | 26.40 | 10297.40 | 7516.00 | 7.63 | 23.60 | 3821.00 | 2512.00 |

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 2.5 วัน

| วันที่ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | |
|--------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) |
| 1 | 9.20 | 31.60 | 22176.00 | 13508.00 | 7.25 | 30.10 | 6048.00 | 4717.44 |
| 2 | 8.88 | 28.00 | 23423.40 | 13719.57 | 6.78 | 27.50 | 6286.80 | 4023.55 |
| 3 | 8.81 | 28.00 | 27290.40 | 14374.80 | 6.43 | 26.40 | 5776.80 | 4274.83 |
| 4 | 8.10 | 28.00 | 18731.20 | 9524.15 | 6.97 | 27.20 | 5904.40 | 4251.17 |
| 5 | 8.21 | 31.60 | 21242.00 | 10115.60 | 6.93 | 30.10 | 5631.60 | 3829.48 |
| 6 | 9.24 | 32.30 | 21632.48 | 10128.00 | 6.86 | 31.40 | 5969.34 | 3880.05 |
| 7 | 8.45 | 32.00 | 20083.20 | 11648.30 | 6.95 | 30.60 | 6066.80 | 3882.75 |
| 8 | 9.78 | 30.80 | 11012.90 | 7922.00 | 6.65 | 30.00 | 6161.00 | 4251.09 |
| 9 | 8.90 | 31.00 | 10800.00 | 7608.00 | 6.76 | 30.00 | 6060.00 | 4060.20 |
| 10 | 8.16 | 30.90 | 10960.00 | 7763.00 | 6.51 | 29.60 | 6211.50 | 4302.00 |

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองของระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน

| วันที่ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | |
|--------|---------------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) | pH | Temp (°C) | COD (mg/L) | BOD (mg/L) |
| 1 | 8.03 | 29.90 | 17928.00 | 7543.70 | 6.06 | 30.30 | 7569.60 | 5234.00 |
| 2 | 8.27 | 26.20 | 17700.00 | 7873.50 | 6.17 | 25.80 | 7700.00 | 5168.00 |
| 3 | 7.57 | 28.40 | 17119.44 | 7820.00 | 6.20 | 28.80 | 7495.80 | 4974.65 |
| 4 | 7.81 | 29.30 | 16539.12 | 7794.80 | 5.96 | 30.00 | 7350.72 | 4862.80 |
| 5 | 7.59 | 28.20 | 17312.88 | 7881.60 | 6.26 | 29.50 | 7350.72 | 4881.00 |
| 6 | 7.90 | 30.40 | 12600.00 | 7548.00 | 5.85 | 31.20 | 7156.00 | 4689.00 |
| 7 | 7.73 | 31.80 | 14622.40 | 7968.90 | 5.79 | 32.20 | 7261.80 | 4753.00 |
| 8 | 7.73 | 31.80 | 10920.93 | 7813.00 | 6.28 | 32.20 | 7261.80 | 4794.50 |
| 9 | 7.90 | 30.40 | 10403.95 | 7740.00 | 5.85 | 31.20 | 7000.00 | 4510.53 |
| 10 | 7.81 | 29.30 | 10587.17 | 7706.67 | 5.77 | 30.00 | 7350.72 | 4926.78 |

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน

| รายการ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | | ประสิทธิภาพ(%) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------------------------|---------|---------|-----------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | |
| pH | 7.04 | 7.41 | 7.24 | 7.23 | 6.89 | 6.99 | 6.89 | 6.92 | - |
| Temperature(°C) | 29.40 | 29.80 | 21.40 | 26.87 | 29.30 | 27.70 | 26.00 | 27.67 | - |
| BOD (mg/L) | 5550.00 | 5286.40 | 10650.00 | 7162.13 | 1397.90 | 1440.00 | 1400.00 | 1412.63 | 80.28 |
| COD (mg/L) | 12834.37 | 13164.00 | 12992.24 | 12996.87 | 2564.80 | 2780.00 | 2700.00 | 2681.60 | 79.36 |
| TKN (mg/L) | 141.40 | 118.44 | 188.40 | 149.41 | 84.28 | 70.28 | 94.36 | 82.97 | 44.47 |
| TP (mg/L) | 41.03 | 47.53 | 74.93 | 54.50 | 24.58 | 32.12 | 40.68 | 32.46 | 40.44 |
| TS (mg/L) | 8752.00 | 7532.00 | 10912.00 | 9065.33 | 4889.60 | 4643.20 | 4646.40 | 4726.40 | 47.86 |
| SS (mg/L) | 4920.00 | 4900.00 | 4920.00 | 4908.65 | 1060.00 | 984.00 | 1000.00 | 1014.67 | 79.33 |
| TVS (mg/L) | 5502.00 | 5164.00 | 8728.50 | 6464.83 | 2612.00 | 2792.00 | 2928.00 | 2777.33 | 57.04 |
| VSS (mg/L) | 3036.00 | 2220.00 | 3576.00 | 2944.00 | 1056.00 | 900.00 | 1024.00 | 993.33 | 66.26 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 831.00 | 796.50 | 824.00 | 817.17 | 483.00 | 367.60 | 387.00 | 412.53 | 49.52 |

