การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

นางสาว ธนวรรณ ติลกการย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม   ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOGAS PRODUCTION FROM PALM OIL MILL EFFLUENT (POME) USING ANAEROBIC BAFFLED REACTOR SYSTEM

Miss Thanawan Tilokkarn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ
โดย	นางสาว ธนวรรณ ติลกการย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. วรางคณา ศรนิล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนวรรณ ติลกการย์ : การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ. (BIOGAS PRODUCTION FROM PAIM OIL MILL EFFLUENT (POME) USING ANAEROBIC BAFFLED REACTOR SYSTEM)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 172 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์จำนวน 2 ถัง ปริมาตร 10 ลิตร โดยถังที่ 1 แบ่งเป็น 3 ห้องและถังที่ 2 แบ่งเป็น 4 ห้อง (3C และ 4C ตามลำดับ) ทำการทดลองโดยใช้เวลากักเก็บทางชลศาสตร์คงที่ ที่ 24 ชั่วโมง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยมีค่าซีโอดีประมาณ 133,010 มก./ล., ค่าของแข็งแขวนลอย 27,900 มก./ล. และค่าพีเอช 4.4 โดยมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เริ่มต้นที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน จากนั้นได้มีการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน ตามลำดับ

พบว่าระบบมีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงและมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่สูง โดยถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 83.23±10.10 และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 82.45±9.47 และมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังปฏิกิริยา 3C และ 4C เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 15.80 และ 15.25 ล./วัน ตามลำดับ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 770.16 และ 778.27 มล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วนการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่าอยู่ในช่วง 10.0 – 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)ให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่า โดยถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันสำหรับอัตราภาระสารอินทรีย์ในช่วงนี้เท่ากับ 77.34% และ 72.19% ตามลำดับ แต่ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูง คือที่ 30.0 – 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่า โดยถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันในช่วงนี้เท่ากับ 49.17% และ 56.48% ตามลำดับ

ซึ่งสรุปได้ว่าถังปฏิกิริยาแผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 3 ห้อง และแบบ 4 ห้อง มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกัน ที่ปริมาตรของระบบรวมเท่ากัน แตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องของการกำจัดน้ำมันและไขมัน และเมื่อพิจารณาในแต่ละห้อง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะมากที่สุดในห้องที่ 1 ของทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาและลดลงตามลำดับไปจนถึงห้องสุดท้าย โดยงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมที่มีค่าน้ำมันและไขมันและซีโอดีสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ธนวรรณ ติลกการย์
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก พิชญ รัชฎาวงศ์
ปีการศึกษา 2553

5070687021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ANAEROBIC BAFFLEED REACTOR / PALM OIL MILL EFFLUENT / BIOGAS

THANAWAN TILOKKARN : BIOGAS PRODUCTION FROM PALM OIL MILL EFFLUENT (POME) USING ANAEROBIC BAFFLED REACTOR SYSTEM. ADVISOR : ASST.PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., 172 pp.

The objectives of this research were to study biogas production and COD removal efficiency of wastewater from palm oil mill industry using Anaerobic Baffled Reactors (ABR). The research used the 3- and 4-compartment of ABR (3C and 4C). Two ABR reactors volume were 10 liters each. Wastewater from palm oil mill, with COD concentration of 133,010 mg/l, suspended solids of 27,000 mg/l and pH 4.4, was fed to both reactors. The organic loading rate (OLR) at the beginning of the study was 2.5 kg COD/m^3-day. Then, organic loading rates of the feed were increased to 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 and 40.0 kg COD/ m^3-day respectively.

The results showed that the system has good performance in treating wastewater with high concentration and producing high volume of biogas. For the 3C reactor, average COD removal was about 83.23±10.10%. For the 4C reactor, average COD removal was about 82.45± 9.47%. Biogas production rates for the reactor 3C and 4C were 15.80 and 15.25 l/day respectively. Average biogas production potential for the experiment were 770.16 and 778.27 ml biogas / g COD removed, respectively. At organic loading rates from 10.0 to 25.0 kg COD/ m^3-d, The 3C reactor had better performance. The 3C and 4C reactors possessed average efficiency for oil and fat at this organic loading rate range at 77.34% and 72.19% respectively. But at high organic loading rate range of 30.0 to 40.0 kg COD/ m^3-d, the 4C reactor provided better removal efficiency. Average removal efficiency of oil and fat for this loading range was 49.17% and 56.48% respectively.

In conclusion, two ABR reactors were effective for COD removal and biogas production similarly. They exhibited slightly different efficiencies in terms for oil and grease removal. The COD removal efficiency is the highest at the first compartment and decreased gradually along the rest of compartments . The experimental results can be further applied for the wastewater from industries that contains with high concentration of oil and COD.

Department : Environmental Engineering Student's Signature Thanawan Tilokkarn

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature ....

Academic Year : 2010

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้โอกาส ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่ดีตลอดมา จนกระทั่งงานวิจัยสามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ผศ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ และ อาจารย์ ดร. วรางคณา ศรนิล ที่ได้กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยให้คำแนะนำ ชี้แนะปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย

ขอขบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่คอยให้คำแนะนำและเอื้ออำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดเวลาทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ จนสามารถทำการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อระบบไร้อากาศ และ บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดีตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชายและน้องสาวเป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้คำแนะนำและคำปรึกษา รวมทั้งให้สิ่งดีๆ ในชีวิตตลอดมา โดยเฉพาะและกำลังใจในทุกๆ เรื่อง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ... ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง.. ญ

สารบัญภาพ.. ฐ

บทที่ 1 บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.. 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ... 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... 5

2.1 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม.. 5

2.1.1 ปาล์มน้ำมัน.. 5

2.1.2 ส่วนประกอบของทะลายปาล์มน้ำมัน... 6

2.1.3 กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน... 7

2.1.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม.. 9

2.1.5 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม... 14

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ... 16

2.2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้อากาศ........................ 17

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ.. 21

2.3 ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.. 23

2.4 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์... 24

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.. 24

2.4.2 ชนิดของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ... 25

2.4.3 ข้อดีของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.. 26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.4.4 การพัฒนาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.. 27
2.4.5 การทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.. 30
2.4.6 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ...................................... 32
2.4.7 ลักษณะของกลุ่มแบคทีเรียในถังปฏิกิริยา..................................... 34
2.4.8 การสร้างเม็ดตะกอนในถังปฏิกิริยา... 34
2.4.9 ความสามารถในการกักเก็บตะกอน... 34
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 36
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.. 40
3.1 แผนการวิจัย.. 40
3.2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย... 41
3.3 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย.. 41
3.4 สารอาหารเสริม.. 42
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย... 42
3.5.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง... 42
3.5.2 เครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง.. 44
3.5.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสีย.............. 45
3.6 จุดเก็บตัวอย่าง... 46
3.7 วิธีการดำเนินการวิจัย.. 46
3.7.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานน้ำมันปาล์มในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ............................. 47
3.7.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพ ของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......................... 51
3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.. 56
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.. 57
4.1 ลักษณะน้ำเสีย.. 57
4.2 ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์... 58
4.3 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ (Start-up)............. 59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ.................... 60
4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในระยะเริ่มต้นระบบ................ 69
4.3.3. สภาวะแวดล้อมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในระยะเริ่มต้นระบบ............................... 71
4.4 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (Organic Loading Rate)... 76
4.4.1. ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.. 76
4.4.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อัตราภาระบรรทุกสาร-อินทรีย์ต่างๆ.. 98
4.4.3 สภาวะแวดล้อมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.. 113
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.. 127
5.1 สรุปผลการวิจัย.. 127
5.2 ข้อเสนอแนะ... 130
รายการอ้างอิง.. 131
ภาคผนวก.. 136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 172

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม................	8
2.2	การเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบใช้อากาศและไร้อากาศ................................	16
2.3	คุณสมบัติต่างๆ ของก๊าซมีเทน………………………………………….………	24
2.4	ข้อดีของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ……………………………………….…………	27
2.5	การพัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ...	31
2.6	ข้อแนะนำในการใช้งานระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ……………………………..………	35
3.1	คุณสมบัติน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม……………………………………	42
3.2	ปริมาณสารอาหารเสริมและสารอาหารเสริมรอง (Vanderbilt Media)……….....	43
3.3	ลักษณะการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ………....	49
3.4	ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ………………………………..……	49
3.5	จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ…………………………………………..........…………	50
3.6	ลักษณะการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ..	52
3.7	ตัวแปรในการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ..................................	53
3.8	จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ…………………………………….............…	55
3.9	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์....................	56
4.1	ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม……………………………..	58
4.2	ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย…………………………...	58
4.3	ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ…………………………….....	62
4.4	ค่าเฉลี่ยซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว………....	62
4.5	ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบ ในช่วงต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ…………………………..…………………………………….……	64

ตารางที่		หน้า
4.6	ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว……………………………………………………………………	64
4.7	ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว…………………….………………………………………………………	65
4.8	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีและที่เกิดขึ้นจริงในระยะเริ่มเดินระบบ...	66
4.9	ค่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยง่ายระเหยต่อของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว………………………………………....	67
4.10	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ........	69
4.11	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีและที่เป็นจริงในระยะเริ่มเดินระบบ............	70
4.12	ค่าพีเอชน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มต้นระบบ....................................	73
4.13	ค่าสภาพด่างน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ............................	74
4.14	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในระยะเริ่มเดินระบบ.....................	75
4.15	ค่าซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..........................	77
4.16	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในสภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ...	80
4.17	ค่าของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆตลอดการทดลอง...	84
4.18	อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา...	86
4.19	อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสของน้ำเข้าระบบ.............................	88
4.20	ค่าไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) ในน้ำเข้าระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ........	88
4.21	ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกใช้ไปและที่เหลืออยู่ในน้ำออกที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ..	90
4.22	อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสของน้ำออกจากระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ..	91
4.23	ค่าน้ำมันและไขมันในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ...........	94
4.24	ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..	97

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่		หน้า
4.25	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..	99
4.26	การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) กับค่าทางทฤษฎี.............................	102
4.27	การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) กับค่าทางทฤษฎี)............................	105
4.28	ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น......................................	106
4.29	สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)..........	108
4.30	สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C).........	109
4.31	การเปรียบเทียบผลการศึกษาของการใช้ถังปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม...	112
4.32	อุณหภูมิในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..........................	113
4.33	ค่าพีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ...........................	115
4.34	ค่าความเป็นด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..............	119
4.35	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ......	122
4.36	อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..	124
4.37	ค่าโออาร์พีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......................	126

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม...	15
2.2	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ.............	18
2.3	ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ..	25
2.4	ลักษณะของถังปฏิกิริยาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบต่างๆ..............................	29
3.1	ชุดอุปกรณ์การทดลองชุดที่ 1(3C)..	43
3.2	ชุดอุปกรณ์การทดลองชุดที่ 2(4C)..	44
3.3	รูปแบบของถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.......................................	45
3.4	ขั้นตอนของการทดลองที่ 1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ..	48
3.5	ขั้นตอนของการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ..............................	54
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระสารอินทรีย์กับระยะเวลาที่ทำการทดลอง ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง...	59
4.2	ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ..	61
4.3	ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำออกจากระบบกับเวลา ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ..	63
4.4	ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังเทียบกับเวลาในระยะเริ่มต้นเดินระบบ................	67
4.5	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ.......	69
4.6	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีในระยะเริ่มเดินระบบ..	71
4.7	อุณหภูมิในระยะเริ่มต้นระบบ..	72
4.8	ค่าพีเอชน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มต้นระบบ..................................	73
4.9	ค่าสภาพด่างน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ..........................	74
4.10	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในระยะเริ่มเดินระบบ..................	75
4.11	ค่าซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ........................	76
4.12	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆ..	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
4.13	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ................	82
4.14	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา..	85
4.15	อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา...	87
4.16	ค่าทีเคเอ็นในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....................	89
4.17	ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.......	89
4.18	ค่าน้ำมันและไขมันในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา...	93
4.19	ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	97
4.20	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา………………………………………………………………………	100
4.21	การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) กับค่าทางทฤษฎี...........................	103
4.22	การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 2 กับค่าทางทฤษฎี..................................	104
4.23	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.................	110
4.24	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ....................	111
4.25	อุณหภูมิในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ…………….……	114
4.26	พีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ............................	116
4.27	สภาพความเป็นด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ........	118
4.28	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา..	120
4.29	กรดระเหยต่อสภาพด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา………………………………………………………………………	125
4.30	ค่าโออาร์พีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา...	126

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่สำคัญในภาคใต้ของประเทศไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการพัฒนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมสบู่ อุตสาหกรรมโอลิโอเคมิคอล เป็นต้น นอกจากนั้น ยังสามารถนำไปผลิตเชื้อเพลิงได้อีกด้วย โดยอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิด By-product ขึ้นมากกว่าร้อยละ 60 ของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตทั้งหมด ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมีสาเหตุจากกระบวนการสกัดน้ำมัน โดยการนึ่งผลปาล์ม การแยกเมล็ดในปาล์ม และสกัดน้ำมันออกจากปาล์ม นอกจากนี้ อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มยังมีการใช้น้ำในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากซึ่งมีภาระความสกปรกของสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง (ปริมาณ ซีโอดีประมาณ 90,000 มก./ล.) นอกจากนี้ กระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดของเสียในรูปของแข็ง ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และกากตะกอน อีกด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) จากการที่อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องทำให้ปริมาณของเศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน เช่น ทะลายปาล์มเปล่า เปลือกผลปาล์ม กะลาปาล์ม และน้ำเสีย แต่เนื่องจากกากของเสียนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้ เช่น กากของลูกปาล์มหลังการหีบ เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลแก่หม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำและ/หรือกระแสไฟฟ้า ปุ๋ยอินทรีย์ วัสดุปรับปรุงดิน อาหารสัตว์ เป็นต้น

ดังนั้น จึงเหลือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตซึ่งมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูงที่จำเป็นต้องหาวิธีการในการจัดการ โดยปริมาณน้ำเสียรวมถึงกากตะกอนจำนวนมากจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้สร้างปัญหาในด้านมลพิษซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชมใกล้เคียง อีกทั้งยังกลายเป็นรายจ่ายส่วนเกินที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นอีกด้วย ปัจจุบันระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพถูกนำมาใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถช่วยในการลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีส่วนช่วยในการลดผลกระทบด้านมลภาวะทางน้ำได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งส่วนใหญ่ อยู่ในรูปก๊าซมีเทนจะถูกนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นสามารถจำหน่ายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับโรงงานอีกทางหนึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีหลายชนิด สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์ (Anaerobic Baffled Reactor) เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถรับปัญหาการเปลี่ยนแปลงภาระสารอินทรีย์อย่างกระทันหันได้ สามารถเก็บกักปริมาณจุลชีพได้สูง จึงสามารถรองรับภาระสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงได้ (High organic loading) เกิดการอุดตันในระบบน้อย นอกจากนั้นยังสามารถแบ่งแยกเฟสต่างๆ ของการย่อยสลายทำให้สามารถแยกแบคทีเรียในแต่ละเฟสของถังได้

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาถึงประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการพิจารณาเลือกระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน และเพื่อใช้ในการออกแบบและควบคุมระบบให้เหมาะสมกับการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มหรือน้ำเสียที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่จำนวนห้องในระบบที่แตกต่างกันในการรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม

1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มที่การรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แปรเปลี่ยนไป

1.2.3 ศึกษาการแปรรูปจากค่าสารอินทรีย์ละลายที่ถูกกำจัดไปเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระบบห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการน้ำเสียภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งในการศึกษาวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำเสียจริงของโรงงานน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดใดๆ ทั้งสิ้น จาก บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ตะกอนจุลินทรีย์ (Seed) ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเป็นหัวเชื้อจากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิ-เนียรส์ จำกัด

1.3.3 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิจัยเป็นระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (ABR) วัสดุทำจากอะครีลิค มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงเป็น 11.00 49.60 และ 32.60 เซนติเมตร ตามลำดับ ระยะความสูงเหนือผิวน้ำ (freeboard) 12.60 เซนติเมตร มีปริมาตรของเหลวภายในระบบทั้งหมด 10 ลิตร และท่อทางน้ำเข้ากับทางน้ำออกจะใช้ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว จำนวน 2 ชุดการทดลอง โดยภายในถังปฏิกิริยาแบ่งออกเป็นขนาด 3 ห้อง(3C) จำนวน 1 ชุดการทดลอง และแบ่งออกเป็นขนาด 4 ห้อง(4C) จำนวน 1 ชุดการทดลอง

1.3.4 งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองหลัก ดังนี้

<u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์มในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังพร้อมกัน ทั้งแบบที่มีการกั้นห้องแบบ 3 ห้อง (3C) และแบบ 4 ห้อง (4C) โดยเริ่มต้นจากการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวพร้อมที่จะใช้ในการศึกษาผลที่เกิดจากสภาวะต่างๆ ซึ่งในระยะแรกจะเป็นการปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อป้องกันความเป็นพิษของน้ำเสียต่อจุลินทรีย์ในระบบ

<u>การทดลองที่ 2</u> ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ โดยทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งจะมีการเก็บข้อมูลวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว และน้ำเสียที่อยู่ในระบบในห้องต่างๆ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบตามภาระบรรทุกที่เปลี่ยนไป

โดยการทดลองกระทำภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศของห้องปฏิบัติการน้ำเสียภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.5 การวิเคราะห์ค่าตัวแปร ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for Examination of water and wastewater, 1998 โดยทำในห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการลดมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

1.4.3 ทราบถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

1.4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาประยุกต์ในการปรับปรุงหรือพัฒนา ระบบต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 **อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม** (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญทางเศรษฐกิจอย่างหนึ่งของประเทศ เนื่องจากน้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยประเทศในแถบโซนเอเชียที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันกันมากก็คือ ประเทศอินโดนีเซีย ประเทศมาเลเซีย และประเทศไทย ซึ่งประเทศไทยนั้นเริ่มมีการปลูกปาล์มน้ำมันครั้งแรกในปี พ.ศ. 2511 แต่ได้รับความสนใจในการปลูกเพื่อผลิตในระบบอุตสาหกรรมราวปี พ.ศ. 2541 โดยได้มีการลงทุนผลิตปาล์มน้ำมัน และสวนปาล์มน้ำมันควบคู่กัน ปัจจุบันมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยประมาณเกือบ 3 ล้านไร่ พื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมัน และการผลิตปาล์มน้ำมันทั่วโลกนั้นมีประเทศมาเลเซีย และอินโดนีเซียเป็นประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ ซึ่งรวมกันแล้วมีพื้นที่ปลูกกว่า 36 ล้านไร่ จังหวัดใหญ่ๆที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยนั้น ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร โดยมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มกระจายอยู่ทั่วไป ตามตัวเลขอย่างเป็นทางการประเทศไทยมีผลผลิตน้ำมันปาล์มประมาณ 6 ล้านตัน ผลผลิตเฉลี่ยได้เพียง 2.7 กก./ต้น/ไร่ (ปาล์มน้ำมัน 1 ไร่ มี 22 ต้น ให้ผลผลิต 6 ตัน) การขายทะลายปาล์มนั้นจะขายเป็นทะลายปาล์มสด โดยเกษตรกรจะขายกับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยตรง หรือขายผ่านลานเทที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป

2.1.1 **ปาล์มน้ำมัน**

ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับ มะพร้าว ต้นจาก ระกำ และตาลโตนด โดยทั่วไปปาล์มน้ำมันจะขึ้นได้ที่ละติจูด 20 องศาเหนือและใต้เส้นศูนย์สูตร ซึ่งมีอากาศร้อนชื้น มีปริมาณน้ำฝนเพียงพอและกระจายเกือบตลอดปี ได้มีการปลูกปาล์มน้ำมันในเชิงการค้าเป็นครั้งแรกที่จังหวัดกระบี่และสตูล ต่อมามีการปลูกกันอย่างแพร่หลายในหลายจังหวัดโดยเฉพาะจังหวัดในทางภาคใต้ จึงก่อให้เกิดอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ในภาคใต้เป็นจำนวนมาก

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ที่มีความทนทานต่อภัยธรรมชาติ นอกจากนี้ปาล์มน้ำมันยังจัดเป็นพืชที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (Eco-friendly Crop) คือ เมื่อปลูกไปเป็นระยะเวลานานจะทำให้ระบบนิเวศน์ที่เคยเสียหายกลับคืนสู่ภาวะปกติ อีกทั้งน้ำมันที่สกัดได้จากผลปาล์มยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์และเป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย อาทิเช่น

อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและพลังงานทดแทนได้อีกด้วย

ปาล์มน้ำมันโดยมากที่ปลูกเป็นการค้าเป็นปาล์มน้ำมันที่เรียกว่า African Oil Palm ซึ่งจัดตามอนุกรมวิธานได้ ดังนี้

Class : Angiospermae

Subclass : Monocotyledon

Order : Palmae

Subfamily : Cocodies

Genus : Elaeis

Spiecies : guineensis

Scientific name : *Elaeis guineensis Jacq*

2.1.2 ส่วนประกอบของทะลายปาล์มน้ำมัน (100%)

เมื่อนำมาแปรรูปแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

1. ผลปาล์มน้ำมัน 71% แบ่งเป็น
    - 1.1. น้ำมันปาล์มดิบ 22% ประกอบด้วย
        - น้ำมันปาล์มโอเลอิน 15%
        - น้ำมันปาล์มสเตียริน 5%
        - กรดไขมันปาล์ม 2%
    - 1.2 ความชื้น 26%
    - 1.3 กากเส้นใยปาล์ม 11%
    - 1.4 เมล็ดปาล์มน้ำมัน 12% ประกอบด้วย
        - เนื้อในกะลาปาล์ม 5.5%
        - น้ำมันจากเนื้อในกะลาปาล์ม 2.5%
        - กากเนื้อในกะลาปาล์ม 3.0 %
        - กะลาปาล์มน้ำมัน 6.5%

2. ทะลายเปล่าของปาล์ม 28%

3. สิ่งเจือปนอื่นๆ 1%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน

น้ำมันที่ได้จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมันได้มาจากสองส่วนด้วยกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.3.1 **น้ำมันปาล์มจากเปลือกนอก** (Mesocarp)

น้ำมันที่ได้ในส่วนนี้เป็นน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) มีลักษณะเป็นสีแดงเข้ม โดยน้ำมันส่วนนี้ได้มาจากการหีบเปลือกนอกของผลปาล์ม มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีน้ำปนอยู่ จากนั้นจะทำการแยกเอาสิ่งสกปรกและกากใยออกโดยวิธีการกรอง แล้วนำไปขจัดความชื้นให้อยู่ในมาตรฐานเพื่อลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนส่งไปยังโรงกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อไป โดยปริมาณของกรดไขมันอิสระและปริมาณสารต่างๆ ที่มีในน้ำมันปาล์ม แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.1.3.2 **น้ำมันจากเนื้อในเมล็ดปาล์ม** (Kernel)

น้ำมันที่ได้ในส่วนนี้เป็นน้ำมันเนื้อใน (Palm Kernel Oil) ได้จากการหีบเนื้อในเมล็ดด้วยแรงอัดสูงๆ หรือสกัดด้วยตัวทำละลาย น้ำมันที่ได้ในส่วนนี้มีลักษณะแตกต่างจากน้ำมันที่ได้ในส่วนแรก มีลักษณะใสไม่มีสีจนถึงมีสีเหลืองอ่อน มีคุณสมบัติและส่วนประกอบใกล้เคียงกับน้ำมันมะพร้าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2550)

ชนิดของกรดไขมัน	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil)
กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)	50 %	82 %
กรดคาโพรอิก (C6:0)	-	0.1 - 0.5
กรดคาไพรลิก (C8:0)	-	3.4 - 5.9
กรดคาพริก (C10:0)	-	3.3 - 4.4
กรดลอริก (C12:0)	0.1 - 0.4	46.3 - 51.1
กรดไมริสติก (C14:0)	1.0 - 1.4	14.3 - 16.8
กรดปาล์มิติก (C16:0)	40.9 - 47.5	6.5 - 8.9
กรดสเตียริก (C18:0)	3.8 - 4.8	1.6 - 2.6
กรดอะราคิดิก (C20:0)	0 - 0.8	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว(Unsaturated fatty acid)	50 %	18 %
กรดปาล์มมิโตเลอิก (C16:1)	0 - 0.6	-
กรดโอเลอิก (C18:1)	36.4 - 41.2	13.2 - 16.4
กรดลิโนเลอิก (C18:2)	9.2 - 11.6	2.2 - 3.4
กรดลิโนเลนิก (C18:3)	0 - 0.5	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

หลังจากทะลายปาล์มถูกเก็บเกี่ยว จะเข้าสู่กระบวนการสกัดหรือหีบน้ำมันออกมาใช้ประโยชน์ต่อไป กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เพราะเป็นการเอาน้ำมันออกจากผลปาล์มน้ำมันเป็นการทำให้ได้น้ำมันดิบ (Crude oil) ที่ดีมีคุณภาพสูงที่สุดเพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูปต่อไป เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดน้ำมันให้ได้น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil) ที่ได้จากส่วนของเปลือก (Mesocarp) และน้ำมันเนื้อใน (Palm kernel oil) ที่ได้จากชั้นของเนื้อใน (Kernel) น้ำมันที่ได้ออกมาทั้งสองส่วนนี้จะเรียกว่า น้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งจะส่งไปยังโรงงานกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ และโรงงานแปรรูปต่างๆ เพื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์บริโภคและอุปโภค และที่สำคัญคือ การนำไปทำเป็นน้ำมันไบโอดีเซล

การสกัดน้ำมันเพื่อให้ได้น้ำมันดิบนั้นจะต้องเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดหลายอย่าง ซึ่งการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปจะใช้ตามคุณภาพของน้ำมันที่สกัดได้

ผลผลิตที่ได้จากสวนปาล์มน้ำมันนั้นสิ่งแรกก็คือ ทะลายสดปาล์มน้ำมันหรือที่เรียกว่า FFB : Fresh Fruit Bunch เป็นทะลายปาล์มน้ำมันทั้งทะลายหรือทั้งช่อ ซึ่งจะขนส่งเข้าโรงงานสกัดน้ำมัน หลังจากนั้นโรงงานจะสกัดน้ำมันออกมาโดยที่ส่วนใหญ่โรงงานจะสกัดน้ำมันจากส่วนเปลือกระยะเดียวและส่งเนื้อใน (Kernel) ให้โรงงานต่อไปสกัดน้ำมันต่อ ผลผลิตของปาล์มน้ำมันลักษณะหนึ่งก็คือ การที่เกษตรกรนำทะลายปาล์มน้ำมันออกจากต้นแล้วนำมาบ่มและเฉาะ(ลูก)ผลปาล์มน้ำมันแยกออกจากทะลายแล้วนำส่งเฉพาะผลสู่โรงงานที่สกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากเนื้อในพร้อมกัน ซึ่งจะได้น้ำมันดิบรวมออกมา

2.1.4.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงาน

1. การรับและการเก็บทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB : Fresh Fruit Bunch)

หลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตปาล์มน้ำมันทั้งทะลายจะถูกนำส่งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม การรับซื้อของโรงงานจะรับซื้อทั้งทะลาย ข้อสำคัญของการส่งทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB : Fresh Fruit Bunch) คือ ต้องรีบส่งเร็วที่สุดภายหลังการเก็บเกี่ยวลงจากต้น (ภายใน 72 ชั่วโมง) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระบวนการที่เอนไซม์ตามธรรมชาติที่อยู่ในส่วนเนื้อชั้นกลางของผลปาล์ม (Mesocarp) ทำให้น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) น้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสดมีกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 1 หากทิ้งผลปาล์มไว้นานปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมันปาล์มมีปริมาณและคุณภาพลดลง

การส่งทะลายปาล์มน้ำมันเข้าโรงงานจะส่งทั้งผลผลิตปาล์มน้ำมันทั้งทะลายผสมกับส่วนของผลร่วงที่เก็บมารวมกันในรถบรรทุกส่งโรงงานที่จะสกัดในขั้นต่อไป

2. การนึ่งทะลายปาล์มสดในหม้อนึ่ง (Sterilizer)

ทะลายสดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการชั่งน้ำหนักและส่งขึ้นลานเทปาล์ม จะถูกบรรจุลงในกระบะบรรจุปาล์มและเคลื่อนผ่านรางเข้าสู่หม้ออบนึ่งไอน้ำ (Autoclave) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำทะลายสดปาล์มน้ำมันเข้าไปอบด้วยความร้อนและความดัน โดยจะใช้อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ (Stream pressure) 2.4-3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเวลา 60-70 นาที

การอบความดันและความร้อนทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB : Fresh Fruit Bunch) เป็นกระบวนการที่ทำเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เป็นการยับยั้งกระบวนการที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ในผลปาล์มน้ำมัน
- เป็นการทำให้ผลปาล์มน้ำมันหลุดร่วงออกมาจากทะลายง่ายในขั้นตอนต่อไป
- ทำให้ชั้นเปลือกนุ่มเพื่อความสะดวกในการหีบน้ำมันในขั้นต่อไป
- ช่วยทำให้การกะเทาะเมล็ดออกจากเนื้อในสะดวกง่ายขึ้นในขั้นตอนต่อไป
- ช่วยให้การสกัดแยกน้ำออกจากผลปาล์มน้ำมันได้ง่ายในขั้นตอนต่อไป
- เป็นการลดปริมาณน้ำออกจากผลปาล์มน้ำมัน

การอบไอน้ำและความดันทะลายสดปาล์มน้ำมันนี้ หากใช้เวลานานไป จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมันปาล์มได้ โดยทั่วไปแล้วการอบความดันและความร้อนตามเวลาที่กำหนดตามมาตรฐานก็จะมีโอกาสสูญเสียน้ำมันประมาณ 3% ในขณะเดียวกันการอบความดันและความร้อนในระยะที่สั้นไปก็จะทำให้ผลปาล์มน้ำมันจำนวนหนึ่งไม่สามารถหลุดจากทะลายในขั้นตอนการแยกผลปาล์มน้ำมัน

3. การแยกผลปาล์ม (Bunch Stripping)

กระบวนการนี้ทะลายปาล์มที่ผ่านการนึ่งจะถูกนำเข้าสู่เครื่องแยกผลปาล์มและทะลายปาล์มออกจากกัน โดยเครื่องนวด (Stripping) หรือเครื่องแยกแบบหมุน (Rotary Drum Thresher) ซึ่งเครื่องจะทำหน้าที่แยกผลปาล์มน้ำมันออกจากทะลาย หมดขั้นตอนนี้จะได้ผลปาล์มน้ำมันและทะลายเปล่า (Empty Fruit Bunches: EFB) แยกจากกัน ส่วนของผลปาล์มน้ำมันจะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการย่อยผล และส่วนของทะลายปาล์มน้ำมันจะถูกนำไปเผา หรือไปใช้ในสวนปาล์มน้ำมันอีกครั้งหนึ่งโดยใช้คลุมโคนต้น จากผลการวิเคราะห์ทะลายเปล่าจะมีแร่ธาตุหลาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างโดยเฉพาะธาตุโพแทสเซียมอาจมีสูงถึง 30-35% โดยน้ำหนัก และมีแมกนีเซียม 3-5% โดยน้ำหนัก

4. การย่อยผลปาล์มน้ำมัน (Digestion)

ผลปาล์มที่แยกออกมาจากทะลายปาล์มแล้วนั้น จะนำเข้าสู่เครื่องย่อย (Vertical Steam-jacked Drum Digesters) เพื่อย่อยเปลือกออกจากเมล็ด เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของเปลือก (Mesocarp) และส่วนของเมล็ด (Seed) กระบวนการย่อยผลปาล์มน้ำมันจะต้องใช้ความร้อนประมาณ 95 องศาเซลเซียส โดยต้องควบคุมอุณหภูมิอยู่ในระดับนี้ตลอดไม่ให้สูง เพราะจะทำให้น้ำเดือด การย่อยนี้จะต้องมีความสม่ำเสมอทั่วถึง

5. การหีบน้ำมันปาล์ม

เป็นกระบวนการต่อจากกระบวนการย่อยผลปาล์มน้ำมัน โดยเป็นเส้นทางของการทำน้ำมันปาล์ม เครื่องหีบน้ำมันปาล์มเป็นแบบเกลียวอัด แบบเครื่องปั่น หรือแบบอัด Hydraulic

การใช้เครื่องหีบแบบเกลียวอัด (Screw press) ใช้ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ขนาดของเครื่องอาจมีขนาดเล็กที่สามารถหีบน้ำมันปาล์มได้ 3 ตันต่อชั่วโมง ถ้าขนาดใหญ่สามารถหีบน้ำมันปาล์มได้ถึง 13 ตันต่อชั่วโมง ส่วนเครื่องปั่น (Centrifuge) ใช้ความเร็วรอบ 950-1,250 รอบต่อนาที กำลังการผลิต 1-2 ตันต่อชั่วโมง ใช้เวลาการปั่นประมาณ 10 นาที การหีบน้ำมันโดยเครื่องปั่นนี้มีข้อดี คือ ได้น้ำมันที่ไม่มีเศษกาก ส่วนเครื่องอัดนั้นจะสามารถบีบได้ประมาณ 5 ตันผลสดปาล์มน้ำมันต่อชั่วโมง น้ำมันที่ได้จากการหีบด้วยเครื่องปั่นจะมีน้ำ 40-50% และมีสิ่งเจือปนเล็กน้อย ส่วนน้ำมันดิบที่ได้จากการอัด จะมีน้ำ 55% โดยที่น้ำมันดิบจากเครื่องอัดเกลียวจะมีน้ำ 60% และสิ่งเจือปนมาก การหีบน้ำมันปาล์มจะได้ผลผลิตออกมาเป็นน้ำมันปาล์มที่ยังคงมีสิ่งเจือปนและความชื้นอยู่จึงต้องผ่านขั้นต่อไป

6. กรองน้ำมัน

กระบวนการกรองน้ำมันต่อจากน้ำมันดิบที่ได้จากการหีบ เพื่อแยกน้ำมันออกจากของผสม โดยขั้นตอนนี้จำเป็นต้องเติมน้ำร้อนลงไปในน้ำมันดิบ แล้วผ่านเครื่องกรองน้ำมันซึ่งจะเป็นตะแกรงสั่น (Vibrating Screen) แบบมีแผ่นกรองหลายชั้น เมื่อเสร็จสิ้นการกรองจะได้น้ำมันที่สะอาดปราศจากกากน้ำมัน โดยเครื่องจะแยกกากออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. เครื่องเหวี่ยง

เป็นการใช้เครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง กระบวนการทำงานของเครื่องนี้ก็คือการแยกน้ำและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันที่ได้จากการกรองจะยังมีน้ำและสิ่งเจือปนอยู่ (มีน้ำปนอยู่ประมาณ 40-60%)

การเหวี่ยงนี้อาศัยความเร็วสูงและความร้อนเข้าช่วย ก็จะสามารถแยกเอาน้ำและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบได้ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส น้ำมันจะอยู่ส่วนบน (ความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ) ส่วนน้ำจะถูกแยกออกมาตามท่อ

8. สกัดความชื้น

น้ำมันดิบที่เข้าเครื่องเหวี่ยงเรียบร้อยแล้วจะยังคงมีความชื้นอยู่ จึงต้องสกัดความชื้นออกก่อนนำไปบรรจุในถังเพื่อส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูปต่อไป น้ำมันดิบที่ได้จะต้องมีมาตรฐานความชื้นตามที่กำหนด

สิ้นสุดกระบวนการสกัดความชื้นจะได้น้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ดีมีคุณภาพตามกำหนดโดยทั่วไปจะดูจากส่วนประกอบต่างๆ คือ

- กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ไม่เกิน 5%

- ความชื้นไม่เกิน 0.5%

- สิ่งเจือปนไม่เกิน 0.05%

2.1.4.2 **ขั้นตอนการคัดแยกกะลาและเนื้อใน**

1. กากใยและเมล็ด

จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานโดยมีขั้นตอนตามลำดับ ตั้งแต่การนำผลผลิตเป็นทะลายสดปาล์มน้ำมันมาอบด้วยไอน้ำความดันแล้วแยกผลปาล์มออกจากทะลาย ต่อจากนั้นจึงย่อยผลปาล์มน้ำมัน ซึ่งพอถึงขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของน้ำมันปาล์ม (Palm oil) ส่วนของกากใยและเมล็ดออกมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนของกากใยเมล็ดที่ถูกแยกออกมานี้ก็คือส่วนของกากใยจากชั้น Mesocarp และเมล็ดทั้งเมล็ดซึ่งประกอบด้วยชั้นของกะลา (Shell) และเนื้อใน (Kernel) ในชั้นของเนื้อในนี้จะมีน้ำมันที่เรียกว่า Palm kernel oil

2. แยกเมล็ด

ส่วนของกากใยและเมล็ดจะถูกเข้าเครื่องแยกซึ่งจะแยกชั้นของกากใยออกไปทางหนึ่งและเมล็ดไปทางหนึ่ง ส่วนของกากใยจะถูกส่งไปทำปุ๋ยในสวนปาล์มน้ำมันและใช้ประโยชน์ต่างๆ หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานต่อไป โดยที่ส่วนของเมล็ด (Seed) จะถูกส่งไปยังกระบวนการขั้นต่อไป

3. อบเมล็ด

กระบวนการเมล็ดนี้ทำเพื่อไล่น้ำออกจากส่วนของเมล็ด เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของเมล็ด ซึ่งประกอบด้วยชั้นของกะลา (Shell) และเนื้อใน (Kernel) ส่วนของน้ำจะถูกแยกออกไป

4. กะเทาะเมล็ด

เมล็ดปาล์มน้ำมันทั้งเมล็ด (Seed) ที่ถูกเข้าสู่ขั้นตอนนี้จะถูกกะเทาะให้แตกเพื่อให้ได้เนื้อใน (Kernel) แยกออกมา เสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของกะลา (Shell) และเนื้อใน (Kernel)

5. แยกเศษกะลา

เป็นขั้นตอนการแยกเอาส่วนของกะลา (Shell) ออกจากส่วนของเนื้อใน (Kernel) ในขั้นตอนนี้จะแยกเอาส่วนของกะลาเปล่าออกไป ซึ่งก็จะถูกส่งไปใช้ประโยชน์ต่างๆ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงงาน อย่างไรก็ตามกะลาเปล่านี้สามารถนำไปแยกเพื่อทำ Activated charcoal หรือถ่านกำมันต์ได้ ส่วนของเนื้อในจะถูกส่งไปยังขั้นตอนต่อไป ซึ่งชั้น (Kernel) จะเป็นส่วนที่มีน้ำมันที่เรียกว่า Palm kernel oil อยู่

6. อบเนื้อใน

ส่วนของเนื้อในที่ได้จากขั้นตอนการกะเทาะ หรือแยกส่วนมาแล้ว จะมีปริมาณความชื้นอยู่ระดับหนึ่ง ในทางปฏิบัติจะต้องเอาความชื้นออก กระบวนการเอาความชื้นออกก็คือการอบเพื่อให้น้ำระเหยออก การอบเนื้อในจะใช้อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 14-16

ชั่วโมง ซึ่งจะมีความชื้นต่ำกว่า 7% เนื้อในที่ได้ออกมาจะถูกบรรจุกระสอบ แล้วนำส่งโรงงานสกัดน้ำมันจากส่วนของเนื้อในเพื่อทำ Palm kernel oil ต่อไป โดยกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแสดงดังในรูปที่ 2.1

2.1.5 **น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม**

น้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มเกือบทั้งหมด เกิดจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมาจาก 5 แหล่งใหญ่ คือ

1. น้ำจากการนึ่งปาล์ม

เป็นน้ำเสียจากการอบทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำส่วนนี้แม้จะมีน้ำมันอยู่แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชั่น

2. น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน

น้ำเสียส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุด และเป็นน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยมาก

3. น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ

เครื่องมือที่ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง ได้แก่

1) เครื่องแยกกรวดทราย ต้องทำการล้างทุกครึ่งชั่วโมง

2) เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง ต้องมีการล้างทำความสะอาด