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน

| รายการ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกระบบ (Effluent) | | | | ประสิทธิภาพ(%) |
|--------------------------------------|---------------------------|---------|---------|-----------|--------------------------|---------|---------|-----------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | |
| pH | 7.25 | 7.45 | 7.33 | 7.34 | 6.74 | 6.89 | 6.94 | 6.86 | - |
| Temperature(°C) | 27.10 | 28.80 | 31.20 | 29.03 | 29.20 | 29.50 | 30.60 | 29.77 | - |
| BOD (mg/L) | 6540.00 | 8087.60 | 5357.40 | 6661.67 | 1765.70 | 1691.80 | 1711.62 | 1723.04 | 74.14 |
| COD (mg/L) | 15000.00 | 9800.00 | 5922.50 | 10240.83 | 2672.00 | 2800.00 | 2778.00 | 2750.00 | 73.15 |
| TKN (mg/L) | 104.20 | 67.71 | 59.56 | 77.16 | 49.61 | 49.43 | 56.62 | 51.89 | 32.75 |
| TP (mg/L) | 64.93 | 45.07 | 49.18 | 53.06 | 33.42 | 27.26 | 43.70 | 34.79 | 34.43 |
| TS (mg/L) | 7804.00 | 6536.00 | 6912.00 | 7084.00 | 4416.04 | 4072.52 | 4177.61 | 4222.06 | 40.40 |
| SS (mg/L) | 5472.00 | 4260.00 | 4370.00 | 4700.67 | 1380.80 | 1355.61 | 1252.56 | 1329.66 | 71.71 |
| TVS (mg/L) | 4896.00 | 5740.00 | 5210.00 | 5282.00 | 1732.00 | 2624.00 | 2118.00 | 2158.00 | 59.14 |
| VSS (mg/L) | 2760.00 | 2244.00 | 2528.00 | 2510.67 | 868.00 | 868.00 | 1036.00 | 924.00 | 63.20 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 921.98 | 982.05 | 898.93 | 934.32 | 737.59 | 742.04 | 662.99 | 714.21 | 23.56 |

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน

| รายการ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | | ประสิทธิภาพ(%) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------------------------|---------|----------|-----------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | |
| pH | 7.58 | 10.91 | 9.04 | 9.18 | 7.63 | 7.52 | 7.63 | 7.59 | - |
| Temperature(°C) | 27.20 | 31.80 | 26.40 | 28.47 | 26.80 | 30.90 | 23.60 | 27.10 | - |
| BOD (mg/L) | 7500.00 | 7568.00 | 7516.00 | 7528.00 | 2425.00 | 2510.00 | 2512.00 | 2482.33 | 68.15 |
| COD (mg/L) | 11600.00 | 11389.00 | 10297.40 | 11095.47 | 3854.00 | 3700.00 | 3821.00 | 3791.67 | 65.83 |
| TKN (mg/L) | 171.92 | 160.72 | 151.08 | 161.24 | 101.08 | 92.40 | 94.92 | 96.13 | 40.38 |
| TP (mg/L) | 100.55 | 83.42 | 82.05 | 88.68 | 43.15 | 43.84 | 42.47 | 43.15 | 51.34 |
| TS (mg/L) | 14730.00 | 15070.00 | 14960.00 | 14920.00 | 9576.00 | 9770.40 | 99568.80 | 9638.40 | 35.40 |
| SS (mg/L) | 5390.96 | 5280.00 | 2520.00 | 4330.32 | 1075.97 | 1309.00 | 1358.20 | 1248.72 | 71.16 |
| TVS (mg/L) | 8570.00 | 8600.00 | 8700.00 | 8623.33 | 3880.00 | 3980.00 | 3853.33 | 3904.44 | 54.72 |
| VSS (mg/L) | 5270.00 | 5110.00 | 2100.00 | 4160.00 | 906.67 | 1244.31 | 1220.00 | 1123.66 | 72.99 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 971.38 | 1201.87 | 1094.62 | 1089.29 | 625.63 | 691.49 | 658.36 | 658.49 | 39.55 |