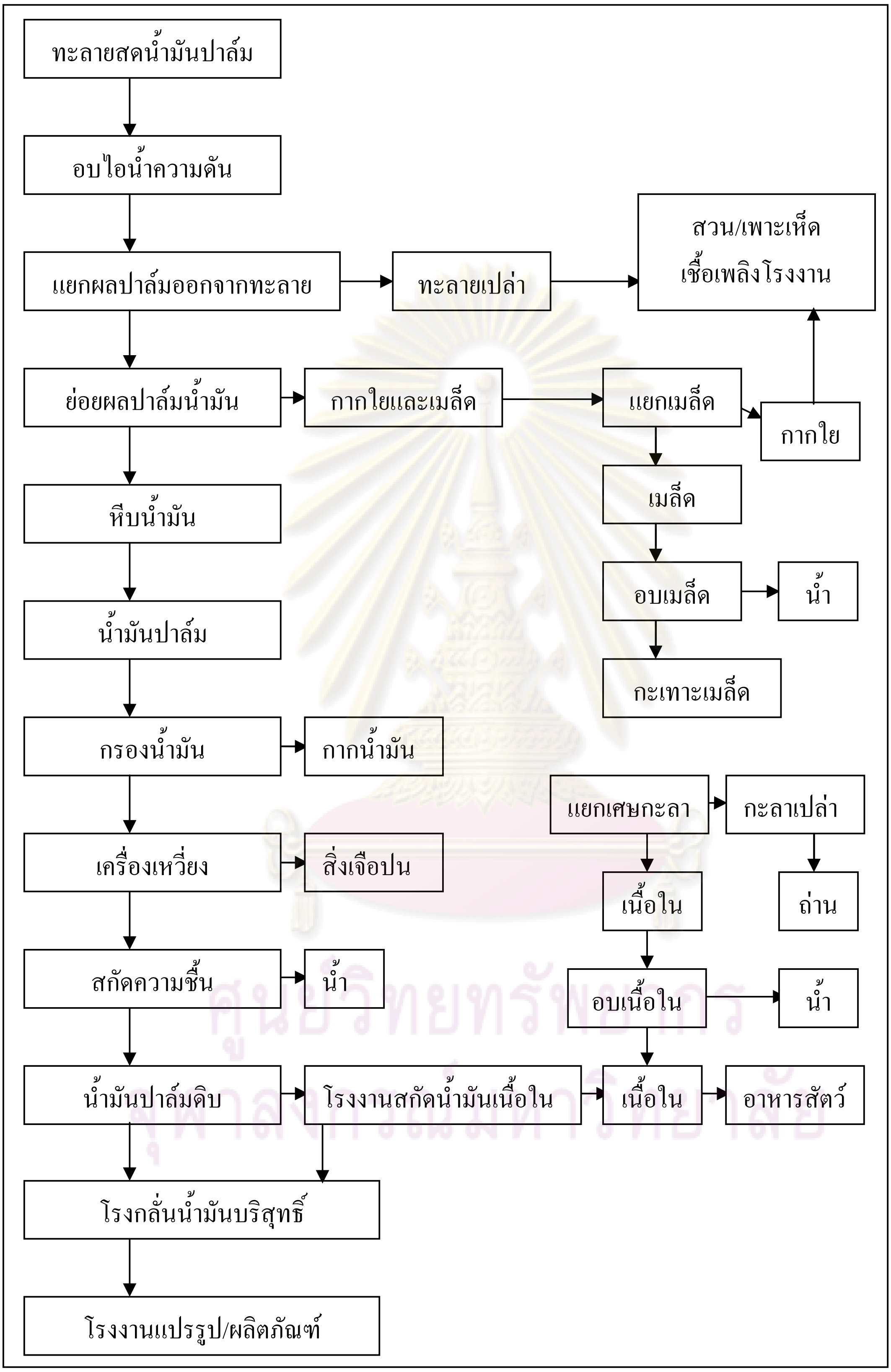
3) เครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง ต้องทำการล้างทุก 20-30 นาที นอกจากนี้ยังต้องทำความสะอาดพื้น ถังพัก และภาชนะต่างๆ อีกด้วย

4. น้ำจากการหล่อเย็นกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย

เป็นน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมากและยังสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่จะมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. **น้ำสลัดจ์จากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง** (Centrifuge)



รูปที่ 2.1 **กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (พรชัย เหลืองอาภาพงศ์,** 2549)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศนั้นเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศในการย่อยสลาย ดูดซับ เปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง มลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้อากาศจะได้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้อากาศ ส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ นอกจากนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ยังมีการใช้พลังงานในการเดินระบบที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศ โดย Grobicki (1997) ได้แสดงการเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบใช้อากาศและไร้อากาศ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบใช้อากาศและไร้อากาศ (Grobicki, 1997)

การเปรียบเทียบ	**ใช้อากาศ** (Aerobic)	**ไร้อากาศ** (Anaerobic)
ความต้องการพลังงาน	0.7-1 กิโลวัตต์/กก.ซีโอดี	0.07-0.1 กิโลวัตต์/กก.ซีโอดี
พลังงานที่ผลิตได้	-	0.25-0.35 ลบ.ม. CH_4/กก.ซีโอดี
อัตราการผลิตชีวมวล	0.2-0.6 กก./กก.	0.03-0.1 กก./กก.
คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด	บีโอดี 20 มก./ล. ของแข็งแขวนลอย 30 มก./ล. NH_3 5 มก./ล.	บีโอดี 50-1,000 มก./ล. ของแข็งแขวนลอย100-500 มก./ล. NH_3 ไม่สามารถกำจัดได้
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์	0.5-2.0 กก./ลบ.ม.-วัน	2-25 กก./ลบ.ม.-วัน
ความเข้มข้นของน้ำเสีย	ซีโอดี 0.2-2.5 ก./ล. ของแข็งแขวนลอย<0.2 มก./ล.	ซีโอดี 3-100 ก./ล. ของแข็งแขวนลอย < 10 มก./ล.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ แบ่งออกได้เป็นหลายขั้นตอน และแต่ละขั้นจะมีกลุ่มแบคทีเรียที่มาเกี่ยวข้องแตกต่างกันไป ตามลำดับ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis)

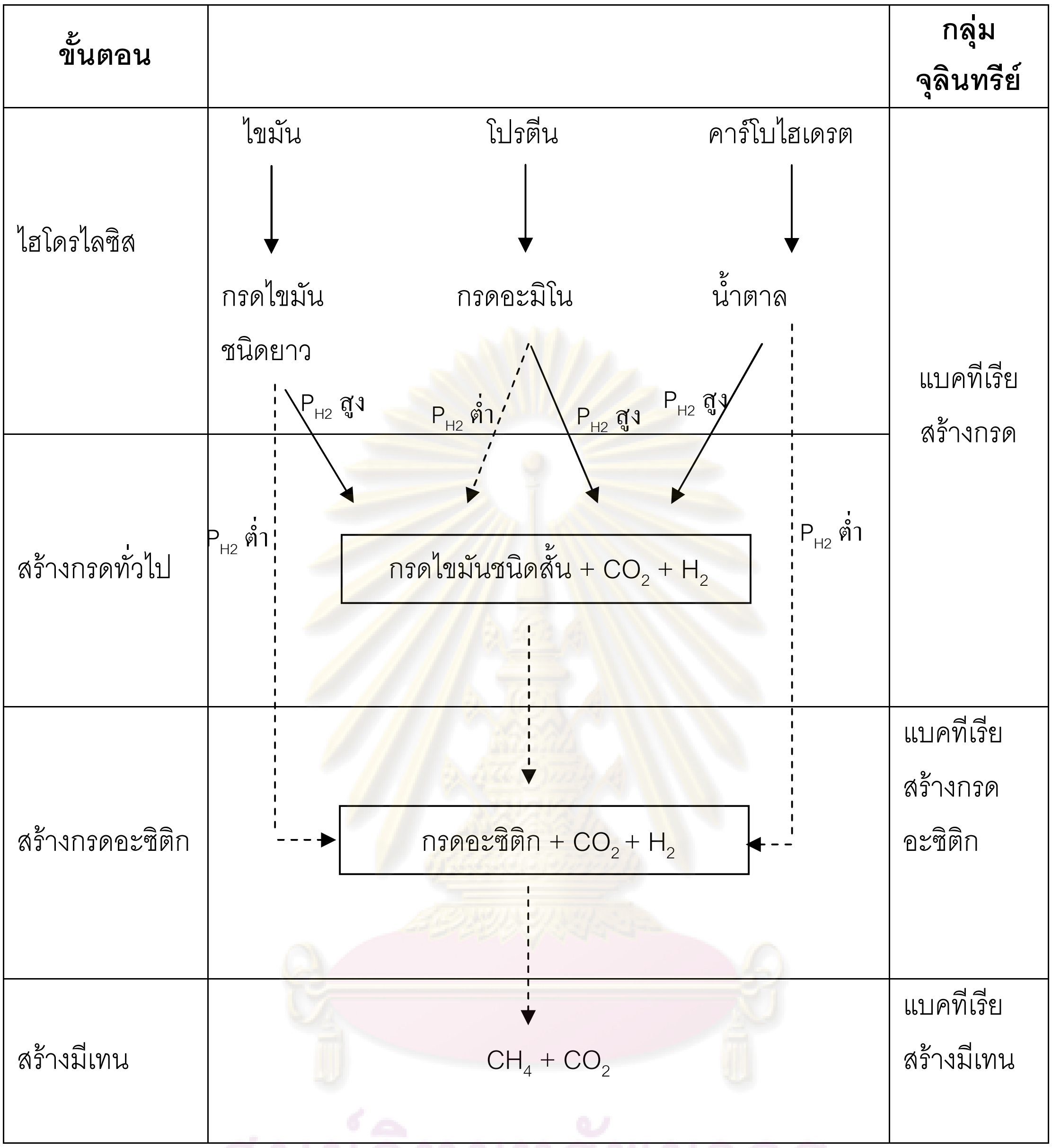
ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนทั้ง 4 นั้นต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก และแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังรูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก ขั้นตอนนี้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีลักษณะซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลอย่างง่าย ขนาดเล็กที่ละลายน้ำโดยใช้เอนไซม์ (Extracellular enzyme) ที่ถูกผลิตและปล่อยออกมาภายนอกเซลล์จากแบคทีเรียหลายจำพวก ส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) โดยที่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันจะถูกย่อยเป็นน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ ทำให้แบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าไปในเซลล์ได้ เกิดจากการที่เอนไซม์เหล่านี้จะลดพลังงานกระตุ้น (Activated Energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้เอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงมาก การทำงานของเอนไซม์จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ ค่าพีเอช และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์จากทั้งหมดนี้ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดใช้เวลาต่างกัน

อันเนื่องมาจากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้ขั้นตอนไฮโดรไลซิสนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดค่อนข้างช้าและเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็ว เช่น ถ้าสารอินทรีย์ชนิดนั้นมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ จะต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าจะได้สารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.2 **ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ**

(Sam-soon, 1987 **อ้างถึงในมั่นสิน ตัณฑุลเวศม์**, 2546)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลง่ายจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) จะทำการเปลี่ยนผลผลิตของขั้นตอนไฮโดรไลซิส เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เป็นส่วนประกอบ เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรไพโอนิก (CH_3CH_2COOH) และกรดบิวทิริก ($CH_3CH_2CH_2COOH$) เป็นต้น

ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารประกอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และสภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนในระบบ (Hydrogen Partial Pressure; PH_2) ตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก และไฮโดรเจน ภายใต้ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิกและ บิวทิริกภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง

ขณะที่น้ำตาลจะถูกย่อยเป็นกรดอะซิติก, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านวิธี Emden-Meyerhof pathway ที่ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่มีค่าต่ำ ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

แต่จะถูกย่อยเป็นกรดอะซิติก,กรดโพไพโอนิก, กรดบิวทิริก, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่มีค่าสูงดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2\,CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างอะซิติก (Acetogenic bacteria) จะมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารอาหาร (Substrate) ที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทธานอล และเมทธิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สร้างอะซิติกมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหย ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก, คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพไพโอนิก สามารถกระทำได้ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ ตามลำดับ สมดุลเคมีแสดง ดังสมการ

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$$

ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหย จะไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่มีค่าสูงได้ ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการลดการสะสมของกรดไขมันระเหย ซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงสามารถยังยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยแบคทีเรียพวกสร้างมีเทน (Methanogen) จะเปลี่ยนสารประกอบที่ได้จากกระบวนการสร้างกรดคือ กรดอะซิติก (CH_3COOH), ไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซมีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ น้ำ (H_2O) ซึ่งถ้าระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนนี้ในปริมาณมากพอและมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี จะได้ก๊าซมีเทนประมาณ 60-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 20-30% และก๊าซอื่นๆ (H_2 และ N_2) อีกเล็กน้อย ก๊าซมีเทนที่ได้มาจำแนกได้เป็น ร้อยละ 33 มาจากไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดย Hydrogenotrophic bacteria ขณะที่ร้อยละ 67 มาจากอะซิเตท (Acetate) โดย Acetotrophic bacteria ทั้งนี้ถ้าปริมาณแบคทีเรียสร้างมีเทนมีน้อยจนไม่สามารถย่อยยสลายสารอาหารได้ทัน จะเกิดการสะสมของกรดภายในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุของพีเอชที่ลดลง ทำให้ระบบล้มเหลว

แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้อากาศประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท ดังนี้

1. Acetoclastic Methane Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตช้าใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน ปฏิกิริยานี้จะเป็นการเกิดก๊าซมีเทนโดยกระบวนการดีคาร์บอกซีเลชัน (Decarboxylation) ของกรดอินทรีย์ระเหย โดยที่กรดอินทรีย์ระเหยถูกย่อยเป็นกรดอะซิติกก่อน แล้วจึงเปลี่ยนเป็นมีเทน ดังสมการ

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

2. H_2-Utilizing Methanogenic Bacteria จะเป็นการเกิดมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ไฮโดรเจน จะเป็นตัวควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงกรดบิวทีริก และกรดโพไพโอนิก ไปเป็นกรดอะซิติก แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตค่อนข้างเร็วใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน ดังสมการ

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

นอกจากนั้น แบคทีเรียพวกนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ

$$HCOOH \rightarrow CO_2 + H_2$$

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

การบำบัดแบบไร้อากาศ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการบำบัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในเขตที่มีอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้อากาศต้องการอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น การบำบัดแบบไร้อากาศจึงไม่ใช้กันแพร่หลายในประเทศที่มีอากาศหนาว เพราะจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย Metcalf and Eddy (2003) ได้สรุปข้อดีข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้อากาศไว้ ดังนี้

1. ข้อดีของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีข้อดีกว่าการบำบัดแบบใช้อากาศหลายประการ ได้แก่

1) ในปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ จะถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนที่ถูกนำไปสังเคราะห์สร้าง

เซลล์จึงมีน้อยมาก ส่วนในปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ สารอินทรีย์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ จึงมีปัญหาในการกำจัดตะกอนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับปัญหาการบำบัดแบบใช้อากาศ

2) ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ปริมาณอาหารเสริมที่ต้องการจะน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้อากาศมาก เพราะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีปริมาณที่ต่ำ

3) ช่วยลดค่าใช้จ่ายได้เนื่องจากไม่ต้องใช้ออกซิเจน ผลพลอยได้จากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ คือ ก๊าซมีเทน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

4) สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงได้

5) ถังปฏิกิริยามีขนาดเล็ก

6) สามารถปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ให้บำบัดน้ำเสียที่ต้องการได้

7) ระบบทำงานได้ดี แม้ว่าจะหยุดเดินระบบไปชั่วคราว

2. ข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีข้อเสียที่สำคัญ คือ

1) จุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดเจริญเติบโตได้ช้า จึงทำให้ต้องใช้เวลานานในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up)

2) ต้องการปริมาณความเป็นด่างที่เหมาะสม

3) น้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรนำไปบำบัดต่อโดยระบบใช้ออกซิเจน

4) ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้

5) ที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

6) ระบบมีความอ่อนไหวต่อไอออนและโลหะหนักที่เป็นพิษ

7) ในการบำบัดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นด้วย ซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจน ทำให้ได้ผลผลิตในรูปของก๊าซผสมซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งก๊าซอื่นๆ ในปริมาณน้อยมาก เช่น ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น (Metcalf และ Eddy, 2003)

เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่คงตัว และไม่ติดไฟ จึงทำให้คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับก๊าซมีเทน โดยปริมาณของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์และชนิดของของเสียที่ต้องการบำบัด ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์มีค่าความร้อนประมาณ 38,100 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติต่างๆ ของก๊าซมีเทนได้แสดงดังตารางที่ 2.3

Buswell และ Muller (1952) ได้พัฒนาสมการสำหรับการทำนายปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นไว้ดังนี้

$$C_nH_aO_b + (n - a/b - b/2)\ H_2O \longrightarrow (n/2 - a/8 + b/4)CO2 + (n/2 - a/8 + b/4)\ CH_4$$

นอกจากนี้ ยังมีสมการอย่างง่าย ที่ใช้สำหรับคำนวณหาปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ดังสมการต่อไปนี้

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

จากสมการดังกล่าวพบว่า 1 โมลของก๊าซมีเทน (16 กรัม) เทียบเท่า 2 โมลของออกซิเจน (64 กรัม) ดังนั้น 1 กรัม ของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะเทียบเท่าก๊าซมีเทน 0.35 ลิตร ณ อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ที่อุณหภูมิ 0°C และความดัน 1 บรรยากาศ) ซึ่ง 1 โมลของก๊าซใดๆ จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร (Speece, 1996)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซมีเทน (หนึ่งฤทัย ศรีพิมพ์ยิ้ม, 2546)

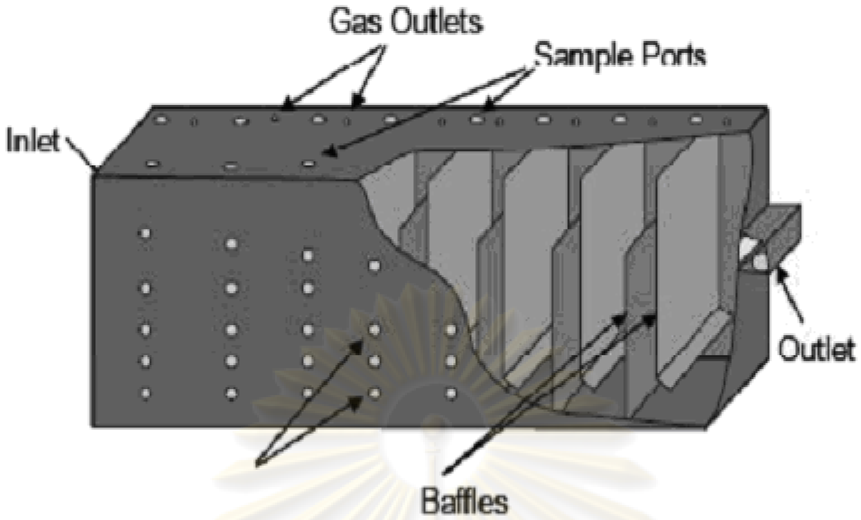
Chemical formula	CH_4
Boiling point at 14.696 psia (760 mmHg)	-258.68 F (-161.49^{o}C)
Freezing point at 14.696 psia (760 mmHg)	-296.46 F (-182.48^{o}C)
Critical temperature	-116 F (-82.5^{o}C)
Specific gravity	
- Liquid (at -263.2 F (-164^{o}C))	0.415
- Gas (at 77 F (25^{o}C))& 14.696 psia (760 mmHg)	0.000658
Specific volume at 60 F (15.5^{o}C) & 14.696 psia (760 mmHg)	223.61 ft/lb. (1.47 l/gm)
Calorific value at 60 F (15.5^{o}C) & 14.696 psia (760 mmHg)	1,012 Btu/ft (38,130 KJ/m)
Air require for combustion ft^3/ft^3	9.53
Flammability limits	5-10 percent by volume
Octane rating	130
Ignition temperature	1,202 F (650^{o}C)
Combustion equation	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
Molecular weight	16.042
Critical pressure	673.1 psia (47.363 kg/cm^2)

2.4 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์ (Anaerobic Baffled Reactor หรือ ABR) (Barber และ Stuckey, 1999)

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเป็นถังปฏิกิริยาที่ออกแบบโดยมีการใช้ชุดของแผ่นกั้น (Baffles) เพื่อบังคับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ให้ไหลขึ้นและลงผ่านแผ่นกั้นจากทางที่น้ำเข้า (Inlet) ไปสู่ทางที่น้ำออก (Outlet) ถังปฏิกิริยาจึงไม่จำเป็นต้องมีความสูงมากเหมือนระบบไร้อากาศอื่นๆ ซึ่งลักษณะของถังปฏิกิริยานี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยจุลชีพที่อยู่ในระบบจะลอยขึ้นและตกตะกอนลงเนื่องจากลักษณะการไหลของน้ำเสียและการเกิดขึ้นของก๊าซ แต่จะเคลื่อนที่ไปตามความยาวของถังปฏิกิริยาอย่างช้าๆ ดังนั้น น้ำเสียกับจุลชีพสามารถสัมผัสกันได้อย่างเต็มที่ในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านระบบ น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีปริมาณของแข็งทางชีวภาพปนออกมาน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Foxon และคณะ, 2004)

2.4.2 ชนิดของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ มี 3 ชนิด ดังนี้

1. ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่ไม่มีตัวกลาง

2. ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่มีตัวกลางอยู่ที่ด้านบนของแต่ละห้อง หรืออยู่ที่ห้องสุดท้ายอย่างเดียว เรียกว่า Hybridized Anaerobic Baffled Reactor (HABR)

3. ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่มีตัวกลางที่เรียกว่า ตัวกรองแบบไร้อากาศ (Anaerobic Filter หรือ AN/F) โดยตัวกลางจะอยู่ภายในถังปฏิกิริยาแต่ไม่ได้ลอยอยู่ที่ผิวด้านบนเหมือนกับ Hybridized Anaerobic Baffled Reactor (HABR)

ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์ เป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 ในช่วงเวลาใกล้เคียงกับที่ Lettinga ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบี (UASB) โดย McCarty และทีมงาน ที่มหาวิทยาลัย Stanford ได้สังเกตเห็นว่า กลุ่มแบคทีเรียส่วนมากสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำเสียในระบบบำบัดแบบจานหมุนชีวภาพ (RBC, Tait and Freidmen, 1980 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) และเมื่อเอาแผ่นจานหมุนออกก็ดัดแปลงเป็นระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (ABR, McCarty, 1981 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ซึ่งในช่วงแรกใช้สำหรับผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน (Chynoweth และคณะ, 1980 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศจัดว่าเป็นระบบบำบัดที่

สามารถบำบัดน้ำเสียได้ที่อัตราสูง (High rate) เนื่องจาก มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรของถังปฏิกิริยาสูง (ในหน่วยของ kg COD/m^3-d) สามารถเก็บกักเซลล์จุลชีพได้จำนวนมาก (SRT สูง) โดยไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) ที่เข้ามาในระบบ ซึ่แตงต่างกับระบบการกวนสมบูรณ์ (CSTR) พบว่าระบบแผ่นกั้นไร้อากาศนี้สามารถรองรับอัตราภาระสารอินทรีย์ได้ถึง 10-40 kg COD/m^3-d (Iza และคณะ, 1991 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ โดยจำแนกตามกลไกการกักเก็บเซลล์จุลชีพ ได้แก่ Fixed film, Suspended growth และ Hybrid

2.4.3 ข้อดีของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

ถึงแม้ว่าจะไม่ค่อยพบระบบนี้ในขนาดใหญ่ แต่ก็เป็นระบบที่มีข้อดีมากกว่าระบบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ข้อดีที่สำคัญของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ สามารถแบ่งแยกกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ในแต่ละห้องตามความยาวของถังระบบนี้จึงเป็นระบบบำบัดแบบสองเฟส (Two phase system) (Weiland และ Rozzi, 1991 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ซึ่งการเดินระบบแบบสองเฟสนี้เป็นการส่งเสริมการทำงานของระบบบำบัดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มอยู่ในสภาวะที่แตกต่างกันทำให้ง่ายต่อการควบคุมระบบ (Cohen และคณะ, 1980, 1982 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999)

เนื่องจากข้อดีหลายประการของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศจึงได้มีผู้พัฒนา ในรูปแบบต่างๆกัน โดยจุดประสงค์หลัก คือ การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บเซลล์จุลชีพให้ได้มากขึ้น เช่น ระบบ Multiphase Anaerobic Reactor (El-Mamouni และคณะ, 1992 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999), Upflow Staged Sludge Bed (USSB)(van Lier และคณะ, 1994, 1996 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) และ Stage Anaerobic Filter (Alves และคณะ, 1997 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) นอกจากข้อดีในด้านต่างๆ แล้ว ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศมีข้อเสียเช่นเดียวกัน คือ สำหรับการออกแบบระบบบำบัดจริงแล้วต้องออกแบบให้ถังปฏิกิริยาตื้นเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำและก๊าซให้เหมาะสม และต้องกระจายน้ำเสียเข้าถังให้สม่ำเสมอ (Tilche และ Vicira, 1991อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999)

ตารางที่ 2.4 ข้อดีของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Barber และ Stuckey, 1999)

การก่อสร้าง
1. ออกแบบง่าย 2. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ 3. ไม่จำเป็นต้องมีระบบกวนผสม 4. ค่าก่อสร้างไม่แพง 5. มีปริมาตรในถังปฏิกิริยาสูง 6. ลดการเกิดการอุดตัน 7. ลดการขยายตัวของชั้นตะกอน 8. ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ
จุลชีพ
1. ใช้ได้กับชีวมวลที่มีการตกตะกอนที่ผิดปกติ 2. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อย 3. มีเวลาการกักเก็บเซลล์จุลชีพสูง (SRT สูง) 4. การกักเก็บจุลชีพไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ (Fixed media) หรือ ห้องตกตะกอน (Solid-settling chamber) 5. ระบบสามารถแยกก๊าซหรือสลัดจ์ได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ
การควบคุมระบบ
1. สามารถทำงานได้ที่ค่ากักเก็บทางชลศาสตร์ต่ำ (HRT ต่ำ) 2. สามารถเดินระบบไม่ต่อเนื่องได้ 3. คงทนต่อการรับภาระทางชลศาสตร์ที่สูงขึ้นอย่างกระทันหันได้ 4. สามารถรับน้ำเสียที่เป็นพิษได้ 5. สามารถเดินระบบได้นานโดยมีการสูญเสียตะกอนน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.4 การพัฒนาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

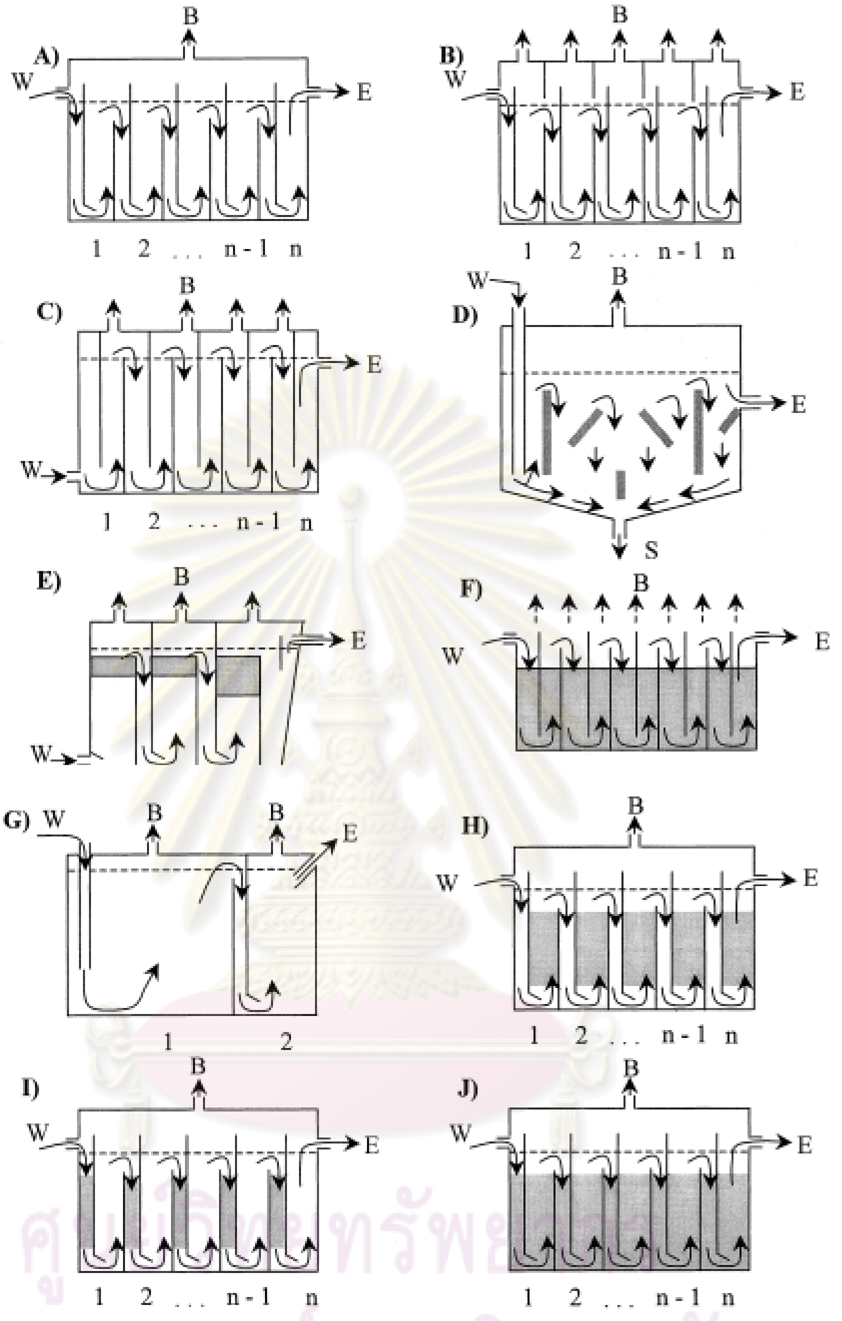
ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเป็นถังปฏิกิริยาที่ออกแบบโดยมีการใช้ชุดของแผ่นกั้น (Baffles) เพื่อบังคับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ให้ไหลขึ้นและลงผ่านแผ่นกั้นจากทางที่น้ำเข้า (Inlet) ไปสู่ทางที่น้ำออก (Outlet) (McCarty และ Bachmann, 1992 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) โดยจุลชีพที่อยู่ในระบบจะลอยขึ้นและตกตะกอนลงเนื่องจากลักษณะการไหลของน้ำเสียและการ

เกิดขึ้นของก๊าซ แต่จะเคลื่อนที่ไปตามความยาวของถังปฏิกิริยาอย่างช้าๆ รูปแบบของถังปฏิกิริยาแบบเริ่มแรก แสดงดังในรูปที่ 2.4 (C) โดยแบบรูปที่ 2.4 (A) จะได้รับความนิยมมากกว่า อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบจึงมีการปรังปรุงระบบในรูปแบบต่างๆ ขึ้น (รูปที่ 2.4 (B และ D-J)) โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบ คือ การเพิ่มความสามารถของระยะเวลาในการกักเก็บของแข็ง แต่บางครั้งก็ได้ออกแบบเพื่อปรับปรุงระบบในด้านอื่น เช่น การบำบัดน้ำเสียที่บำบัดได้ยาก (เช่น น้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งสูง, Boopathy และ Sievers, 1991 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) หรือเพื่อลดค่าก่อสร้าง (Orozco, 1997 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ในรูปที่ 2.4 (F) ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบการพัฒนาระบบได้ดังรูปที่ 2.4

ในปี 1981 Fannin และคณะ (1981) (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้เพิ่มแผ่นกั้นในแนวดิ่งให้กับระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่มีการไหลตามยาวเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีของแข็งจากกากตะกอนเหลวของอาหารทะเล ดังรูปที่ 2.4 (C) เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบในการกักเก็บเซลล์แบคที่เรียสร้างมีเทนที่เติบโตได้ช้า ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยของแข็งที่เข้ามากับน้ำเสีย โดยรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) คงที่ที่ 1.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน หลังจากมีการเพิ่มแผ่นกั้นให้กับนระบบแล้ว ผลปรากฏว่าปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็นมากกว่า 55% โดยมีค่ามีเทนยิลด์เป็น 0.34 ลบ.ม./กก.วีเอสเอส ต่อมา Bachmann และคณะ (1983) (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นชีวภาพ 2 แบบ คือ เปรียบเทียบระบบก่อนและหลังที่มีการทำให้ห้องที่น้ำไหลลงมีความแคบมากขึ้น และขอบปลายแผ่นกั้นถูกทำให้เอียง (รูปที่ 2.4 (A) และตารางที่ 2.6) จากการปรับปรุงการออกแบบระบบพบว่า อัตราการผลิตมีเทนและประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น แต่ส่วนประกอบของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลง โดยประสิทธิภาพของระบบยังด้อยกว่าระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) และระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating biological disc) ที่เดินระบบภายใต้สภาวะเดียวกัน สำหรับระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่พัฒนาแล้ว ระบบกรองไร้อากาศ และระบบจานหมุนชีวภาพค่าความสามารถในการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 82, 92 และ 90% ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงใหญ่ที่เกิดขึ้นต่อมาเป็นการพัฒนาระบบไร้อากาศแบบผสมผสานหลายๆ รูปแบบที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (Tilche และ Yang, 1987, รูปที่ 2.4 (E) อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) โดยวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บของแข็งสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (High strength wastewater) โดยปรับปรุงถังปฏิกิริยาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและเพิ่มห้องตกตะกอนต่อจากห้องสุดท้ายของระบบ ตะกอนที่หลุดออกจากระบบจะถูกเก็บไว้ที่ห้องตกตะกอนนี้ และสามารถเวียนกลับไปห้องแรกได้ การรวบรวมตะกอนที่ผิวหน้าของเหลวในแต่ละห้อง มีการใช้ตัวกลางแบบ Packed pall ring ในสองห้องแรก และห้องที่สามซึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ลักษณะของถังปฏิกิริยาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบต่างๆ (Barber และ Stuckey, 1999) รูปแบบต่างๆ ของถัง (A) Single gas headspace, (B) Individual gas headspace, (C) Vertical, (D) Horizontal, (E) Hybrid with settling zone, (F) Open top, (G) Enlarge first compartment, (H-J) ใส่ Packing แบบต่างๆ (H) Up-comers, (I) Down-comers, (J) Entire reactor, Key : W = Wastewater, B = Biogas, E = Effluent, S = Solids, (Shaded areas เป็นพื้นที่ใส่ packing)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีความลึกและพื้นที่ว่างมากจะใช้ Modular corrugated block ตะกอนชีวภาพที่ลอยเนื่องจากความหนาแน่นที่ลดลงจากการเกิดก๊าซในปริมาณมาก โดยจะถูกเก็บไว้ที่ห้องแรกโดยตัว Packing ระบบนี้สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงเนื่องจากโครงสร้างที่ทำให้มีการหลุดออกของของแข็งที่น้อยระหว่างที่เกิดการผสมกันโดยก๊าซ ห้องเก็บก๊าซแต่ละห้องจะถูกแยกออกเป็นส่วนเพื่อที่จะสามารถวัดส่วนประกอบของก๊าซและอัตราการผลิตก๊าซในแต่ละห้องได้

ในการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรที่มีอนุภาคของแข็งเล็กๆ อยู่ในปริมาณที่มาก Boopathy และ Sievers (1991) (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทำการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ โดยปัญหาที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ เกิดชั้นตะกอนลอยที่จะช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บของแข็งยาก และความเร็วสูงที่เกิดขึ้นทำให้ตะกอนหลุดออกจากระบบ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงรูปแบบเพื่อลดความเร็วในการไหลขึ้นของของเหลว โดยในระบบแบบ 2 ห้อง ส่วนแรกของจะเพิ่มขนาดห้องเป็น 10 ลิตร และห้องที่สองขนาด 5 ลิตร (รูปที่ 2.4(G)) ประสิทธิภาพและความสามารถในการกักเก็บของแข็งจถูกเปรียบเทียบกับระบบที่มี 3 ห้อง ที่มีปริมาตรของแต่ละห้องเท่ากัน พบว่า ห้องที่เพิ่มมาในระบบ 3 ห้อง จะช่วยเพิ่มเวลาในการกักเก็บของแข็งและมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบแบบ 2 ห้อง ซึ่งตรงข้ามกับผลที่เกิดจากการศึกษาในตอนแรก (Sievers, 1988 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) พบว่าห้องที่มีขนาดใหญ่กว่าของระบบที่มี 3 ห้อง โดยสามารถยืนยันได้โดยข้อมูลปริมาณของแข็งที่หลุดออกจากระบบ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสำหรับระบบที่มี 2 ห้อง จากการวิเคราะห์ที่มากขึ้นพบว่าแม้การสูญเสียของแข็งมากกว่า แต่ระบบที่มี 3 ห้องมีประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนได้ดีกว่า

จากการพัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในรูปแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

2.4.5 การทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

2.4.5.1 ลักษณะการไหล (Flow patterns)

ลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์และความสามารถในการกวนผสม (Degree of mixing) จะส่งผลต่อการสัมผัสระหว่างแบคทีเรียและสารอาหารในน้ำเสีย ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ ในปี 1992 Grobicki และ Stuckey (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ศึกษาพบว่าระบบแผ่นกั้นไร้อากาศมีระดับการเกิดพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้งาน (Hydraulic dead space) น้อยกว่า 8% สำหรับถังเปล่าที่ไม่มีเซลล์จุลชีพและที่ 18% เมื่อมีเซลล์จุลชีพ 8 ก.ของแข็งแขวนลอยระเหย/ล. ซึ่งน้อยกว่าถังปฏิกรณ์แบบอื่นๆ และหากเดินระบบที่ HRT ต่ำๆ การเกิด Dead space จะไม่ขึ้นอยู่กับเซลล์จุลชีพในถังแต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและจำนวนช่องของถัง

(การวางแผ่นกั้น) ซึ่งจะตรงข้ามกับ Biological dead space (บริเวณที่แบคทีเรียไม่ได้ทำงาน) ที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของมวลจุลชีพ อัตราการเกิดก๊าซและอัตราการไหล โดยค่า Biological dead space จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น (HRT ลดลง) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าที่ค่า HRT สูงๆ Dead space ของระบบจะเกิดจาก Biological dead space เป็นส่วนหลักและจะส่งผลกระทบน้อยลงเมื่อ HRT ลดลง

ตารางที่ 2.5 การพัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Barber **และ** Stuckey, 1999)

รูปที่	**การปรับปรุง**	**วัตถุประสงค์**	**อ้างอิง**
3.(C)	เพิ่มแผ่นกั้นในแนวตั้งเพื่อให้การไหลเป็นแบบระบบไหลตามยาว (plug flow)	เพิ่มเวลาในการกักเก็บของแข็ง เพื่อให้สารอาหารเข้าถึงแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนได้ดีขึ้น	Fannin และคณะ, 1981
3.(A)	1. ช่วงที่น้ำไหลลงมีความแคบมากขึ้น 2. ให้ขอบแผ่นกั้นด้านล่างปรับเอียง 40-45°	1. เพื่อเพิ่มระยะกักเก็บเซลล์ในช่วงไหลขึ้น 2. ปรับการไหลไปที่กึ่งกลางของช่องไหลขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสม	Bachnann และคณะ, 1983
3.(E)	1. มีห้องตกตะกอน 2. ใส่ตัวกลางที่ด้านบนของช่วงไหลขึ้นของแต่ละห้อง 3. แยกที่เก้บก๊าซของแต่ละห้อง	1. เพิ่มเวลากักเก็บของแข็ง (SRT) 2. ป้องกันการหลุดออกของของแข็ง 3. ง่ายต่อการควบคุมและการวัดก๊าซ เพิ่มความเสถียรของระบบ	Tilche และ Yang, 1987
3.(G)	ทำให้ห้องแรกมีขนาดใหญ่ขึ้น	เพื่อเพิ่มความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกอนมาก	Boopathy และ Sievers, 1991

2.4.5.2. ผลของการเวียนน้ำกลับ (Effect of effluent recycle)

การเวียนน้ำทิ้งกลับเข้าถังปฏิกรณ์อีกครั้งจะส่งผลให้ถังปฏิกรณ์มีลักษณะคล้ายถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง แต่การหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับเข้าถังก็มีข้อดีในบางประการขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การออกแบบ เช่น การเพิ่มค่า pH ของน้ำเข้า เมื่อมี pH ต่ำเกินไปในถังด้านหน้า อย่างไรก็ตามการเวียนน้ำกลับจะทำให้สูญเสียข้อดีที่สำคัญของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ ทำให้ระบบกลับสู่ลักษณะเฟสเดียว (Single phase) เพราะ

ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศสามารถแยกเฟสเป็น Methanogenic และ Acidogenic ตามช่องต่างๆของถัง ทำให้ประสิทธิภาพของระบบในการผลิตก๊าซมีเทนลดลง

ข้อดีและข้อเสียของการหมุนเวียนน้ำกลับ

ข้อดี - สามารถช่วยปรับ pH ของน้ำเข้าได้
- ลดผลกระทบของความเป็นพิษของสารที่มากับน้ำ
- สามารถรองรับโหลดได้สูงขึ้น (สำหรับน้ำเสียที่ย่อยยาก)
- เพิ่มการสัมผัสระหว่างสารอาหารและเซลล์จุลชีพ

ข้อเสีย - ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงเนื่องจากทำให้ระบบกลายเป็น single phase
- ทำให้เกิดการสูญเสียเซลล์จุลชีพเพิ่มขึ้น
- เพิ่ม Hydrualic dead space

2.4.6 **ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ**

2.4.6.1 **การเริ่มต้นเดินระบบ**

วัตถุประสงค์หลักของการเริ่มต้นเดินระบบ คือ ปรับสภาพของจุลินทรีย์ให้เหมาะสมกับน้ำเสีย โดยสารชีวมวลจะเริ่มฟอร์มตัวเป็นเม็ดตะกอนหรือฟล็อค เมื่อเดินระบบจนถึงสภาวะคงตัว เนื่องจากระบบไร้อากาศ แบคทีเรียมีการเจริญเติบโตที่ช้า ดังนั้นในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading) ที่ต่ำและอัตราการไหลที่ต่ำ Henze และ Herremore (1983 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) แนะนำว่าในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบควรมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าระบบประมาณ 1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และการเริ่มต้นเดินระบบมีความสำคัญต่อการเดินระบบ ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นที่เกี่ยวเนื่องกับเรื่องนี้ เช่น Barber และ Stuckey (1997) พบว่าการเริ่มต้นเดินระบบด้วยค่า HRT สูงๆ (มากกว่า 80 ชั่วโมง) แล้วค่อยๆ ลด HRT ลงเป็นขั้นๆ โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของสารอาหารเข้าระบบ (Substrate) คงเดิม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความมีเสถียรภาพของระบบได้ดี

2.4.6.2. **การนำระบบแผ่นกั้นไร้อากาศไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ**

เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีแรงขับในการถ่ายเทมวล (Mass transfer diving force) มีค่าต่ำลง ซึ่งทำให้อัตราการย่อยสลายต่ำลงด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เป็นการยากที่จะแยกกลุ่มแบคทีเรียในแต่ละช่อง และยังพบว่า การบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ต้องใช้ค่าอายุตะกอน (θ_c) ที่

สูงหรือมีปริมาณจุลชีพในระบบที่มาก (SRTสูง) เพราะการเกิดจำนวนจุลชีจะต่ำจึงทำให้ชั้นตะกอนน้อยลง

2.4.6.3. การนำระบบแผ่นกั้นไร้อากาศไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงจะตรงข้ามกับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงนั้นอาจต้องทำการเจือจางหรือเดินระบบที่ HRT ต่ำ เนื่องจากมีการเกิดก๊าซจำนวนมากในระบบทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นตะกอน ดังนั้นความสามารถในการตกตะกอนจึงลดลงและมีโอกาสที่เซลล์จุลชีพจะถูกชะล้างออกไปได้ เมื่อพิจารณาในแง่ของไคเนติกส์การที่น้ำเสียมีความเข้มข้นสูงทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่มีค่า K_s สูง มีการเติบโตมากขึ้นและผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น Boophy และ Tilche (1991) อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999 พบว่า เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นสูง แบคทีเรีย *Methanosarcina sp.* จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นในตะกอนจุลชีพ

2.4.6.4. การนำระบบแผ่นกั้นไร้อากาศไปใช้บำบัดที่อุณหภูมิต่ำ

โดยทั่วไปอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะเพิ่มเป็น 2 เท่า ทุกๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10°C ตามกฎของ Van't Hoff แต่จากงานวิจัยของ Nachaiyasit (1995) อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีโดยรวมของระบบไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงอุณหภูมิ 25-30 °C แต่อย่างไรก็ตาม ตามกฎของ Arhenius kinetics ค่า K_s ของปฏิกิริยาจะสูงขึ้นทำให้การสร้างกรดจะเกิดขึ้นในห้องถัดไปแทนที่จะเกิดขึ้นในห้องแรก และพบว่าผลกระทบของอุณหภูมิมีผลต่อแบคทีเรียที่มีอัตราการเติบโตต่ำอยู่แล้วมากกว่าแบคทีเรียที่มีอัตราการเติบโตสูง

2.4.6.5. การนำระบบแผ่นกั้นไร้อากาศไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณตะกอนสูง

การที่มีของแข็งหรือตะกอนเข้ามาในระบบจะทำให้การย่อยสลายช้าลง เนื่องจากการลดการสัมผัสระหว่างแบคทีเรียและสารอาหาร นอกจากนี้ทำให้เกิดการแทนที่ของจุลชีพในระบบ ดังนั้นการปรับปรุงถังปฏิกิริยาให้มีระบบการผสมในถังด้านหน้าจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้

2.4.6.6. การนำระบบแผ่นกั้นไร้อากาศไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต

Fox และ Venkatasubbiah (1996 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทดลองบำบัดน้ำเสีย ที่มีซัลเฟตซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำเสียจากการผลิตยาที่มีความเข้มข้นซีโอดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

20 ก.ซีโอดี/ล. และอัตราส่วน COD:SO_4 เท่ากับ 8:1 พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ 50% และกำจัดซัลเฟตได้ 95% ในช่วง HRT 1 วัน และพบว่าซัลเฟตส่วนใหญ่ถูกกำจัดในถัง ABR ช่วงแรก แต่ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อช่วงหลังๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งอาจแก้โดยการเวียนน้ำกลับมาเพื่อลดผลกระทบจากซัลไฟด์หากมีความเข้มข้นสูงเกินไป

2.4.7 ลักษณะของกลุ่มแบคทีเรียในถังปฏิกิริยา

ลักษณะของแบคทีเรียที่เติบโตในระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแต่ละช่วงของถังนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียที่บำบัด โดยปกติจะเกิดกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดในถังปฏิกิริยาห้องแรกๆ ซึ่งกลุ่มแบคทีเรียนี้จะมีอัตราเติบโตที่เร็วและสามารถอยู่ได้ในสภาวะที่มีสารอาหารมากและพีเอชต่ำ ส่วนแบคทีเรียที่เติบโตช้าและอาศัยได้ในช่วงที่พีเอชสูงก็จะอยู่ในห้องถัดๆไป

2.4.8 การสร้างเม็ดตะกอนในถังปฏิกิริยา

แม้ว่าการสร้างเม็ดตะกอนในถังปฏิกิริยาจะไม่จำเป็นเมื่อเทียบกับระบบยูเอเอสบี (UASB) แต่ก็มีรายงานว่าเกิดเม็ดตะกอนขึ้นในระบบได้ในลักษณะเดียวกับระบบยูเอเอสบี โดยลักษณะเม็ดตะกอนที่พบจะประกอบด้วยแบคทีเรีย *Methanosarcina sp.* ที่ถูกหุ้มด้วยแบคทีเรียจำพวกเส้นใย เช่น *Methanosaeta sp.* และพบว่าขนาดเม็ดตะกอนที่พบในแต่ละห้องของถังปฏิกิริยาจะมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีขนาดใหญ่ที่สุดในห้องแรกๆ จนถึงขนาดเล็กสุดในห้องสุดท้าย เนื่องจากการสร้างเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซีโอดีและปริมาณกาซที่เกิดขึ้น

2.4.9 ความสามารถในการกักเก็บตะกอน

Orozco (1998 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทำการศึกษาค่าระยะกักเก็บของแข็ง (SRT) ต่ำที่สุดที่ต้องการในการบำบัดน้ำเสียเปรียบเทียบระหว่างระบบยูเอเอสบี (UASB) กับระบบแผ่นกั้นชีวภาพ ที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เหมือนกัน พบว่าค่าระยะกักเก็บของแข็งที่ต้องการของระบบยูเอเอสบีจะสูงกว่าของระบบแผ่นกั้นชีวภาพ

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศได้มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียได้หลากหลายอย่าง ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ โดยหลักการต่างๆ ที่แนะนำสรุปได้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อแนะนำในการใช้งานระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Barber และ Stuckey, 1999)

สภาวะการเดินระบบ	ข้อแนะนำ
1. การเริ่มต้นเดินระบบ (Start up)	ควรเริ่มต้นเดินระบบที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ต่ำ เพื่อการสร้างเม็ดตะกอนหรือฟล็อค อาจมีการเติมสารจำพวกอะซิเตทเพื่อเพิ่มการเติบโตของแบททีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) แล้วจึงเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์หรือทำการเริ่มต้นเดินระบบด้วยระยะกักเก็บน้ำ (HRT) ที่สูงๆ เพื่อลดการสูญเสียตะกอนจุลชีพจากระบบ
2. การหมุนเวียนน้ำกลับ (Recycle)	ใช้เมื่อต้องการจะเจือจางความเป็นพิษที่เกิดกับระบบเนื่องจากน้ำเสียที่เข้าระบบมีสารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย และใช้ในการเพิ่มพีเอชในถังปฏิกิริยาห้องแรกๆ ช่วยป้องกันการเกิดฟอง
3. การบำบัดน้ำเสียเจือจาง (Low strength)	ควรใช้ระยะกักเก็บน้ำ (HRT) ที่ต่ำที่สุดสามารถทำได้เพื่อให้เกิดการลดการขาดอาหารของแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาห้องท้ายๆ
4. การบำบัดน้ำเสียเข้มข้น (High strength)	ควรใช้ระยะกักเก็บน้ำ (HRT) ที่สูงเพื่อลดการชะล้างตะกอนอันเนื่องมาจากการเกิดก๊าซที่มาก หรืออาจปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มตัวกลางดักตะกอน
5. อุณหภูมิ	การลดอุณหภูมิในช่วง 25-30^{o}C ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบสำหรับน้ำเสียที่ย่อยง่าย แต่อาจมีผลกระทบต่อน้ำเสียที่ย่อยยากและทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Barber และ Stuckey (1999) เป็นการรวบรวมเกี่ยวกับการพัฒนา ประโยชน์และความสามารถในการใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสีย ถังปฏิกิริยาชนิดนี้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 และมีข้อดีหลายประการเหนือกว่าระบบอื่นๆ เช่น ระบบยูเอเอสบี และระบบถังกรองไร้อากาศ คือ สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มาก เชื้อจุลินทรีย์สามารถอยู่ในระบบได้นาน อัตราการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ มีการแยกส่วนระหว่างจุลินทรีย์ชนิดต่างๆได้ เชื้อจุลินทรีย์สามารถป้องกันสารพิษหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างกระทันหันได้ดี เช่น พีเอช อุณหภูมิ

Boopathy และ Tilche (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงจากกากน้ำตาล โดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่ซีโอดี 115,771 และ 990,000 มก./ล. ใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 20 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จากการทดลองพบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ 73% มีการเกิดเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ขนาด 0.5 มม. และถังปฏิกิริยายังมีระยะเวลากักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่นาน

Borja และ คณะ (1996) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ในห้องปฏิบัติการ ด้วยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีขนาด 16 ลิตร โดยทำการป้อนน้ำเสียที่ค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 5.1-42.5 ก./ล. ใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) ที่ 4 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ค่าการผลิตก๊าซมีเทน, VFA, การเจริญเติบโตของตะกอนแบคทีเรีย, ค่าซีโอดี ผลการทดลองพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 10.6 ก.ซีโอดี/ล.-วัน สามารถกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Cail และ Barford (1985) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยระบบ Semi-continuous digester ภายใต้สภาวะ Mesophilic เดินระบบจนถึงค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 12.6 ก.ซีโอดี/ล.-วัน ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 5.6 วัน หลังจากเดินระบบได้ 1 เดือน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายน้ำเริ่มต้นที่ 97 % ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีในการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพกว่าการศึกษาในสภาวะ Mesophilic ที่ผ่านมา

Chin และ Wong (1983) ได้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ในระดับห้องปฏิบัติการของกระบวนการ ไร้อากาศที่สภาวะ Thermophilic ซึ่งมีลักษณะน้ำเสีย คือ ซีโอดี 67,000 มก./ล. ของแข็งแขวนลอย 31,800 มก./ล. และพีเอช 4.5 ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ Complete mixed เพื่อหาผลของระยะเวลากักเก็บของแข็ง (SRT) ในการเดิน

ระบบ โดยการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาที่ ระยะเวลากักเก็บของแข็ง (SRT) 5-35 วัน พบว่า ที่ SRT 5 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 70 % และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่า 90 % ที่ SRT 15 วัน ซึ่งตลอดการศึกษานี้ได้ทำการปรับพีเอชของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 7.4

Faisal และ Unno (2001) ได้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มภายใต้สภาวะคงตัว โดยใช้ระบบเอ็มเอบีอาร์ (Modified Anaerobic Baffled Bioreactor, MABR) โดยผลการศึกษาพบว่ามีการผลิตก๊าซมีเทน 0.32-0.42 ล.มีเทน/ก.ซีโอดีที่หายไป ซึ่งสอดคล้องกับส่วนประกอบมีเทน 67.3-71.2 % ในช่วงระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 3-10 วัน การกำจัดซีโอดีและ ไขมันและน้ำมัน (Oil & Grease) เป็น 87.4-95.3% และ 44.1-91.3% ตามลำดับนอกจากนี้การผลิต VFA ในปริมาณ 1450 มก./ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 3 วัน มีแนวโน้มลดลงเหลือ 608 มก./ล. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 10 วัน

Grobicki และ Stuckey (1991) ได้ทำการศึกษาการบำบัดโดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศโดยดำเนินการทดลองโดยใช้ถังปฏิกิริยา 4 ถัง ภายใต้สภาวะคงตัวและสภาวะที่รับภาระอินทรีย์อย่างเฉียบพลัน โดยเป็นการหาค่าระยะเวลากักเก็บน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพดี ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซีโอดี 4,000 มก./ล. พบว่าในแต่ละถังปฏิกิริยา ที่ค่าระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 20 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่มากกว่า 95% และมีปริมาณจุลินทรีย์ที่หลุดออกจากระบบในปริมาณที่น้อย นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นของ จุลินทรีย์ต่ำและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ยังคงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงอีกด้วย เพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยา จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อหาความสมดุลระหว่างปริมาณความเข้มข้นจุลินทรีย์ ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และความจำกัดในการถ่ายเทมวลในระบบ โดยความสามารถในการบำบัดจะมีความสัมพันธ์กับมวลของจุลินทรีย์

Nachaiyasit และ Stuckey (1997b) ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ โดยศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เข้าระบบอย่างกระทันหันที่มีต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกิริยา โดยจะเริ่มเดินระบบที่เวลากักเก็บน้ำ (HRT) 20 ชั่วโมง ค่าซีโอดี 4 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะพื้นฐาน จากนั้นเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอย่างกระทันหันที่ 1 ชั่วโมง (20 เท่าของปริมาณน้ำเข้า) 10 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง โดยนำเข้าระบบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 2 สัปดาห์ และ 3.5 สัปดาห์ตามลำดับ ผลการศึกษาที่สภาวะพื้นฐาน (4.8 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 98 แต่เมื่อลด HRT เหลือ 10 ชั่วโมง (9.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ความสามารถในการกำจัดจะลดลงเหลือร้อยละ 90 และที่ HRT 5 ชั่วโมง (19.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ความสามารถในการกำจัดจะลดลงเหลือร้อยละ 52 เท่านั้น

จึงสามารถบอกได้ว่าระบบแผ่นกั้นไร้อากาศสามารถทนกับการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่มากได้ รวมทั้งสามารถฟื้นฟูระบบได้เองเมื่อเข้าสู่สภาวะปกติได้ภายใน 9 ชั่วโมงหลังจากการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถไหลเวียนได้ในถังเป็น 24 กรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลิตร ที่ 20 ชั่วโมง จะมีพื้นที่เท่ากับร้อยละ 18 โดยปริมาตร เมื่อลด HRT จาก 10 ชั่วโมงเป็น 5 ชั่วโมง จะเพิ่มพื้นที่ในส่วนนี้เป็นร้อยละ 39 สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสามารถอธิบายได้ด้วยเวลากักเก็บน้ำ, อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์, ความเข้มข้นและการทำปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถไหลเวียนได้ อาจกล่าวได้ว่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอบีอาร์นี้ สามารถบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความหลากหลายทั้งปริมาณและความเข้มข้น อีกทั้งบำบัดได้ในอัตราที่สูงด้วย

Shahrakbah และคณะ (2006) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ด้วยถังปฏิกิริยาระบบปิดขนาด 500 ลบ.ม. ซึ่งก่อนการบำบัดน้ำเสียในระบบปิดนี้ต้องผ่านขั้นตอนการเริ่มเดินระบบมาก่อนซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ผลการทดลองพบว่าในช่วงเวลาการเดินระบบจะสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงสุดถึง 97 % และให้ผลอัตราส่วน VFA : Alk (Volatile Fatty Acid : Alkalinity) เป็นที่น่าพอใจ โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ระหว่าง 0.1 และ 0.3 โดยระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) ต่ำสุดจะอยู่ที่ 17 วัน ซึ่งเริ่มเดินระบบสำเร็จโดยใช้เวลาน้อยกว่า 3 เดือน โดยช่วงแรกจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงจากนั้นจะค่อยๆลดลงตามค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม อย่างรวดเร็วจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

Najapour และคณะ (2006) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ด้วยถังปฏิกิริยาแบบยูเอเอสเอฟเอฟ (Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film, UASFF) ซึ่งเป็นหนึ่งในถังปฏิกิริยาแบบตะกอนเม็ด ถังปฏิกิริยาแบบยูเอเอสเอฟเอฟ เป็นถังปฏิกิริยาแบบผสมซึ่งมีส่วนของยูเอฟเอฟ (Upflow Fixed-Film, UFF) อยู่ด้านบนของถังและส่วนของยูเอเอสบีอยู่ด้านล่างของถัง โดยวัตถุประสงค์ครั้งนี้เพื่อต้องการลดระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบให้สั้นลง (ซึ่งในระบบยูเอเอสบีจะเกิดปัญหาเรื่องการใช้ระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบนานถึง 2-4 เดือน) และสามารถเดินระบบที่ค่าระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) สั้นๆได้ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 1.5 และ 3 วัน รับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.63 ก.ซีโอดี/ล.-วัน แล้วค่อยๆ ทำการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 23.15 ก.ซีโอดี/ล.-วัน ผลที่ได้พบว่าแบคทีเรียสามารถพัฒนาเป็นตะกอนเม็ดได้อย่างรวดเร็วภายใน 20 วัน ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ (HRT) 1.5 และ 3 วัน จะสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 89 และ 93 % ตามลำดับ ที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.361 ลิตรมีเทนต่อ

ซีโอดีที่หายไป การที่มี Fixed-film ภายในระบบจะช่วยให้แบคทีเรียไม่หลุดออกนอกระบบอีกทั้งยังสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการสร้างตะกอนเม็ดของแบคทีเรียอีกด้วย

Rafael และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ในระดับห้องปฏิบัติการ ของกระบวนการไร้อากาศแบบ High rate โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบยูเอเอสบี แบบ 2 stage โดยถังปฏิกิริยาที่มีแบคทีเรียพวก Acidogenic สามารถปรับสภาพให้เข้ากับน้ำเสียได้อย่างรวดเร็ว และสามารถทนค่า Suspended solid ที่มากถึง 5.4 ก./ล. ในน้ำเสียที่เข้าระบบ มีการเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อยๆ เป็นขั้นจนถึงค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 60 ก.ซีโอดี/ล.-วัน ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีค่อยๆ ลดลง และเกิดการปรับสภาพของ Long-chain VFA โดยสรุปว่าระบบสามารถทำงานที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 30 ก.ซีโอดี/ล.-วัน และพบว่าอัตราค่าการผลิตมีเทนเป็นที่น่าพอใจเช่นเดียวกับการลดลงของค่าซีโอดี คือมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ 90% โดยมีการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ถังสร้างกรดหลังจาก 80 วันและในถังสร้างมีเทนหลังจากผ่านไป 110 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระบบห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการศึกษาถึงผลของการใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์ (Anaerobic Baffled Reactor; ABR) ในการรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทั้งยังเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการเดินระบบกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ตลอดจนศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ได้จากการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนห้องภายในระบบ โดยได้มีการออกแบบถังปฏิกิริยา แบบจำลองของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศทำจากวัสดุอะคริลิกใสขนาด 10 ลิตร จำนวน 2 ชุดการทดลอง ซึ่งจะทำการทดลองเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ในแต่ละชุดการทดลอง โดยมีรายละเอียดการทดลอง ดังนี้

<u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์มในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ทำการศึกษาผลของจำนวนห้องแบบ 3 ห้อง(3C) กับแบบ 4 ห้อง(4C) ของระบบแผ่นกั้น-ไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ โดยทำการเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีทั้งหมดของระบบ (โดยเทียบระหว่างซีโอดีน้ำเข้ากับซีโอดีน้ำออก) ที่มีค่าค่อนข้างคงที่ และพิจารณาค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากระบบและซีโอดีของน้ำเสียในแต่ละห้องของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศรวมทั้งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าค่อนข้างคงที่ร่วมด้วย เพื่อให้ระบบมีความคงตัวพร้อมใช้ศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากสภาวะต่างๆ ที่กำหนดในงานวิจัยนี้ โดยทำการเก็บน้ำเสียจากห้องต่างๆและน้ำเสียที่ออกจากระบบมาวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ

<u>การทดลองที่ 2</u> ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจากการทดลองที่ 1 แล้ว จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 3 ห้อง(3C) กับแบบ 4 ห้อง(4C) ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น โดยเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ

5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งเริ่มต้นจากการเจือจางน้ำเสียโดยให้ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมือนกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ซึ่งจะทำการทดลองที่ระยะเวลากักน้ำที่ 24 ชม. จากนั้นจึงเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเดินระบบด้วยน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นของค่าซีโอดี ประมาณ 40,000 มก./ล.

เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นทั้ง 2 การทดลองจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 การทดลองและ 2 ชุดถังปฏิกิริยา เพื่อหาสาเหตุของผลกระทบต่อการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

3.2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตะกอนจุลินทรีย์ (Seed) ที่นำมาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ เป็นหัวเชื้อจากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของบริษัท แซน.อี.68คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด โดยทำการเก็บตะกอนจุลชีพแล้วนำมาแช่ไว้ในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการทดลอง

3.3 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย

น้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Effluent) ของระบบบำบัดน้ำเสีย บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตยังไม่ได้ผ่านการบำบัดใดๆทั้งสิ้น

การปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบจะควบคุมไม่ให้ต่ำกว่า 7.2 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ในปริมาณที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความเพียงพอของกำลังบัฟเฟอร์ด้วย โดยคุณสมบัติน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
(ข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นของ บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด)

พารามิเตอร์	หน่วย	ลักษณะสมบัติน้ำเบื้องต้น
ค่าบีโอดี (BOD)	(มก./ล.)	69,170
ค่าซีโอดี (COD)	(มก./ล.)	133,010
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)	(มก./ล.)	9,150
ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)	-	4.40
ค่าอินทรีย์ไนโตรเจน (TKN)	(มก./ล.ในรูป ไนโตรเจน)	130
ค่าของของแข็งละลายน้ำ (TDS)	(มก./ล.)	42,230
ค่าของแข็งทั้งหมด (TS)	(มก./ล.)	70,130
ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)	(มก./ล.)	27,900

3.4 สารอาหารเสริม

ในงานวิจัยครั้งนี้มีการเติมสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในช่วงเริ่มต้นเดินระบบเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ปริมาณและชนิดสารอาหารเสริมที่เติมในถังปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 3.2

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.5.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง (รูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2)

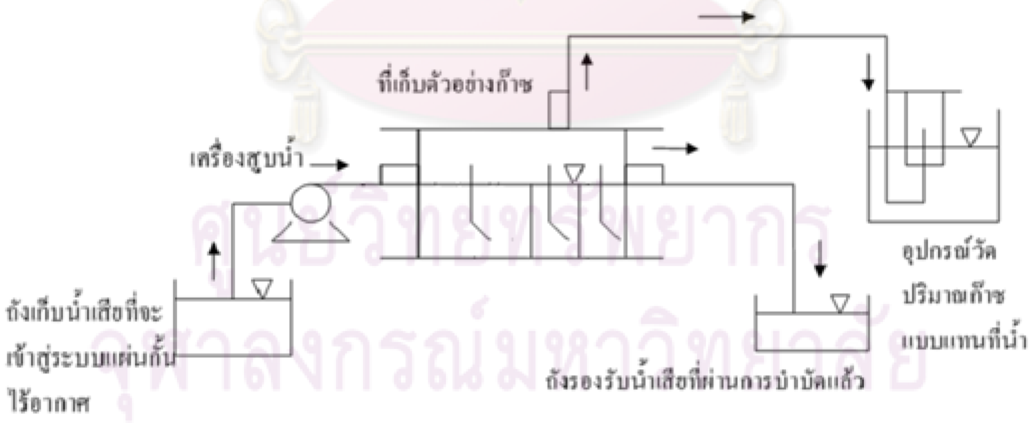
1. ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศความจุ 10 ลิตร 2 ชุด
2. ถังพักน้ำเข้าระบบ ขนาด 30 ลิตร 2 ชุด
3. อุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ 2 ชุด
4. เครื่องสูบน้ำ 2 ชุด
6. ถังรองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ขนาด 30 ลิตร 2 ชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารอาหารเสริมและสารอาหารเสริมรอง (Vanderbilt Media)
(Speece, 1996)

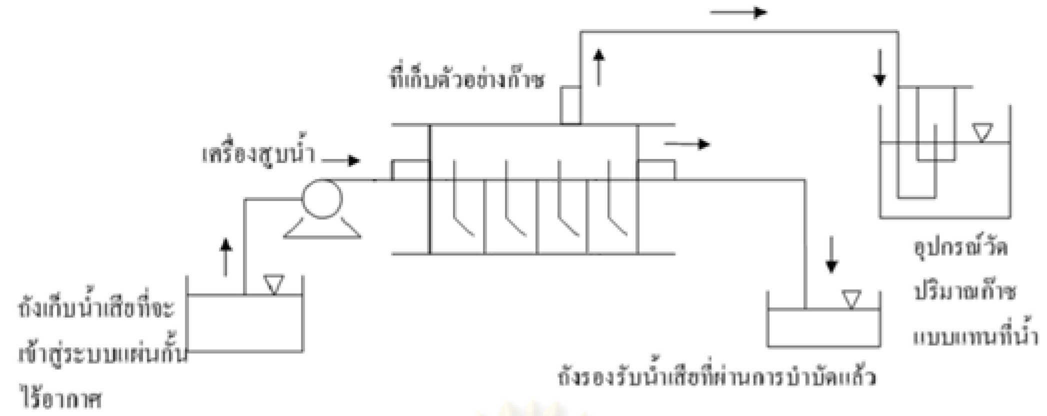
ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
* NH_4Cl	1,200	NH_4VO_3	0.5
* $MgSO_4(H_2O)_5$	463.5	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	0.5
* KCl	400	$ZnCl_2$	0.5
* $Na_2S \cdot 9H_2O$	300	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	0.5
* $CaCl_2 \cdot 2H_2O$	748	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.5
* $(NH_4)_2HPO_4$	80	H_3BO_3	0.5
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	40	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	0.5
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	10	$Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$	0.5
KI	10	Na_2SeO_4	0.5
$(NaPO_3)_6$	10	$NaHCO_3$	6,000
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	10		

หมายเหตุ * หมายถึง สารอาหารเสริมหลัก นอกจากนั้นเป็นสารอาหารเสริมรอง



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองชุดที่ 1(3C)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์การทดลองชุดที่ 2(4C)

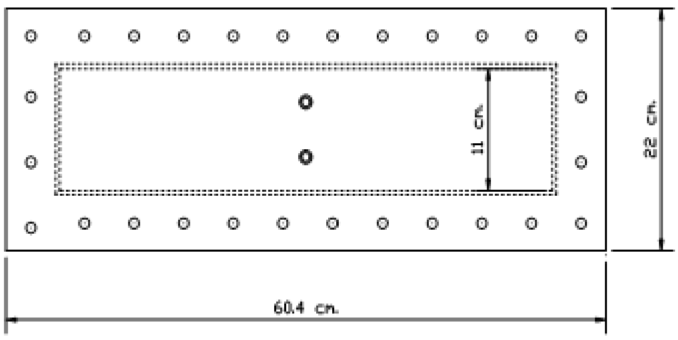
3.5.2 เครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง

ถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

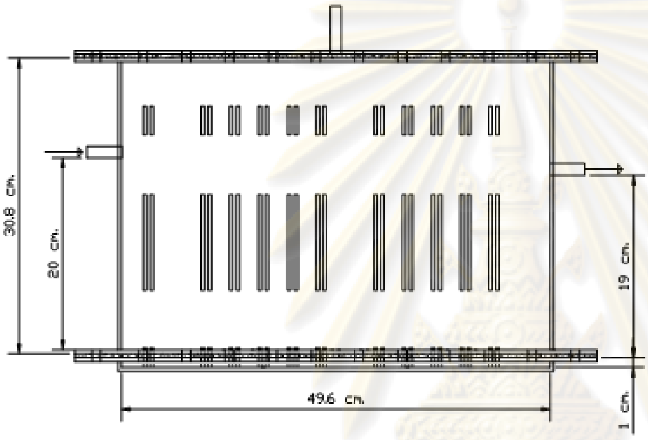
การดำเนินการศึกษาวิจัยใช้ถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ จำนวน 2 ถัง ขนาดกว้าง 11.00 ซม. ยาว 49.60 ซม. สูง 32.60 ซม.โดยมีระยะความสูงเหนือผิวน้ำ (freeboard) 12.60 ซม. ความสูงของระดับน้ำในถังปฏิกิริยา ประมาณ 20 ซม. (ดังรูปที่ 3.3) ดังนั้น มีปริมาตรของเหลวภายในเท่ากับ 10 ลิตร ปลายช่องน้ำเสียไหลลงมีการเอียงปลายแผ่นกั้นเป็นมุม 60 องศา โดยในแต่ละชุดการทดลองจะแบ่งห้องต่างกัน ดังนี้

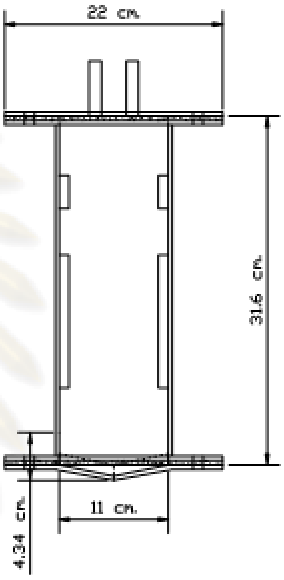
- ถังปฏิกิริยาที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 ห้อง (3C = 3 Compartments) โดยให้ห้องแรกยาวเท่ากับ 19.84 ซม. มีความจุเท่ากับ 4 ลิตร ห้องที่สองและสาม ยาวห้องละ 14.88 ซม. มีความจุห้องละ 3 ลิตร เช่นเดียวกัน โดยรวมปริมาตรของเหลวภายในระบบทั้งหมด 10 ลิตร ท่อทางน้ำเข้าและทางน้ำออกใช้ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว ทางด้านบนของถังปฏิกิริยามีการต่อสายยางนำก๊าซขนาด 1/8 นิ้ว ผ่านเข้าสู่ระบบวัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ
- ถังปฏิกิริยาที่ 2 แบ่งออกเป็น 4 ห้อง (4C = 4 Compartments) เท่าๆ กัน โดยให้แต่ละห้องยาว 12.4 ซม. มีความจุแต่ละห้องเท่ากับ 2.5 ลิตร โดยรวมปริมาตรของเหลวภายในระบบทั้งหมด 10 ลิตร ท่อทางน้ำเข้าและทางน้ำออกใช้ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว ทางด้านบนของถังปฏิกิริยามีการต่อสายยางนำก๊าซขนาด 1/8 นิ้ว ผ่านเข้าสู่ระบบวัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพด้านบน





ภาพด้านหน้า ภาพด้านข้าง

รูปที่ 3.3 รูปแบบของถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

3.5.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสีย

1. เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ

เป็นเครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristatic Pump) จำนวน 2 เครื่อง

2. อุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซ

โดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำ (Inverted glass cylinder method) โดยถังเก็บก๊าซ 1 ชุดจะประกอบด้วยกระบอกตวง ขนาด 1 ลิตร ประกอบกลับด้านกับกระบอกตวง ขนาด 2 ลิตร (จำนวน 2 ชุด) และทำการปรับพีเอชของน้ำให้ต่ำกว่า 3 โดยใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 20 ก. ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) 5 มล.ในน้ำ 100 มล. เพื่อป้องกันการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ถังพักน้ำเสียป้อนเข้าสู่ระบบ

ใช้ถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร จำนวน 2 ถัง

4. ถังรองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ใช้ถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร จำนวน 2 ถัง

3.6 จุดเก็บตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่างมี 4 จุด ได้แก่

1. ถังพักน้ำเสีย (น้ำเสียเข้าระบบ)
2. น้ำจากถังปฏิกิริยาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ โดยแยกเก็บในแต่ละห้อง โดย
   - ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) ได้แก่ห้องที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
   - ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ได้แก่ห้องที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ
3. น้ำจากถังพักน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ 2(4C) (น้ำเสียออกจากระบบ)
4. เก็บก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซ ซึ่งอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา

3.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาผลของประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ โดยใช้ระบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการซึ่งได้ทำการทดลองเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ในแต่ละชุดการทดลอง โดยมีรายละเอียดของการทดลอง ดังนี้

<u>การทดลองที่ 1</u> การเริ่มเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

<u>การทดลองที่ 2</u> การเดินระบบที่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอิทรีย์ต่างๆ

โดยในการทดลองจะมีการศึกษาถึง

- ลักษณะน้ำเสีย
- ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์
- ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ
- ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ
- สภาพแวดล้อมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

โดยตลอดระยะเวลาการทดลองได้ออกแบบการศึกษาจากถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่มีการแบ่งจำนวนห้องต่างกัน ได้แก่ แบบ 3 ห้อง และ แบบ 4 ห้อง โดยสามารถอธิบายวิธีการทดลองได้ ดังนี้

3.7.1 <u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบมีสภาวะคงตัวพร้อมใช้ศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากสภาวะต่างๆ ที่กำหนดในงานวิจัย โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีทั้งหมดของระบบ (โดยเทียบระหว่างซีโอดีน้ำเข้ากับซีโอดีน้ำออก) ที่มีค่าค่อนข้างคงที่ และพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าค่อนข้างคงที่ร่วมด้วย โดยมีขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.4 และตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งมีวิธีการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเจือจางน้ำเสียเพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้ได้ค่าซีโอดีเท่ากับหรือใกล้เคียงที่กำหนด น้ำเสียที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวของงานวิจัยนี้ คือ น้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำมันปาล์มเจือจางด้วยน้ำประปา (ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนเพื่อลดคลอรีน) ผสมสารอาหารสูตร Vanderblit media (Speech,1996) เฉพาะในช่วงเริ่มต้นระบบครั้งแรกเท่านั้นเพื่อเสริมประสิทธิภาพจุลินทรีย์ สำหรับน้ำเสียที่จะป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทั้งสองนี้จะต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.0-7.2 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โดยการเดินระบบเริ่มป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี 2,500 มก./ล. เทียบเท่ากับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยได้ทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 24 ชั่วโมง

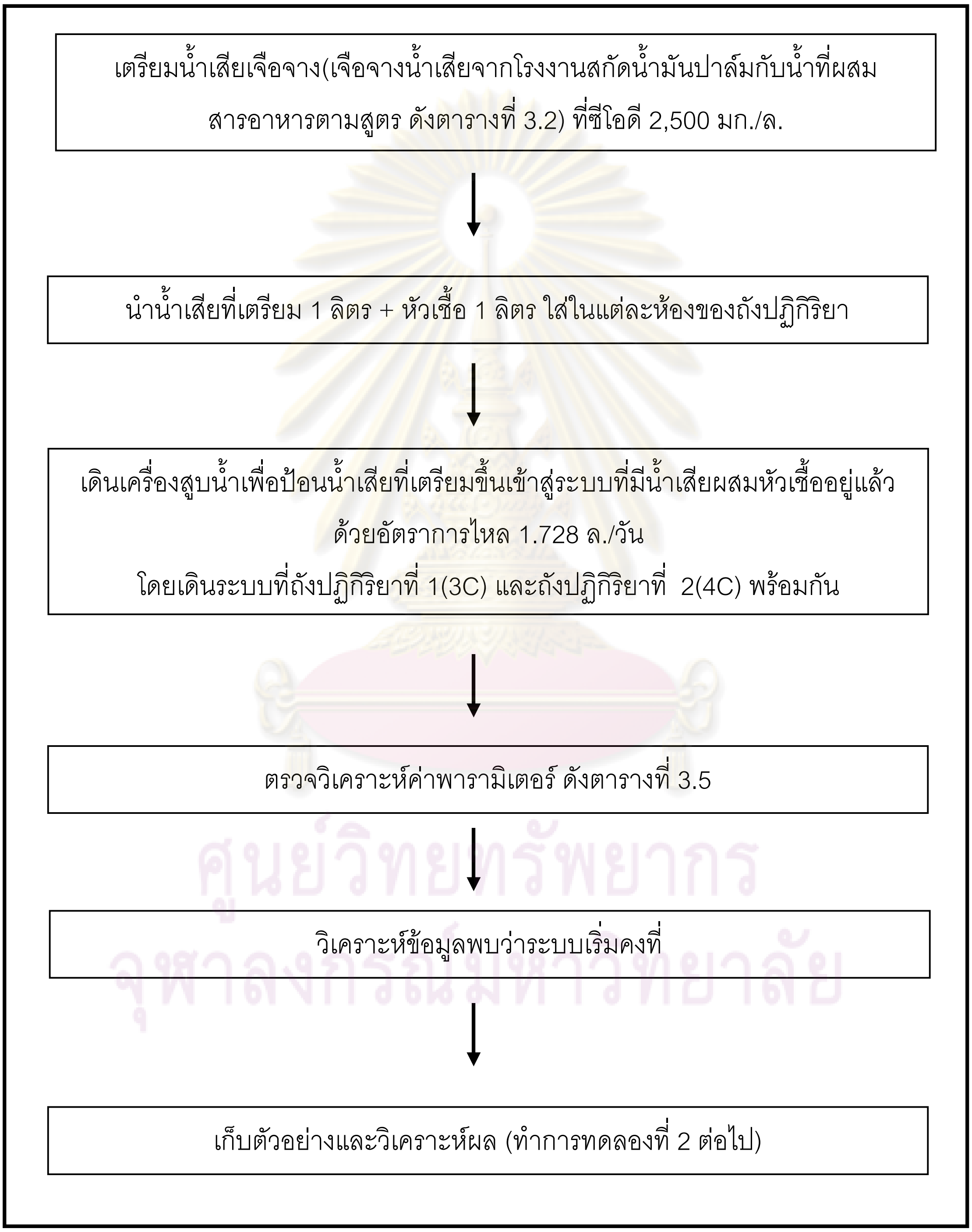
2. การทดลองนี้ทำการเดินระบบทั้ง 2 ชุดการทดลองพร้อมกัน ดังนี้

- ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) : ทำการทดลองที่จำนวนห้อง 3 ห้อง
- ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) : ทำการทดลองที่จำนวนห้อง 4 ห้อง

เริ่มต้นเดินระบบโดยการเติมตะกอนจุลินทรีย์ (Seed) ที่นำมาจากระบบไร้อากาศของบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิ-เนียรส์ จำกัด ในแต่ละถังปฏิกิริยา (แต่ละถังมีปริมาตร 10 ลิตร) โดยเติมน้ำ 1 ลิตร : หัวเชื้อ 1 ลิตร ใส่ในแต่ละห้องของถังปฏิกิริยา โดยใส่ตะกอนจุลินทรีย์เหมือนกันทั้ง 2 ถังปฏิกิริยา แล้วใส่น้ำเสียเจือจาง (ดังข้อที่ 1) เข้าระบบจนได้ปริมาตร (Working Volume) 10 ลิตร โดยเริ่มป้อนที่อัตราไหล 1.728 ลิตรต่อวัน (อัตราการไหลต่ำสุดของเครื่องสูบน้ำ)

3. ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมีความถี่ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.5

4. เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระบบเริ่มมีความคงตัว แล้วค่อยลดอัตราการเจือจางเป็นผลให้เพิ่มค่าซีโอดี โดยทำการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เพื่อทำการทดลองที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนของการทดลองที่ 1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ลักษณะการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ช่วง	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	เวลากักเก็บทางชลศาสตร์ (ชม.)
เริ่มต้นเดินระบบ	2.5	24

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. พีเอช 3. ซีโอดี	1. อุณหภูมิห้อง 2. 7.0-7.2 3. 2,500 มก./ล.
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ทำการวัด**
1. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ 2. ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 3. สภาวะแวดล้อมของระบบ 4. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว	1. ซีโอดี 2. พีเอช 3. กรดไขมันระเหย 4. ของแข็งแขวนลอย 5. ของแข็งระเหย 6. สภาพด่าง 7. ความต่างศักย์โออาร์พี 8. ปริมาณก๊าซทั้งหมด 9. ปริมาณก๊าซมีเทน 10. อุณหภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

พารามิเตอร์	น้ำเสีย ที่เข้าระบบ	น้ำเสีย ในแต่ละห้อง	น้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแล้ว
ซีโอดีทั้งหมด	B	B	B
ซีโอดีที่ละลาย	B	B	B
พีเอช	A	A	A
กรดไขมันระเหยง่าย	B	B	B
ของแข็งแขวนลอย	B	B	B
ของแข็งระเหยง่าย	B	B	B
สภาพด่าง	C	C	C
ความต่างศักย์โออาร์พี	A	A	A
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	-	A	-
ปริมาณก๊าซมีเทน	-	-	D
อุณหภูมิ	A	A	A

หมายเหตุ : A หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าทุกวัน

B หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

C หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าทุก 2 สัปดาห์

D หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าในช่วงก่อนระบบคงตัว 1 ครั้ง และหลังระบบคงตัว 1 ครั้ง โดยเก็บเป็นค่ารวมของทั้งระบบไม่แยกค่าของแต่ละห้อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ ที่มีจำนวนห้องแตกต่างกัน มีขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 และตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.7

การทดลองนี้ทำการเดินระบบทั้ง 2 ชุดปฏิกิริยาพร้อมกัน (เดินระบบต่อเนื่องมาจากการทดลองที่ 1) ซึ่งมีวิธีการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองนี้ทำการเดินระบบทั้ง 2 ชุดการทดลองพร้อมกัน ดังนี้

- ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) : ทำการทดลองที่จำนวนห้อง 3 ห้อง
- ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) : ทำการทดลองที่จำนวนห้อง 4 ห้อง

2. การเดินระบบป้อนน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งจะทำการเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำประปา และ ปรับค่า พีเอชให้อยู่ในช่วง 7.0 -7.2 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นซีโอดี 5,000 มก./ล. โดยป้อนน้ำเสียที่อัตราไหล 10 ล./วัน ใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 24 ชม.

3. ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมีความถี่ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.8

4. เมื่อระบบเข้าส่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ทำการทดลองอยู่แล้ว จากนั้นทำการลดอัตราการเจือจางน้ำเสียลง ทำให้ค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น โดยมีค่าซีโอดีที่ทำการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 5,000 มก./ล. เป็น 10,000 15,000 20,000 25,000 30,000 35,000 และ 40,000 มก./ล. โดยเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ดังตารางที่ 3.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 ลักษณะการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

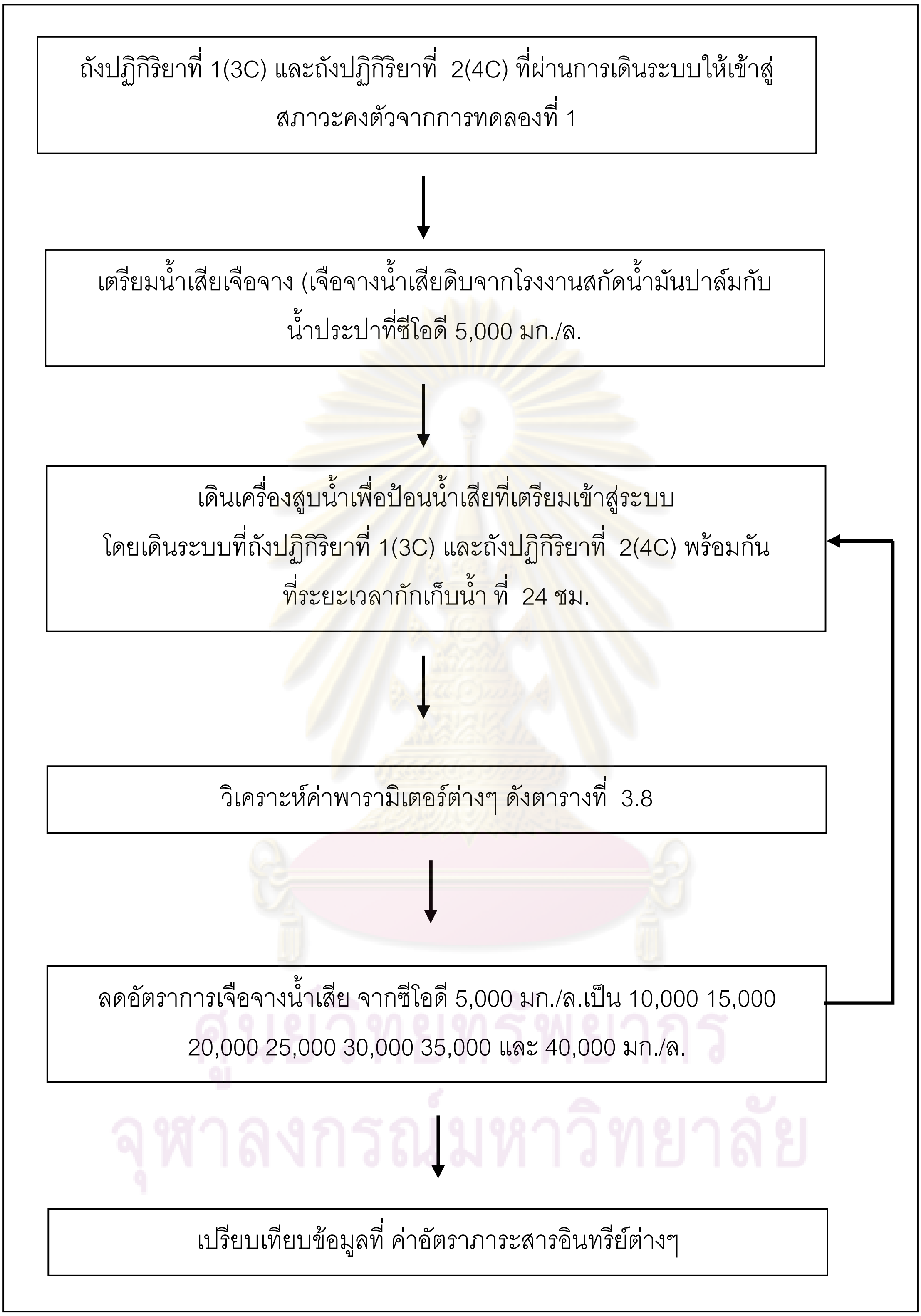
ช่วง	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	เวลากักเก็บทางชลศาสตร์ (ชม.)
1	5.00	24
2	10.00	24
3	15.00	24
4	20.00	24
5	25.00	24
6	30.00	24
7	35.00	24
8	40.00	24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. พีเอช	1. อุณหภูมิห้อง 2. 7.0-7.2
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ทำการวัด**
1. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ 2. ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 3. สภาวะแวดล้อมของระบบ 4. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว	1. ซีโอดี 2. พีเอช 3. กรดไขมันระเหยง่าย 4. ของแข็งระเหยง่าย 5. ของแข็งแขวนลอย 6. สภาพด่าง 7. ความต่างศักย์โออาร์พี 8. ไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) 9. ฟอสฟอรัสทั้งหมด 10. ไขมันและน้ำมัน 11. ปริมาณก๊าซทั้งหมด 12. ปริมาณก๊าซมีเทน 13. อุณหภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนของการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.8 จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

พารามิเตอร์	น้ำเสีย ที่เข้าระบบ	น้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแล้ว
ซีโอดีทั้งหมด	B	B
ซีโอดีที่ละลาย	B	B
พีเอช	A	A
ความต่างศักย์โออาร์พี	A	A
กรดไขมันระเหย	B	B
ของแข็งแขวนลอย	B	B
ของแข็งระเหยง่าย	B	B
สภาพด่าง	B	B
ไขมันและน้ำมัน	C	C
ปริมาณไนโตรเจน	C	C
ปริมาณฟอสฟอรัส	C	C
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	-	-
ปริมาณก๊าซมีเทน	-	B
อุณหภูมิ	A	A

หมายเหตุ : A หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าทุกวัน

B หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าทุกสัปดาห์

C หมายถึง เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าทุก 2 สัปดาห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงได้ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ซีโอดี (COD)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 5220C (Closed Reflux)
พีเอช (pH)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 4500B (Electrometric Method)
กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 5560
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 2540B (Dried at 103-105 ^{o}C)
ของแข็งระเหยง่าย (Total Volatile Solid, VS)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 2540E (Ignited at 550 ^{o}C)
ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solid, SS)	GF/C Filter
สภาพด่าง (Alkalinity, Alk)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 2320B (Titration Method)
ความต่างศักย์โออาร์พี (ORP)	ORP Meter
ปริมาณไนโตรเจน (Total Kjeldahl nitrogen; TKN)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 4500N_{org}C (Micro-Kjeldahl method)
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus;TP)	Standard Methods for water and wastewater Examination No. 4500P (Vanadomolybopheric Acid Method)
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	การวัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ
ปริมาณก๊าซมีเทน	Gas Chromatography (GC)
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาผลของประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์ โดยใช้ระบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการซึ่งได้ทำการทดลองเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ในแต่ละชุดการทดลองเป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 308 วัน โดยมีรายละเอียดการทดลอง ดังนี้

4.1 ลักษณะน้ำเสีย

4.2 ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์

4.3 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ (Start-up)

4.4 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (Organic Loading Rate)

โดยตลอดระยะเวลาการทดลองได้ออกแบบการศึกษาจากถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้น-ไร้อากาศที่มีการแบ่งห้องจำนวนไม่เท่ากัน ได้แก่ ถังปฏิกิริยาที่ 1 ที่มีการแบ่งห้อง แบบ 3 ห้อง (3 Compartments; 3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2 ที่มีการแบ่งห้อง แบบ 4 ห้อง (4 Compartments; 4C) ที่เวลากักเก็บทางชลศาสตร์ (Hydraulic Retention Time; HRT) ของระบบเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยสามารถอธิบายผลการทดลองตามขั้นตอนของการทดลองต่างๆ ได้ ดังนี้

4.1 ลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent; POME) ของระบบบำบัดน้ำเสีย บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตยังไม่ได้ผ่านการบำบัดใดๆทั้งสิ้น ลักษณะของน้ำเสียจะมีสีเหลืองอมน้ำตาล และขุ่น มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว โดยตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองมีการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละประมาณ 250 ลิตร

โดยลักษณะสมบัติน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
บีโอดี (BOD)	มก./ล.	69,170
ซีโอดี (COD)	มก./ล.	133,010
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)	มก./ล.	9,150
ความเป็นกรดด่าง (pH)	-	4.40
อินทรีย์ไนโตรเจน (TKN)	มก./ล. ในรูปไนโตรเจน	130
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	มก./ล.	42,230
ของแข็งทั้งหมด (TS)	มก./ล.	70,130
ของแข็งแขวนลอย (SS)	มก./ล.	27,900

หมายเหตุ: ข้อมูลผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียเบื้องต้นเป็นของ บริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด

4.2 ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศนี้ เป็นตะกอนของถังหมักแบบไร้อากาศ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท แซน.อี.68 แลบ จำกัด ลักษณะตะกอนจะมีสีดำอมน้ำตาล เนื้อหยาบ มีกากใยผสมอยู่เล็กน้อย ผลวิเคราะห์ในห้องทดลองพบว่ามีค่าลักษณะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า
ของแข็งแขวนลอย (MLSS)	มก./ล.	35,570
ของแข็งระเหยง่าย (MLVSS)	มก./ล.	11,920
อัตราส่วนของ MLVSS/MLSS	-	0.34

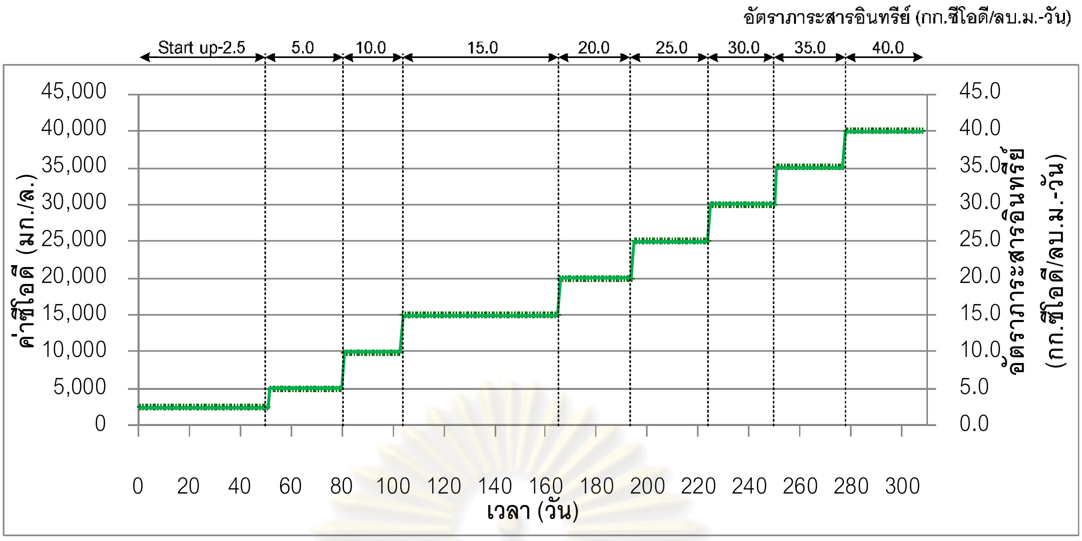
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ (Start-up)

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวพร้อมที่จะใช้ในการศึกษาผลที่เกิดจากสภาวะต่างๆ ซึ่งในระยะแรกจะเป็นการปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อป้องกันความเป็นพิษของน้ำเสียต่อจุลินทรีย์ในระบบ น้ำเสียที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวของงานวิจัยนี้ คือ น้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำมันปาล์มเจือจาง การเริ่มต้นเดินระบบเริ่มใช้ถังปฏิกิริยาชนิดแผ่นกั้นไร้อากาศทั้ง 2 ถังโดยมีแบบของถังปฏิกิริยาแตกต่างกัน 2 แบบ โดย แบบแรก คือ แบบที่มีการแบ่งห้องเป็น 3 ห้อง (ถังปฏิกิริยาที่ 1; 3C) และแบบที่สองคือแบบที่มีการกั้นห้องเป็น 4 ห้อง (ถังปฏิกิริยาที่ 2; 4C) หลังจากการติดตั้งและทดสอบระบบแผ่นกั้นไร้อากาศและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของจุลินทรีย์ที่เตรียมไว้แล้วจึงเตรียมตะกอนจุลินทรีย์ใส่ในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง จำนวนถังละ 5 ลิตร โดยมีส่วนที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด 10 ลิตร โดยเฉลี่ยใส่ในแต่ละห้องเท่าๆ กัน หลังจากนั้นเติมน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เจือจางที่ความเข้มข้นของซีโอดี 2,500 มก./ล. ด้วยน้ำผสมสารอาหารสูตร Speece (1996)ทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 24 ชั่วโมง ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา ทั้ง 2 ถังพร้อมกันเพื่อทำการศึกษาควบคู่กันไปภายใต้สภาวะเดียวกัน

หลังจากป้อนน้ำเสียและเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เมื่อดำเนินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่คงที่ร่วมด้วย) แล้วจึงเพิ่มค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อยๆ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1) เมื่อสังเกตุว่าระบบมีประสิทธิภาพที่สามารถรองรับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ใช้เดินระบบอยู่ได้ โดยอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบทั้ง 2 ชุดการทดลอง ตลอดการทดลองเท่ากับ 5.0-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ใช้เดินระบบและค่าของซีโอดีน้ำเข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระสารอินทรีย์กับระยะเวลาที่ทำการทดลองของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง

โดยถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบทั้งหมด 51 วันโดยผลการทดลองการเริ่มต้นระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ

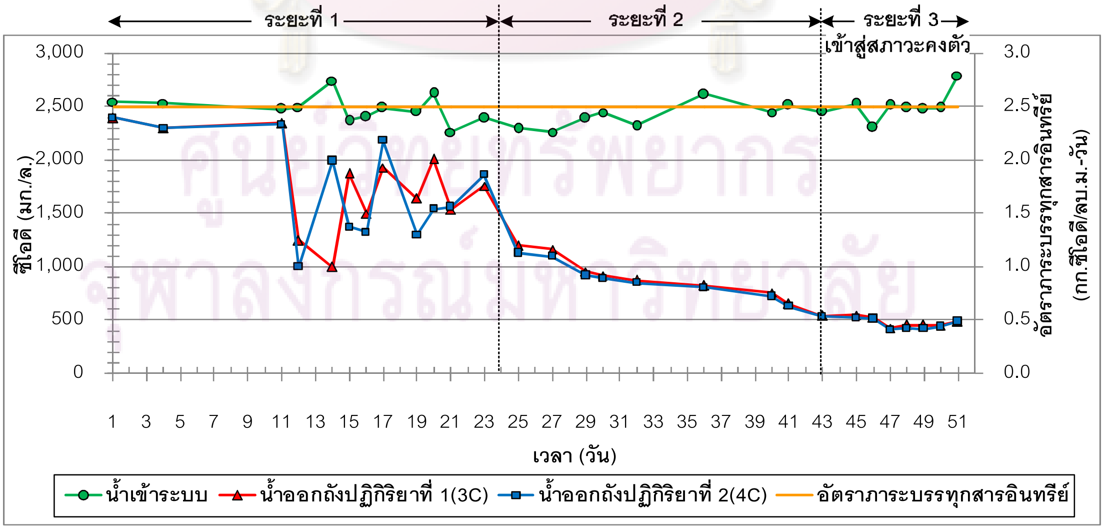
4.3.1.1 ซีโอดี

การเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up) ในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ชุดการทดลอง ใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเสียที่เตรียมจากการเจือจางน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มให้ได้ความเข้มข้นซีโอดีใกล้เคียงหรือเทียบเท่า 2,500 มก./ล. ในช่วงการเริ่มระบบ ทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบทั้งหมด 51 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (วันที่ 1 ถึง วันที่ 51 ของการทดลอง) จากการทดลอง พบว่า ค่าซีโอดีน้ำเสียเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,474±127 มก./ล. และน้ำเสียหลังออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 1,172±648 มก./ล. และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 1,144±654 มก./ล. ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 โดยจากรูปที่ 4.2 แสดงค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ พบว่า สามารถแบ่งช่วงก่อนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เป็น 3 ระยะ ดังนี้

ระยะปรับตัวที่ 1 (ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 23 ของการทดลอง) พบว่าค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากระบบในช่วงนี้ยังมีความแปรปรวนมาก ซึ่งเกิดจากการที่ระบบปรับตัวรับอัตราภาระสารอินทรีย์ ในช่วงนี้พบว่าค่าซีโอดีน้ำออกของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าเฉลี่ย 1,797±438 มก./ล. และ 1,768±476 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่ยังสูงอยู่มาก

ระยะปรับตัวที่ 2 (ช่วงวันที่ 24 ถึงวันที่ 42 ของการทดลอง) พบว่าค่าซีโอดีมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ โดย ค่าซีโอดีน้ำออกมีค่าเฉลี่ย 919±189 มก./ล. และ 884±172 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าซีโอดีน้ำออกในช่วงก่อนหน้านี้ แสดงว่าระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น (สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบน ของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) เท่ากับ 0.21 และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) เท่ากับ 0.19)

ระยะเข้าสู่สภาวะคงตัว (ช่วงวันที่ 43 ถึงวันที่ 51 ของการทดลอง) เป็นช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว พบว่าน้ำออกมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 486±47 มก./ล. และ 470±52 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ยในช่วงระยะปรับตัวที่ 2 ซึ่งนอกจากระบบมีความสามารถในการกำจัดซีโอดีมากขึ้นแล้วยังพบว่าค่าซีโอดีน้ำออกของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีความแปรปรวนน้อยลงกว่าเดิม (สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) เท่ากับ 0.10 และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) เท่ากับ 0.11) ซึ่งค่าซีโอดีที่เริ่มคงตัวนับตั้งแต่วันที่ 47- 51 ของการทดลอง (โดยช่วงสภาวะคงตัวเริ่มตั้งแต่วันที่ 47 เป็นต้นไป) โดยแสดงค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบ ในช่วงต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ ดังตารางที่ 4.3 และแสดงค่าเฉลี่ยซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว ดังในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ

ตารางที่ 4.3 ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบในช่วงต่างๆ ของ ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ

ช่วงการเดินระบบ	ซีโอดี (มก./ล.)					
	น้ำเข้าระบบ		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่1 (3C)		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ระยะที่ 1 (วันที่ 1-23)	2,268-2,750	2,488 ±125	1,000-2,400	1,797 ±438	1,000-2,400	1,768 ±476
ระยะที่ 2 (วันที่ 24-42)	2,267-2,622	2,417 ±119	650-1,200	919 ±189	630-1,133	884 ±172
ระยะที่ 3 (วันที่ 43-51)	2,310-2,798	2,512 ±135	425-550	486 ±47	410-535	470 ±52

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว

สภาวะของระบบ	ซีโอดี (มก./ล.)					
	น้ำเข้าระบบ		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่1 (3C)		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ก่อนระบบคงตัว	2,267-2,750	2,456±121	524-2,400	1,328±611	515-2,400	1,298±622
ระบบคงตัวแล้ว	2,485-2,798	2,559±134	425-486	454±22	410-491	438±32

4.3.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

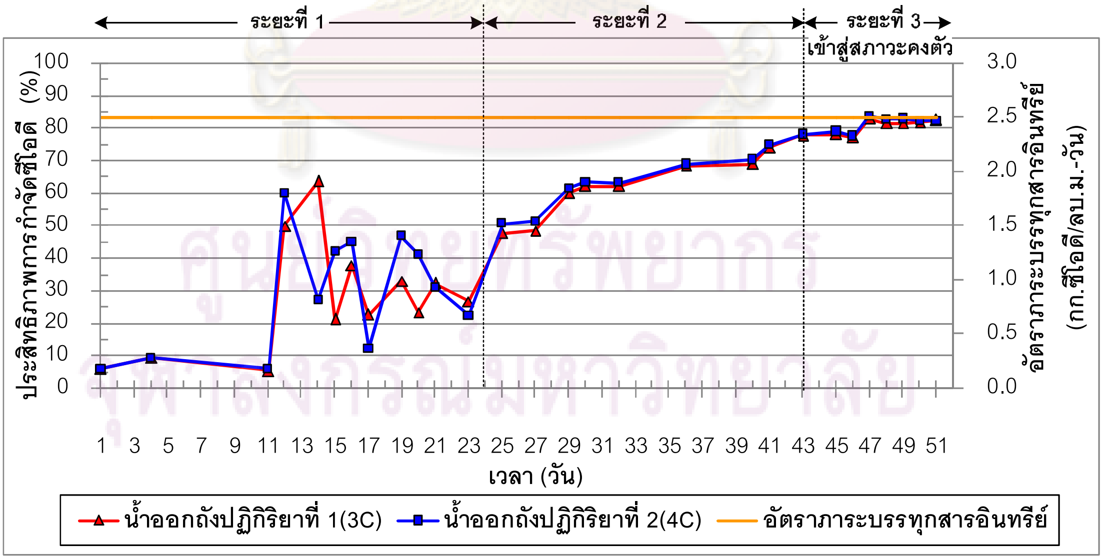
จากการทดลอง พบว่า ในช่วงการเริ่มระบบ (Start-up) (วันที่ 1 ถึง วันที่ 51 ของการทดลอง) ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าเท่ากับร้อยละ 52±26 และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าเท่ากับร้อยละ 54±26 โดยจากรูปที่ 4.3 สามารถแบ่งช่วงก่อนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเป็น 3 ระยะ พบว่า

ระยะปรับตัวที่ 1 (ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 23 ของการทดลอง) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำมาก (เทียบระหว่าง ซีโอดีน้ำเข้ากับซีโอดีน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง) รวมถึงยังมีความ

แปรปรวนอยู่มาก (สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบน ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าเท่ากับ 0.63) โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 28±17 และ 29±19 ตามลำดับ

ระยะปรับตัวที่ 2 (ช่วงวันที่ 24 ถึงวันที่ 42 ของการทดลอง) พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น โดยในช่วงนี้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 62±9 และ 63±9 ตามลำดับ (สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) เท่ากับ 0.15 และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) เท่ากับ 0.14) เห็นได้ชัดว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น และค่าที่ได้มีความแปรปรวนลดลงด้วย

ระยะเข้าสู่สภาวะคงตัว (ช่วงวันที่ 43 ถึงวันที่ 51 ของการทดลอง) เป็นช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว พบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมดของน้ำออกจากระบบมีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81±2 และ 81±2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีหลังจากวันที่ 47 เป็นต้นไป ค่าค่อนข้างคงที่ (สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบน ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าเท่ากับ 0.03) และมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบ ในช่วงต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ แสดงดังในตารางที่ 4.5 และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้วแสดงดังในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.3 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำออกจากระบบกับเวลาในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ตารางที่ 4.5 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบในช่วงต่างๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ในระยะเริ่มเดินระบบ

ช่วงการเดินระบบ	**ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)**			
	น้ำออกถังปฏิกิริยาที่1 (3C)		**น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)**	
	ช่วง	**ค่าเฉลี่ย**	**ช่วง**	**ค่าเฉลี่ย**
ระยะที่ 1 (วันที่ 1-23)	5.24-63.64	29.53±16.84	5.75-63.64	31.18±17.53
ระยะที่ 2 (วันที่ 24-42)	47.83-74.21	61.62± 9.46	50.72-75.00	63.14± 8.64
ระยะที่ 3 (วันที่ 43-51)	77.32-83.14	80.60± 2.34	77.71-83.74	81.22± 2.41

ตารางที่ 4.6 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว

สภาวะของระบบ	**ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)**			
	น้ำออกถังปฏิกิริยาที่1 (3C)		**น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)**	
	ช่วง	**ค่าเฉลี่ย**	**ช่วง**	**ค่าเฉลี่ย**
ก่อนระบบคงตัว	5.24-78.30	47.79±23.27	5.75-79.28	49.24±23.18
ระบบคงตัวแล้ว	81.75-83.75	82.25± 0.61	82.28-83.74	82.91± 0.58

4.3.1.3 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยง่ายในระบบ

การเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up) ในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ชุดการทดลอง ใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จากการทดลอง พบว่า ในช่วงการเริ่มระบบ (วันที่ 1 ถึง วันที่ 51 ของการทดลอง) ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบ ดังแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3 และ ข-4

ที่สภาวะก่อนระบบคงตัวค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเข้าระบบในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 1,740-4,980 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,668±1,070 มก./ล. ในน้ำทิ้งหลังออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 1,357-4,352 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,133±1,006 มก./ล. และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 1,270-3ม468 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,988±797 มก./ล. ที่สภาวะที่ระบบคงตัวแล้วพบว่า

ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 1,860-2,210 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,035±247 มก./ล. ในน้ำทิ้งหลังออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 1,250-1,624 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,437±264 มก./ล. และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 1,070-1,568 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,319±352 มก./ล. ซึ่งค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว

สภาวะของระบบ	**ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)**		
	น้ำเสียเข้าระบบ	**น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่1 (3C)**	**น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)**
ก่อนระบบคงตัว	2,668±1,070	2,133±1,006	1,988±797
ระบบคงตัวแล้ว	2,035±247	1,437±264	1,319±352

ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของน้ำเสียที่สภาวะก่อนระบบคงตัว ของน้ำเสียเข้าระบบในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 1,210-2,920 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,863±682 มก./ล. ในน้ำทิ้งหลังออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายอยู่ในช่วง 960-2,570 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,459±541 มก./ล. และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายอยู่ในช่วง 910-2,470 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,488±551 มก./ล. ที่สภาวะที่ระบบคงตัวแล้วพบว่าค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 1,452-1,480 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,466±20 มก./ล. ในน้ำทิ้งหลังออกจากถังปฏิกิริยา ที่ 1 (3C) มีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายอยู่ในช่วง 950-1,270 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,088±258 มก./ล. และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายอยู่ในช่วง 760- 1,180 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 970±297 มก./ล. ซึ่งค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว แสดงดังตารางที่ 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว

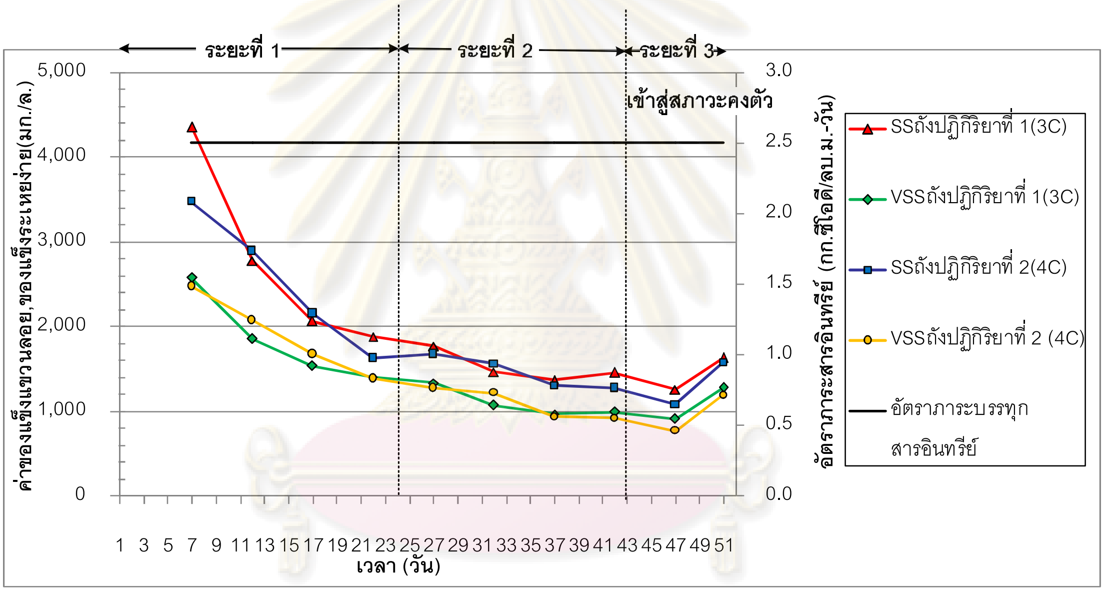
สภาวะของระบบ	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)		
	น้ำเสียเข้าระบบ	น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่1 (3C)	น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)
ก่อนระบบคงตัว	1,863±682	1,459±541	1,488±551
ระบบคงตัวแล้ว	1,466±20	1,088±258	970±297

ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยา สามารถตรวจวัดได้ด้วยปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS) และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids; VSS) พารามิเตอร์สองตัวนี้สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกิริยา ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายซึ่งเป็นสารอินทรีย์นี้เป็นส่วนที่สำคัญเนื่องจากประกอบไปด้วย ตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้นหากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกไปกับน้ำเสียจำนวนมาก นั่นหมายความว่าระบบมีความสามารถในการตกตะกอนไม่ดี ทำให้การกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในระบบมีน้อย จนอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงได้ อีกทั้งยังทำให้มีสารอินทรีย์หลุดออกไปกับน้ำเสียในปริมาณมาก ส่งผลให้ซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยง่ายระเหยต่อค่าของแข็งแขวนลอยเมื่อเริ่มต้นเดินระบบมีค่าต่ำแต่เมื่อทำการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่าค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ในระบบด้วย โดยค่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยง่ายระเหยต่อค่าของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้วแสดงดังตารางที่ 4.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยง่ายระเหยต่อของแข็งแขวนลอย ณ สภาวะก่อนระบบคงตัวและสภาวะที่ระบบคงตัวแล้ว

สภาวะของระบบ	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอย (VS/VSS)			
	น้ำออกถังปฏิกิริยาที่1 (3C)		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ก่อนระบบคงตัว	0.59-0.76	0.70±0.06	0.71-0.85	0.75±0.05
ระบบคงตัวแล้ว	0.72-0.78	0.75±0.04	0.71-0.75	0.73±0.03



รูปที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังเทียบกับเวลาในระยะเริ่มต้นเดินระบบ

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำออกของถังปฏิกิริยาทั้งสองถัง พบว่าในช่วงแรกมีค่าของของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบมากโดยถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีการหลุดออกที่มากกว่า อาจกล่าวได้ว่ามีการหลุดออก (Wash out) ของตะกอนออกจากถังปฏิกิริยามาก อาจเนื่องมาจากการคัดเลือกสายพันธุ์ของตะกอนจุลินทรีย์ คือตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักเบาจะถูกพัดพาออกจากระบบ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักมากความหนาแน่นสูง สามารถรวมเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และตกลงสู่ก้นถัง ทำให้ประสิทธิภาพใน

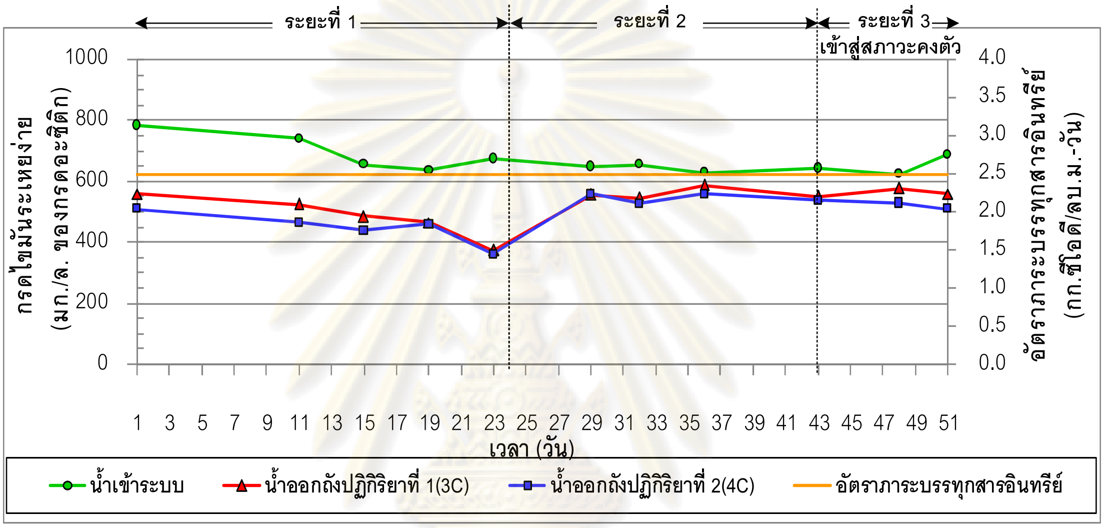
การลดของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จีรพงษ์ อินทร์จอหอ(2537) ที่กล่าวว่ากระบวนการสร้างตะกอนมี 3 ช่วง คือ ช่วงแรก คือ การคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักเบาไม่สามารถอยู่ในระบบ ซึ่งจะหลุดออกจากระบบ ช่วงที่สอง คือ ช่วงก่อตัวเป็นเม็ด ช่วงที่สาม คือ ช่วงเพิ่มขนาดเม็ดตะกอน เมื่อเดินระบบไปได้ระยะหนึ่งพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกน้อยลงและมีความคงตัวมากขึ้น จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณของแข็งระเหยในน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าสูง แต่เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งจนเข้าใกล้ช่วงสภาวะคงตัวพบว่าปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่หลุดออกมามีปริมาณต่ำ ส่งผลให้ค่าของแข็งระเหยง่ายที่หลุดออกมามีปริมาณต่ำลงด้วย โดยค่าของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายมีแนวโน้มการลดลงที่สอดคล้องกันทั้งสองถังปฏิกิริยา

4.3.1.4 กรดไขมันระเหยง่าย

กรดไขมันระเหยง่ายเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากหลังกระบวนการไฮโดรไลซิสจะมีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายขึ้นมาซึ่งถ้าหากระบบมีกรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่มาก ซึ่งส่งผลถึงค่าพีเอชโดยตรงและอาจทำให้ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนทำงานได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพลดลง ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบ ตลอดการทดลองในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 672±50 มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก และน้ำเสียหลังออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยเท่ากับ 526±62 มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยเท่ากับ 496±60 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก จากการทดลองพบว่าค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าต่ำกว่าน้ำเข้าระบบ เนื่องจากเกิดการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังทีมีค่าซีโอดีลดลงจากน้ำเสียเข้าระบบ :ซึ่งค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบ แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-5 โดยค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบและออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง แสดงดังในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.10 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ

ถังปฏิกิริยา	กรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้า (มก./ล.)		กรดไขมันระเหยง่ายของน้ำออก (มก./ล.)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	625-785	672±50	375-588	526±62
ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)			362-560	496±60



รูปที่ 4.5 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ

4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในระยะเริ่มต้นระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ตรวจสอบสภาพการทำงานของระบบได้ โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังปฏิกิริยาจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในอุปกรณ์เก็บก๊าซโดยใช้วิธีแทนที่น้ำและทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 จากกราฟจะพบว่าปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่คงที่ ยังใช้เป็นค่าที่บ่งบอกสภาวะของระบบจากช่วงเริ่มต้นเดินระบบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว สามารถทำการเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์เพื่อทำการทดลองต่อไปได้

ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) เท่ากับ 1,386±626 มก./วัน ได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎี 1,067±464 มล./วัน ส่วนค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 663±489 มล./วัน

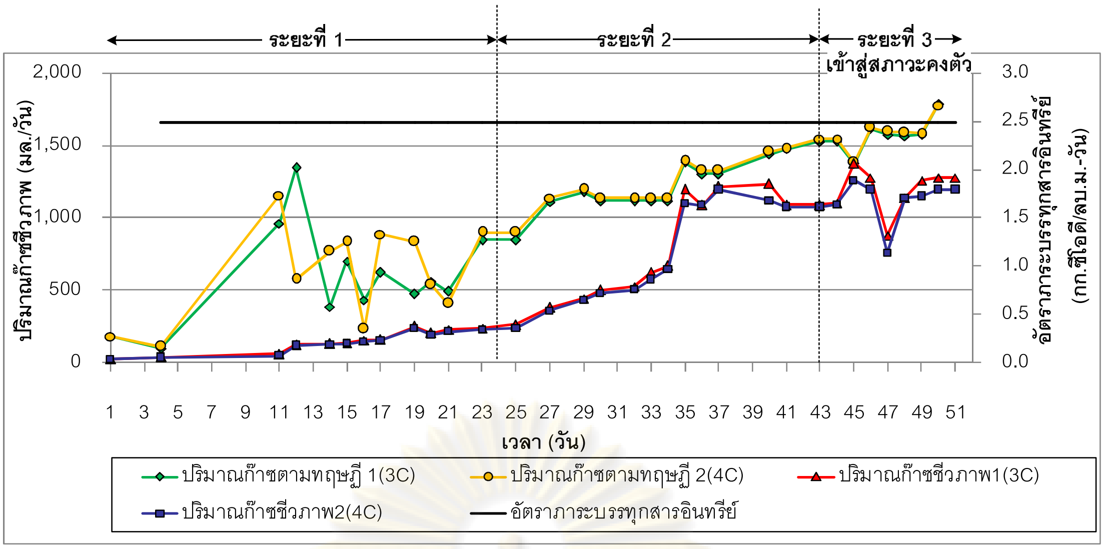
ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 1,414±614 มก./วัน และได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีเท่ากับ 1,089±455 มล./วัน ส่วนค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง 634±468 มิลลิลิตรต่อวัน (ดังแสดงในตารางที่ 4.11)

จากตารางที่ 4.11 พบว่าสัดส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ มีค่า 0.48-0.45 มล. ต่อ 1 มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ (คิดเป็น 62.71 และ 58.23% ของค่าทางทฤษฎี ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีและที่เป็นจริงในระยะเริ่มเดินระบบ

ถังปฏิกิริยา	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย (กก./ลบ.ม.-วัน)	ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มก./วัน)	*ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ควรเกิดตามทฤษฎี (มล./วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง (มล./วัน)	สัดส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อ ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มล.ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)
1 (3C)	2.5	1,386±640	1,067±464	663±489	0.48
2 (4C)	2.5	1,414±632	1,089±455	634±468	0.45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



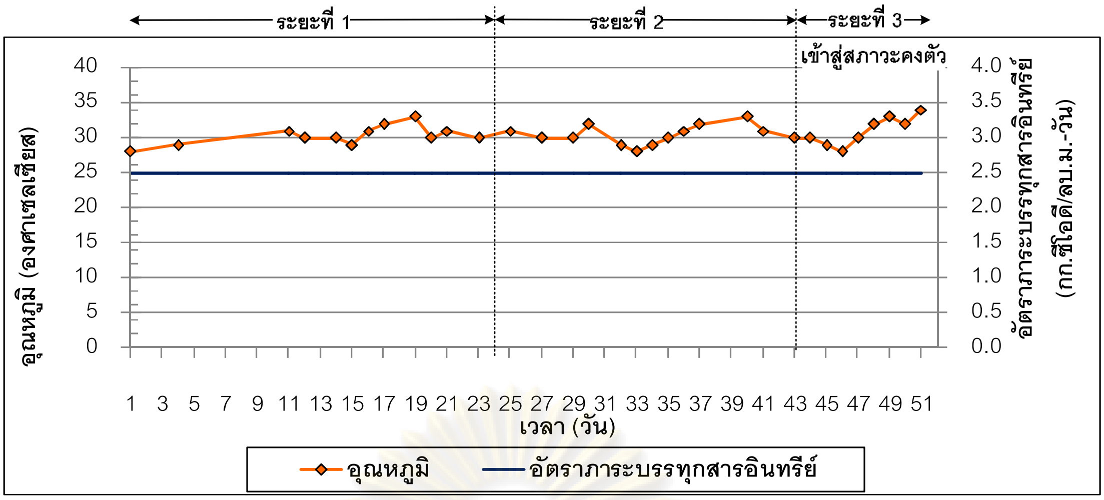
รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีในระยะเริ่มเดินระบบ

4.3.3. สภาวะแวดล้อมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในระยะเริ่มต้นระบบ

4.3.3.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในการเดินระบบของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง (3C และ 4C) ได้ทำการเดินระบบภายใต้อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 28-35 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 31.5±1.82 องศาเซลเซียส นับว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยจัดอยู่ในสภาวะการทำงานของแบคทีเรียแบบมีโซฟิลิค (Mesophilic Bacteria) ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 25-40 องศาเซลเซียส (Metcalf and Eddy, 2004) โดยอุณหภูมิในระยะเริ่มต้นระบบแสดงดังในรูปที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