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 2.5 วัน

| รายการ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกระบบ (Effluent) | | | | ประสิทธิภาพ(%) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------|--------------------------|----------|----------|-----------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | |
| pH | 9.78 | 8.90 | 8.16 | 8.95 | 6.65 | 6.76 | 6.51 | 6.64 | - |
| Temperature(°C) | 30.80 | 31.00 | 30.90 | 30.90 | 30.00 | 30.00 | 29.60 | 29.87 | - |
| BOD (mg/L) | 7922.00 | 7608.00 | 7763.00 | 7764.33 | 4251.00 | 4060.20 | 4302.00 | 4204.40 | 45.85 |
| COD (mg/L) | 11012.90 | 10800.00 | 10960.00 | 10924.30 | 6161.00 | 6060.00 | 6211.50 | 6144.17 | 43.76 |
| TKN (mg/L) | 283.36 | 294.56 | 297.36 | 291.76 | 78.40 | 79.80 | 89.60 | 82.60 | 71.69 |
| TP (mg/L) | 205.34 | 213.56 | 234.79 | 217.90 | 40.60 | 50.68 | 60.96 | 50.75 | 76.71 |
| TS (mg/L) | 15020.00 | 15325.00 | 15270.00 | 15205.00 | 10500.00 | 10465.00 | 10735.00 | 10566.67 | 30.51 |
| SS (mg/L) | 7810.00 | 7200.00 | 7110.00 | 7373.33 | 2111.50 | 2220.30 | 2507.50 | 2279.43 | 69.09 |
| TVS (mg/L) | 8750.00 | 9220.00 | 9150.00 | 9040.00 | 5290.00 | 5605.00 | 5785.00 | 5560.00 | 38.50 |
| VSS (mg/L) | 6750.00 | 6050.00 | 6170.00 | 6323.33 | 1190.00 | 1240.00 | 1540.00 | 1323.33 | 79.07 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 1432.76 | 1468.00 | 1699.32 | 1533.36 | 749.70 | 666.40 | 773.00 | 729.70 | 52.41 |

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน

| รายการ | น้ำที่เข้าระบบ (Influent) | | | | น้ำที่ออกจากระบบ (Effluent) | | | | ประสิทธิภาพ(%) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------------------------|---------|---------|-----------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | |
| pH | 7.73 | 7.90 | 7.81 | 7.81 | 6.28 | 5.85 | 5.77 | 5.97 | - |
| Temperature(°C) | 31.80 | 30.40 | 29.30 | 30.50 | 32.20 | 31.20 | 30.00 | 31.13 | - |
| BOD (mg/L) | 7813.00 | 7740.00 | 7567.00 | 7706.67 | 4794.50 | 4510.53 | 4926.78 | 4743.94 | 38.44 |
| COD (mg/L) | 10920.93 | 10403.95 | 10436.63 | 10587.17 | 7261.80 | 7000.00 | 7350.72 | 7204.17 | 31.95 |
| TKN (mg/L) | 148.40 | 166.88 | 162.60 | 159.29 | 84.40 | 82.52 | 86.08 | 84.33 | 47.06 |
| TP (mg/L) | 152.60 | 123.84 | 82.19 | 119.54 | 13.70 | 13.70 | 13.70 | 13.70 | 88.54 |
| TS (mg/L) | 11730.00 | 11715.00 | 11710.00 | 11718.33 | 6190.00 | 6025.00 | 6145.00 | 6120.00 | 47.77 |
| SS (mg/L) | 6350.00 | 5220.00 | 5950.00 | 5840.00 | 2720.00 | 3170.00 | 2640.00 | 2843.33 | 51.31 |
| TVS (mg/L) | 10360.00 | 10375.00 | 10305.00 | 10346.67 | 4415.00 | 4225.00 | 4375.00 | 4338.33 | 58.07 |
| VSS (mg/L) | 6080.00 | 5020.00 | 5690.00 | 5596.67 | 2360.00 | 2980.00 | 2460.00 | 2600.00 | 53.54 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 1271.68 | 1189.74 | 1544.52 | 1335.31 | 836.38 | 784.00 | 973.49 | 864.62 | 35.25 |