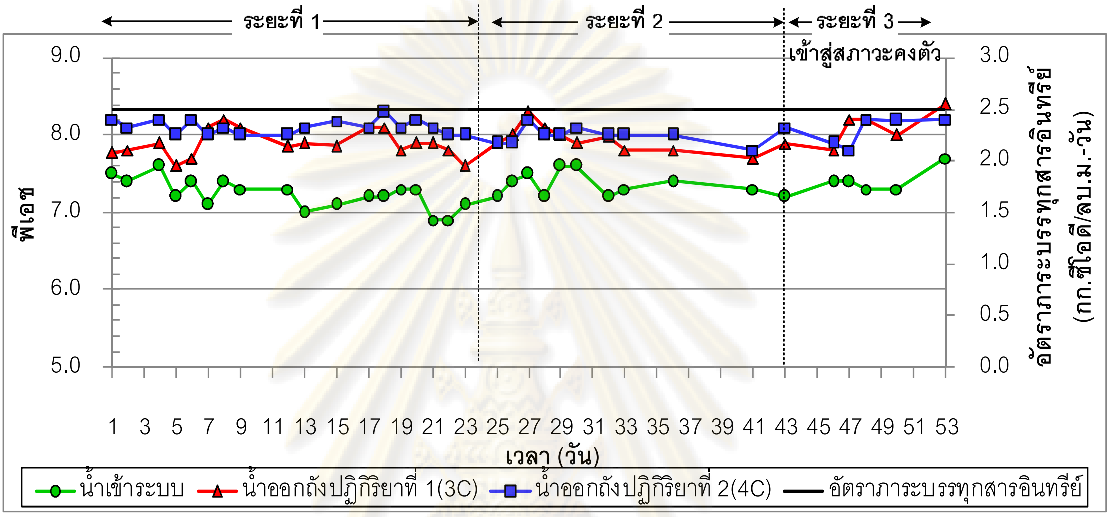
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิในระยะเริ่มต้นระบบ

4.3.3.2 พีเอช

ค่าพีเอชเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงสภาพภายในของกระบวนการไร้อากาศได้ จึงนับเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้น จึงต้องควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศ โดยให้มีค่าอยู่ที่ 6.6-7.6 ซึ่งที่ค่าพีเอช 6.7-7.4 จะเหมาะแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542) เนื่องจากน้ำเสียน้ำมันปาล์มมีค่าพีเอชประมาณ 4-5 ซึ่งไม่เหมาะต่อการเดินระบบ จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบ โดยการเริ่มต้นเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ได้ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบให้มีค่าประมาณ 6.9-7.2 โดยการเติม $NaHCO_3$ ซึ่งค่าพีเอชของน้ำเสียที่ปรับแล้วจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.30±0.2 ส่วนน้ำเสียหลังผ่านระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.00±0.3 และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.00 ±0.3 โดยมีค่าแสดงดังในตารางที่ 4.12 ซึ่งพบว่าในช่วงประมาณ 30 วันแรกของการทดลองค่าพีเอชน้ำออกของถังปฏิกิริยาทั้งสองยังแปรปรวนอยู่บ้างเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักและค่อนข้างคงที่ และยังพบว่าค่าพีเอชตลอดการทดลองเป็นค่าที่เหมาะสมกับการเดินระบบแบบไร้อากาศ โดยค่าพีเอชน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มต้นระบบแสดงดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.12 ค่าพีเอชน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มต้นระบบ

ถังปฏิกิริยา	น้ำเข้า		น้ำออก	
	ช่วงพีเอช	ค่าเฉลี่ย	ช่วงพีเอช	ค่าเฉลี่ย
ถังปฏิกิริยาที่1 (3C)	6.9-7.7	7.30±0.2	7.50-8.70	8.00±0.3
ถังปฏิกิริยาที่2 (4C)			7.50-8.80	8.00±0.3



รูปที่ 4.8 ค่าพีเอชน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มต้นระบบ

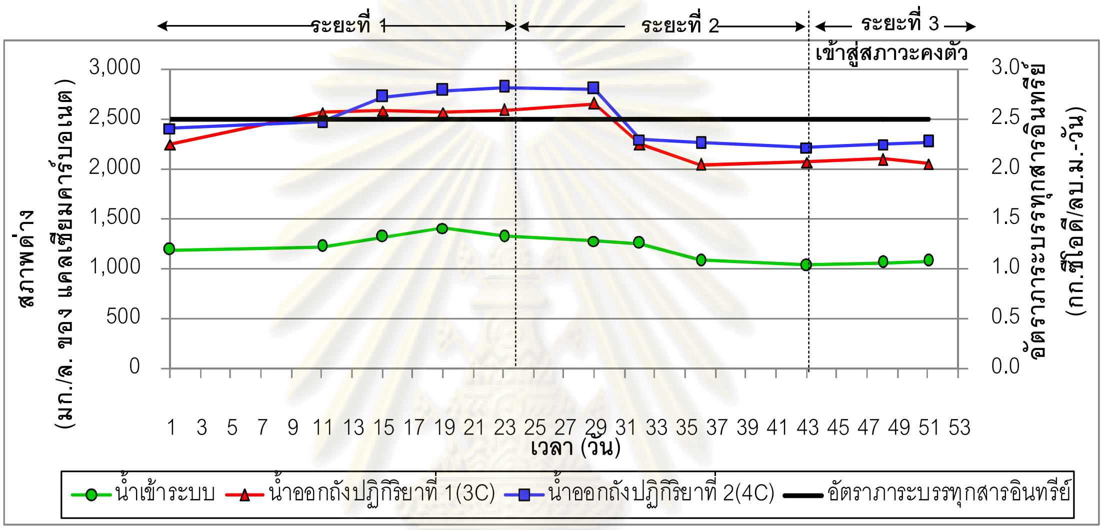
4.3.3.3 สภาพด่าง

เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าสภาพด่างเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพการทำงานของระบบ โดยระบบไร้อากาศควรมีค่าสภาพด่าง 1,000-5,000 มก./ล. ของ $CaCO_3$ (MetCalf & Eddy, 1982)

สภาพด่างของน้ำเสียก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 1,718-2,350 มก./ล. ของ $CaCO_3$ สำหรับสภาพด่างในน้ำเสียที่ออกจากระบบทั้ง 2 ถังปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่าน้ำเสียที่ออกจากระบบของถังปฏิกิริยาทั้งสอง พบว่าโดยค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องด้วยได้ทำการปรับพีเอชน้ำเสียก่อนเข้าระบบด้วย $NaHCO_3$ ซึ่งเป็นการเพิ่มสภาพด่าง (สภาพด่างไบคาร์บอเนต) ให้น้ำเสียด้วย ซึ่งสภาพด่างไบคาร์บอเนตจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) เกิดขึ้นในระบบ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542) โดยค่าสภาพด่างน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบแสดงดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.13 ค่าสภาพด่างน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ

ถังปฏิกิริยา	สภาพด่างน้ำเข้า (มก./ล. ของ $CaCO_3$)		สภาพด่างน้ำออก (มก./ล. ของ $CaCO_3$)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	1,718-2,350	2,005±211	2,045-2,660	2,341±256
ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)			2,218-2,820	2,484±251



รูปที่ 4.9 ค่าสภาพด่างน้ำเข้าและออกจากระบบในระยะเริ่มเดินระบบ

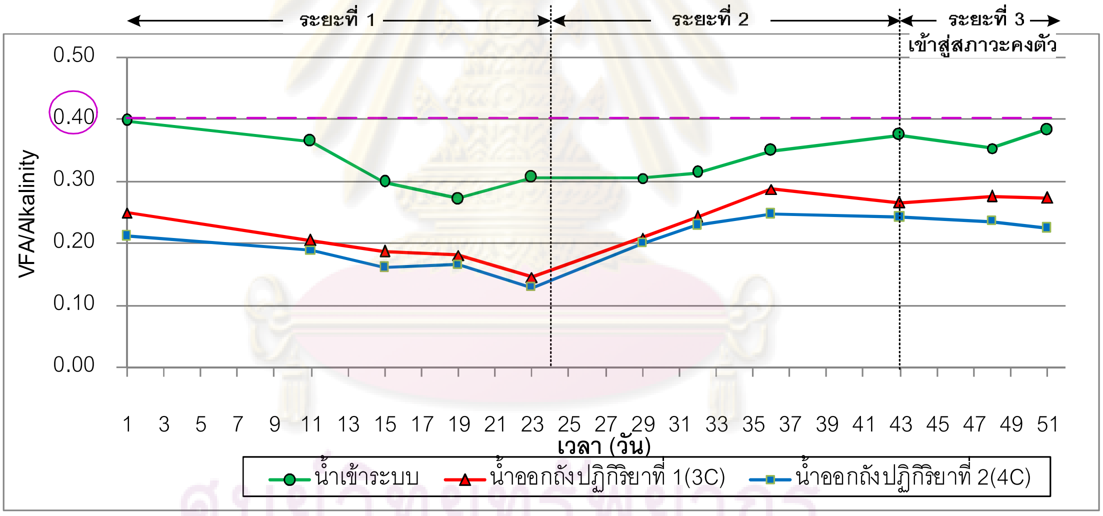
4.3.3.4 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง

สภาพด่างเป็นตัวบ่งชี้ถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบซึ่งช่วยให้ระบบมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ในขณะที่โมเลกุลกรดไขมันระเหยง่ายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง หากเกิดการสะสมอยู่ในระบบมากเกินไปนอกจากจะส่งผลให้พีเอชมีค่าลดลงแล้วยังเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนได้จนทำให้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบลดลง การวิเคราะห์อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในระบบจึงนับว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบที่สำคัญ โดยทั่วไปแล้วค่าสัดส่วนนี้ควรน้อยกว่า 0.4 จึงจะถือได้ว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าสัดส่วนนี้มีค่ามากขึ้นแสดงว่าระบบกำลังเสียสมดุล กำลังบัฟเฟอร์ที่มีอยู่เดิมลดน้อยลงและไม่เพียงพอ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าสัดส่วนนี้มีค่ามากกว่า 0.8 จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็วหรืออาจลดลงแล้วก็เป็นไปได้ (มั่นสิน ตัณฑุล-

เวศม์,2542) ซึ่งจากรูปที่ 4.10 พบว่าในช่วงแรกของการทดลองมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างที่สูงหลังจากนั้นแปรปรวนอีกเล็กน้อยจนกระทั่งถึงวันที่ 36 ของการทดลองค่าที่ได้จึงเริ่มคงที่ แต่เมื่อดูภาพรวมของระบบส่วนใหญ่แล้วพบว่าค่าที่ได้ยังมีค่าต่ำกว่า 0.4 แสดงว่าในระบบมีบัฟเฟอร์ที่เพียงพอที่ทำให้ระบบสามารถทำงานและผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าได้แสดงดังในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในระยะเริ่มเดินระบบ

ถังปฏิกิริยา	น้ำเข้า		น้ำออก	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	0.27-0.40	0.34±0.04	0.14-0.29	0.25±0.03
ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)			0.13-0.25	0.20±0.02



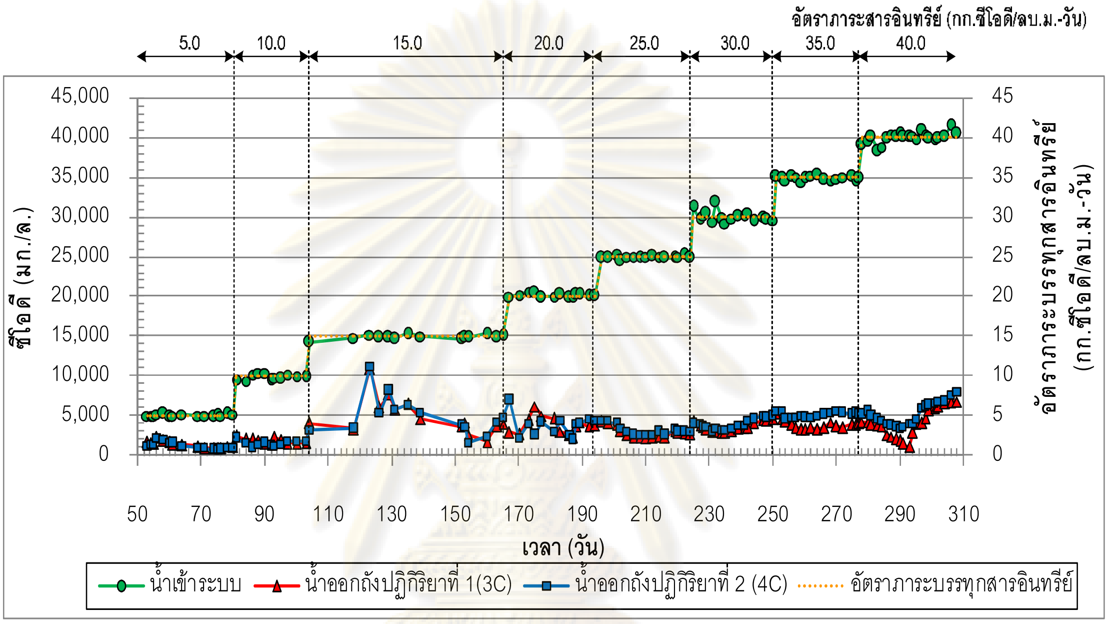
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในระยะเริ่มเดินระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ (Organic Loading Rate)

4.4.1. ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

4.4.1.1 ค่าซีโอดีทั้งหมด (COD)



รูปที่ 4.11 ค่าซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่แสดงถึงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ นั่นคือประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีนั่นเอง ซึ่งระบบที่มีประสิทธิภาพสูงทำงานได้ดี ย่อมทำให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีสูงตามไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำเข้าและออกจากระบบ ทำให้ทราบถึงความสามารถในการกำจัดซีโอดี โดยจะมีการแปรค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาของการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเท่ากับ 5,019±130, 9,888±355, 14,915±270, 20,164±215, 24,977±176, 30,099±707, 34,912±255 และ 40,035±672 มก./ล. ตามลำดับ โดยค่าซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.11 และน้ำออกจากระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 โดยค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบและค่าซีโอดีของน้ำเสีย

ที่ออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังในช่วงสภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าซีโอดีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)					
	น้ำเข้าระบบ		น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)		น้ำออก ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	4,825-5,250	5,019 ±130	783-885	879 ±90	750-957	860 ±75
10.0	9,359-10,387	9,888 ±355	1,338-1,987	1,631 ±255	981-1,750	1,438 265
5.0	4,292-15,335	14,915 270	1,693-2,538	2,116 ±597	1,513-2,324	1,919 ±573
20.0	19,870-20,629	20,164 ±215	2,231-4,127	3,263 ±699	2,011-3,987	3,124 ±994
25.0	24,526-25,328	24,977 ±176	2,125-4,295	2,840 ±705	2,458-4,346	3,104 ±636
30.0	29,238-31,880	30,099 ±707	2,815-4,521	3,560 ±602	3,025-4,984	3,853 ±673
35.0	34,436-35,286	34,912 ±255	3,240-5,314	3,817 ±559	4,643-5,528	5,100 ±320
40.0	38,400-41,556	40,035 ±672	1,048-6,730	4,002 ±1,778	3,256-7,873	5,202 ±1,419

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 52 ถึง วันที่ 80 ของการทดลอง ที่ OLR 5.0 หรือ อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า การลดลงของค่าซีโอดีที่ออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังยังมี

ค่าไม่มากนัก น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 5,019±130 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 1,299±414 มก./ล. และ 1,200±434 มก./ล. ตามลำดับ

ในวันที่ 81 ถึง วันที่ 103 ของการทดลอง ที่ OLR 10.0 หรือ ที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 10.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 9,888±355 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 1,790±357 มก./ล. และ 1,508±341 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งช่วงนี้ ค่าซีโอดีที่ออกจากระบบค่อนข้างคงที่

ในวันที่ 104 ถึง วันที่ 165 ของการทดลอง ที่ OLR 15.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ช่วงนี้ค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในช่วงที่เปลี่ยนอัตรารับภาระสารอินทรีย์ (วันที่ 123 ของการทดลอง) จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง (ตั้งแต่วันที่ 123 จนถึงวันที่ 131 ของการทดลอง; ประมาณ 9 วัน) เมื่อถึงวันที่ 135 ของการทดลอง ค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังกลับสูงขึ้นมาอีก เนื่องจากระบบมีตะกอนในรูปของแข็งแขวนลอยหลุดออกมาจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ซึ่งตรวจดูจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังแล้วพบว่ามีการสะสมของ scum หรือตะกอนลอยที่ผิวหน้าน้ำในถังปฏิกิริยามากจึงต้องทำการช้อนออก หลังจากนั้นค่าซีโอดีคงที่ไประยะหนึ่ง เนื่องจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลต่อสภาวะแวดล้อมและการทำงานของจุลินทรีย์ในถังได้ ซึ่งเมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งค่าซีโอดีของน้ำออกจึงลดลง นอกจากนั้นในช่วงนี้มีความจำเป็นต้องหยุดเดินระบบเป็นเวลาประมาณ 2 อาทิตย์ จึงทำให้ช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์นี้เป็นช่วงที่ใช้เวลาในการเดินระบบนานกว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์อื่น โดยในช่วงนี้น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 14,915±270 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 2,722±1,198 มก./ล. และ 2,763±1,280 มก./ล.

ในวันที่ 166 จนถึง วันที่ 194 ของการทดลอง ที่ OLR 20.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียออกจากระบบมีความแปรปรวนมากในช่วงแรก(ตั้งแต่วันที่ 166 จนถึง วันที่ 188 ของการทดลอง เนื่องมาจากนอกจากต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นแล้ว ระบบอาจต้องปรับตัวกับสภาวะแวดล้อมของระบบที่เปลี่ยนแปลงในอัตราภาระสารอินทรีย์ก่อนหน้านี้ ซึ่งหลังจากวันที่ 187 ของการทดลองที่มีค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาต่ำที่สุดแล้ว (ค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 2,231 มก./ล. และ 2,011 มก./ล.) หลังจากนั้นค่าซีโอดีก็มีแนวโน้มคงตัวมากขึ้น โดยช่วงนี้น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 20,164±215 มก./ล.

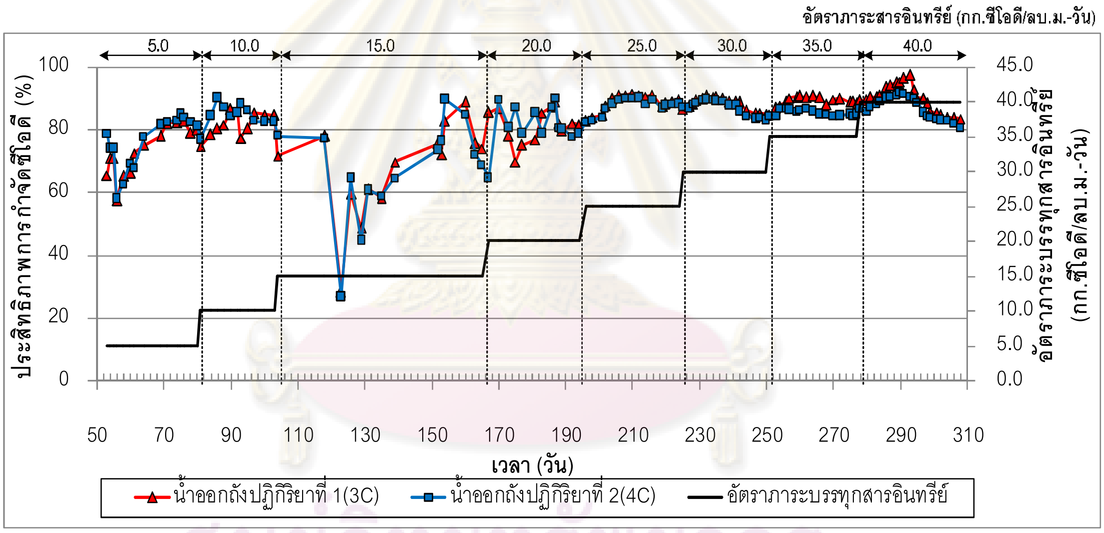
ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 3,746±1,125 มก./ล. และ 3,725±1,336 มก./ล. ตามลำดับ

ในวันที่ 195 จนถึง วันที่ 225 ของการทดลองที่ OLR 25.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 24,977±176 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 2,840±705 มก./ล. และ 3,104±636 มก./ล. ในวันที่ 225 จนถึง วันที่ 250 ของการทดลองที่ OLR 30.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 30.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 30,099±707 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 3,560±602 มก./ล. และ 3,853±673 มก./ล. ในวันที่ 251 จนถึง วันที่ 277 ของการทดลองที่ OLR 35.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 35.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 34,912±255 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 3,817±559 มก./ล. และ 5,100±320 มก./ล. ซึ่งที่อัตราภาระสารอินทรีย์ทั้ง 3 ช่วงนี้มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีคล้ายคลึงกัน คือค่าซีโอดีของน้ำออกสูงในช่วงแรกลดลงในช่วงกลางและคงที่ในที่สุด จากสภาวะดังกล่าว น่าจะเกิดจากการที่ระบบคงตัวและสามารถรองรับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้

ในวันที่ 278 จนถึง วันที่ 308 ของการทดลองที่ OLR 40.0 หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ในช่วงนี้ค่าซีโอดีของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาในช่วงแรกสูงขึ้นเล็กน้อยก่อนจะค่อยๆ ลดลง จนต่ำที่สุดในวันที่ 293 ของการทดลองก่อนค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 40,035±672 มก./ล. ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เท่ากับ 4,002±1,778 มก./ล. และ 5,202±1,419 มก./ล.

เมื่อพิจารณาจากการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ จากรูปที่ 4.11 แล้ว พบว่า เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งจะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีที่ออกจากถังปฏิกิริยาจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเข้าระบบในแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ช่วงแรกของการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ให้กับถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีของระบบจะต่ำลง แต่ความสามารถในการกำจัดซีโอดีของระบบจะปรับตัวสูงขึ้น จากนั้นความสามารถในการกำจัดซีโอดีของระบบจะลดต่ำลงเล็กน้อยและคงที่ในเวลาต่อมา แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลาอันสั้นระบบอาจแสดงประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแต่ถ้าเดินระบบต่อไปในระยะยาวประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเรื่อยๆ อาจเนื่องจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ

เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีทั้งหมดของน้ำออกจากระบบ (เทียบระหว่าง ซีโอดีน้ำเข้ากับซีโอดีน้ำออกจากระบบ) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ จากตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.12 ในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังมีความแปรปรวนอยู่บ้าง แต่เมื่อเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีความแปรปรวนน้อยลงแสดงว่าระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.13 พบว่าส่วนใหญ่ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) จะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) โดยเฉพาะในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนกว่าช่วงอื่น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองแล้วค่าที่ได้ใกล้เคียงกันมากโดยถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 84.88 ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) เท่ากับร้อยละ 84.11



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

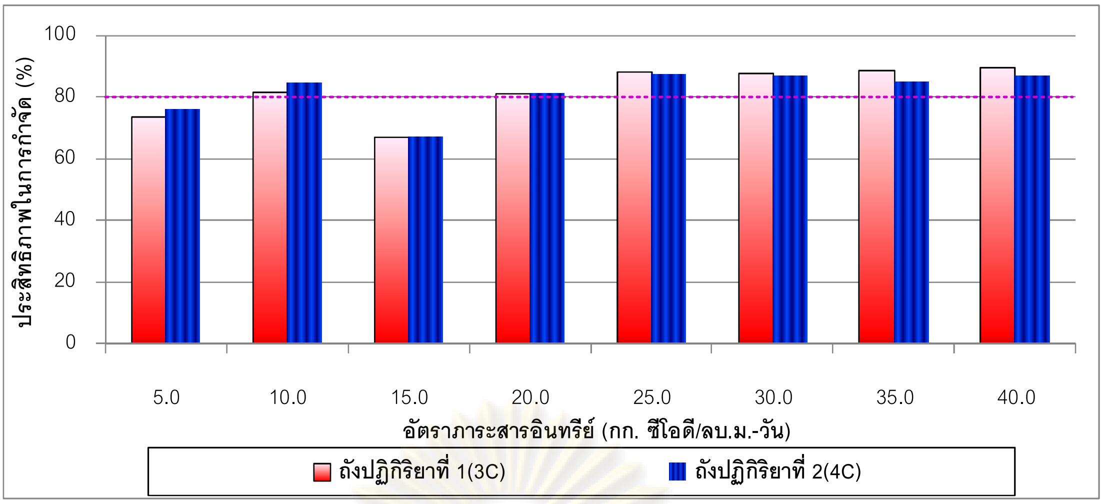
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในสภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)			
	น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)		น้ำออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	78.01-84.38	81.62±2.26	85.04-81.33	82.55±1.28
10.0	80.42-86.51	83.71±2.48	82.63-90.34	85.50±2.60
15.0	82.88-88.95	85.91±4.29	84.83-89.79	87.31±3.51
20.0	79.68-88.84	83.81±3.38	80.37-89.94	84.50±4.80
25.0	82.79-91.51	88.63±2.83	82.59-90.23	87.57±2.56
30.0	84.76-90.75	88.16±2.04	83.19-89.82	87.2±2.30
35.0	84.87-90.71	89.07±1.59	84.26-86.68	85.39±0.93
40.0	83.42-97.39	90.01±4.39	80.60-91.96	87.02±3.47

โดยจากรูปที่ 4.13 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ โดยเฉพาะในช่วงหลัง (อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่า 80% และถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) เล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

4.4.1.2 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเข้าระบบทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาของการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4,459±714, 6,775±885, 9,670±1,249, 12,683±998, 15,790±1,026, 18,009±919, 21,663±938 และ 25,873±1,553 มก./ล. ตามลำดับ ความเข้มข้นของค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ตลอดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.17

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบในการกักตะกอนเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป และค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบมีค่าสูงขึ้น ตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยในช่วงแรกของการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4,459±714 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,297±497 และ 1,242±474 มก./ล. ตามลำดับ และที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 10.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6,775±885 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,395±432 และ 1,396±423 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าที่ได้ทั้ง 2 ช่วงนี้พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกัน

ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,670±1,249 มก./ล. ส่วนในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังพบว่าในช่วงแรกนั้นมีค่า

ของแข็งแขวนลอยสูงขึ้นมากกว่าช่วงก่อนหน้านี้มาก โดยในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 5,586±1,290 และ 5,913±1,318 มก./ล. ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงนี้มีของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบสูงเกิดจากการที่มี Scum สะสมที่ผิวหน้าน้ำในถังปฏิกิริยาสูงและเกิดการจับตัวปกคลุมอย่างหนาแน่น และมีบางส่วนที่หลุดออกจากระบบทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยในช่วงนี้มีค่าเพิ่มขึ้นสูง เมื่อทำการแก้ไขระบบแล้วพบว่าค่าของแข็งแขวนลอยลดลงและค่อยข้างคงที่ในที่สุด

ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12,683±998 มก./ล. ส่วนในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง พบว่าในช่วงแรกค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นสูง จากการสังเกตุปรากฏว่า มีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกมาจากระบบ ซึ่งอาจเกิดจากก๊าซชีวภาพยกตัวดันตะกอนและดันตะกอนออกมากับน้ำที่ออกจากระบบ เพราะยังมีสารอินทรีย์ (ซีโอดี) เหลืออยู่สูงในช่วงปลายวัฏจักร หรือในน้ำทิ้งนั่นเอง โดยในช่วงนี้น้ำออกจากถังปฏิกิริยามีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย เท่ากลับ 5,100±1,173 มก./ล. และ 5,139±625 มก./ล. ตามลำดับ

ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15,790±1,026 มก./ล. ส่วนในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง พบว่ามีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย เท่ากลับ 5,444±1,372 มก./ล. และ 5,932±1,171 มก./ล. ตามลำดับ

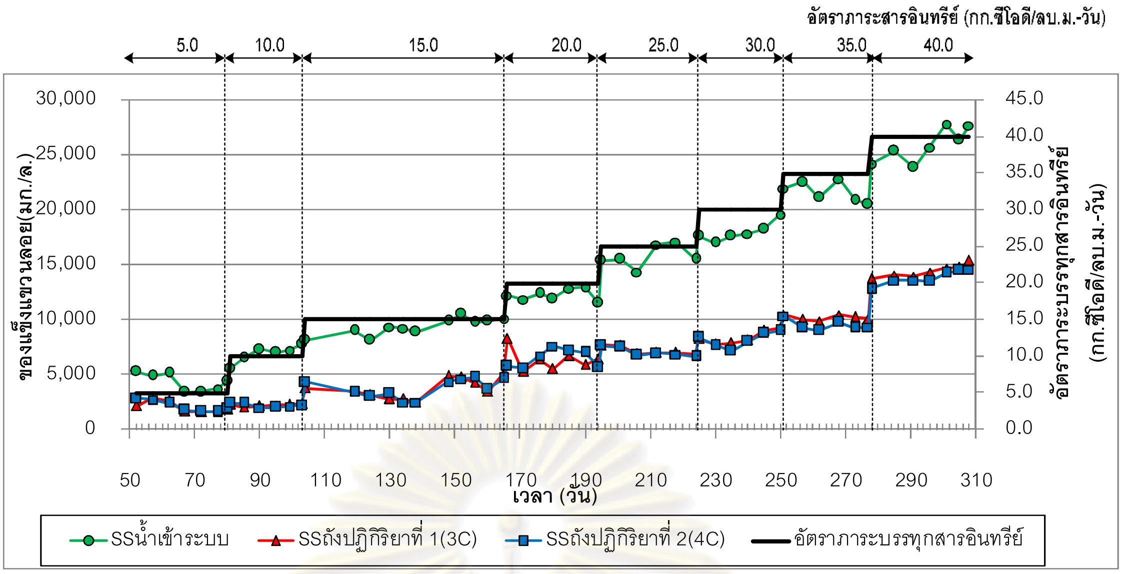
จะเห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นในช่วงหลังปริมาณของแข็งในน้ำจะเพิ่มขึ้นสูง นั่นก็เนื่องมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพออกมาอย่างต่อเนื่องและในปริมาณที่สูงทำให้ตะกอนลอยขึ้น และการตกตะกอนทำได้ยาก ส่งผลให้ตะกอนหลุดออกไปกับน้ำทิ้งออกจากระบบจำนวนมาก นอกจากนี้ยังเกิดจากการสะสมของกากตะกอนที่ยังไม่ถูกย่อยสลาย และตกอยู่ในระบบตั้งแต่เริ่มต้นระบบที่ไม่มีการระบายตะกอนก้นถังออก จึงส่งผลให้ถังปฏิกิริยามีตะกอนสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 ค่าของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดการทดลอง

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)					
	น้ำเข้าระบบ		น้ำออกถังปฏิกิริยา ที่ 1 (3C)		น้ำออกถังปฏิกิริยา ที่ 2(4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	5,240-3,380	4,459 ±714	793-2,098	1,297 ±497	777-2,066	1,242 ±474
10.0	5,560-7,740	6,775 ±885	985-1,961	1,395 ±432	818-1,934	1,396 ±423
15.0	8,120-12,280	9,670 ±1,249	3,670-7,290	5,586 ±1,290	3,792-7,998	5,913 ±1,318
20.0	11,440-14,520	12,683 ±998	3,793-6,824	5,100 ±1,173	4,118-6,154	5,139 ±625
25.0	14,340-17,100	15,790 ±1,026	4,104-7,972	5,444 ±1,372	4,463-7,859	5,932 ±1,171
30.0	17,140-19,600	18,009 ±919	6,378-10,370	8,800 ±1,539	6,752-10,306	9,129 ±1,364
35.0	20,540-22,860	21,663 ±938	8,694-13,308	11,246 ±1,1782	9,664-12,518	11,311 ±1,104
40.0	23,900-27,830	25,873 ±1,553	13,206-17,654	15,219 ±1,784	14,043-17,231	15,720 ±1,009

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

4.4.1.3 อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอย (VSS/SS)

อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอย เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำออกต่อปริมาณสารทั้งหมดในน้ำออก โดยแสดงดังตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าในช่วงวันที่ 52 ถึงวันที่ 103 ของการทดลอง (ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 5.0 – 10.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) อัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย ในน้ำออกจากถังปฏิกิริยามีค่าไม่สูงมากนัก แสดงว่าระบบสามารถตกตะกอนได้ดีพอสมควร ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ ส่วนในช่วงหลังๆของการทดลองประมาณวันที่104 ถึงวันที่ 304 ของการทดลอง (ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 15.0 – 40.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ระบบมีสัดส่วนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 15.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่พบว่ามีการเกิด scum และการหลุดออกของตะกอนเป็นจำนวนมาก พบว่าตลอดการทดลองอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอยของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอยู่ในช่วง 0.53-0.88 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.73±0.07 และ ช่วง 0.55-0.86 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.74±0.07 ตามลำดับ นั่นก็หมายความว่า ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบส่วนใหญ่เป็น

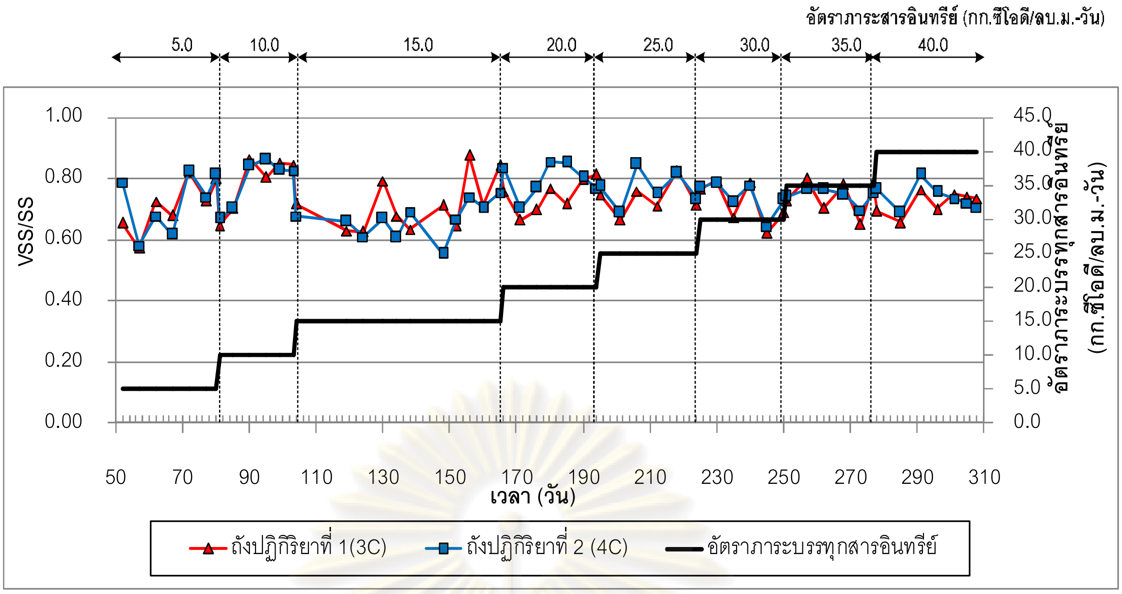
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารอินทรีย์ ซึ่งก็คือกากตะกอนส่วนหนึ่งที่ไม่ถูกย่อยสลายและตะกอนจุลินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบส่วนใหญ่จึงเป็นสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.18 อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอย			
	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)		ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	0.57-0.82	0.71±0.09	0.58-0.82	0.72±0.10
10.0	0.65-0.87	0.79±0.09	0.67-0.86	0.79±0.08
15.0	0.63-0.88	0.71±0.09	0.55-0.75	0.67±0.06
20.0	0.66-0.81	0.75±0.05	0.70-0.86	0.80±0.06
25.0	0.67-0.83	0.74±0.05	0.69-0.85	0.77±0.06
30.0	0.62-0.79	0.72±0.07	0.64-0.79	0.74±0.05
35.0	0.65-0.90	0.74±0.06	0.70-0.77	0.74±0.03
40.0	0.66-0.76	0.72±0.04	0.69-0.81	0.74±0.04

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 อัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายต่อของแข็งแขวนลอยในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

4.4.1.4 ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

จุลินทรีย์นั้นต้องการธาตุอาหารเพื่อไปใช้ในการสร้างเซลล์ โดยธาตุอาหารหลักประกอบด้วย คาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส แต่จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นเจริญเติบโตช้าจึงต้องการอาหารในการสร้างเซลล์ใหม่ในปริมาณที่น้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนเพราะอัตราการเจริญเติบโต (Yield) ต่ำกว่า โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นมีอัตราส่วนความต้องการซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD :N : P) เท่ากับ 150:1:0.2 (100:1.0:0.8) (Speech,1996) โดยถ้าหากในระบบมีปริมาณไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสไม่เพียงพอจะทำให้จุลินทรีย์ไม่ค่อยเจริญเติบโตซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ speece เพื่อให้มีธาตุอาหารต่างๆ เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ โดยค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส แสดงดังในตารางที่ 4.19 พบว่าน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นมีปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.19 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสของน้ำเข้าระบบ

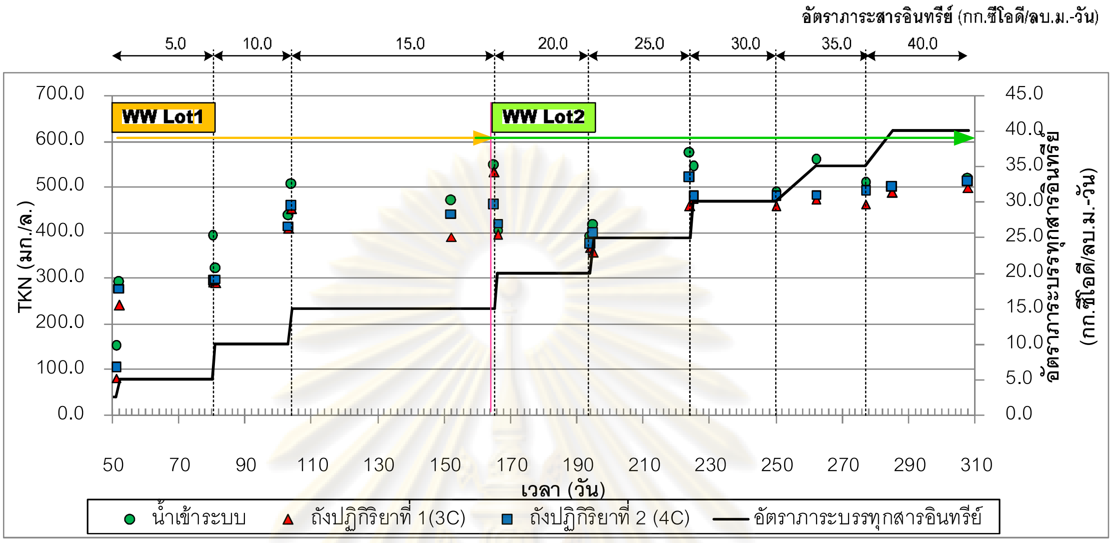
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	COD : N : P เข้าระบบ
5.0	100 : 5.9 : 0.9
10.0	100 : 3.9 : 0.7
15.0	100 : 3.4 : 0.6
20.0	100 : 2.0 : 0.4
25.0	100 : 2.0 : 0.3
30.0	100 : 1.7 : 0.2
35.0	100 : 1.5 : 0.2
40.0	100 : 1.3 : 0.2

ตารางที่ 4.20 ค่าไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) ในน้ำเข้าระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

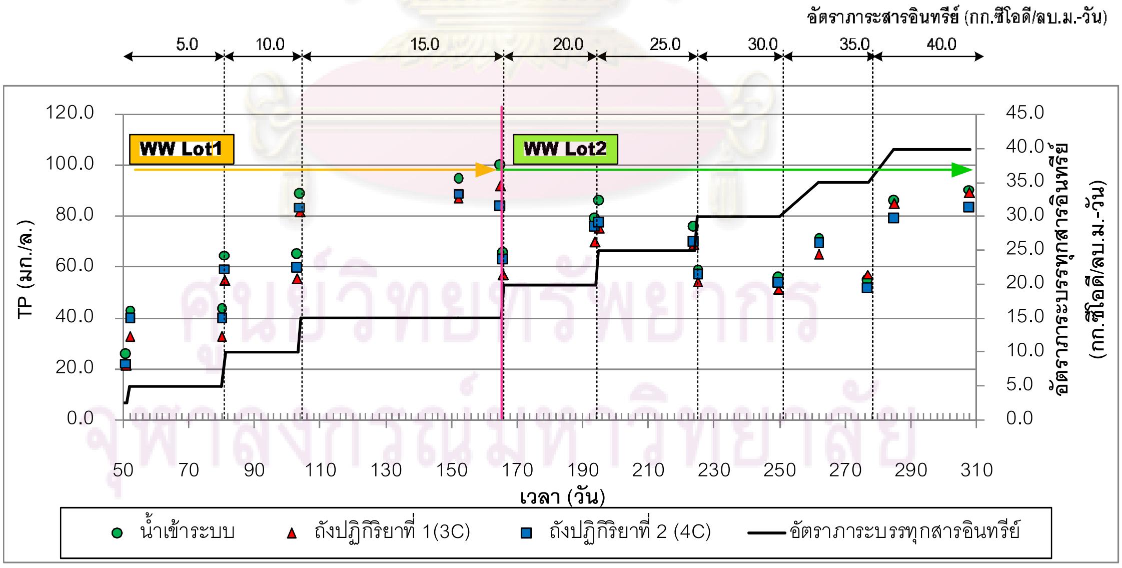
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ค่าไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.-ฟอสฟอรัส/ล.)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	291-391	341±71	43.20-43.40	43.30±0.14
10.0	319-436	377±82	64.80-65.10	64.95±0.21
15.0	469-547	506±39	89.00-100.00	94.60±5.50
20.0	393-405	399±8	65.55-79.05	72.30±9.55
25.0	415-574	494±112	76.00-86.00	81.00±7.07
30.0	486-543	514±40	55.95-59.40	57.68±2.44
35.0	508-558	533±36	55.05-70.90	62.98±11.21
40.0	500-518	509±12	86.20-90.80	88.50±3.25

จากตารางที่ 4.19 จะเห็นว่าในน้ำเข้าระบบซึ่งไม่มีการเติมสารอาหารเสริมมีความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเข้าส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยใช้น้ำเสียจริงปริมาณมาก ดังนั้นตลอดช่วงระยะเวลา 10 เดือนของ