ตารางที่ ข.11 พารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ

| รายการ/พารามิเตอร์ | ระยะเวลาเก็บกัก | | | | |
|------------------------|-----------------|---------|----------|----------|----------|
| | 1 วัน | 2.5 วัน | 5 วัน | 7 วัน | 10 วัน |
| pH | 5.97 | 6.64 | 7.59 | 6.86 | 6.92 |
| Temperature(°C) | 31.13 | 29.87 | 27.10 | 29.77 | 27.67 |
| BOD (mg/L) | 4743.94 | 4204.40 | 2482.33 | 1723.04 | 1412.63 |
| COD (mg/L) | 7204.17 | 6144.17 | 3791.67 | 2750.00 | 2681.60 |
| BOD/COD | 0.66 | 0.68 | 0.66 | 0.63 | 0.53 |
| TKN (mg/L) | 84.33 | 82.60 | 96.13 | 51.89 | 82.97 |
| TP (mg/L) | 13.7 | 50.75 | 43.15 | 34.79 | 32.46 |
| Organic acids | | | | | |
| - Lactic acid (ppm) | 202.856 | 176.142 | 85.670 | 24.663 | 13.348 |
| - Acetic acid (ppm) | 862.138 | 587.490 | 440.333 | 240.135 | 198.510 |
| - Propionic acid (ppm) | 856.267 | 934.157 | 1020.266 | 1248.326 | 1356.337 |
| - Butyric acid (ppm) | 186.556 | 348.268 | 525.958 | 632.943 | 748.650 |
| แก๊สชีวภาพ (L/d) | 193.3 | 157.60 | 146.51 | 129.03 | 105.38 |
| แก๊สมีเทน (%) | 55 | 58.00 | 64.00 | 66.00 | 70.00 |
| ประสิทธิภาพการบำบัด | 31.95 | 43.76 | 65.83 | 73.15 | 79.36 |

ตารางที่ ข.12 การทดลองทางพลศาสตร์ของแข็งปฏิกรณ์

| Time (min) | dt (min) | AgNO ₃ (mL) | NaCl, C (mg/L) | Ci = C/C ₀ | Ci * dt | ti * Ci * dti | ti ² *Ci*dti |
|---------------|-------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|---------|---------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0.90 | 16.495 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 10 | 1.20 | 41.237 | 0.004 | 0.041 | 0.412 | 4.124 |
| 40 | 10 | 6.10 | 445.362 | 0.045 | 0.445 | 17.814 | 712.579 |
| 50 | 10 | 8.00 | 602.063 | 0.060 | 0.602 | 30.103 | 1505.158 |
| 60 | 10 | 9.00 | 684.538 | 0.068 | 0.685 | 41.072 | 2464.336 |
| 70 | 10 | 9.50 | 725.775 | 0.073 | 0.726 | 50.804 | 3556.297 |
| 80 | 10 | 9.80 | 750.517 | 0.075 | 0.751 | 60.041 | 4803.311 |
| 120 | 10 | 13.30 | 1039.178 | 0.104 | 1.039 | 124.701 | 14964.160 |
| 140 | 10 | 10.30 | 791.755 | 0.079 | 0.792 | 110.846 | 15518.388 |
| 150 | 10 | 8.10 | 610.311 | 0.061 | 0.610 | 91.547 | 13731.991 |
| 160 | 10 | 7.90 | 593.816 | 0.059 | 0.594 | 95.011 | 15201.687 |
| 170 | 10 | 6.80 | 503.094 | 0.050 | 0.503 | 85.526 | 14539.417 |
| 180 | 10 | 6.50 | 478.352 | 0.048 | 0.478 | 86.103 | 15498.595 |
| 190 | 10 | 5.50 | 395.877 | 0.040 | 0.396 | 75.217 | 14291.167 |
| 200 | 10 | 5.40 | 387.630 | 0.039 | 0.388 | 77.526 | 15505.192 |
| 210 | 10 | 5.10 | 362.888 | 0.036 | 0.363 | 76.206 | 16003.339 |
| 220 | 10 | 4.50 | 313.403 | 0.031 | 0.313 | 68.949 | 15168.696 |
| 230 | 10 | 4.20 | 288.661 | 0.029 | 0.289 | 66.392 | 15270.140 |
| 240 | 10 | 4.00 | 272.166 | 0.027 | 0.272 | 65.320 | 15676.739 |
| 250 | 10 | 3.80 | 255.671 | 0.026 | 0.256 | 63.918 | 15979.419 |
| 260 | 10 | 3.50 | 230.928 | 0.023 | 0.231 | 60.041 | 15610.760 |
| 270 | 10 | 3.30 | 214.434 | 0.021 | 0.214 | 57.897 | 15632.202 |
| 280 | 10 | 3.00 | 189.691 | 0.019 | 0.190 | 53.114 | 14871.790 |
| 290 | 10 | 2.70 | 164.949 | 0.016 | 0.165 | 47.835 | 13872.202 |
| 300 | 10 | 2.60 | 156.701 | 0.016 | 0.157 | 47.010 | 14103.126 |
| 310 | 10 | 2.60 | 156.701 | 0.016 | 0.157 | 48.577 | 15058.966 |
| 320 | 10 | 2.50 | 148.454 | 0.015 | 0.148 | 47.505 | 15201.690 |

ตารางที่ ข.12 การทดลองทางพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| Time (min) | dt (min) | AgNO ₃ (mL) | NaCl, C (mg/L) | Ci = C/C ₀ | Ci * dt | ti * Ci * dti | ti ² *Ci*dti |
|---------------|-------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|---------|---------------|-------------------------|
| 330 | 10 | 2.50 | 148.454 | 0.015 | 0.148 | 48.990 | 16166.641 |
| 340 | 10 | 2.10 | 115.464 | 0.012 | 0.115 | 39.258 | 13347.638 |
| 350 | 10 | 2.10 | 115.464 | 0.012 | 0.115 | 40.412 | 14144.340 |
| 360 | 10 | 2.00 | 107.217 | 0.011 | 0.107 | 38.598 | 13895.297 |
| 370 | 10 | 1.90 | 98.969 | 0.010 | 0.099 | 36.619 | 13548.856 |
| 380 | 10 | 1.80 | 90.722 | 0.009 | 0.091 | 34.474 | 13100.242 |
| 390 | 10 | 1.70 | 82.474 | 0.008 | 0.082 | 32.165 | 12544.356 |
| 400 | 10 | 1.60 | 74.227 | 0.007 | 0.074 | 29.691 | 11876.320 |
| 410 | 10 | 1.50 | 65.980 | 0.007 | 0.066 | 27.052 | 11091.154 |
| 420 | 10 | 1.50 | 65.980 | 0.007 | 0.066 | 27.712 | 11638.872 |
| 430 | 10 | 1.40 | 57.732 | 0.006 | 0.058 | 24.825 | 10674.665 |
| 440 | 10 | 1.30 | 49.485 | 0.005 | 0.049 | 21.773 | 9580.238 |
| 450 | 10 | 1.20 | 41.237 | 0.004 | 0.041 | 18.557 | 8350.533 |
| 460 | 10 | 1.20 | 41.237 | 0.004 | 0.041 | 18.969 | 8725.749 |
| 470 | 10 | 1.10 | 32.990 | 0.003 | 0.033 | 15.505 | 7287.447 |
| 480 | 10 | 1.10 | 32.990 | 0.003 | 0.033 | 15.835 | 7600.896 |
| 490 | 10 | 1.10 | 32.990 | 0.003 | 0.033 | 16.165 | 7920.899 |

ประวัติผู้เขียน

นางสาว จารุณี เรียมพิมพ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 เริ่มเข้าศึกษาปริญญาตรี ที่ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2541 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาจึงได้ทำการศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2542