การทดลอง จึงมีการนำน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นจำนวน 2 ครั้ง โดยแสดงดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 โดยน้ำเสียที่นำมาใช้ในครั้งแรกใช้ในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 165 ของการทดลอง น้ำเสียที่นำมาใช้ในครั้งที่สองสำหรับวันที่ 166 ของการทดลองจนสิ้นสุดการทดลอง โดยน้ำเสียที่นำมาแต่ละครั้งอาจมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.16 ค่าทีเคเอ็นในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ระหว่างการทดลองที่แต่ละอัตราภาระสารอินทรีย์ได้ทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกใช้ไปและที่เหลือออกมากับน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยา โดยผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกใช้ไปและที่เหลือแสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ถูกใช้ไปและที่เหลืออยู่ในน้ำออกที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

ถังปฏิกิริยา	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) (มก.-ไนโตรเจน/ล.)			ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.-ฟอสฟอรัส/ล.)		
		เข้าระบบ	ถูกใช้ไป	ที่เหลือ	เข้าระบบ	ถูกใช้ไป	ที่เหลือ
1 (3C)	5.0	341.13	76.13	265.00	43.30	10.65	32.65
2 (4C)			56.38	284.75		3.65	39.65
1 (3C)	10.0	377.38	28.93	348.45	64.95	9.95	55.00
2 (4C)			21.88	355.50		5.40	59.55
1 (3C)	15.0	506.33	48.75	457.58	94.60	7.47	87.13
2 (4C)			53.73	452.60		8.93	85.67
1 (3C)	20.0	399.13	19.44	379.69	72.30	8.85	63.45
2 (4C)			1.92	397.20		2.90	69.40
1 (3C)	25.0	494.25	87.90	406.35	81.00	8.95	72.05
2 (4C)			35.04	459.21		7.25	73.75
1 (3C)	30.0	514.38	49.38	465.00	57.68	4.72	52.95
2 (4C)			36.64	477.73		2.22	55.45
1 (3C)	35.0	532.88	66.38	466.50	62.98	1.75	61.23
2 (4C)			47.17	485.70		2.38	60.60
1 (3C)	40.0	508.75	16.77	491.98	88.50	1.30	87.20
2 (4C)			3.55	505.20		7.10	81.40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสของน้ำออกจากระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	COD : N : P น้ำออก	
	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	**ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)**
2.5	100 : 11.3 : 2.8	100 : 14.0 : 2.9
5.0	100 : 14.1 : 1.9	100 : 14.1 : 1.9
10.0	100 : 19.3 : 2.9	100 : 19.3 : 2.9
15.0	100 : 11.8 : 2.3	100 : 11.8 : 2.3
20.0	100 : 11.7 : 1.9	100 : 11.7 : 1.9
25.0	100 : 12.8 : 2.2	100 : 12.8 : 2.2
30.0	100 : 10.7 : 1.2	100 : 10.7 : 1.2
35.0	100 : 12.7 : 1.7	100 : 12.7 : 1.7
40.0	100 : 13.2 : 2.3	100 : 13.2 : 2.3

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนจากตารางที่ 4.22 แสดงค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสของน้ำออกจากระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่ามีอัตราส่วนมากกว่า 100:1.0:0.8 แสดงว่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในระบบมีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาควบคู่กับปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหลือในน้ำออกจากตารางที่ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ การถูกนำไปใช้ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำที่ออกจากระบบของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการย่อยสลายสสารอินทรีย์ที่เข้ามาภายในระบบในปริมาณที่มากขึ้น จึงมีความต้องการในการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของค่าไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัส ทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) ในน้ำออกจากระบบลดลงจากน้ำเสียเข้าระบบไม่มากนัก เนื่องจากค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) ไม่ได้ถูกบำบัดออกจากระบบแต่ปริมาณไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) บางส่วนที่หายไปถูกใช้เป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ในการสร้างเซลล์ใหม่ โดยในทางทฤษฎีแล้วการบำบัดไนโตรเจนไม่สามารถกระทำได้โดยกระบวนการไร้อากาศอย่างเดียวแต่ต้องใช้ควบคู่กับกระบวนการใช้อากาศหรืออื่นๆ ด้วย ส่วนค่าฟอสฟอรัส เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียเข้าระบบและออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังพบว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เช่นเดียวกัน เนื่องจากความต้องการฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้เป็นสารอาหารในการสร้างเซลล์ใหม่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

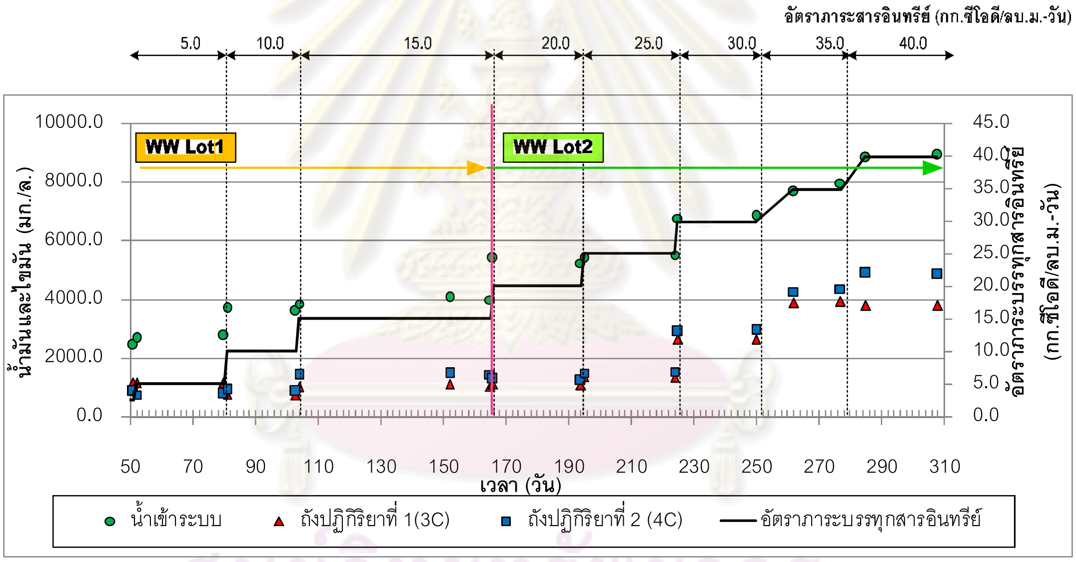
4.4.1.5 **น้ำมันและไขมัน**

น้ำมันและไขมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เป็นสารอาหารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากในโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีไขมันและน้ำมันปนเปื้อนในน้ำเสียนั้น จะมีปัญหาในเรื่องการหลุดออก(wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัด (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) จากลักษณะสมบัติของน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มพบว่ามีน้ำมันและไขมันในปริมาณสูง สำหรับปัญหาที่เกิดกับระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน คือ การดูดซับอนุภาคไขมันรอบๆ โดยชั้นไขมันของจุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์เกิดการลอยและหลุดออกจากระบบ

จากผลการทดลองของ Lalman และ David (2001) พบว่าไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเป็นสาเหตุสำคัญโดยมีผลทำให้เกิดการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากการย่อยสลายของไขมันและน้ำมันภายใต้สภาวะไร้อากาศทำให้เกิดกรดไขมันสายยาว (Long Chain Fatty Acids; LCFAs) ขึ้นซึ่งจะถูกย่อยสลายต่อไปช้า ๆ ภายใต้สภาวะไร้อากาศจึงมีผลให้เกิดกรดไขมันสะสมทำให้ค่าพีเอชลดลงจนเป็นสาเหตุให้ระบบล้มเหลวได้ นอกจากนี้น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถเคลือบบริเวณผิวของเซลล์จุลินทรีย์ทำให้ไม่สามารถสัมผัสกับสสารอาหารจนทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนสารอาหารขึ้นซึ่งมีผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์มีค่าลดลง นอกจากนี้ของแข็งแขวนลอยที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียยังเป็นสาเหตุของการเกิดฟองและชั้นตะกอนลอย (Scum layers) ขึ้นที่ผิวน้ำ (Halalsheh *et al*., 2005; Pagilla *et al*., 1997)

น้ำมันและไขมัน ของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.18 เนื่องจากมีการนำน้ำเสียมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นจำนวน 2 ครั้งดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้ลักษณะสมบัติของน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกันเล็กน้อย จากตารางที่ 4.23 พบว่า ค่าไขมันและน้ำมันในน้ำเสียเข้าระบบมีค่าค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น พบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0 - 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันในน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีค่าน้ำมันและไขมันเฉลี่ยเท่ากับ 1,060±215 มก./ล. ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีค่าน้ำมันและไขมันเฉลี่ยเท่ากับ 1,162±339 มก./ล.

แต่เมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ขึ้น พบว่าค่าความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันในน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าสูงขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นไปด้วย โดยในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีค่าน้ำมันและไขมันเฉลี่ยเท่ากับ 4,030±1,007 มก./ล. ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีค่าน้ำมันและไขมันเฉลี่ยเท่ากับ 3,428±698 มก./ล. จากการสังเกตุพบว่าเมื่อเดินระบบไปช่วงหนึ่ง (ประมาณวันที่ 120 ของการทดลอง) พบว่ามีการจับตัว Scum คล้ายฟองซึ่งน่าจะเกิดจากน้ำมันและไขมัน (อ้างตาม Halalsheh *et al*., 2005; Pagilla *et al*., 1997) สะสมอยู่ด้านบนและจับตัวอยู่กับผนังถังและท่อน้ำเข้าของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังเป็นจำนวนมาก ทำให้เสียปริมาตรของถังปฏิกิริยาในการบำบัดและน้ำไม่สามารถเข้าระบบได้ทำให้ต้องเปิดถังเพื่อกำจัด Scum ที่ผิวหน้าน้ำในถังปฏิกิริยาออก หลังจากนั้นทำการทดลองต่อไปตามปรกติ ซึ่งแม้ยังเกิด Scum ในถังปฏิกิริยาเมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ แต่ระบบยังมีประสิทธิภาพดีพอสมควรจึงเดินระบบต่อไปจนจบการทดลอง



รูปที่ 4.18 ค่าน้ำมันและไขมันในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.23 ค่าน้ำมันและไขมันในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ค่าน้ำมันและไขมัน (มก./ล.)					
	น้ำเข้า		ถังปฏิกิริยา 1 (3C)		ถังปฏิกิริยา 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	2,675-2,751	2,713 ±54	1,122-1,149	1,135 ±19	735-752	744 ±13
10.0	3,584-3,688	3,636 ±73	713-741	727 ±20	841-902	871 ±43
15.0	3,849-4,062	3,965 ±108	1,009-1,099	1,044 ±48	1,406-1,454	1,433 ±25
20.0	5,245-5,409	5,327 ±116	1,057-1,092	1,075 ±25	1,237-1,277	1,257 ±29
25.0	5,393-5,527	5,460 ±94	1,304-1,335	1,319 ±22	1,487-1,521	1,504 ±24
30.0	6,772-6,854	6,813 ±58	2,883-2,936	2,910 ±38	2,616-2,,631	2,624 ±11
35.0	7,683-7,985	7,834 ±214	4,275-4,360	4,317 ±60	3,859-3,908	3,884 ±35
40.0	8,838-8,952	8,895 ±80	4,834-4,890	4,862 ±40	3,770-3,781	3,776 ±8

ค่าเฉลี่ยผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.24 พบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันค่อนข้างสูง โดยถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันเท่ากับ ร้อยละ 80.01 และ 76.05 เมื่อทำการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เป็น 15 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเล็กน้อย เท่ากับ 73.69 และ

63.85 ตามลำดับ เนื่องจากเกิด Scum จากการสะสมของน้ำมันและไขมันในระบบ แต่ยังอยู่ในค่าที่ระบบยังสามารถรองรับได้ และเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เป็น 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เท่ากับ 79.83 และ 76.41 ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ไปเรื่อยๆ เป็น 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันจะลดต่ำลง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันสูงสุดของถังปฏิกิริถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) คือที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ส่วนถังปฏิกิริถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) คือที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าเฉลี่ยผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าสามารถแบ่งตามความสามารถของถังปฏิกิริยาแต่ละชนิดตามประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

- <u>ช่วงที่ 1</u> ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ในช่วงนี้ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังยังมีค่าต่ำอยู่บ้างเนื่องจากเป็นช่วงปรับตัว

- <u>ช่วงที่</u> 2 ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ในช่วงนี้ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าสูงมากกว่าช่วงที่ 1

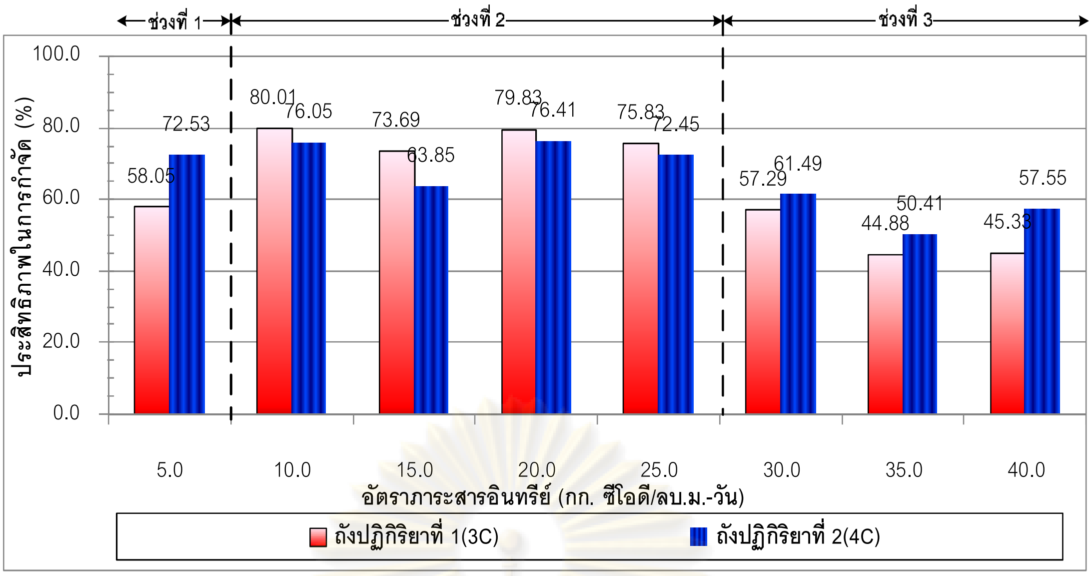
- <u>ช่วงที่ 3</u> ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน วัน โดยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ในช่วงนี้ของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าน้อยที่สุด

จากการแบ่งช่วงทั้ง 3 ช่วง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจสรุปได้ว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่ากลางๆ ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่าต่ำและค่าสูง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่าต่ำ (5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ถังปฏิกิริยาที่มีการแบ่งห้องเป็น 4 ห้อง จะสามารถกักเก็บน้ำที่มีองค์ประกอบของน้ำมันและไขมัน ได้นานกว่า จึงสามารถย่อยสลายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของน้ำมันและไขมันได้ ดีกว่า ถังปฏิกิริยาที่มีการแบ่งห้องน้อยกว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่ากลางๆ (10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ในช่วงนี้ถังปฏิกิริยาที่มีจำนวนห้อง 4 ห้อง เกิดการอุดตันเนื่องจากการสะสมตัวของ scum น้ำมันด้านบนผิวน้ำในถังปฏิกิริยาและเมื่อมีการเดินระบบอย่างต่อเนื่องต่อไประยะหนึ่งก็เกิดการหลุดออกของก้อน Scum น้ำมัน ทำให้ค่าน้ำมันและไขมันของถังปฏิกิริยาที่2 (4C) สูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) ที่สามารถกักเก็บและ

ย่อยสลายน้ำเสียได้ที่สภาวะที่เหมาะสมพอดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boopathy และ Sievers, 1991 ที่ได้พัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ ทำให้ห้องแรกมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกอนมาก และสุดท้ายที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันต่ำลงทั้งคู่ แต่อย่างไรก็ตาม ถังปฏิกิริยาที่มีจำนวนห้องมากกว่ายังมีประสิทธิภาพดีกว่าถังปฏิกิริยาที่มีจำนวนห้องน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่มีจำนวนห้องมากกว่าเป็นเพิ่มเวลาในการกักเก็บของแข็งซึ่งนอกจากของแข็งในระบบแล้วยังรวมถึง Scum ของน้ำมันและไขมันในน้ำเสียด้วยซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Fannin และคณะ, 1981 ที่ได้พัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ เพิ่มแผ่นกั้นในแนวตั้งเพื่อให้การไหลเป็นแบบระบบไหลตามยาวเพื่อเพิ่มเวลาในการกักเก็บของแข็งเพื่อให้สารอาหารเข้าถึงแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนได้ดีขึ้น

จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบบำบัดทางชีวภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากน้ำมันและไขมันเป็นสารอินทรีย์ที่มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายยาวนานกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น อีกทั้งหากปริมาณที่สูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในระบบได้ เนื่องจากน้ำมันและไขมันจะลดอัตราการถ่ายเทมลสารสู่เซลล์และเป็นสาเหตุของตะกอนลอยอืดและทำให้ไขมันอุดตันในระบบอีกด้วย แต่เมื่อน้ำมันและไขมันเข้าสู่ระบบในปริมาณต่ำ เช่น ในกรณีอัตราภาระสารอินทรีย์ต่ำ จุลินทรีย์ยังคงสามารถย่อยสลายได้โดยไม่ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต และเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันในระดับที่จุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในระบบให้สูงไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงจนถึงระดับหนึ่ง จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายน้ำมันและไขมันได้ และเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในระบบลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน (%)	
	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)
2.5	54.23	64.34
5.0	58.05	72.53
10.0	80.01	76.05
15.0	73.69	63.85
20.0	79.83	76.41
25.0	75.83	72.45
30.0	57.29	61.49
35.0	44.88	50.41
40.0	45.33	57.55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

4.4.2.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

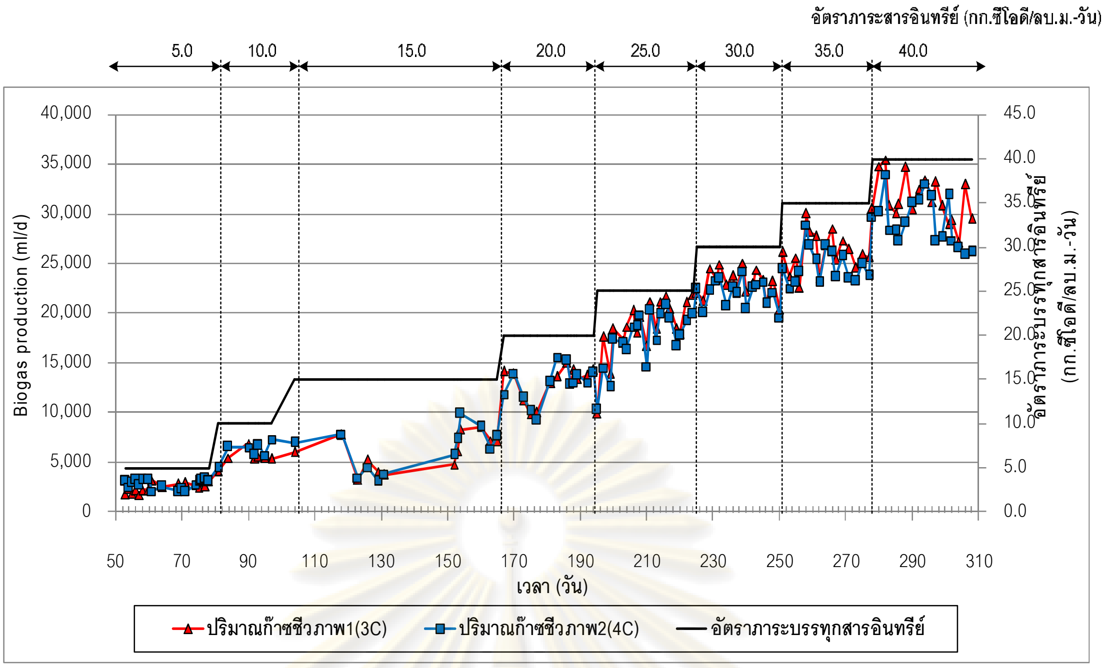
ในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ทำได้โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ซึ่งทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวันแสดงดังในรูปที่ 4.20 และตาราง 4.25 แสดงอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของถังปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์ของระบบสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ แล้วเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ พบว่าในช่วงแรกที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0 และ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าไม่มากนัก เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องปรับตัวให้เข้ากับน้ำเสียและสภาพแวดล้อมในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากรดไขมันระเหยง่ายของระบบ ซึ่งในช่วงแรกนั้น (ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) พบว่าค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบ หลังจากนั้นพบว่าการกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายมีแนวโน้มสูงขึ้นแม้เพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ก็ตาม แสดงให้เห็นว่าตะกอนจุลินทรีย์ปรับตัวเข้ากับน้ำเสียได้ดี ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์ของระบบสูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.25 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)					
	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)			ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)		
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ปริมาตรรวม	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ปริมาตรรวม
5.0	1,688-3,173	2,443 ±463	41,533	2,040 - 3,380	2,799 ±460	47,581
10.0	5,344-6,880	5,677 ±593	79,677	5,700 - 7,324	6,437 ±613	90,665
15.0	3,252-8579	6,008 ±1,813	151,772	3,132 - 9,890	6,274 ±2,173	165,954
20.0	9,850 - 15,060	13,049 ±1,637	321,413	9,270 - 15,600	12,888 ±1,819	333,503
25.0	9,935-21,840	18,573 ±2,893	674,302	10,324 - 20,815	17,453 ±2,801	665,117
30.0	20,382-25,063	22,981 ±1,400	1,042,000	19,563 - 24,254	22,076 ±1,342	1,018,337
35.0	22,565-30,029	26,152 ±1,977	1,460,433	22,532 - 28,931	24,793 ±1,760	1,415,022
40.0	27,110 - 35,470	31,527 ±2,247	2,027,925	25,953 - 33,995	29,303 ±2,465	1,942,467

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

4.4.2.2 การเปรียบเทียบอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจริงกับอัตราการเกิดก๊าซทางทฤษฎี

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงกับที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี โดยเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาตลอดระยะการทดลองซึ่งสามารถคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการกับสูตรทางทฤษฎีได้โดย

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทน}\left(\frac{\text{มล.ของก๊าซมีเทน}}{\text{ก.ซีโอดีที่ถูกบำบัด}}\right) = \frac{\text{การผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด(มล./วัน)x ร้อยละมีเทนx10}}{\text{ซีโอดี}_{\text{เข้า}}\text{-ซีโอดี}_{\text{ออก}}\text{(มล./ล.)xอัตราการไหล(ล./วัน)}}$$

สำหรับร้อยละของก๊าซมีเทนที่ใช้ในการคำนวณ มีค่าเท่ากันทุกช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์ก๊าซมีเทนได้ครบทุกช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ จึงนำค่าเฉลี่ยของก๊าซมีเทนในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะปกติ (ร้อยละ 50) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งสมมติให้เป็นค่าคงที่ของการทดลองนี้ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี และปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงที่แต่ละค่าของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ยต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4.26

เนื่องจากการกำจัดซีโอดีของระบบไร้อากาศทำให้เกิดก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากระบบ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีโอดีที่ระบบกำจัดได้ ดังนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ตรวจสอบสภาพการทำงานของระบบได้ซึ่งจากรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 พบว่าทุกครั้งที่ทำการเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงและที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงกับที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี

จากตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.21 พบว่า ในถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงยังมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีในช่วงแรก ดังนี้ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 3,697 ±430 มก./วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 2,443 ±463 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 2,847 ±331 มล./วัน)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 8,073 ±644 มก./วัน ได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 5,677 ±593 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 6,216 ±496 มล./วัน)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 10,168 ±2,541 มก./วัน ได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 6,008 ±1,813 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีมากซึ่งเท่ากับ 7,830 ±1,956 มล./วัน) ซึ่งในช่วงนี้พบว่าเกิด scum สะสมปริมาณมากทำให้เดินระบบต่อไปไม่ได้จึงต้องทำการเปิดฝาถังปฏิกิริยาออกเพื่อทำการแก้ไข ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงกับปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีจึงลดลงจากเดิมมากกว่าช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ก่อนหน้านี้มาก หลังจากนั้นทำการเดินระบบต่อไปพบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และยังมีค่ามากกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามทฤษฎีด้วย ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 16,417 ±803 มก./วัน ส่วนค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 13,049 ±1,637 มล./วัน (มากกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 12,641 ±803 มล./วัน) ซึ่งปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ก่อนหน้านี้ มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเนื่องจากในช่วงก่อนหน้านี้ มีก๊าซออกซิเจนเข้าไปในถังปฏิกิริยาในขณะที่ทำการเปิดฝาถัง จึงถูกนำไปใช้แล้วเปลี่ยนเป็น

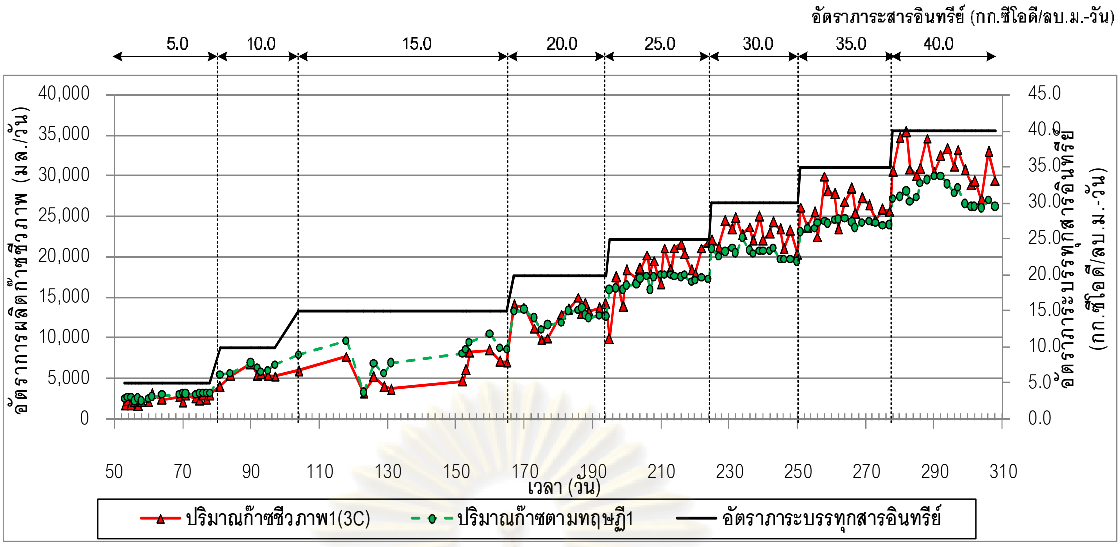
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้ก่อนปฏิกิริยาการสร้างก๊าซชีวภาพที่มีจุลินทรีย์ไร้อากาศเป็นตัวทำงาน เนื่องจากการใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็คตรอนจุลชีพจะได้รับพลังงานมากสุดซึ่งส่งผลถึงปริมาณเนื้อเซลล์จุลชีพที่จะเกิดขึ้นด้วย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542)

โดยปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นต่อจากนี้ยังมีแนวโน้มเช่นเดียวกันจนจบการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) กับค่าทางทฤษฎี

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	**ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มก./วัน)**	**ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ควรเกิดตามทฤษฎี (มล./วัน)**	**ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง (มล./วัน)**	**สัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มล. ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด**
5.0	3,697 ±430	2,854 ±332	2,443 ±463	0.661
10.0	8,073 ±644	6,232 ±497	5,677 ±593	0.703
15.0	10,168 ±2,541	7.850 ±1,961	6,008 ±1,813	0.591
20.0	16,417 ±803	12,674 ±805	13,049 ±1,637	0.795
25.0	22,064 ±856	17,033 ±661	18,573 ±2,893	0.842
30.0	26,539 ±950	20,488 ±733	22,981 ±1,400	0.866
35.0	31,095 ±597	24,005 ±461	26,152 ±1,977	0.841
40.0	35,775 ±1,720	27,618 ±1,328	31,527 ±2,247	0.881

หมายเหตุ : *ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีได้จากสมมติฐาน คือ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 777.20 มิลลิลิตร ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.77 มิลลิลิตรต่อ 1 มิลลิกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด การคำนวณและที่มาแสดงในภาคผนวก) โดยมีสมมติฐานว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทน 50%



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) กับค่าทางทฤษฎี

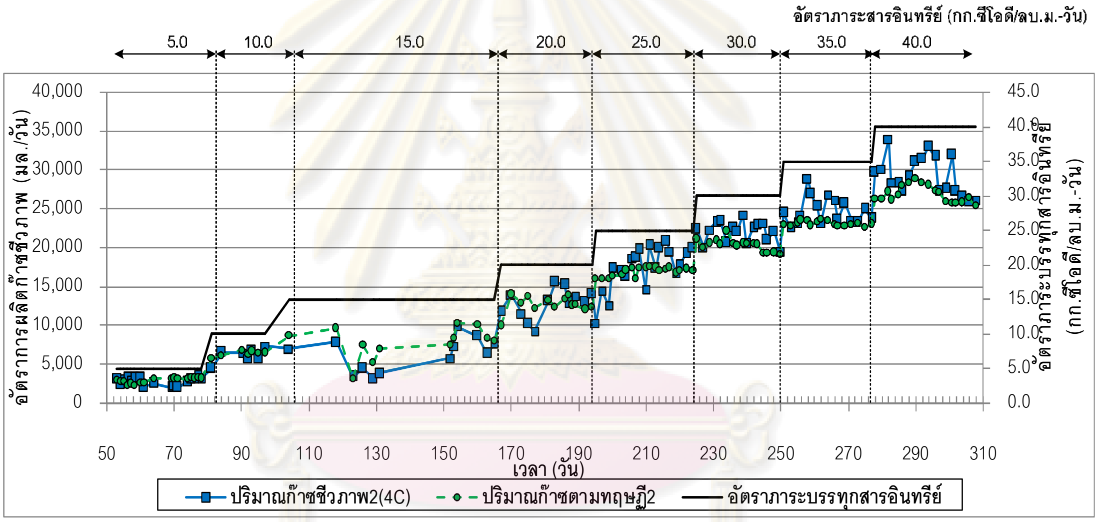
จากตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.22 พบว่า ในถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) ลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพและค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) โดยมีความแตกต่างบ้างเล็กน้อย คือ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรก ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีเล็กน้อย ดังนี้ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 3,790 ±444 มก./วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 2,799±460 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีเล็กน้อยซึ่งเท่ากับ 2,919 ±342 มล./วัน)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 8,358 ±307 มก./วัน ได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 6,437 ±613 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีเล็กน้อยซึ่งเท่ากับ 6,452 ±237 มล./วัน)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 10,059 ±2,629 มก./วัน ได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 6,274 ±2,173 มล./วัน (น้อยกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีมากซึ่งเท่ากับ 7,765 ±2,029 มล./วัน) พบว่าระบบเกิดปัญหาเช่นเดียวกับถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) ซึ่งในช่วงนี้พบว่าเกิด Scum สะสมปริมาณมากทำให้เดินระบบต่อไปไม่ได้จึงต้องทำการเปิดฝาถังปฏิกิริยาออกเพื่อทำการแก้ไข ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงกับปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีจึงลดลงจากเดิมมากกว่าช่วงอัตราภาระบรรทุก

สารอินทรีย์ก่อนหน้านี้มาก หลังจากนั้นทำการเดินระบบต่อไป พบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และยังมีค่ามากกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามทฤษฎีด้วย ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ 16,439 ±1,353 มก./วัน ส่วนค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 12,888 ±1,819 มล./วัน (มากกว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตามทฤษฎีซึ่ง เท่ากับ 12,691 ±1,045 มล./วัน) ซึ่งปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ก่อนหน้านี้ มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (จากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C))

โดยปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจริงที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นต่อจากนี้ยังมีแนวโน้มเช่นเดียวกันจนจบการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.27



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆของถังปฏิกิริยาที่ 2 กับค่าทางทฤษฎี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27 พบว่าสัดส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ ในช่วงแรกมีค่าต่ำกว่า ค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.772 มล./ 1 มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) คือ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0 และ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดย ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 0.661, 0.703 และ 0.591 มล. ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 0.738, 0.770 และ 0.624 มล.ก๊าซชีวภาพ/

มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าสัดส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ มากกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

ตารางที่ 4.27 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆของถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) กับค่าทางทฤษฎี

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มก./วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ควรเกิดตามทฤษฎี (มล./วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง (มล./วัน)	สัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ (มล. ก๊าซชีวภาพต่อมก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด
5.0	3,790 ±444	2,926 ±342	2,799±460	0.738
10.0	8,358 ±307	6,452 ±237	6,437 ±613	0.770
15.0	10,059 ±2,629	7,765 ±2,029	6,274 ±2,173	0.624
20.0	16,439 ±1,353	12,691 ±1,045	12,888 ±1,819	0.784
25.0	21,811 ±761	16,838 ±587	17,453 ±2,801	0.800
30.0	26,246 ±1,019	20,262 ±787	22,076 ±1,342	0.841
35.0	29,813 ±423	23,015 ±327	24,793 ±1,760	0.832
40.0	34,706 ±1,394	26,793 ±1,076	29,303 ±2,465	0.844

หมายเหตุ : *ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีได้จากสมมติฐาน คือ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 777.20 มิลลิลิตร ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.77 มิลลิลิตรต่อ 1 มิลลิกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด การคำนวณและที่มาแสดงในภาคผนวก) โดยมีสมมติฐานว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทน 50%

โดย ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 0.795, 0.842, 0.866, 0.841 และ 0.881 มล. ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วน ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ย

ที่กำจัดได้เท่ากับ 0.784, 0.800, 0.841, 0.832 และ0.844 มล. ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.772 มล./ 1 มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด) เนื่องจากสาเหตุที่มีการเปิดฝาถังปฏิกิริยาในช่วงวันที่ 104 – 165 ของการทดลอง ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อพิจารณา คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ด้วยสัดส่วนของก๊าซมีเทนซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ โดยก๊าซชีวภาพที่มีเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนมากเป็นก๊าซที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ สำหรับระบบไร้อากาศ อัตราการสร้างก๊าซมีเทนเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากต่อการบ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของระบบ ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	**ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ**	
	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	**ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)**
5.0	44.73	45.93
10.0	49.37	51.11
15.0	40.68	40.54
20.0	49.13	49.18
25.0	63.46	62.83
30.0	63.18	62.60
35.0	63.73	61.51
40.0	64.30	62.49
ค่าเฉลี่ย	**54.82**	**54.52**

จากตารางที่ 4.28 พบว่าช่วงที่อัตราภาระสารอินทรีย์แรก ๆ นั้น (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าหรือใกล้เคียงร้อยละ 50 และเมื่อเดินระบบไปประยะหนึ่ง (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เป็นต้นไป) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากขึ้น โดยมีค่ามากกว่า ร้อยละ 50 แสดงให้เห็นได้ว่าระบบมีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น ซึ่งสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับสมมติฐานข้างต้นที่ใช้ในการคำนวณที่กำหนดให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 โดยเมื่อพิจารณาร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังแล้ว พบว่าในช่วงแรกนั้น (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0 และ 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) เล็กน้อย ส่วนในช่วงหลังนั้น (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เป็นต้นไป) ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) แต่เมื่อดูภาพรวมร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังตลอดการทดลองแล้ว พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าเฉลี่ยร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) และที่ 2 (4C) เท่ากับ 54.82 และ 54.52 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.29 สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง (ล./วัน)	ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่กำจัดได้ (ล. ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่กำจัดได้ (ล. ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)
5.0	2.44	44.73	0.661	0.330
10.0	5.68	49.37	0.703	0.352
15.0	6.01	40.68	0.591	0.295
20.0	13.05	49.13	0.795	0.397
25.0	18.57	63.46	0.842	0.421
30.0	22.98	63.18	0.866	0.433
35.0	26.15	63.73	0.841	0.421
40.0	31.53	64.30	0.881	0.441

หมายเหตุ : *ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีได้จากสมมติฐาน คือ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 777.20 มิลลิลิตร ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.77 มิลลิลิตรต่อ 1 มิลลิกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด การคำนวณและที่มาแสดงในภาคผนวก) โดยมีสมมติฐานว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทน 50%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

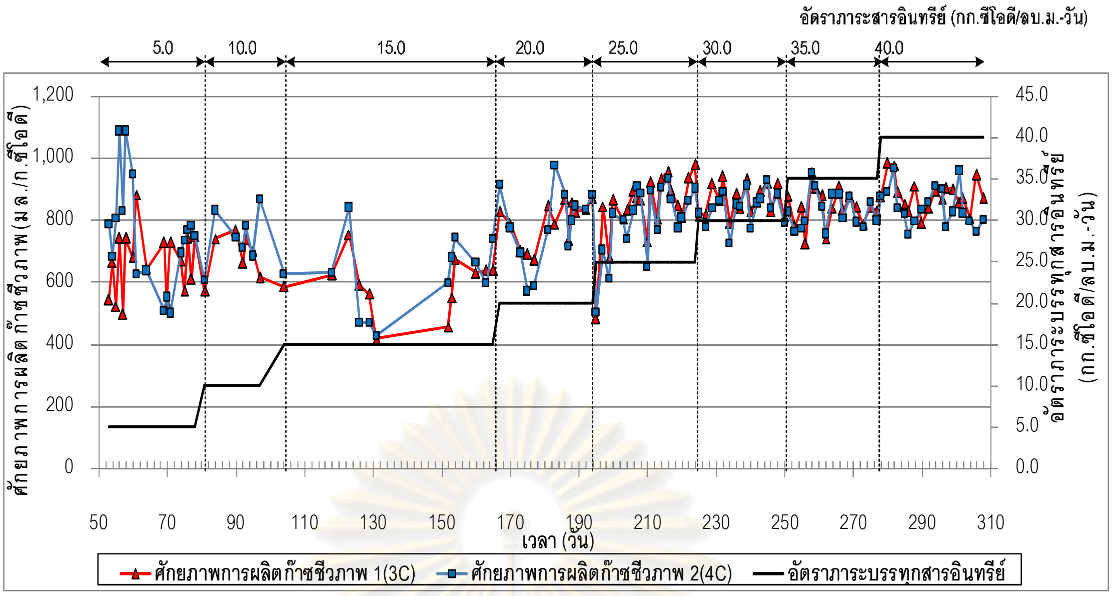
ตารางที่ 4.30 สรุปค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริง (ล./วัน)	ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่กำจัดได้ (ล. ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่กำจัดได้ (ล. ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)
5.0	2.80	45.93	0.738	0.369
10.0	6.44	51.11	0.770	0.385
15.0	6.28	40.54	0.624	0.312
20.0	12.89	49.18	0.784	0.392
25.0	17.45	62.83	0.800	0.400
30.0	22.08	62.60	0.841	0.421
35.0	24.79	61.51	0.832	0.416
40.0	29.30	62.49	0.844	0.422

หมายเหตุ : *ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีได้จากสมมติฐาน คือ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 777.20 มิลลิลิตร ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (เกิดก๊าซชีวภาพ 0.77 มิลลิลิตรต่อ 1 มิลลิกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด การคำนวณและที่มาแสดงในภาคผนวก) โดยมีสมมติฐานว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทน 50%

4.4.2.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Yield)

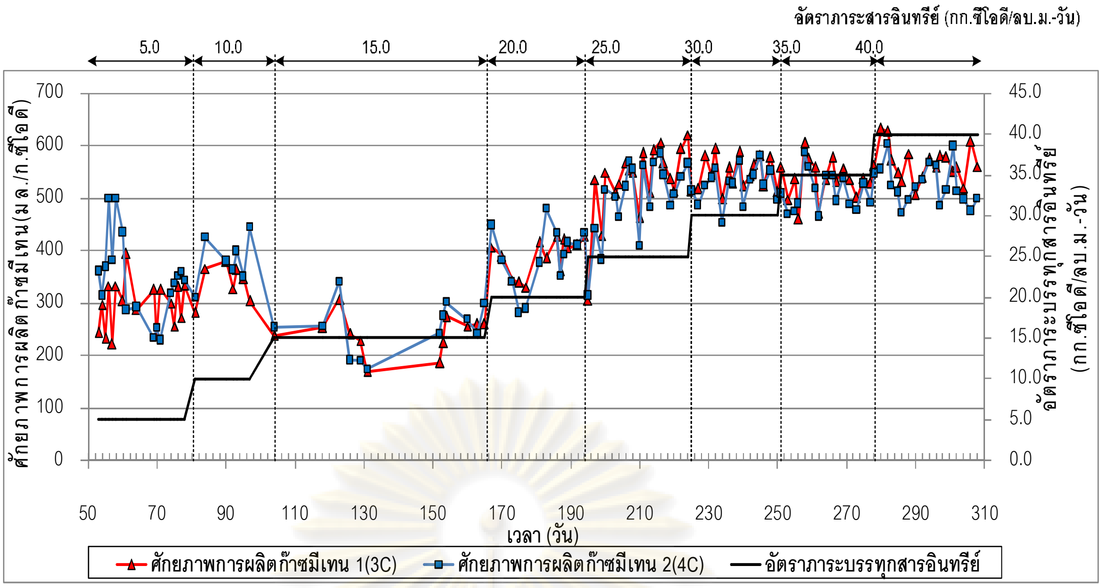
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวันเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบต่อวัน สามารถคำนวณและรายงานได้ในรูปของศักยภาพการการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Yield) แสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งพบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 661.49, 685.25, 593.04, 793.06, 839.57, 866.28, 841.03 และ 881.56 มล.-ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดี ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) เท่ากับ 751.54, 747.06, 623.24, 788.07, 798.37, 841.90, 831.67 และ 844.32 มล.-ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดี ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4.2.4 **ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน** (Methane Gas Yield)

เมื่อพิจารณาถึงศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบร่วมกับสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ(ตารางที่ 4.28) สามารถรายงานได้ในรูป ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Gas Yield) ของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งพบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เฉลี่ยเท่ากับ 295.86, 338.29, 241.27, 389.64, 532.83, 547.35, 535.98 และ 566.83 มล.-ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดี ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) เท่ากับ 345.16, 381.81, 252.65, 387.57, 501.59, 527.00, 511.58, และ 527.64 มล.-ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดี ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดสำหรับถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) คือที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



รูปที่ 4.24 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4.2.5 การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

จากผลการทดลองพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Gas Yield) ของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ ของถังปฏิกิริยาที่ 1 ที่มีการกั้นห้องแบบ 3 ห้องมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.441 ล. ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2 ที่มีการกั้นห้องแบบ 4 ห้อง มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่ำกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1 โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.422 ล. ก๊าซมีเทน/ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด เมื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากงานวิจัยอื่นๆ พบว่าค่าที่ได้จากกงานวิจัยนี้มีค่าสูงที่สุด โดยพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Faisal and Unno, 2001 ที่ได้ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ด้วยถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศ แบบปรับปรุง (MABR; Modified Anaerobic Baffled Bioreactor) โดยได้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 0.42 ซึ่งการเปรียบเทียบผลการศึกษาของการใช้ถังปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แสดงดังในตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 การเปรียบเทียบผลการศึกษาของการใช้ถังปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ชนิดถังปฏิกิริยา	การกักเก็บทางชลศาสตร์ (วัน)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	Methane Yield (l CH_4/g $COD_{removed}$)	COD removal efficiency (%)	อ้างอิง
Anaerobic Pond	40	1.4	0.109	97.8	Yacob et al.,2006a
Anaerobic Digester	20	2.16	0.247	80.7	Yacob et al.,2005
Anaerobic Filtration	115	4.5	0.39	94.0	Borja and Banks, 1994b
Fluidized Bed	0.25	40	N/A	78.0	Borja and Banks, 1995
UASB	4	10.63	0.33	98.4	Borja and Banks, 1994c
UASFF	3	11.58	0.346	97.0	Najapour et al., 2006
CSTR	18	3.33	0.3	80.0	Tong and Jaafar, 2006
Modified Anaerobic Baffled Bioreactor	8	3.44	0.42	95.0	Faisal and Unno, 2001
Anaerobic Baffled Reactor	1	40.0	0.44	90.0	This Study

N/A : DATA unvaliable.

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.3 สภาวะแวดล้อมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

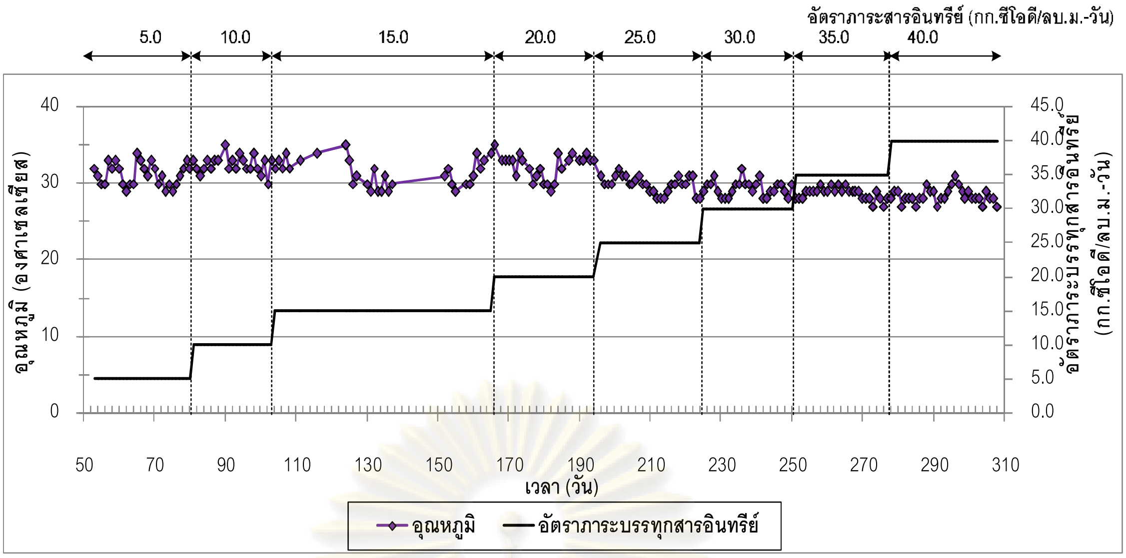
4.4.3.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการทำงานและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ในการทดลองครั้งนี้ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน. ตามลำดับ จากการวัดอุณหภูมิห้อง ณ จุดที่ตั้งระบบ พบว่า อุณหภูมิตลอดการทดลองจะอยู่ในช่วง 27.0-35.0 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองประมาณ 30.4 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจัดอยู่ในช่วงการทำงานแบบมีโซฟิลิค เมื่อดูในภาพรวมแล้วพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิสูงกว่าช่วงหลังเล็กน้อย โดยช่วงอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 4.32 อุณหภูมิที่วัดได้แสดงดังในรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.32 อุณหภูมิในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	29.0-34.0	31.2±1.4
10.0	31.0-35.0	32.6±1.0
15.0	29.0-35.0	31.6±1.7
20.0	29.0-35.0	32.3±1.6
25.0	28.2-35.0	29.9±1.1
30.0	28.0-32.0	29.4±1.1
35.0	27.0-30.0	28.7±0.8
40.0	27.0-31.0	28.4±1.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 อุณหภูมิในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

4.4.3.2 พีเอช

เนื่องจากน้ำเสียน้ำมันปาล์มมีค่าพีเอชประมาณ 4-5 ซึ่งไม่เหมาะต่อการเดินระบบ จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบ โดยเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน. ตามลำดับ ได้ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบให้มีค่าประมาณ 6.9-7.2 โดยการเติม $NaHCO_3$ ซึ่งค่าพีเอชน้ำเสียก่อนเข้าระบบตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 6.60-7.70 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.19±0.24 ส่วนน้ำเสียหลังผ่านระบบตลอดการทดลองของถังปฏิกิริยาที่ 1 แบบ 3 ห้อง อยู่ในช่วง 6.90-8.40 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.72±0.25 และถังปฏิกิริยาที่ 2 แบบ 4 ห้อง อยู่ในช่วง 7.00-8.40 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.77 ±0.25 แสดงช่วงและค่าเฉลี่ยของค่าพีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.33 ค่าพีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	พีเอช					
	น้ำเข้าระบบ		น้ำออก			
			ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)		ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	6.60-7.70	7.23 ±0.28	6.90-8.40	7.79 ±0.38	7.00-8.40	7.78 ±0.36
10.0	7.20-7.60	7.41 ±0.16	7.40-8.00	7.66 ±0.17	7.60-8.00	7.79 ±0.14
15.0	7.00-7.70	7.37 ±0.15	6.90-8.30	7.77 ±0.27	7.00-8.20	7.80 ±0.27
20.0	7.00-7.60	7.36 ±0.16	7.40-8.40	7.95 ±0.29	7.20-8.40	8.08 ±0.29
25.0	6.80-7.60	7.14 ±0.21	7.40-8.00	7.64 ±0.14	7.40-8.00	7.70 ±0.16
30.0	6.80-7.30	7.09 ±0.15	7.40-8.20	7.70 ±0.19	7.40-7.90	7.65 ±0.16
35.0	6.80-7.20	6.96 ±0.09	7.40-7.80	7.61 ±0.14	7.40-8.00	7.72 ±0.14
40.0	6.80-7.20	6.96 ±0.11	7.40-8.00	7.61 ±0.16	7.40-7.80	7.64 ±0.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

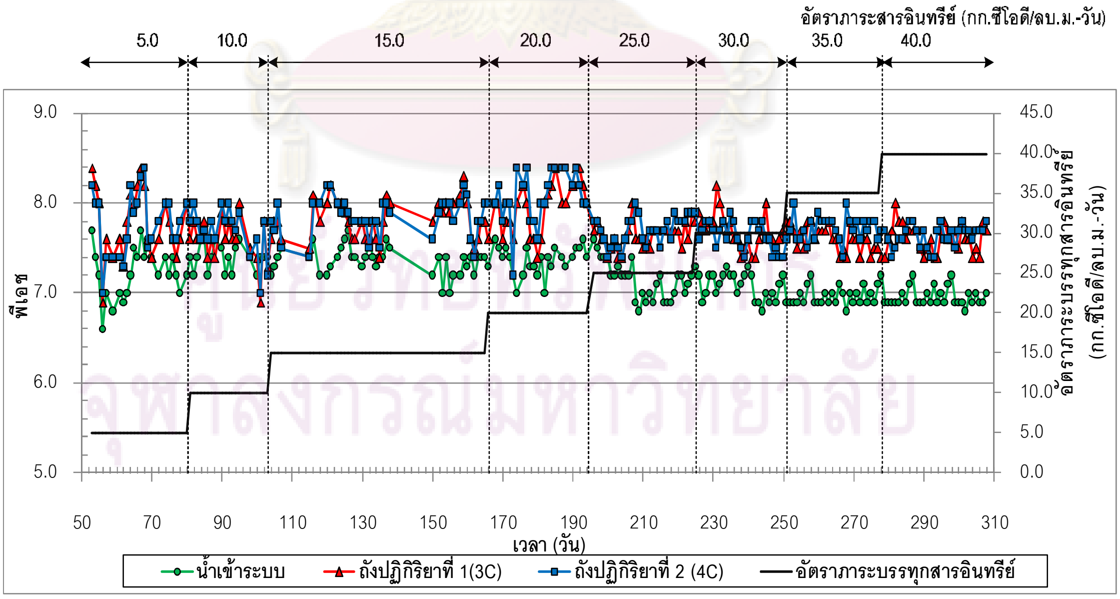
โดยใน รูปที่ 4.26 พีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเทียบกับเวลา พบว่าค่าพีเอชของน้ำออกสูงกว่าค่าพีเอชของน้ำเข้า โดยถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีค่าพีเอชสูงกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) เล็กน้อย ซึ่งค่าพีเอชของน้ำเสียออกจากระบบที่มีค่าค่อนข้างสูงนี้คาดว่าเป็นผลจากการที่ในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจนมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียมคาร์บอเนต โดยเนื่องจากในน้ำเสียน้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในปริมาณสูง ดังนั้นเมื่อเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ กรดไขมันระเหยง่ายถูก

ใช้ไปในกระบวนการย่อยสลาย ส่วนสารประกอบพวกอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^-) เมื่อรวมกับสารพวกคาร์บอเนต เกิดเป็นแอมโมเนียมคาร์บอเนต ส่งผลให้พีเอชในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อค่าพีเอชในระบบมีค่ามากกว่า 7.2 จะทำให้ NH_4^- อิสระที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียเปลี่ยนรูปเป็น NH_3 ดังสมการ

$$NH_4^- \leftrightarrow NH_3 + H^+$$

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบตลอดการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้งสองถังมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยช่วงแรก ตั้งแต่วันที่ 52-194 (ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0 – 20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.) อาจมีความแปรปรวนบ้างเล็กน้อย แต่ เมื่อถึงวันที่ 195 เป็นต้นไปจนถึงระยะเวลาสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 308) พบว่าค่าพีเอชค่อนข้างคงที่และค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองถังปฏิกิริยา

สำหรับน้ำเสียเข้าระบบนั้นพบว่ามีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเดินระบบแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะกับแบคทีเรียที่สร้างมีเทน คือ อยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Brayant,1979) (McCarty,1964a)



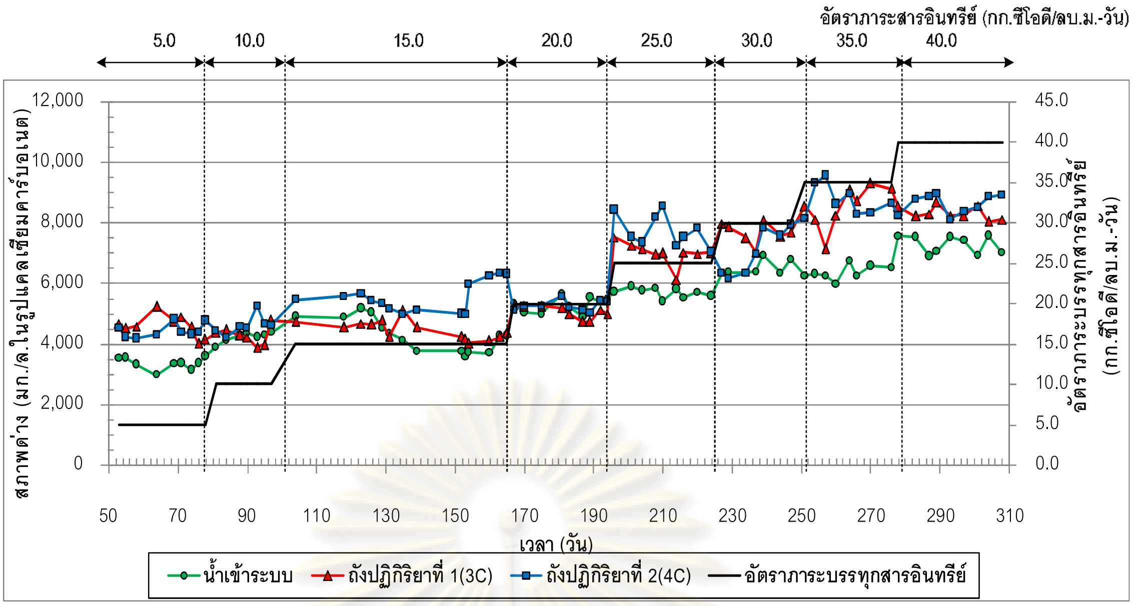
รูปที่ 4.26 พีเอชในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4.3.3 สภาพความเป็นด่าง

เนื่องจากน้ำเสียน้ำมันปาล์มมีค่าพีเอชประมาณ 4-5 ซึ่งไม่เหมาะต่อการเดินระบบ จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบ โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ เดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน. ตามลำดับ ได้ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบให้มีค่าประมาณ 6.9-7.2 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ซึ่งโซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากใช้ปรับค่าพีเอชแล้วยังมีคุณสมบัติเพิ่มค่าสภาพด่างได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

จากตารางที่ 4.34 และรูปที่ 4.27 แสดงค่าความเป็นด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆพบว่าน้ำเสียก่อนเข้าระบบทั้ง 2 ถังปฏิกิริยา มีค่าสภาพด่างสูงกว่า 2,000 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ทุกอัตราภาระสารอินทรีย์ โดยน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าสูงกว่าน้ำเสียก่อนเข้าระบบเล็กน้อย จากรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่า ตั้งแต่วันที่ 52-165 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0-20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าน้ำเสียเข้าระบบและน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป โดยน้ำเสียเข้าระบบในช่วงนี้มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 4,138±761 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต น้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 4,472±403 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต น้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 4,922±586 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากวันที่ 165 เป็นต้นไปจนถึงระยะเวลาสิ้นสุดการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 25.0-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าค่าสภาพความเป็นด่างมีค่าสูงขึ้นจากค่าในช่วงแรก ค่าน้ำเสียเข้าระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป ส่วนค่าสภาพด่างน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้งสองถังมีค่าสูงกว่าค่าสภาพด่างน้ำเข้าถังปฏิกิริยาทั้งสองถัง โดยถังที่ 2 มีค่าเฉลี่ยสภาพด่างสูงกว่าถังที่ 1 ซึ่งน้ำเสียเข้าระบบในช่วงนี้มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 6,466±639 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต น้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 7,881±758 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต น้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีค่าสภาพด่างเฉลี่ยเท่ากับ 8,084±857 มก./ล.ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต จากค่าสภาพด่างของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบที่มีค่าสูง นั่นแสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่สูง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเป็นด่างจากถังปฏิกิริยาทั้งสองแล้ว พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพของระบบต่อการรับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มกระระเหยง่ายที่เข้าสู่ระบบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.27 สภาพความเป็นด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

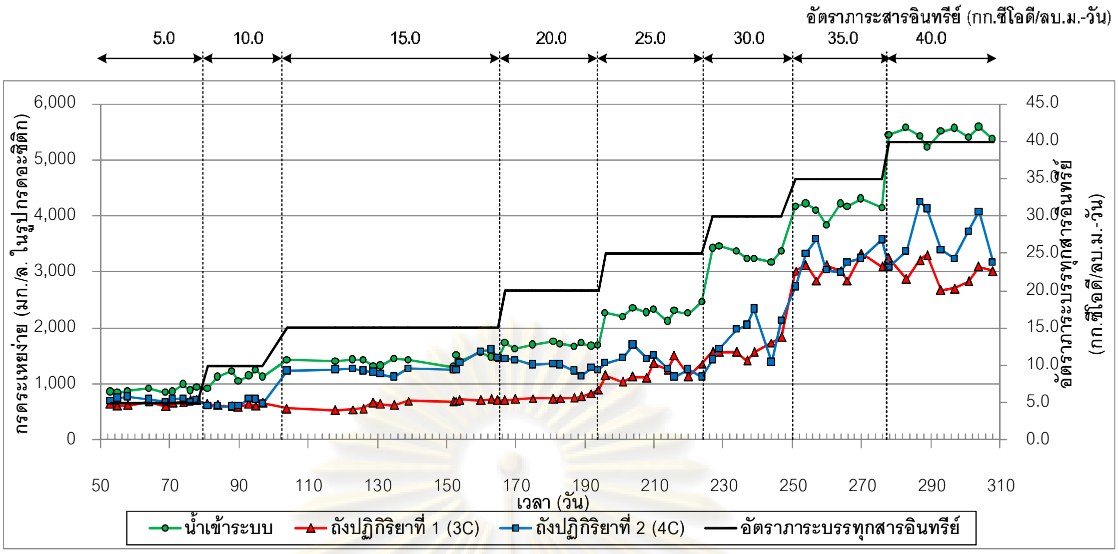
ตารางที่ 4.34 ค่าความเป็นด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	สภาพความเป็นด่าง (มก./ล. ของ $CaCO_3$)					
	น้ำเข้า		น้ำออก			
			ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)		ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	2,970-3,600	3,355 ±202	4,000-5,225	4,592 ±367	4,184-4,825	4,440 ±228
10.0	3,900-4,380	4,227 ±165	3,872-4,788	4,283 ±306	4,213-5,250	4,615 ±317
15.0	3,576-5,190	4,293 ±552	4,020-5,113	4,456 ±317	4,983-6,345	5,545 ±500
20.0	4,903-5,658	5,295 ±265	4,725-5,275	5,056 ±213	5,032-5,583	5,267 ±172
25.0	5,413-5,905	5,701 ±161	6,125-7,524	7,001 ±375	7,050-8,563	7,756 ±541
30.0	6,342-6,942	6,508 ±254	7,025-8,115	7,677 ±362	6,174-7,953	7,035 ±766
35.0	5,992-6,746	6,368±239	7,154-9,314	8,543±705	8,151-9,587	8,748±512
40.0	6,912-7,587	7,284±301	8,050-8,685	8,332±215	8,125-8,980	8,637±324

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.3.4 กรดไขมันระเหยง่าย

กรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำออกจาถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.35 ซึ่งพารามิเตอร์นี้สามารถใช้แสดงถึงความสมดุลของระบบ ถ้ากรดไขมันระเหยสะสมในระบบเพิ่มสูงมากขึ้นจะทำให้ค่าพีเอชลดลงจนอาจเป็นอันตรายกับจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้ทำให้ระบบล้มเหลวได้



รูปที่ 4.28 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.28 พบว่า ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียเข้าระบบในช่วงแรกมีค่าต่ำและเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน 3 ช่วงดังนี้

ช่วงแรกในวันที่ 52-80 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 891 ±51 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) เฉลี่ยเท่ากับ 658 ±40 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) เฉลี่ยเท่ากับ 719 ±34 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าใกล้เคียงกันโดยลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเสียเข้าระบบ แสดงว่าในช่วงนี้กรดไขมันระเหยที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้ได้น้อย

ช่วงที่ 2 วันที่ 81-250 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 และ 30.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ช่วงนี้น้ำเสียเข้าระบบมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1,890±727 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าลดลงจากน้ำเสียเข้าระบบมากและค่อนข้างคงที่ โดยมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 928±379 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าลดลงจากน้ำเสีย

เข้าระบบเล็กน้อย โดยในช่วงแรกที่ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าใกล้เคียงกับค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียเข้าระบบมาก (ค่ากรดไขมันระเหยง่ายน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 1,423±73 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายน้ำเสียออกถังปฏิกิริยาที่ 2 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1,312±146 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก) หลังจากนั้นค่าการลดกรดไขมันระเหยง่ายจึงค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับค่าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) เพียงแต่ค่าที่ได้มีความแปรปรวนมากกว่า โดยค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียออกถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) โดยเฉลี่ยในช่วงนี้ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 20.0, 25.0 และ 30.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) เท่ากับ 1,484±323 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก

ช่วงสุดท้ายของการทดลองในวันที่ 251-308 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเข้าระบบในช่วงนี้แนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 4,845±687 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริทั้ง 2 ถัง ในช่วงนี้มีค่าแปรปรวนมากกว่าช่วงก่อนหน้านี้ โดยค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยา เท่ากับ 3,022±199 มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก และ 3,423±มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.35 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ ลบ.ม.-วัน)	ค่ากรดระเหยง่าย (มก./ล. ของ CH_3COOH)					
	น้ำเข้า		น้ำออก			
			ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	842-996	891 ±51	600-713	658 ±40	675-775	719 ±34
10.0	918-1,250	1,120 ±111	588-665	623 ±26	597-733	648 ±59
15.0	1,303-1,563	1,423 ±73	534-729	649 ±71	1,125-1,613	1,312 ±146
20.0	1,625-1,756	1,699 ±39	703-899	767 ±61	1,138-1,450	1,317 ±99
25.0	2,125-2,463	2,288 ±96	1,038-1,500	1,228 ±153	1,125-1,700	1,365 ±189
30.0	3,180-3,460	3,329 ±108	1,419-1,833	1,612 ±134	1,389-2,342	1,851 ±369
35.0	3,838-4,313	4,150 ±141	2,844-3,328	3,054 ±170	3,003-3,592	3,281 ±238
40.0	5,225-5,600	5,463 ±120	2,677-3,306	2,996 ±237	3,083-4,260	3,609 ±453

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.3.5 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่าง

อัตราส่วนกรดระเหยต่อสภาพด่าง มีความสำคัญต่อการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ เนื่องจากค่าสัดส่วนของความเข้มข้นกรดไขมันระเหย (มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก) ต่อความเข้มข้นสภาพด่าง (มก./ล.ในรูปแคลเซียม-คาร์บอเนต) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพการทำงานของระบบไร้อากาศได้ โดยทั่วไปแล้วค่าสัดส่วนนี้ควรน้อยกว่า 0.4 จึงจะถือได้ว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าสัดส่วนนี้มีค่ามากขึ้นแสดงว่าระบบ

กำลังเสียสมดุล กำลังบัฟเฟอร์ที่มีอยู่เดิมลดน้อยลงและไม่เพียงพอ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าสัดส่วนนี้มีค่ามากกว่า 0.8 จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็วหรืออาจลดลงแล้วก็เป็นไปได้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542)

จากตารางที่ 4.36 และรูปที่ 4.29 พบว่าในช่วงแรกคือวันที่ 52-103 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0-10.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างของน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีค่าคงที่ แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง

ในช่วงที่ 2 วันที่ 104-224 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 15.0-25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป โดยค่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ช่วงสุดท้ายของการทดลองวันที่ 225-308 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 30.0-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง โดยเฉพาะถังที่ 2 (4C) มีค่าแปรปรวนมาก อาจเนื่องจากอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเช่นเดียวกันแล้ว ทำให้ค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างสูงขึ้นเช่นเดียวกันแต่การที่ค่าเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัดเนื่องจากมีการเติมค่าสภาพด่างให้กับระบบตอนที่ปรับพีเอชน้ำเสียเข้าระบบทำให้สภาพด่างสูงขึ้นเช่นเดียวกัน จึงสามารถป้องกันการลดลงอย่างรวดเร็วของค่าพีเอชเนื่องจากการเกิดการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายในระบบมากจนเกินไป ซึ่งจากตารางที่ 4.36 เห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ นั้นมีค่าไม่เกิน 0.40

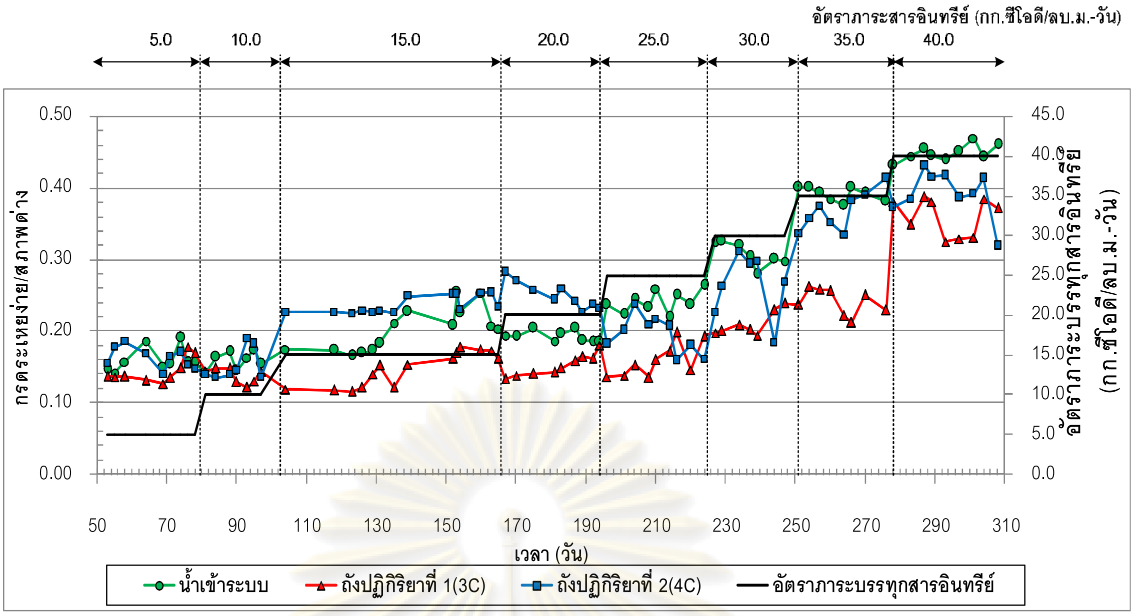
โดยค่าเฉลี่ยของค่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง โดยเฉลี่ยของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 0.26±0.10 ส่วนน้ำออกจากระบบเท่ากับ 0.19±0.07 และ 0.25±0.08 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบยังมีกำลังบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ ทำให้ระบบยังสามารถทำงานได้ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.36 อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	อัคราส่วนกรดระเหยต่อสภาพด่าง					
	น้ำเข้า		น้ำออก			
			ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	0.14-0.19	0.16 ±0.02	0.13-0.18	0.14 ±0.02	0.14-0.19	0.16 ±0.01
10.0	0.14-0.17	0.16 ±0.01	0.12-0.15	0.14 ±0.01	0.14-0.19	0.15 ±0.02
15.0	0.17-0.25	0.20 ±0.03	0.12-0.18	0.15 ±0.02	0.22-0.25	0.24 ±0.01
20.0	0.18-0.20	0.19 ±0.01	0.13-0.18	0.15 ±0.02	0.23-0.28	0.25 ±0.02
25.0	0.22-0.26	0.24 ±0.02	0.14-0.20	0.16 ±0.02	0.16-0.24	0.20 ±0.03
30.0	0.28-0.33	0.31 ±0.02	0.19-0.24	0.21 ±0.02	0.18-0.31	0.26 ±0.05
35.0	0.38-0.40	0.39 ±0.01	0.21-0.26	0.24 ±0.02	0.33-0.41	0.37 ±0.03
40.0	0.43-0.47	0.45 ±0.01	0.32-0.39	0.36 ±0.03	0.32-0.43	0.39 ±0.03

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.29 กรดระเหยต่อสภาพด่างในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ เทียบกับเวลา

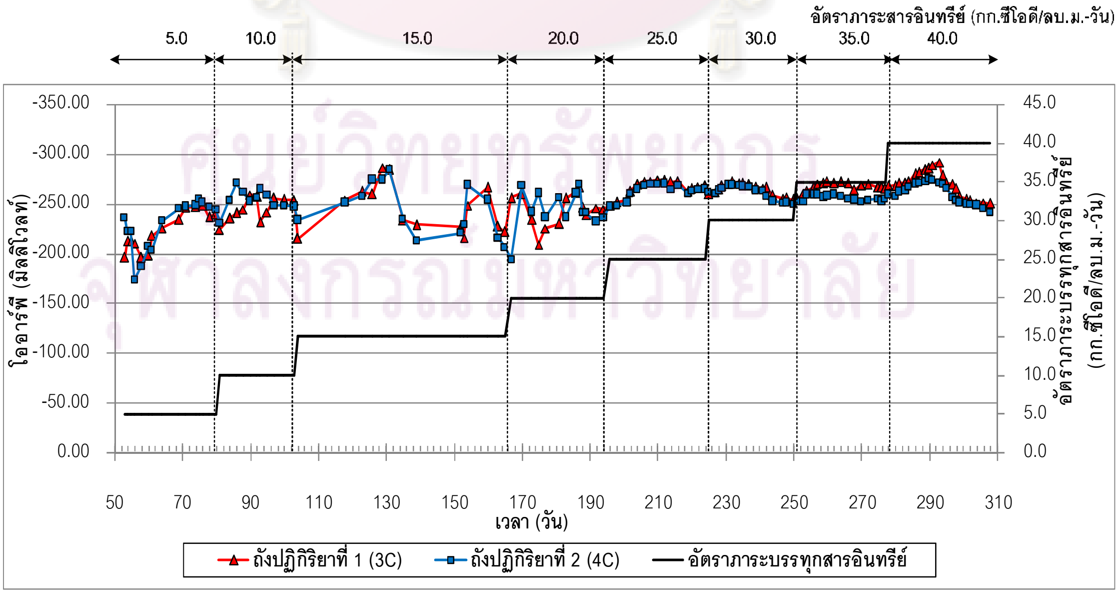
4.4.3.6 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี)

เนื่องจากค่าความต่างศักย์อกซิเดชั่น-รีดักชั่นหรือค่าโออาร์พีเกี่ยวข้องโดยตรงกับปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพราะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดัคชันโดยค่าโออาร์พีเป็นค่าที่วัดปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็คตรอนที่เกิดขึ้นในน้ำ ค่าที่วัดได้อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้าวัดได้ค่าบวกแสดงว่าสารละลายนี้มีสารรับอิเล็คตรอน เช่น มีออกซิเจน แต่ถ้าวัดได้ค่าลบแสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการให้อิเล็คตรอน เช่น มีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็คตรอน ถังย่อยไร้อากาศที่ทำงานได้ดีควรมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลท์ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์,2542) ถ้าค่าโออาร์พีที่วัดได้มีค่าบวกมากกว่าช่วง -300 ถึง-500 มิลลิโวลท์ ก็ไม่ได้หมายความว่าระบบไม่มีสภาพไร้อากาศ แต่เป็นเพราะระบบมีสภาพไร้อากาศที่น้อยลง เช่น อาจมีออกซิเจนปะปนเข้าไปในระบบ โดยเกิดจากการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้น้ำประปา หรือออกซิเจนอาจเข้าไปในระบบตอนเปิดระบบเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลของค่าโออาร์พีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.37

จากตารางที่ 4.37 และรูปที่ 4.30 พบว่าแม้ค่าโออาร์พีเฉลี่ยของถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง จะมีค่ามากกว่า -300 มิลลิโวลท์ก็ตาม แต่ค่าโออาร์พีที่ได้ก็มีค่าเป็นลบ แสดงว่า เกิดกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 4.37 ค่าโออาร์พีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	โออาร์พี (มิลลิโวลท์)			
	น้ำออก			
	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)		ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
5.0	-253- -196	-225±20	-255 - -174	-228±25
10.0	-260 - -224	-245±12	-271 - -231	-254±11
15.0	-287 - -215	-245±24	-285 - -206	-244±26
20.0	-267 - -209	-244±16	-270 - -194	-245±20
25.0	-275 - -248	-266±9	-271 - -248	-263±8
30.0	-272 - -254	-264±6	-269 - -250	-262±7
35.0	-272 - -255	-267±5	-260 - -253	-256±3
40.0	-292 - -250	-270±13	-276 - -242	-261±10



รูปที่ 4.30 ค่าโออาร์พีในการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ เทียบกับเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศหรือเอบีอาร์จำนวน 2 ถัง ปริมาตร 10 ลิตร โดยถังปฏิกิริยาที่ 1 แบ่งเป็น 3 ห้อง (3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2 แบ่งเป็น 4 ห้อง (4C) ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์คงที่ที่ 24 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาความสามารถของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม

ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในระยะเริ่มต้นระบบ (Start-up)

- การเริ่มต้นเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศจนเข้าสู่สภาวะคงตัวของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) และถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ที่สภาวะคงตัวประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) เท่ากับ 82.25% และ ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) เท่ากับ 82.91% ตามลำดับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้งสองถังมีค่าไม่แตกต่างกัน และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเฉลี่ย เท่ากับ 0.475 และ 0.441 มล.ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

ผลการศึกษาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

- การเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบพบว่าถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพในกำจัดซีโอดีสูงที่สุด ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยประสิทธิภาพในกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 90.01% ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีประสิทธิภาพในกำจัดซีโอดีสูงที่สุด ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยประสิทธิภาพในกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 87.57%
- ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน ของระบบพบว่า ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีประสิทธิภาพในกำจัดน้ำมันและไขมันดีกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ช่วงกลาง คือที่ 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน นอกนั้นพบว่า ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีประสิทธิภาพในกำจัดน้ำมันและไขมันดีกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) โดยเฉพาะที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงในช่วงหลัง คือที่ 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

- ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบ พบว่าในช่วงแรกที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.0, 10.0 และ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันมากกว่าถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) แต่ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วั น ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันมากกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)

5.1.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มที่การรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แปรเปลี่ยนไป เนื่องจากกระบวนการไร้อากาศประกอบด้วยแบคทีเรียสองกลุ่ม ทำงานกันอย่างต่อเนื่องกับ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากจะต้องรักษาระบบให้อยู่ในสภาพไร้อากาศแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

- พีเอชที่ใช้ในการเดินระบบของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มควรคุมพีเอชน้ำเสียเข้าระบบอยู่ที่ 6.8-7.0 เพื่อสุดท้ายแล้วค่าน้ำเสียที่ออกจากระบบจะได้ไม่มีค่าพีเอชสูงเกินไป ทำให้เกิดความเป็นพิษเนื่องจากแอมโมเนีย

-ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง แม้ว่าในการดำเนินการทดลองนี้ค่าสภาพด่างและค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่สูงเกินค่าที่เหมาะสมที่ได้แนะนำสำหรับการเดินระบบแบบไร้อากาศ แต่เมื่อดูในผลการทดลองพบว่าถ้ายังสามารถควบคุมอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง ให้มีค่าไม่เกิน 0.4 พบว่ายังสามารถเดินระบบเพื่อผลิตกาวชีวภาพต่อไปได้ โดยค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างที่เหมาะสมกับการเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.25

-สำหรับถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) พบว่าเหมาะกับการใช้ในการเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงๆ (อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 25.0-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ส่วนถังปฏิกิริยาที่ 2(4C) เหมาะกับการใช้ในการเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่ำๆ (2.5-20.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)

-ค่าน้ำมันและไขมันในน้ำเสียเข้าระบบควรมีค่าไม่เกิน 5,000 มก./ล.สำหรับถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เนื่องจากน้ำมันและไขมันซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายยาวนานกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นจึงเกิดการสะสมอยู่ในระบบซึ่งสามารถอยู่ในรูปของ Scum ปิดกั้นที่ผิวหน้าน้ำในถังปฏิกิริยาได้

-พบว่าระบบแผ่นกั้นไร้อากาศมีประสิทธิภาพสูงในการกักเก็บตะกอนในถังปฏิกิริยา และใช้ได้จริงและมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีลักษณะการทำให้เกิดตะกอนชีวภาพที่มีลักษณะการตกตะกอนที่ผิดปกติ

5.1.3 ผลการศึกษาการแปรรูปจากค่าสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดไปเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบบ 3 ห้องและ 4 ห้อง พบว่าสัดส่วนของปริมาณ ก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ ในช่วงแรกมีค่าต่ำกว่า ค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี คือ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.0, 10.0 และ 15.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 0.661, 0.703 และ 0.591 มล.ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ถังปฏิกิริยาที่ 2 (4C) มีค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้เท่ากับ 0.738, 0.770 และ 0.624 มล.ก๊าซชีวภาพ/มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 และ 40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าสัดส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงต่อซีโอดีเฉลี่ยที่กำจัดได้ มากกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี โดยรวมแล้วพบว่า ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C) มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่กำจัดได้มากกว่าถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)

จากผลการทดลองที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 2.5-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน แสดงให้เห็นว่าการใช้ถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้นให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่สูง โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีถังปฏิกิริยาที่ 1 (3 ห้อง) ดีกว่าแบบ 2 (4 ห้อง) ตามลำดับ นอกจากนั้นระบบยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าค่าทางทฤษฎีอีกด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลกันแล้วพบว่าถังปฏิกิริยาแบบ 3 ห้องและแบบ 4 ห้องไม่มีความแตกต่างกันโดยงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ต่อไปสำหรับโรงงานที่มีค่าไขมันและน้ำมันในน้ำเสียรวมทั้งที่มีค่าซีโอดีสูง ซึ่งนอกจากจะเป็นการบำบัดน้ำเสียแล้วยังสามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้อีกทางหนึ่งด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยนี้พบว่ามีข้อเสนอแนะที่ต้องการเสนอให้มีการวิจัยติอไป เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ดังต่อไปนี้

1. การใช้น้ำเสียจริงในการทำการทดลองมีส่วนทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แปรเปลี่ยนไปได้บ้าง ดังนั้น ควรมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้อย่างสม่ำเสมอเพื่อการนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง

2. ศึกษาผลของระยะเวลากักเก็บทางชลศาสตร์ (HRT) และระยะเวลากักเก็บของแข็ง (SRT) ในการใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

3.ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการใช้ถังปฏิกิริยาแบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

4. ศึกษาถึงผลที่เกิดจากการเพิ่มจำนวนห้องให้มากขึ้น และเพิ่มขนาดของถังปฏิกิริยาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากขึ้นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

โรงงานอุตสาหกร

รมม,กรม. 2549. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐนิเวศน์; อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. กรุงเทพมหานคร.

โรงงานอุตสาหกรรม,กรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.

พรชัย เหลืองอาภาพงศ์. 2549. คัมภีร์ปาล์มน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มติชน, หน้า 294-302.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย. เล่ม1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่ม1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรภี เบญจปัญญาวงศ์. 2549. ผลของการเติมโพลีเมอร์ต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม.2541. กรุงเทพมหานคร.

หนึ่งฤทัย ศรีพิมพ์ยิ้ม. 2546. การไฮโดรไลซิสและการเกิดกรดของหนังไก่และไส้ไก่จากโรงงานชำแหละไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกชัย พฤกษ์อำไพ. 2548. คู่มือปาล์มน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: เพ็ท-แพล้นท์พับลิชชิ่ง.

ภาษาอังกฤษ

APHA 1998. American Public Health Association Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC: APHA and American Water Works Association and Water Environment Federation.

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bachmann, A., Beard, V.L., and McCarty, P.L. 1983. Comparison of Fixed Film Reactor with a Modified Sludge Blanket Reactor. In Wu, Y.C., and Smith, E.D.(eds.), Fixed Film Biological Processes for Wastewater Treatment. Noyes Data, NJ.

Bachmann, A., Beard, V.L., and McCarty, P.L. 1985. Performance Characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor. Water Research. 19(1): 99-106.

Barber, P. and Stuckey, C. 1999. The Use of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for Wastewater Treatment: A review. Water Research. 33(7):1559-1578.

Boopathy, R. and Tilche, A. 1991. Anaerobic Digestion of High Strength Molasses Wastewater Using Hybrid Anaerobic Baffled Reactor Treating Molasses Wastewater. Biomass and Bioenergy. 25(70): 785-790.

Boopathy, R. and Tilche, A. 1992. Pelletization of Biomass in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor (HABR) Treating Acidified Wastewater. Bioresource Technology. 40: 101-107.

Borja, R., Banks, C.J., 1994b. Treatment of palm oil mill effluent by upflow anaerobic filtration. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 61: 103–109.

Borja, R., Banks, C.J., 1994c. Anaerobic digestion of palm oil mill effluent using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. Biomass and Bioenergy 6: 381–389.

Borja, R., Banks, C.J., 1995. Comparison of an anaerobic filter and an anaerobic fluidized bed reactor treating palm oil mill effluent. Process Biochemistry 30: 511–521

Borja, R., Charles, J.B. and Sanchez, E. 1996. Anaerobic Treatment of Palm Oil Mill Effluent in a Two-Stage Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) system. Journal of Biotechnology. 45: 125-135.

Buswell, A.M. and Muller, H.F. 1952. Mechanisms of Methane Fermentation. Industrial Engineering Chemistry. 44: 550.

Cail, R.G. and Barford, J.P. 1985. Mesophilic Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. Biomass. 7: 287-295.

Chin, K.K. and Wong, K.K. 1983. Thermophilic Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. Water Research. 17: 993-995.

Faisal, M. and Unno, H. 2001. Kinetic Analysis of Palm Oil Mill Wastewater Treatment by a Modified Anaerobic Baffled Reactor. Biochemical Engineering Journal. 9: 25-31.

Foxon, K.M. 2004. The Anaerobic Baffled Reactor (ABR): An Appropriate Technology for On-Site Sanitation. Water Institute of South Africa (WISA) Biennal Conference. 2-6 May.

Grobiki, A. and Stuckey, D.C. 1991. Performance of the Anaerobic Baffled Reactor Under Steady-State and Shock Loading Conditions. Biotechnology and Bioengineering. 37(4): 344-355.

Grobiki, A. 1997. Design Manual for Anaerobic Treatment of Industrial Effluent. Sweden. Wreple.

Halalsheh, M., Koppes, J., den Elzen, J., Zeeman. G., Fayyed, M. and Lettinga, G. 2005. Effect on SRT and temperature on biological conversions and the related scum-forming potential. Water Res.39: 2475-2482

Lalman, J.A., and David, M.B. 2001. Anaerobic degradation and methanogenic inhibitory effects of oleic and stearic acids. Water Res. 35(12): 2975-2983.

Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering. 4th ed. McGraw-Hill. McGraw-Hill Companies. Pp. 999.

Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Hasnain Isa, M. and Nasrollahzadeh, H. 2006. High-rate Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent in an Upflow Anaerobic Sludge Fixed-Film Bioreactor. Process Biochemistry. 41: 370-379.

Nachaiyasit, S. and Stuckey, D.C. 1997a. The Effect of Shock Loads on the Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR).1.Step Changes in Feed Concentration at Constant Retention Time. Water Research. 31(11): 2737-2746.

Nachaiyasit, S. and Stuckey, D.C. 1997. The Effect of Shock Loads on the Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR).2.Step and Transient Hydraulic Constant Feed Strength. Water Research. 31 (11): 2747-2754.

Pagilla, K.R., Craney, K.C., Kodo, W.H. 1997. Cases and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. Water Sci Technol. 36(6-7): 463-470.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Rafael, B., Chales, J.B. and Enrique, S. 1996. Anaerobic Treatment of Palm Oil Mill Effluent in a Two-Stage Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) System. Journal of Biotechnology. 45: 125-135.

Shahrakbah, Y., Yoshihito S., Mohd Ali H., Minato W. and Sunderaj S. 2006. Start-up Operation of Semi-Commercial Closed Anaerobic Digester for Palm Oill Mill Effluent Treatment. Process Biochemistry. 41: 962-964.

Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater. Arche Press. Nashville. Tennessee. Pp. 1-393.

Tong, S.L., Jaafar, A.B., 2006. POME Biogas capture, upgrading and utilization. Palm Oil Engineering Bulletin 78: 11–17.

Trostyanskata, E.B. 1995. Polymeric Matrices in Fiber-Reinforce Composite Material : Polymer Matrix Composit. London: Chairman & Hall.

Uyanik, S. 2003. A Novel Anaerobic Reactor: Split Fed Anaerobic Baffled Reactor (SFABR). Engineering Environment Science. 23: 339-345.

Uyanik, S., Sallis, P.J. and Anderson, G.K. 2002. The Effect of Polymer Addition on Granulation in an Anaerobic Baffled Reactor (ABR). Part I: Process Performance. Water Research. 36: 933-943.

Uyanik, S., Sallis, P.J. and Anderson, G.K. 2002. The Effect of Polymer Addition on Granulation in an Anaerobic Baffled Reactor (ABR). Part II: Compartmentalization of Bacteria Populations. Water Research. 36: 944-955.

Wang, J., Huang, Y. and Zhao, X. 2004. Performance and Characteristics of an Anaerobic Baffled Reactor. Bioresource Technology. 93(2): 205-208.

Woodhams, R.T., Thomas, G. and Rodger D.K. 1984. Wood Fibers as Reinforcing Fillers for Polyolefins. Polymer Engineering and Science. 24: 166-117.

Xing, J. and Tilche, A. 1992. The Effect of Hydraulic Retention Time on The Hybrid Anaerobic Baffled Reactor Performance at Constant Loading. Biomass and Bioenergy. 3(1): 25-29.

Xing, J., Boopathy, R. and Tilche, A. 1991. Model Evaluation of Hydraulic Hybrid Anaerobic Baffled Reactor Treating Molasses Wastewater. Biomass and Bioenergy. 1(5): 267-274.

Yacob, S., Hassan, M.A., Shirai, Y., Wakisaka, M., Subash, S., 2005. Baseline study of methane emission from open digesting tanks of palm oil mill effluent treatment. Chemosphere 59: 1575–1581.

Yacob, S., Hassan, M.A., Shirai, Y., Wakisaka, M., Subash, S., 2006a. Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. Science of the Total Environment 366: 187–196.

Zhang, Y., Yan, L., Chi, L., Long, X., Mei, Z. and Zhang, Z. 2008. Startup and Operation of Anaerobic EGSB Reactor Treating Palm Oil Mill Effluent. Journal of Engineering Sciences. 20: 658-663.

Zinatizadah, A.A.L., Mohamed, A.R., Mashitah, M.D., Abdullah, A.Z. and Hasnain Isa, M. 2007. Optimization of Pre-treated Palm Oil Mill Effluent Digestion in an Up-flow Anaerobic Sludge Fixed Film Bioreactor: A Comparative Study. Biochemical Engineering Journal. 35: 226-237.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1 ตัวอย่างการคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอัตราการไหล

1. การคำนวณภาระบรรทุกสารอินทรีย์

คำนวณจาก ค่าการเก็บกักที่ 24 ชั่วโมง ปริมาตร 10 ลิตร และค่าซีโอดี 2,500 มก./ล.

จาก Organic loading rate = COD (kg/m^3) / Time (day)

โดย COD ปกติใช้หน่วย mg/L เมื่อเปลี่ยนหน่วย COD x 10^{-3} เป็น kg/m^3

Time คือ HRT ปกติใช้หน่วยชั่วโมง เมื่อเปลี่ยนหน่วย HRT/24 เป็น day

ดังนั้น Organic loading rate = (COD x 10^{-3})/ (HRT/24)

= 2,500 x 10^{-3})/ (24/24)

= 2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

2. การคำนวณอัตราการไหล

จาก Q= V/T โดย V คือ ปริมาตร และ T คือ เวลา

Q= 10/(24) = 0.417 ลิตร/ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-2 ตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนก๊าซรวม

1. จากสัดส่วนปริมาณก๊าซรวม = $\dfrac{\text{ปริมาณ gas (L/day)}}{\text{COD removal (g COD/day)}}$

เนื่องจากปริมาณ gas ที่เก็บข้อมูลมีหน่วยเป็น ml/day จึงเปลี่ยนหน่วยเป็น L/day โดยนำปริมาณ gas/1000

จาก COD removal = $COD_{\text{เข้า}} - COD_{\text{ออก}}$ เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L เป็น g/L โดยนำ COD/1000 แล้วคิดเป็นปริมาณ COD ที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหล จะได้ COD removal หน่วย gCOD/day

2. วิธีคำนวณดังตัวอย่าง

กำหนดให้ COD เข้า =6,000 mg/L, COD ออก =200 mg/L
gas ที่เกิดขึ้น 51,000 ml/day , อัตราการไหล 12 L/day

เนื่องจาก ปริมาณ gas ที่เก็บข้อมูลมีหน่วยเป็น ml/day จึงเปลี่ยนหน่วย เป็น L/day โดย

ปริมาณ gas(L/day) = ปริมาณgas/1000
= 51000/1000 = 51 L/day

COD removal = CODเข้า – CODออก = 6000 – 200 = 5800 mg/L

เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L เป็น g/L

โดย COD removal (g/L) = COD removal/1000 = 5800/1000 = 5.8 g/L

แล้วคิดเป็นปริมาณ CODที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหลจะได้ COD removal (g COD /day)

โดย COD removal (g COD /day) = COD removal (g/L) × อัตราการไหล (L/day)
= 5.8×12
= 69.6 g COD /day

จากสัดส่วนปริมาณก๊าซรวม = $\dfrac{\text{ปริมาณgas (L /day)}}{\text{COD removal (g COD /day)}}$

= $\dfrac{\text{51 L/day}}{\text{69.6 g COD /day}}$

= 0.73 L /g COD x (1000g/1000L)

= 0.73 m3 /kg COD

ภาคผนวก ก -3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณก๊าซทางทฤษฎี

1. ปริมาณ Gas ทางทฤษฎี = COD removal (g COD /day) x อัตราการเกิด gas ทางทฤษฎี
โดยอัตราการเกิด gasทางทฤษฎี = 0.7 m^3 /kg COD ที่ STP เปลี่ยนหน่วยจากสภาวะที่ STP เป็นอุณหภูมิห้องจะได้

= 0.7 x (273+25)/273

= 0.76 m^3 /kg COD x (1000L/1000g)

= 0.76 L /g COD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25°C

COD $_{removal}$ หาจาก COD$_{เข้า}$ – COD$_{ออก}$เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L โดยนำ COD/1000 เป็นg/L แล้วคิดเป็นปริมาณ COD ที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหลจะได้ COD $_{removal}$ (g COD /day)

2. วิธีคำนวณดังตัวอย่าง

กำหนดให้ COD เข้า = 6,000 mg/L, COD ออก = 200 mg/L , อัตราการไหล 12 L/day
โดยอัตราการเกิด gas ทางทฤษฎี = 0.76 L /g COD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25°C
จาก COD $_{removal}$ = COD$_{เข้า}$ – COD$_{ออก}$ = 6000 – 200 = 5,800 mg/L
เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L เป็น g/L
โดย COD removal (g/L) = COD removal/1000 = 5800/1000 = 5.8 g/L
แล้วคิดเป็นปริมาณ COD ที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหลจะได้
COD removal (g COD /day)
โดย COD removal (g COD /day) = COD removal (g/L) x อัตราการไหล (L/day)
= 5.8 x 12 = 69.6 g COD /day
จาก ปริมาณ Gas ทางทฤษฎี = COD removal (g COD /day) x อัตราการเกิด gas ทางทฤษฎี
= 69.6 x 0.76
= 52.89 L /day

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ปริมาณสารอินทรีย์ (ซีโอดี) ที่เข้าระบบและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ช่วง	วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)
เริ่มระบบ	1 - 53	2,500	2.5
OLR 1	52 - 80	5,000	5.0
OLR 2	81 - 103	10,000	10.0
OLR 3	104 - 165	15,000	15.0
OLR 4	166 - 194	20,000	20.0
OLR 5	195 - 224	25,000	25.0
OLR 6	225 - 250	30,000	30.0
OLR 7	251 - 277	35,000	35.0
OLR 8	278 - 308	40,000	40.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
1	2,550	2,400	2,400	6	6
4	2,540	2,304	2,304	9	9
11	2,480	2,350	2,338	5	6
12	2,500	1,250	1,000	50	60
14	2,750	1,000	2,000	64	27
15	2,375	1,875	1,375	21	42
16	2,412	1,500	1,325	38	45
17	2,492	1,932	2,188	22	12
19	2,455	1,643	1,304	33	47
20	2,628	2,013	1,545	23	41
21	2,268	1,539	1,566	32	31
23	2,400	1,760	1,867	27	22
25	2,300	1,200	1,133	48	51
27	2,267	1,167	1,100	49	51
29	2,400	958	923	60	62
30	2,450	921	895	62	63
32	2,326	876	852	62	63
36	2,622	825	810	69	69
40	2,450	759	725	69	70
41	2,520	650	630	74	75
43	2,456	542	535	78	78
45	2,534	550	525	78	79
46	2,310	524	515	77	78
47	2,521	425	410	83	84
48	2,498	456	425	82	83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
49	2,485	453	420	82	83
50	2,495	450	442	82	82
51	2,798	486	491	83	82
53	4,938	1,705	1,049	65	79
54	4,934	1,443	1,279	71	74
55	4,934	1,443	1,279	71	74
56	5,160	2,200	2,167	57	58
58	5,206	1,806	1,952	65	63
60	4,886	1,656	1,509	66	69
61	4,959	1,361	1,597	73	68
64	5,176	1,283	1,154	75	78
69	4,973	1,093	907	78	82
71	4,952	885	867	82	82
74	4,825	850	821	82	83
75	5,012	783	750	84	85
76	4,950	850	794	83	84
78	5,250	1,107	925	79	82
80	5,125	1,025	957	80	81
81	9,551	2,413	2,203	75	77
84	9,359	2,013	1,445	78	85
86	10,148	1,987	981	80	90
88	10,387	1,918	1,327	82	87
90	10,357	1,397	1,619	87	84
92	9,493	1,338	1,367	86	86
93	9,754	2,215	1,131	77	88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
95	9,633	1,875	1,313	81	86
97	10,177	1,500	1,750	85	83
100	9,986	1,504	1,725	85	83
103	9,920	1,528	1,723	85	83
104	14,292	4,051	3,139	72	78
118	14,810	3,279	3,380	78	77
123	15,210	10,902	11,146	28	27
126	14,834	5,990	5,251	60	65
129	14,938	7,671	8,253	49	45
131	14,720	5,736	5,760	61	61
135	15,335	6,404	6,328	58	59
139	14,994	4,540	5,332	70	64
152	14,708	3,599	3,878	76	74
153	14,937	4,178	3,514	72	76
154	14,821	2,538	1,513	83	90
160	15,320	1,693	2,324	89	85
163	14,868	3,602	4,163	76	72
165	15,026	3,919	4,699	74	69
167	20,000	2,908	7,052	85	65
170	20,181	2,667	2,137	87	89
173	20,629	4,506	3,975	78	81
175	20,443	6,177	2,633	70	87
177	19,958	4,962	4,217	75	79
181	19,986	4,639	2,876	77	86
183	20,252	2,969	4,268	85	79

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
186	19,870	2,526	2,560	87	87
187	19,986	2,231	2,011	89	90
188	20,250	3,625	3,938	82	81
189	20,315	4,127	3,987	80	80
192	20,113	3,625	4,500	82	78
194	20,145	3,740	4,267	81	79
196	24,960	4,295	4,346	83	83
198	24,860	4,005	4,250	84	83
201	25,150	3,886	4,060	85	84
202	24,526	3,012	3,251	88	87
204	24,985	2,562	2,893	90	88
206	25,010	2,263	2,587	91	90
208	24,890	2,228	2,463	91	90
210	25,036	2,125	2,501	92	90
212	25,150	2,231	2,458	91	90
214	25,025	2,342	2,984	91	88
216	24,880	2,263	2,587	91	90
219	24,890	3,097	3,262	88	87
220	25,015	2,881	3,030	88	88
222	25,328	2,759	2,988	89	88
224	24,956	2,646	2,896	89	88
225	31,320	4,204	4,021	87	87
227	29,666	3,750	3,890	87	87
228	30,250	3,562	3,623	88	88
229	30,520	3,273	3,457	89	89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
231	29,400	2,934	3,025	90	90
232	31,880	2,950	3,246	91	90
234	29,680	2,815	3,138	91	89
235	29,238	2,862	3,106	90	89
237	29,850	3,013	3,262	90	89
239	30,150	3,375	3,646	89	88
241	30,125	3,381	3,657	89	88
242	30,658	3,396	4,306	89	86
244	29,545	4,072	4,609	86	84
247	29,864	4,480	4,895	85	84
248	29,782	4,379	4,783	85	84
250	29,656	4,521	4,984	85	83
251	35,125	5,314	5,528	85	84
253	34,982	4,580	5,500	87	84
254	34,625	4,251	4,643	88	87
256	35,120	3,894	4,720	89	87
257	35,025	3,482	4,710	90	87
259	34,436	3,287	4,896	90	86
260	34,892	3,240	4,823	91	86
262	35,228	3,406	4,693	90	87
264	35,286	3,287	4,930	91	86
266	34,752	3,377	5,185	90	85
268	34,626	4,158	5,251	88	85
270	34,857	3,605	5,474	90	84
272	35,012	3,507	5,386	90	85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าซีโอดีที่เข้าและออกระบบ และค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ค่าซีโอดี (มก./ล.)			เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี	
	น้ำเข้าระบบ	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
275	35,120	3,879	5,228	89	85
276	34,527	3,784	5,395	89	84
277	34,985	4,025	5,235	88	85
278	39,160	4,127	5,216	89	87
280	39,524	4,150	5,606	90	86
281	40,140	3,830	5,025	90	87
283	38,400	3,715	4,587	90	88
284	38,875	3,625	4,287	91	89
286	40,025	2,563	3,913	94	90
287	40,436	2,326	3,831	94	91
289	40,125	2,023	3,594	95	91
290	40,520	1,875	3,256	95	92
291	40,129	1,443	3,480	96	91
293	40,210	1,048	3,867	97	90
294	40,250	2,859	3,965	93	90
295	39,857	3,916	4,553	90	89
297	40,920	4,095	5,905	90	86
298	40,150	4,650	6,229	88	84
299	39,920	5,658	6,443	86	84
301	39,852	5,980	6,585	85	83
302	39,985	6,159	6,720	85	83
304	40,125	6,540	6,810	84	83
306	41,556	6,720	7,492	84	82
308	40,582	6,730	7,873	83	81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังปฏิกิริยา (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
7	2.5	4,980	4,352	3,468
12	2.5	3,480	2,770	2,886
17	2.5	2,560	2,054	2,150
22	2.5	2,240	1,871	1,620
27	2.5	2,257	1,760	1,670
32	2.5	1,980	1,454	1,550
37	2.5	1,740	1,357	1,292
42	2.5	2,110	1,445	1,270
47	2.5	1,860	1,250	1,070
51	2.5	2,210	1,624	1,568
52	5.0	5,240	1,809	1,113
57	5.0	4,920	2,098	2,066
62	5.0	5,160	1,416	1,662
67	5.0	3,380	1,081	1,292
72	5.0	4,440	793	777
77	5.0	3,700	1,005	963
80	5.0	4,370	874	816
81	10.0	5,560	1,961	1,839
85	10.0	6,520	1,929	1,934
90	10.0	7,300	985	1,141
95	10.0	6,000	1,168	818
99	10.0	7,530	1,134	1,301
103	10.0	7,740	1,192	1,344
104	15.0	8,160	4,313	3,792

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังปฏิกิริยา (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
104	15.0	8,160	4,313	3,792
119	15.0	9,040	6,391	6,453
124	15.0	8,120	6,016	6,146
130	15.0	9,350	7,290	7,654
134	15.0	9,210	7,044	7,998
138	15.0	8,920	6,106	6,577
148	15.0	9,920	6,428	6,616
152	15.0	10,520	5,943	5,475
156	15.0	9,750	3,670	4,995
160	15.0	12,280	4,357	4,863
165	15.0	11,100	3,895	4,471
166	20.0	12,200	4,206	4,118
171	20.0	11,440	4,928	5,229
176	20.0	12,600	3,793	4,717
180	20.0	11,940	4,168	5,222
185	20.0	13,120	6,452	5,118
190	20.0	12,960	5,327	5,416
194	20.0	14,520	6,824	6,154
195	25.0	15,400	5,288	5,719
201	25.0	15,520	4,104	4,463
206	25.0	14,340	4,608	5,857
212	25.0	16,860	5,835	6,526
218	25.0	17,100	7,972	7,859
224	25.0	15,520	4,857	5,167

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังปฏิกิริยา (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
225	30.0	17,234	8,921	9,021
230	30.0	18,020	10,088	9,979
235	30.0	17,620	7,605	8,515
240	30.0	18,440	10,370	10,201
245	30.0	17,140	6,378	6,752
250	30.0	19,600	9,436	10,306
251	35.0	21,970	11,207	11,512
257	35.0	22,550	13,308	12,518
262	35.0	21,130	9,974	11,315
268	35.0	22,860	13,115	12,393
273	35.0	20,930	8,694	9,664
277	35.0	20,540	11,177	10,466
278	40.0	24,200	13,230	14,977
285	40.0	25,380	13,206	14,043
291	40.0	23,900	14,651	15,827
296	40.0	25,700	14,558	15,991
301	40.0	27,830	17,654	17,231
305	40.0	26,400	16,131	15,640
308	40.0	27,700	17,106	16,326

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ของแข็งแขวนลอยระเหย (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
7	2.5	2,910	2,570	2,470
12	2.5	2,920	1,850	2,071
17	2.5	1,830	1,530	1,670
22	2.5	1,620	1,394	1,380
27	2.5	1,550	1,330	1,270
32	2.5	1,230	1,060	1,210
37	2.5	1,210	960	924
42	2.5	1,630	980	910
47	2.5	1,480	905	760
51	2.5	1,452	1,270	1,180
52	5.0	3,580	1,185	877
57	5.0	3,680	1,203	1,198
62	5.0	3,580	1,028	1,127
67	5.0	2,780	735	798
72	5.0	2,900	652	641
77	5.0	2,660	732	713
80	5.0	2,930	699	664
81	10.0	3,560	1,269	1,231
85	10.0	4,560	1,358	1,360
90	10.0	4,750	852	963
95	10.0	4,410	941	706
99	10.0	4,240	963	1,076
103	10.0	4,480	1,009	1,111
104	15.0	5,875	3,090	2,569

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย**ระเหย** (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m3-d)	ของแข็งแขวนลอยระเหย (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
119	15.0	6,450	5,784	5,117
124	15.0	6,720	4,769	4,848
130	15.0	6,330	3,873	4,544
134	15.0	6,840	4,589	3,662
138	15.0	7,570	3,840	3,657
148	15.0	7,120	3,213	3,692
152	15.0	7,020	3,097	3,429
156	15.0	7,070	3,279	3,373
160	15.0	8,780	3,193	3,441
165	15.0	8,170	3,277	3,675
166	20.0	8,310	2,647	3,638
171	20.0	8,480	3,201	4,470
176	20.0	8,970	4,632	4,360
180	20.0	8,940	4,245	4,353
185	20.0	8,060	5,557	4,727
190	20.0	10,630	3,955	4,437
194	20.0	11,170	2,731	3,073
195	25.0	10,040	3,500	4,958
201	25.0	12,140	4,151	4,909
206	25.0	12,480	6,582	6,436
212	25.0	10,710	3,468	3,792
218	25.0	12,700	6,831	6,961
224	25.0	5,840	3,764	3,743

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m3-d)	ของแข็งแขวนลอยระเหย (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
225	30.0	6,450	5,784	5,117
230	30.0	12,770	7,997	7,851
235	30.0	12,690	5,111	6,163
240	30.0	13,020	8,169	7,943
245	30.0	13,320	3,968	4,348
250	30.0	13,920	6,488	7,543
251	35.0	16,260	8,167	8,549
257	35.0	16,460	10,654	9,583
262	35.0	15,210	7,015	8,676
268	35.0	16,680	10,229	9,275
273	35.0	14,860	5,650	6,728
277	35.0	14,380	8,773	7,854
278	40.0	17,180	9,189	11,484
285	40.0	17,760	8,673	9,686
291	40.0	17,210	11,194	12,872
296	40.0	17,990	10,190	12,085
301	40.0	20,320	13,239	12,661
305	40.0	19,010	11,909	11,257
308	40.0	19,390	12,559	11,526

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่าย

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
1	2.5	785	560	510
11	2.5	740	525	465
15	2.5	656	485	438
19	2.5	638	465	460
23	2.5	675	375	362
29	2.5	650	555	560
32	2.5	656	545	528
36	2.5	630	588	560
43	2.5	644	550	538
48	2.5	625	578	530
51	2.5	688	560	510
53	5.0	863	638	700
55	5.0	842	613	750
58	5.0	870	625	775
64	5.0	920	688	725
69	5.0	844	600	675
71	5.0	865	663	725
74	5.0	996	675	740
76	5.0	881	713	675
78	5.0	939	703	703
81	10.0	918	638	613
84	10.0	1,125	625	603
88	10.0	1,225	602	597
90	10.0	1,050	588	613

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
93	10.0	1,150	638	733
95	10.0	1,250	608	728
97	10.0	1,125	665	647
104	15.0	1,425	563	1,238
118	15.0	1,410	534	1,263
123	15.0	1,435	542	1,275
126	15.0	1,425	563	1,238
129	15.0	1,312	670	1,213
131	15.0	1,325	642	1,175
135	15.0	1,450	620	1,125
139	15.0	1,425	700	1,275
152	15.0	1,303	686	1,263
153	15.0	1,519	700	1,256
154	15.0	1,408	715	1,375
160	15.0	1,563	713	1,581
163	15.0	1,480	729	1,613
165	15.0	1,447	707	1,475
167	20.0	1,729	703	1,450
170	20.0	1,625	725	1,425
175	20.0	1,700	740	1,350
181	20.0	1,756	738	1,363
183	20.0	1,712	740	1,350
187	20.0	1,670	750	1,235
189	20.0	1,730	780	1,138

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
192	20.0	1,677	829	1,288
194	20.0	1,691	899	1,250
196	25.0	2,265	1,150	1,375
201	25.0	2,203	1,038	1,463
201	25.0	2,203	1,038	1,463
204	25.0	2,357	1,125	1,700
208	25.0	2,275	1,113	1,450
210	25.0	2,338	1,375	1,513
214	25.0	2,125	1,250	1,275
216	25.0	2,306	1,500	1,125
220	25.0	2,263	1,138	1,263
224	25.0	2,463	1,363	1,125
227	30.0	3,425	1,579	1,434
229	30.0	3,460	1,575	1,626
234	30.0	3,380	1,569	1,972
237	30.0	3,240	1,419	2,054
239	30.0	3,240	1,570	2,342
244	30.0	3,180	1,738	1,389
247	30.0	3,380	1,833	2,138
251	35.0	4,175	3,025	2,742
254	35.0	4,225	3,129	3,328
257	35.0	4,100	2,844	3,592
260	35.0	3,838	3,118	3,035
264	35.0	4,225	3,016	3,003

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
266	35.0	4,175	2,849	3,177
270	35.0	4,313	3,328	3,250
276	35.0	4,150	3,094	3,581
278	40.0	5,450	3,250	3,083
283	40.0	5,580	2,874	3,371
287	40.0	5,438	3,217	4,260
289	40.0	5,225	3,306	4,138
293	40.0	5,513	2,677	3,395
297	40.0	5,575	2,706	3,242
301	40.0	5,413	2,828	3,729
304	40.0	5,600	3,094	4,083
308	40.0	5,375	3,016	3,177

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพด่าง

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ค่าสภาพด่าง (มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
53	5.0	3,518	4,675	4,532
55	5.0	3,555	4,502	4,225
58	5.0	3,323	4,575	4,184
64	5.0	2,970	5,225	4,301
69	5.0	3,345	4,750	4,825
71	5.0	3,370	4,892	4,388
74	5.0	3,135	4,561	4,327
76	5.0	3,375	4,000	4,400
78	5.0	3,600	4,150	4,775
81	10.0	3,900	4,375	4,450
84	10.0	4,133	4,463	4,213
88	10.0	4,275	4,288	4,563
90	10.0	4,350	4,215	4,538
93	10.0	4,238	3,872	5,250
95	10.0	4,313	3,981	4,663
97	10.0	4,380	4,788	4,625
104	15.0	4,905	4,740	5,468
118	15.0	4,875	4,550	5,575
123	15.0	5,190	4,675	5,670
126	15.0	5,052	4,650	5,425
129	15.0	4,540	4,788	5,351
131	15.0	4,352	4,225	5,154
135	15.0	4,124	5,113	4,983
139	15.0	3,750	4,560	5,124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพด่าง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ค่าสภาพด่าง (มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
152	15.0	3,748	4,237	5,004
153	15.0	3,576	4,136	4,983
154	15.0	3,738	4,020	5,983
160	15.0	3,696	4,100	6,243
163	15.0	4,284	4,225	6,345
165	15.0	4,275	4,364	6,318
167	20.0	5,355	5,275	5,125
170	20.0	5,054	5,248	5,257
175	20.0	4,988	5,250	5,249
181	20.0	5,658	5,183	5,583
183	20.0	5,234	4,987	5,219
187	20.0	4,903	4,725	5,125
189	20.0	5,552	4,740	5,032
192	20.0	5,418	5,120	5,426
194	20.0	5,488	4,980	5,387
196	25.0	5,725	7,524	8,451
201	25.0	5,905	7,250	7,540
204	25.0	5,775	7,136	7,357
208	25.0	5,852	6,954	8,214
210	25.0	5,413	6,993	8,563
214	25.0	5,812	6,125	7,259
216	25.0	5,528	7,030	7,543
220	25.0	5,713	6,978	7,824
224	25.0	5,589	7,015	7,050

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพด่าง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ค่าสภาพด่าง (มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
227	30.0	6,350	7,983	6,345
229	30.0	6,375	7,864	6,174
234	30.0	6,347	7,514	6,345
237	30.0	6,395	7,025	6,980
239	30.0	6,942	8,115	7,864
244	30.0	6,342	7,563	7,581
247	30.0	6,808	7,674	7,953
251	35.0	6,255	8,557	8,151
254	35.0	6,325	8,114	9,324
257	35.0	6,255	7,154	9,587
260	35.0	5,992	8,250	8,634
264	35.0	6,746	9,105	8,987
266	35.0	6,255	8,725	8,300
270	35.0	6,591	9,314	8,345
276	35.0	6,523	9,125	8,654
278	40.0	7,575	8,540	8,250
283	40.0	7,538	8,230	8,785
287	40.0	6,912	8,300	8,878
289	40.0	7,052	8,685	8,980
293	40.0	7,542	8,250	8,125
297	40.0	7,415	8,244	8,375
301	40.0	6,920	8,567	8,530
304	40.0	7,587	8,050	8,872
308	40.0	7,012	8,125	8,942

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ค่าน้ำมันและไขมัน (มก./ล.)		
		น้ำเสียเข้าระบบ	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
22	2.5	2,455	1,129	903
37	2.5	2,535	1,153	899
51	2.5	2,446	1,120	849
52	5.0	2,675	1,122	735
80	5.0	2,751	1,149	752
81	10.0	3,688	741	902
103	10.0	3,584	713	841
104	15.0	3,849	1,009	1,406
152	15.0	4,062	1,099	1,454
165	15.0	3,986	1,023	1,440
166	20.0	5,409	1,092	1,277
194	20.0	5,245	1,057	1,237
195	25.0	5,393	1,335	1,487
224	25.0	5,527	1,304	1,521
225	30.0	6,772	2,883	2,616
250	30.0	6,854	2,936	2,631
262	35.0	7,683	4,275	3,859
277	35.0	7,985	4,360	3,908
285	40.0	8,838	4,890	3,770
308	40.0	8,952	4,834	3,781

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	ค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) **(มก./ล.)**		
		น้ำเสียเข้าระบบ	**ออกจากถังปฏิกิริยาที่** 1(3C)	**ออกจากถังปฏิกิริยาที่** 2(4C)
22	2.5	166.67	112.09	127.50
37	2.5	157.50	92.28	116.50
51	2.5	149.80	79.93	101.60
52	5.0	291.00	240.49	276.80
80	5.0	391.25	289.50	292.70
81	10.0	319.25	288.50	297.50
103	10.0	435.50	408.40	413.50
104	15.0	504.00	451.58	457.23
152	15.0	468.50	390.21	440.20
165	15.0	546.50	530.96	460.37
166	20.0	405.00	393.60	419.90
194	20.0	393.25	365.77	374.50
195	25.0	415.00	355.10	398.15
224	25.0	573.50	457.60	520.28
225	30.0	542.50	473.00	477.37
250	30.0	486.25	457.00	478.10
262	35.0	558.00	471.00	482.21
277	35.0	507.75	462.00	489.19
285	40.0	500.00	486.96	498.96
308	40.0	517.50	497.00	511.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	**ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.)**		
		น้ำเสียเข้าระบบ	**ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)**	**ออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)**
22	2.5	26.90	21.80	23.10
37	2.5	27.20	22.10	23.30
51	2.5	25.90	21.50	22.20
52	5.0	43.20	32.60	39.70
80	5.0	43.40	32.70	39.60
81	10.0	64.80	54.70	59.40
103	10.0	65.10	55.30	59.70
104	15.0	89.00	81.97	83.70
152	15.0	94.80	87.32	89.20
165	15.0	100.00	92.11	84.10
166	20.0	65.55	57.00	62.90
194	20.0	79.05	69.90	75.90
195	25.0	86.00	75.30	77.60
224	25.0	76.00	68.80	69.90
225	30.0	59.40	54.50	57.20
250	30.0	55.95	51.40	53.70
262	35.0	70.90	65.10	69.60
277	35.0	55.05	57.36	51.60
285	40.0	86.20	84.90	79.30
308	40.0	90.80	89.50	83.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
1	2.5	24	24		
4	2.5	36	36	152.54	152.54
11	2.5	60	48	461.54	336.84
12	2.5	125	120	99.84	80.00
14	2.5	132	125	75.43	166.40
15	2.5	137	132	273.60	132.00
16	2.5	156	144	171.05	132.47
17	2.5	161	156	286.95	513.22
19	2.5	252	240	310.20	208.51
20	2.5	204	192	331.71	177.29
21	2.5	228	216	312.87	307.81
23	2.5	240	228	375.00	427.50
25	2.5	264	240	240.00	205.71
27	2.5	384	360	348.99	308.48
29	2.5	444	432	307.91	292.48
30	2.5	504	480	329.63	308.68
32	2.5	528	504	364.14	341.93
33	2.5	624	576	430.34	390.77
34	2.5	672	648	463.45	439.62
35	2.5	1,200	1,104	827.59	748.98
36	2.5	1,087	1,090	605.01	601.32
37	2.5	1,219	1,200	720.99	695.65
40	2.5	1,236	1,122	730.93	650.43
41	2.5	1,092	1,080	583.96	571.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
43	2.5	1,092	1,080	570.53	562.21
44	2.5	1,104	1,092	556.45	543.55
45	2.5	1,380	1,260	695.56	627.18
46	2.5	1,280	1,200	716.69	668.52
47	2.5	880	760	419.85	360.02
48	2.5	1,140	1,140	558.28	549.93
49	2.5	1,260	1,152	620.08	557.87
50	2.5	1,280	1,200	625.92	584.51
51	2.5	1,280	1,200	553.63	520.16
53	5.0	1,760	3,060	544.37	786.87
54	5.0	2,320	2,500	664.49	683.94
55	5.0	1,820	2,940	521.28	804.31
56	5.0	2,200	3,260	743.24	1,089.09
57	5.0	1,688	2,700	496.54	829.65
58	5.0	2,200	3,260	743.24	1,089.09
60	5.0	2,200	3,200	681.21	947.55
61	5.0	3,173	2,101	881.89	624.94
64	5.0	2,500	2,560	642.19	636.54
69	5.0	2,820	2,060	726.87	506.60
70	5.0	2,180	2,300	531.71	551.82
71	5.0	2,968	2,040	729.78	499.39
74	5.0	2,660	2,780	669.18	694.31
75	5.0	2,420	3,132	572.24	734.87
76	5.0	3,044	3,188	742.44	767.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
76	5.0	3,044	3,188	742.44	767.08
77	5.0	2,520	3,380	608.25	781.50
78	5.0	3,060	3,120	746.34	748.56
81	10.0	4,080	4,460	571.60	606.99
84	10.0	5,440	6,580	740.53	831.45
90	10.0	6,880	6,500	767.84	743.88
92	10.0	5,400	5,780	662.17	711.31
93	10.0	5,560	6,740	737.50	781.61
95	10.0	5,440	5,700	701.21	685.05
97	10.0	5,344	7,324	615.88	869.11
104	15.0	6,000	6,980	585.86	625.86
118	15.0	7,800	7,840	622.43	630.72
123	15.0	3,252	3,420	754.95	841.61
126	15.0	5,228	4,500	591.16	469.56
129	15.0	4,084	3,132	561.96	468.51
131	15.0	3,736	3,820	415.86	426.33
152	15.0	4,760	5,760	455.32	596.13
153	15.0	6,108	7,372	549.84	680.71
154	15.0	8,283	9,890	674.31	743.17
160	15.0	8,579	8,605	629.59	662.13
163	15.0	7,180	6,380	637.28	595.96
165	15.0	7,086	7,623	637.92	738.18
167	20.0	14,143	11,829	827.44	913.57
170	20.0	13,890	13,980	793.07	774.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
173	20.0	11,278	11,550	699.51	693.51
175	20.0	9,850	10,180	690.49	571.59
177	20.0	10,072	9,270	671.63	588.92
181	20.0	13,000	13,140	847.09	767.99
183	20.0	13,600	15,600	786.91	975.99
186	20.0	15,060	15,260	868.31	881.57
187	20.0	13,050	12,850	735.01	714.89
188	20.0	14,278	13,030	858.83	798.77
189	20.0	13,360	13,820	825.30	846.40
192	20.0	13,780	13,040	835.76	835.20
194	20.0	14,280	14,000	870.47	881.72
195	25.0	9,935	10,324	480.77	500.80
197	25.0	17,617	14,508	844.73	703.94
199	25.0	13,951	12,579	675.08	610.19
200	25.0	18,421	17,349	866.30	822.61
203	25.0	17,295	17,011	803.91	799.55
204	25.0	18,645	16,345	831.52	739.87
206	25.0	20,322	18,669	893.40	832.60
207	25.0	18,048	18,702	873.35	907.27
208	25.0	19,617	19,850	865.63	885.09
210	25.0	16,739	14,661	730.62	650.60
211	25.0	21,180	20,329	924.13	895.85
213	25.0	18,456	17,330	805.56	769.04
214	25.0	21,181	19,927	933.79	904.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
216	25.0	21,633	20,815	956.49	933.69
217	25.0	20,478	19,541	893.82	867.13
219	25.0	18,450	16,750	846.60	774.46
220	25.0	17,930	17,755	810.07	807.60
222	25.0	21,150	19,250	937.13	861.68
224	25.0	21,840	19,920	978.93	902.99
225	30.0	22,067	22,466	813.80	822.96
227	30.0	21,285	20,059	821.29	778.19
229	30.0	24,525	22,341	918.97	839.04
231	30.0	23,520	23,331	863.21	862.10
232	30.0	24,908	23,502	941.12	891.06
234	30.0	22,836	20,724	789.35	723.74
236	30.0	23,758	22,579	884.35	850.67
237	30.0	22,078	22,069	837.03	844.54
239	30.0	25,063	24,254	933.91	912.20
240	30.0	22,154	20,493	827.42	773.21
242	30.0	22,960	22,630	858.50	854.99
243	30.0	24,384	22,932	894.42	870.24
245	30.0	23,452	23,195	920.65	930.17
246	30.0	21,033	20,984	828.59	840.42
248	30.0	23,295	22,099	917.01	884.00
250	30.0	20,382	19,563	810.89	792.93
251	35.0	26,192	24,497	878.60	827.67
253	35.0	23,718	22,532	780.16	764.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR ($kgCOD/m^3$-d)	Biogas Production (มล./วัน)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)	ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	ถังปฏิกิริยาที่ 2(4C)
255	35.0	25,598	23,136	842.76	771.67
256	35.0	22,565	24,221	722.63	796.74
258	35.0	30,029	28,931	952.01	954.36
259	35.0	28,155	26,889	903.87	910.25
261	35.0	27,821	25,349	878.98	843.03
262	35.0	23,553	23,106	740.15	756.71
264	35.0	26,889	26,864	840.31	884.95
266	35.0	28,516	26,159	908.87	884.74
267	35.0	25,395	23,659	833.51	805.42
269	35.0	27,346	25,772	875.02	877.11
271	35.0	26,491	23,539	840.85	794.54
273	35.0	24,597	23,229	787.33	777.10
275	35.0	25,894	25,031	842.28	859.23
277	35.0	25,672	23,770	829.21	798.99
278	40.0	30,628	29,738	874.25	876.08
280	40.0	34,800	30,180	983.77	889.79
282	40.0	35,470	33,995	976.87	968.10
283	40.0	30,900	28,415	890.88	840.36
285	40.0	30,105	28,335	854.04	819.21
286	40.0	31,015	27,263	827.90	754.95
288	40.0	34,695	29,158	910.39	796.55
290	40.0	30,485	31,130	788.85	835.39
292	40.0	32,515	31,430	840.48	857.60
294	40.0	33,450	33,050	894.60	910.84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	OLR (kgCOD/m^3-d)	Biogas Production (**มล./วัน**)		Biogas Yield (mLBiogas/gCOD remove)	
		ถังปฏิกิริยาที่ 1(3C)	**ถังปฏิกิริยาที่** 2(4C)	**ถังปฏิกิริยาที่** 1(3C)	**ถังปฏิกิริยาที่** 2(4C)
296	40.0	31,215	31,825	868.51	901.46
297	40.0	33,303	27,240	904.34	777.95
299	40.0	30,855	27,685	900.56	826.99
301	40.0	28,995	31,950	856.02	960.41
302	40.0	29,410	27,345	869.45	822.04
304	40.0	27,110	26,575	807.21	797.69
306	40.0	33,015	25,953	947.73	761.87
308	40.0	29,527	26,180	872.25	800.39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ธนวรรณ ติลกการย์ เกิดเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดพังงา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยี และการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย