

ค่าจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศ  
ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

นายกิตติธัช อัจศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

KINETIC PARAMETERS OF BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION  
OF OIL CONTAMINATED WASTEWATER

Mr. Kittitat Archsiri

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ค่าจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อย  
สลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

โดย

นายกิตติวิช อาจศิริ

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์)

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

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยวงค์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปธาน บรรจงปฐ)

กิตติธัช อาจศิริ : ค่าจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน. (KINETIC PARAMETERS OF BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF OIL CONTAMINATED WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 145 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์การเจริญเติบโต (Yield, Y) ของตะกอนจุลินทรีย์, ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ และ จลนพลศาสตร์ของ การผลิตแก๊สชีวภาพจาก การย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์มทด ลงระดับห้องปฏิบัติการในชุดถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากนมขาดมันเนยมีค่าซีโอดี 800 มิลลิกรัม-ซีโอดีต่อลิตรโดยประมาณ และทำให้ปนเปื้อนด้วยน้ำมันปาล์ม 0, 100, 500, 2,000, 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) มีผลให้ค่าyieldลดลงจาก 0.11 เป็น 0.085 กรัม-เซลล์ซีโอดีต่อกรัม -ซีโอดี การผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด 75.89, 64.76 และ 68.47 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณมากที่สุด 575, 580 และ 525 มิลลิลิตร ในการทดลองทั้ง 3 ครั้งตามลำดับ ส่วนระยะปรับตัวของจุลินทรีย์ของทั้ง 3 การทดลองสามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ซึ่งแปรผันตามฟังก์ชันลอการิทึมของความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีพบว่ามีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบ 52.94±8.64 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 47.06±8.65 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆ 0.008±0.018 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบไม่เชิงเส้นของ Monod ด้วยโปรแกรม SPSS พบว่าค่าคงที่ได้คือ ค่า  $k_m = 1.84 \pm 0.19$  ต่อวัน และค่า  $K_s = 1,092 \pm 452$  มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้รับจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่มีประโยชน์ในการนำไปใช้ควบคุม ดำเนินการ และออกแบบระบบ บำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันในระดับอุตสาหกรรมได้ต่อไปในอนาคต

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

## 5270220821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : OIL CONTAMINATED WASTEWATER / ANAEROBIC DIGESTION / BIOGAS / KINETIC PARAMETERS

KITTITAT ARCHSIRI : KINETIC PARAMETERS OF BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF OIL CONTAMINATED WASTEWATER.  
ADVISOR: ASST.PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 145 pp.

This research was to study the microbial growth yield coefficients (yield,  $Y$ ) in anaerobic digestion of palm oil contaminated wastewater, the effect of palm oil contaminated wastewater to biogas production and its kinetic studies were presented in this work. A lab scale batch reactor using approximate 800 mg-COD/L non fat milk synthesized wastewater, was contaminated with 0, 100, 500, 2,000, 10,000 and 50,000 mg/L palm oil as co-substrate. The result revealed that the adding of sodium dodecyl sulfate (SDS) could be reduced the yield coefficients from 0.11 to 0.085 g-CellCOD/g-COD. Anaerobic digestion of 2,000 mg/L palm oil contaminated wastewater, has the maximum COD removal rate are 75.89, 64.76 and 68.47 % approximately, could be produced a maximum biogas are equal to 575, 580 and 525 mL in experiment 1, 2 and 3 approximately, The lag period, can be explained base on mathematics equations, direct varies to the logarithm of palm oil concentrations in all experiments. In addition, the biogas composition analyzed by gas chromatography indicate that the produced biogas in this research has the methane content  $52.94 \pm 8.64$  %, carbon dioxide content  $47.06 \pm 8.65$  % and the other gas  $0.008 \pm 0.018$  %. Kinetic parameters were determined using a non-linear equation (Monod) by SPSS program. The  $k_m$  value =  $1.84 \pm 0.19$  per day and the  $K_s$  value is  $1,092 \pm 452$  mg/L. This work proves that important baseline data for the operation and design of industrial oily wastewater treatment plant in the future.

Department : ... Environmental Engineering ...      Student's Signature .....

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

Academic Year : ... 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลา การทำวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน อ.ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์ อ.ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์ และ ดร.ปธาน บรรจงปรุ ที่ได้ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ประสาทวิชาให้ความรู้ทางวิชาการ ตลอดจนคำปรึกษาแนะนำต่างๆที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และ นักวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุน ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวข้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้นมาใช้ในงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกอาจศิริทุกคน ที่ให้การ สนับสนุน ค่าใช้จ่ายในการเล่าเรียน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สอนให้รู้ว่า “เกียรติภูมิจุฬาฯ คือเกียรติแห่งการรับใช้ประชาชน”

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียปนเปื้อนสารประเภทไขมัน.....	4
2.1.1 กรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ).....	5
2.1.2 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารประเภทไขมันในน้ำเสียชุมชน.....	6
2.1.3 ศักยภาพของสารประเภทไขมันในการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	6
2.2 การย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	7
2.2.1 หลักการเบื้องต้นของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	7
2.2.2 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	9
2.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	13
2.2.4 การย่อยสลายแบบไร้อากาศของไขมัน.....	15
2.3 แก๊สชีวภาพ.....	16
2.3.1 ความหมายของแก๊สชีวภาพ.....	16
2.3.2 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ.....	16
2.3.3 ประโยชน์ของแก๊สชีวภาพ.....	18
2.4 สมดุลมวลและจลนพลศาสตร์ของระบบชีวภาพ.....	19
2.4.1 สมดุลมวลของระบบชีวภาพ.....	19

2.4.2 การคำนวณหาปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากการย่อยสลาย น้ำมันพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทางทฤษฎี.....	20
2.4.3 สมการของโมนอด.....	22
2.5 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	30
3.2 การออกแบบงานวิจัย.....	32
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	35
3.3.2 การศึกษาลักษณะตะกอนจุลินทรีย์.....	37
3.3.3 การหาค่าyield (Y) .....	37
3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่าyield ของตะกอนจุลินทรีย์.....	38
3.3.5 การเริ่มเดินระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศของ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	38
3.3.6 การสร้างกราฟด้วยสมการของ โมนอด (Monod) แบบชะลอการเจริญเติบโตด้วย ซับสเตรท (Substrate inhibition).....	40
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
4.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์.....	43
4.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลาย แบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	44
4.3.1 การศึกษาค่าyield ของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบที่ไม่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS).....	45
4.3.2 การศึกษาค่าyield ของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS).....	46



4.4 การศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม.....	49
4.4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียเริ่มต้นและสุดท้าย.....	49
4.4.2 การหาค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว ( $K_s$ ) .....	50
4.4.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ.....	60
4.5 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ความสำคัญด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้งาน.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	145

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน.....	7
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจากของเสียแต่ละชนิด.....	17
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและแก๊สจากหลุมฝังกลบ.....	17
ตารางที่ 2.4	เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสีย ปนเปื้อนไขมันประเภทต่างๆ.....	29
ตารางที่ 3.1	ปริมาณสารที่เติมต่อ 1 แบตช์ (300 มิลลิลิตร) .....	35
ตารางที่ 3.2	วิธีมาตรฐานหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย.....	36
ตารางที่ 3.3	ความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียและ แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้.....	39
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น (Biogas Lab).....	41
ตารางที่ 4.2	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น (Yield Lab).....	43
ตารางที่ 4.3	ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์.....	44
ตารางที่ 4.4	ค่ายึดติดที่วิเคราะห์ได้.....	48
ตารางที่ 4.5	อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 1.....	60
ตารางที่ 4.7	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 2.....	61
ตารางที่ 4.8	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 3.....	61
ตารางที่ 4.9	สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ.....	62
ตารางที่ 4.10	การเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์กับงานวิจัยก่อนหน้า.....	64
ตารางที่ ก.1	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีของนมขาดมันเนย.....	74
ตารางที่ ก.2	ข้อมูลดิบค่า MLSS ของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น.....	75
ตารางที่ ก.3	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS).....	76
ตารางที่ ก.4	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีของน้ำมันปาล์ม 0-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	77
ตารางที่ ก.5	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีของน้ำมันปาล์ม 2,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	78
ตารางที่ ก.6	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีของน้ำมันปาล์ม 20,000-200,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	79

ตารางที่ ข.1	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีการเติม SDS.....	81
ตารางที่ ข.2	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เติม SDS.....	83
ตารางที่ ข.3	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีการเติม SDS.....	85
ตารางที่ ข.4	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เติม SDS.....	87
ตารางที่ ข.5	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ไม่มีการเติม SDS.....	89
ตารางที่ ข.6	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร เติม SDS.....	91
ตารางที่ ข.7	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ไม่มีการเติม SDS.....	93
ตารางที่ ข.8	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร เติม SDS.....	95
ตารางที่ ข.9	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ไม่มีการเติม SDS.....	97
ตารางที่ ข.10	ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร เติม SDS.....	99
ตารางที่ ข.11	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 1.....	101
ตารางที่ ข.12	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 2.....	102
ตารางที่ ข.13	ข้อมูลดิบค่าซีโอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 3.....	103
ตารางที่ ข.14	ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของ ชุดการทดลองครั้งที่ 1.....	104
ตารางที่ ข.15	ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของ ชุดการทดลองครั้งที่ 2.....	105

	หน้า	
ตารางที่ ข.16	ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของ ชุดการทดลองครั้งที่ 3.....	106
ตารางที่ ข.17	ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 1.....	107
ตารางที่ ข.18	ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 2.....	109
ตารางที่ ข.19	ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 3.....	112
ตารางที่ ค.1	รายละเอียดการคำนวณปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เติม.....	116
ตารางที่ ค.2	รายละเอียดการคำนวณปริมาณธาตุอาหาร.....	118
ตารางที่ ค.3	รายละเอียดการคำนวณปริมาณฟอสเฟตบัพเฟอร์.....	119
ตารางที่ ง.1	สรุปสถานะของเครื่องในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี...	124
ตารางที่ ง.2	สรุป Retention time ของโมเลกุลแก๊สในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี.....	125

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	โครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของสารประเภทไขมัน..... 4
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของกรดไขมัน..... 5
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวบางชนิด..... 6
ภาพที่ 2.4	กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ..... 8
ภาพที่ 2.5	วิธีการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของการสร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์..... 13
ภาพที่ 2.6	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย..... 14
ภาพที่ 2.7	วิธีการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของโมเลกุลแอลซีเอฟเอในขั้นตอนไฮโดรไลซิสการสร้างกรด และการสร้างอะซิเตท..... 15
ภาพที่ 2.8	การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ..... 18
ภาพที่ 2.9	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของโมนอด..... 23
ภาพที่ 2.10	ลักษณะกราฟของโมนอดที่มีการชะลอการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรท..... 24
ภาพที่ 3.1	ชุดอุปกรณ์เลี้ยงเชื้อแบบแบตช์ 1 ชุด..... 31
ภาพที่ 3.2	ตัวอย่างการสร้างกราฟแสดงการประมาณค่าyieldของจุลินทรีย์..... 33
ภาพที่ 3.3	ตัวอย่างการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สชีวภาพกับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี..... 34
ภาพที่ 3.4	ตัวอย่างการสร้างกราฟสมการของโมนอดแบบธรรมดา..... 34
ภาพที่ 3.5	ตัวอย่างการสร้างกราฟสมการของโมนอด แบบชะลอการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรท..... 34
ภาพที่ 4.1	ตะกอนจุลินทรีย์จากบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด..... 44
ภาพที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีทั้งหมด ค่าซีไอดีละลายน้ำและค่าเซลล์ซีไอดีกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา..... 45
ภาพที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์ซีไอดีกับค่าซีไอดีละลายน้ำเพื่อกำหนดค่า yield ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายที่ไม่มีการเติม SDS..... 46

	หน้า	
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีทั้งหมด ค่าซีไอดีละลายน้ำและค่าเซลล์ซีไอดีกับ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพของทุกๆแบคทีเรียแบบมีการเติม SDS.....	47
ภาพที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์ซีไอดีกับค่าซีไอดีละลายน้ำเพื่อการกำหนดค่า ยี่ลด์ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายที่มีการเติม SDS.....	48
ภาพที่ 4.6	ความสัมพันธ์ผลต่างซีไอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง.....	49
ภาพที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง.....	50
ภาพที่ 4.8	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มครั้งที่ 1.....	51
ภาพที่ 4.9	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มครั้งที่ 2.....	52
ภาพที่ 4.10	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์มครั้งที่ 3.....	52
ภาพที่ 4.11	ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง.....	53
ภาพที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีไอดีกับความเข้มข้น น้ำมันปาล์มในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง.....	54
ภาพที่ 4.13	ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์ในการทดลองครั้งที่ 1.....	54
ภาพที่ 4.14	ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์ในการทดลองครั้งที่ 2.....	55
ภาพที่ 4.15	ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์ในการทดลองครั้งที่ 3.....	55
ภาพที่ 4.16	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	56
ภาพที่ 4.17	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	56

ภาพที่ 4.18	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	57
ภาพที่ 4.19	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	57
ภาพที่ 4.20	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	58
ภาพที่ 4.21	การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	58
ภาพที่ 4.22	การสร้างกราฟโมโนด.....	60
ภาพที่ ก.1	กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของนมขามันเนย.....	74
ภาพที่ ก.2	กราฟมาตรฐานค่า MLSS ของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น.....	75
ภาพที่ ก.3	กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS).....	76
ภาพที่ ก.4	กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 0-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	77
ภาพที่ ก.5	กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 2,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร....	78
ภาพที่ ก.6	กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 20,000-200,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	79
ภาพที่ ค.1	โปรแกรม Phosphate Buffer Calculator ที่พัฒนาขึ้นโดย Dave Robinson.	120
ภาพที่ ง.1	สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	124
ภาพที่ ง.2	โครมาโตแกรมของอากาศ.....	126
ภาพที่ ง.3	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1.....	127
ภาพที่ ง.4	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2.....	128
ภาพที่ ง.5	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3.....	129
ภาพที่ ง.6	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1.....	130
ภาพที่ ง.7	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2.....	131

ภาพที่ ง.8	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3.....	132
ภาพที่ ง.9	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1.....	133
ภาพที่ ง.10	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2.....	134
ภาพที่ ง.11	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3.....	135
ภาพที่ ง.12	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1.....	136
ภาพที่ ง.13	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2.....	137
ภาพที่ ง.14	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3.....	138
ภาพที่ ง.15	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1.....	139
ภาพที่ ง.16	โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2.....	140
ภาพที่ ง.17	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น Shimadzu-2010 ประเทศญี่ปุ่น.....	142
ภาพที่ ง.18	ชื่อรุ่นของเครื่อง และเครื่องหมายทางการค้า.....	143
ภาพที่ ง.19	ช่องใส่สาร (Injection port).....	143
ภาพที่ ง.20	อุปกรณ์ใส่สารแบบอัตโนมัติ (Auto injector).....	144
ภาพที่ ง.21	เข็ม GC สำหรับฉีดแก๊สตัวอย่าง.....	144



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันและไขมันทั้งน้ำเสียชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตน้ำมันพืช โรงงานผลิตอาหาร และโรงฆ่าสัตว์ มักพบปัญหาสำคัญในการกำจัดน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย เนื่องจากน้ำมันและไขมันจะแผ่ปกคลุมผิวหน้าน้ำ ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถละลายสู่น้ำได้ ก่อให้เกิดภาวะขาดออกซิเจน เกิดกลิ่น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบการบำบัดน้ำเสียลดลง นอกจากนี้ในเรื่องของการบำบัดน้ำเสียแล้ว พบว่าน้ำมันและไขมันในน้ำเสียยังก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม กล่าวคือถ้าไขมันและไขมันปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมากจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดสภาพไม่นาดู (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) และขวางกั้นการซึมผ่านของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้น และยังสามารถก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียตามมาได้ (Mongkolthanaruk และ Dharmsthiti, 2002)

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนจะมีการบำบัดขั้นต้น (Preliminary treatment) ด้วยวิธีทางกายภาพ ซึ่งในปัจจุบันถูกพิจารณาว่าไม่เพียงพอถ้าพบว่ามีน้ำมันและไขมันนั้นอยู่ในรูปแบบที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพจึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดน้ำมันและไขมันด้วย กระบวนการย่อยสลายให้กลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงด้วยจุลินทรีย์ (Mohamed และคณะ, 2004) และการบำบัดทางชีวภาพที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ การย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) มีความหมายคือ การเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียหรือในสลัดจ์ได้แก่สเม็นเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน สร้างความมั่นคงทางพลังงานของประเทศในยุคที่พลังงานเป็นสิ่งที่ต้องการสูง และราคาแพงอย่างมากในปัจจุบัน และเนื่องจาก การย่อยสลายแบบไร้อากาศ มีวิธีการย่อยสลายที่ซับซ้อน ยากต่อการทำความเข้าใจ การออกแบบและการดำเนินการให้ถูกต้องและเหมาะสม การศึกษาทางจุลชีววิทยาจึงมีความสำคัญในการพิจารณาเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานในภาคสนามได้ กล่าวคือ ใช้ค่าจลนพลศาสตร์ในการประเมินปริมาณอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย ฯลฯ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้จะส่งผลต่อวิธีการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัด และระยะเวลา เป็นต้น (ธีระ เกรอต, 2539)

จากปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดจึงเป็นแรงจูงใจให้ผู้วิจัยต้องการศึกษาระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การ

เจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ ผลของ ความเข้มข้นของน้ำมัน ปาล์ม ต่ออัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความสัมพันธ์การเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
2. ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มในน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของ การผลิตแก๊สชีวภาพ การย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นและตะกอนจุลินทรีย์
  - 1.1 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นจากนมขาดมันเนยถูกใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน และทำให้ปนเปื้อนด้วยน้ำมัน ปาล์มที่ความเข้มข้น 0, 100, 500, 2,000 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ ค่า TCOD SCOD MLSS MLVSS และ pH ตามวิธีของออร์ทัย ซวาลภาฤทธิ์ (2545) และวิเคราะห์ ค่า ORP ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (APHA, AWWA and WPCF, 2005)
  - 1.2 หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับจากบริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ทำการวิเคราะห์ค่า MLSS ค่า MLVSS และ pH ตามลำดับ
2. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
  - 3.1 เริ่มเดินระบบกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในชุดการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาค่าyield ของตะกอนจุลินทรีย์
  - 3.2 วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่าyield ของตะกอนจุลินทรีย์

4. การศึกษาค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate;  $\mu_m$ ), ค่าคงที่การอิ่มตัว (Half saturation constant;  $K_s$ ) ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
  - 4.1 เริ่มเดินระบบกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในชุดการทดลองแบบแบตช์ของถัง 6 ชุดการทดลอง รวมทั้งวิเคราะห์ค่า TCOD SCOD MLSS MLVSS และ pH ตามวิธีของอรรถัย ขวาลภาฤทธิ์ (2545) และวิเคราะห์ค่า ORP ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (APHA, AWWA and WPCF, 2005) และวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)
  - 4.2 วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองและนำไปสร้างกราฟด้วยสมการของโมนอด (Monod) เพื่อหาค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด และค่าคงที่การอิ่มตัว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

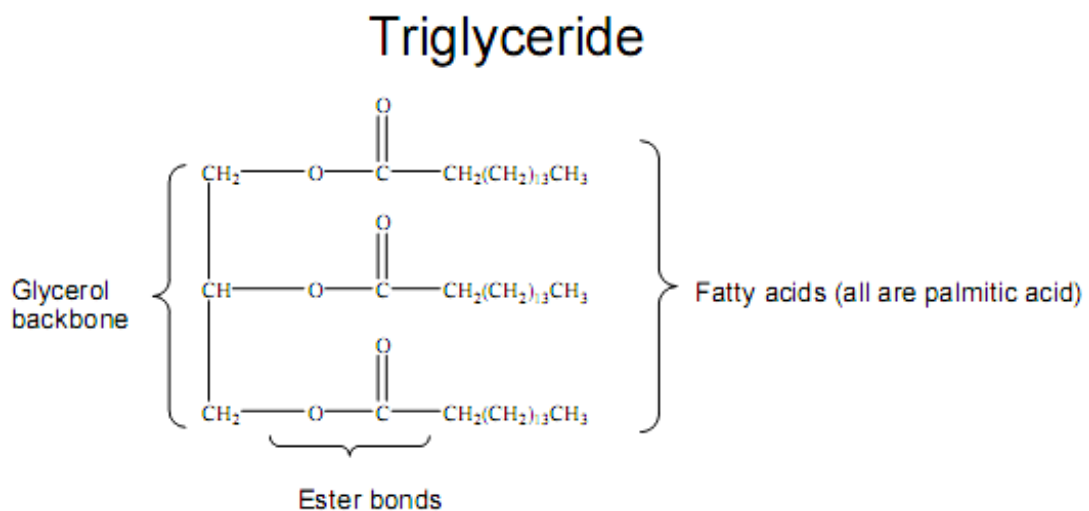
1. ทราบผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำมันพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ
2. ทราบข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปปรับใช้ในการ ควบคุมและดำเนินการใน กระบวนการ บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ปนเปื้อนน้ำมันพืชต่อไปได้ในอนาคต

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียปนเปื้อนสารประเภทไขมัน

สารประเภทไขมัน หรือลิพิด คือสารชีวภาพที่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม และเมทานอล แต่ละลายน้ำได้น้อยมาก พบได้ในเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นแหล่งพลังงานสะสมที่สำคัญของร่างกาย (สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพณิชยกิจ, 2551) โดยไขมันถูกระบุว่าเป็นน้ำมัน ไขมัน และกรดไขมัน ซึ่งพบว่าเป็นสารอาหารที่มีอยู่ในธรรมชาติ หรือ สารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้น (Chipasa และ Medrzycka, 2006) หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้น้ำมันและไขมันเป็นกลุ่มย่อยของลิพิดที่มีหมู่แอลกอฮอล์ (กลีเซอรอล) สร้างพันธะแบบเอสเทอร์ (Ester bond) กับกรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ) 3 โมเลกุล (Alves และคณะ, 2009) แสดงดังภาพที่ 2.1 โดยสารประเภทไขมันเมื่อถูกย่อยสลายแล้วได้เป็นอนุพันธ์ของไขมัน คือกรดไขมัน (Fatty acid) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

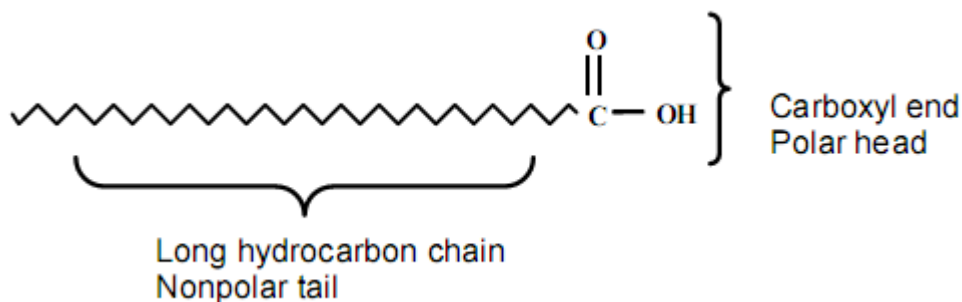


ภาพที่ 2.1: โครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของสารประเภทไขมัน

ที่มา: Schmalz และ Kerrigan, 2003

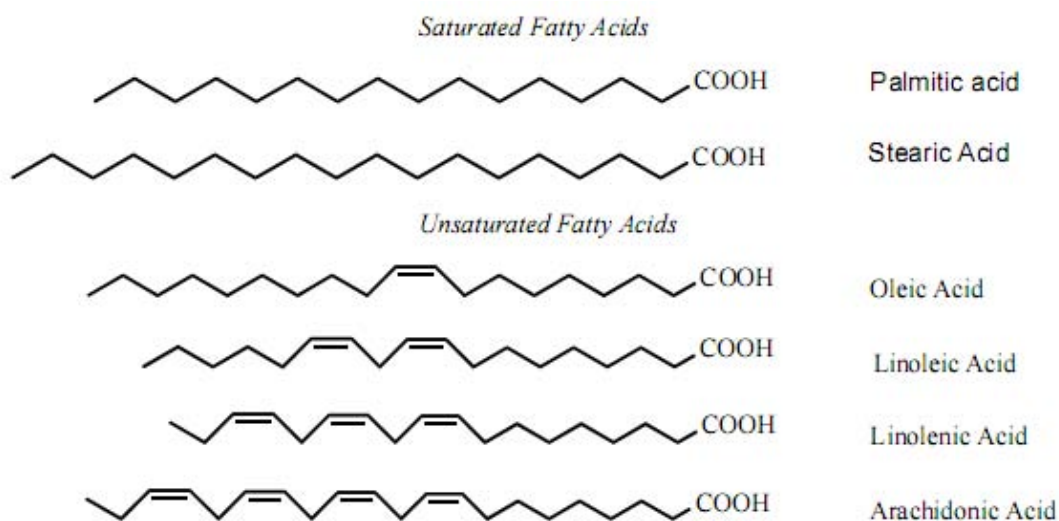
### 2.1.1 กรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ)

กรดไขมัน หรือ กรดไขมันสายยาว คือ กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ชนิดหนึ่งที่มีส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบแอลิฟาติก (Aliphatic) สายยาว กรดไขมันจึงมีสมบัติเป็นสารแอมฟิแพติก (Amphipathic substance) คือมีส่วนที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำคือ สายไฮโดรคาร์บอนอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 2.2 โดยพบว่ากรดไขมันเป็นอนุพันธ์ของเอสเทอร์ที่ได้รับมาจาก น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และขี้ผึ้ง (Wax) เป็นต้น (International Union of Pure and Applied Chemistry; IUPAC, 2011) กรดไขมันส่วนใหญ่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ มีความยาวคิดตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 12-24 และมีโมเลกุลเป็นสายตรงไม่มีแขนง เรามักจะไม่พบว่ามีการไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นจำนวนคี่ เนื่องจาก การสังเคราะห์กรดไขมันเกิดจากการเชื่อมต่อของสารตั้งต้นที่มีคาร์บอนเป็นจำนวนคู่ กรดไขมันหลายชนิดจากพืชและสัตว์อยู่ในรูปที่ไม่อิ่มตัว คือมีพันธะคู่ (Double bond) เรียกกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) และเรียกกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ว่า กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) แสดงดังภาพที่ 2.3 (สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพนิตขยกิจ, 2551)



ภาพที่ 2.2: โครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของกรดไขมัน

ที่มา: Schmalz และ Kerrigan, 2003



ภาพที่ 2.3: โครงสร้างโมเลกุลของ กรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวบางชนิด  
ที่มา: Schmalz และ Kerrigan, 2003

### 2.1.2 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารประเภทไขมันในน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมการประกอบอาหาร (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ซึ่งพบว่าน้ำเสียในห้องครัวเป็นแหล่งกำเนิดหลักของน้ำเสียประเภทนี้ โดยของเสียจากห้องครัวจะมีน้ำมันและไขมันเป็นส่วนประกอบอยู่ 14-36 เปอร์เซ็นต์ ย่อยสลายมาจากน้ำมันพืชและไขมันจากสัตว์ (Quemeneur และ Marty, 1993) โดยน้ำเสียชุมชนที่ยังไม่ได้รับการบำบัดโดยทั่วไปมีปริมาณน้ำมันและไขมันอยู่ในช่วง 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Metcalf และคณะ, 2003) และจากร้านอาหารทั่วไป หรือร้านอาหารภายในโรงแรมจะพบปริมาณ น้ำมันและไขมันอยู่ในช่วง 14-38,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) นอกจากนี้ยังพบว่าก่อให้เกิดปัญหาน้ำมันและไขมันปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมาก โดยอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดสภาพไม่น่าดูและยังขวางกั้นการซึมผ่านของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียตามมาได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

### 2.1.3 ศักยภาพของสารประเภทไขมันในการผลิตแก๊สชีวภาพ

ของเสียประเภทไขมันจัดเป็นชั้นสเตรทในอุดมคติสำหรับการผลิตแก๊สมีเทน กล่าวคือ การย่อยสลายของแก๊สมีเทนตามทฤษฎีจะผลิตแก๊สชีวภาพที่มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารประกอบประเภทโปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต (Alves และคณะ, 2009) จากตารางที่ 2.1 แสดงถึง

ปริมาณสารประเภทไขมันสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เท่ากับ 1.425 ลิตรต่อกรัม ซึ่งมีปริมาณมากกว่าทั้งสารประเภทโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตที่ผลิตได้ 0.921 และ 0.830 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ ขณะที่เปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากกลุ่มประเภทไขมันก็มีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 69.5 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือสารประเภทโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต 68.8 และ 50.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1: ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน

Component	Methanogenic reaction	Biogas (lg <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> (%)
Lipids	$C_{22}H_{42}O_2 + 24.5H_2O \rightarrow 34.75CH_4 + 15.25CO_2$	1.425	69.5
Carbohydrates	$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$	0.830	50.0
Proteins	$C_{12}H_{24}O_3N_4 + 14.5H_2O \rightarrow 8.25CH_4 + 3.75CO_2 + 4NH_4^+ + 4HCO_3^-$	0.921	68.8

ที่มา: Alves และคณะ, 2009

## 2.2 การย่อยสลายแบบไร้อากาศ

### 2.2.1 หลักการเบื้องต้นของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

การย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) หมายถึง การเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียหรือในสลัดจ์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมักจะหมายถึง การย่อยสลายแบบไร้อากาศนั่นเอง ซึ่งผลผลิตสุดท้ายจะได้เป็นแก๊สมีเทนเสมอ (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2546) ซึ่งการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทนภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศที่สามารถช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogen) และกลิ่น (Salminen และ Rintala, 2002)

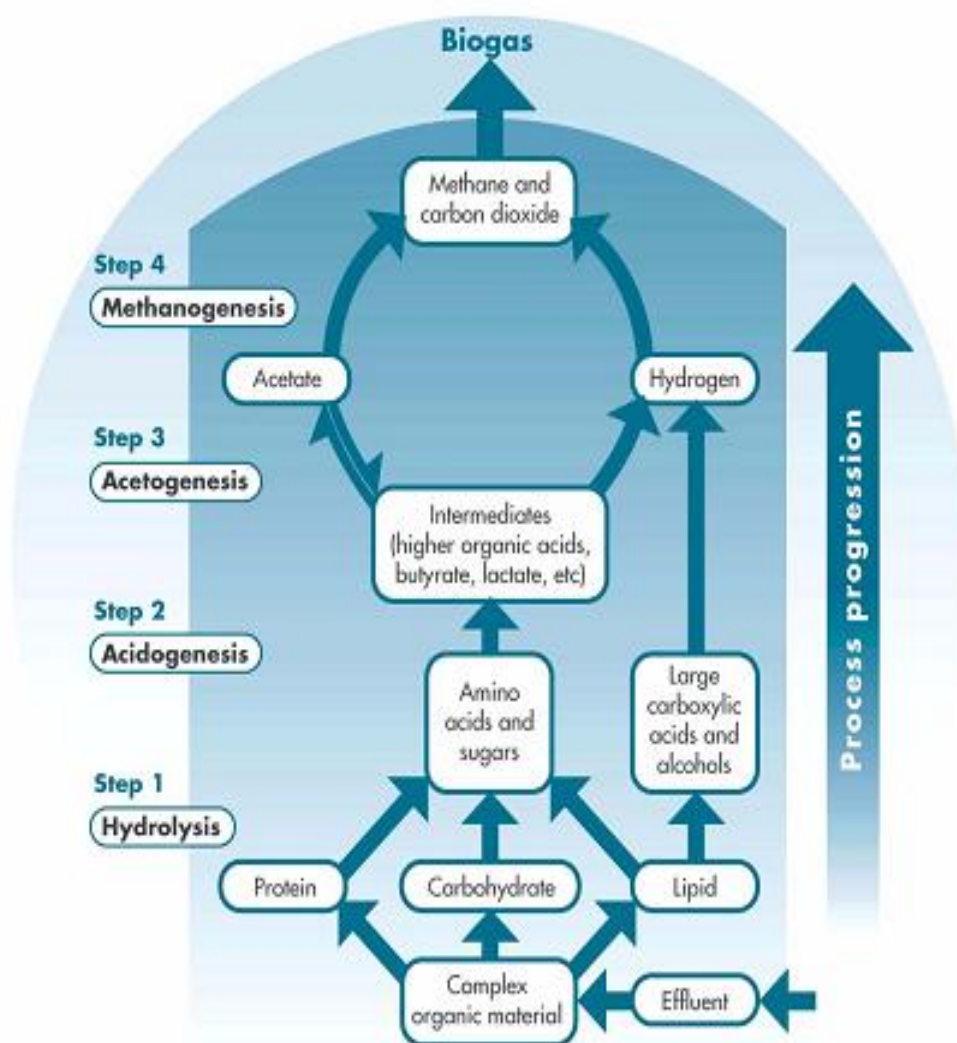
กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศประกอบด้วย 4 ขั้นตอน เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามลำดับ (ภาพที่ 2.4) ดังนี้ (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2546 )

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันสายยาว ตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายสารดังกล่าว

2. การสร้างกรด (Acidogenesis) ผลผลิตจากขั้นตอนแรกจะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริก เป็นต้น และผลิตแก๊สไฮโดรเจน กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย กระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก

3. การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) แบคทีเรียสร้างอะซิเตทมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน โดยแบคทีเรียสร้างอะซิเตทจะย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็น กรดอะซิติก และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4. การสร้างแก๊สมีเทน (Methanogenesis) แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจน ไปเป็นแก๊สมีเทน ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด และเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่ได้แก๊สมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย



ภาพที่ 2.4: กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ  
ที่มา: Wheatley, 1997

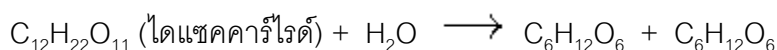


## 2.2.2 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

เพื่อให้แน่ใจว่าการออกแบบและการใช้ประโยชน์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีความถูกต้องจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจจุลชีววิทยาและชีวเคมีของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Lema และ Omil, 2001) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนของการย่อยสลายแบบไร้อากาศทั้ง 4 ขั้นตอน ในแง่ของจุลชีววิทยาและชีวเคมี

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนของกระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน สารเหล่านี้จะถูกทำให้แตกสลายไปเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) ด้วยเอนไซม์ที่หลั่งออกมาจากเซลล์ (Extracellular enzyme) ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ ตัวอย่างของเอนไซม์ที่หลั่งออกมาจากเซลล์ได้แก่ เซลลูเลส อะไมเลส โปรตีเอส และไลเปส เป็นต้น สารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส จะถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) เช่น กลูโคส กาแล็กโตส ไซโทส และอะราบิโนส เป็นต้น (Elefsiniotis และ Oldham, 1994) สารประเภทโปรตีนถูกทำให้แตกสลายเป็นกรดอะมิโน เปปไทด์ และ แอมโมเนีย เป็นต้น (Elefsiniotis และ Oldham, 1994) ส่วนสารประเภทไขมันจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันชนิดสายยาวและสั้น และกลีเซอรอล (Glycerol) (Pavlostathis และ Giraldo-Gomez, 1991)

ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารอินทรีย์บางชนิด

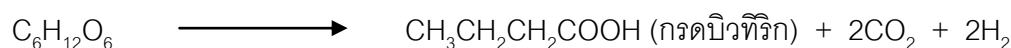
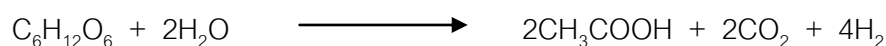


กลุ่มแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนนี้ได้แก่กลุ่ม ไฮโดรไลติก แบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) และเฟอร์เมนเททีฟ แบคทีเรีย (Fermentative bacteria) โดยทั้งสองกลุ่มนี้เป็นแบคทีเรียที่เจริญในสภาวะไร้อากาศชนิดเด็ดขาด (Obligate anaerobes) และเจริญได้ทั้งในสภาวะมี/ไม่มีอากาศ (Facultative anaerobes) ตัวอย่างของแบคทีเรียในทั้งสองกลุ่มได้แก่ *Clostridium* sp. และ *Micrococci* sp. ผลิตเอนไซม์ไลเปสย่อยสลายไขมัน *Bacteroides* sp., *Butyrivibrio* sp., *Clostridium* sp., *Fusobacterium* sp., *Selenomonas* sp. และ *Streptococcus* sp. ผลิตเอนไซม์โปรตีเอสย่อยสลายโปรตีน เป็นต้น โดยพบว่าปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นมีประมาณ 40 – 50 เปอร์เซ็นต์ (McInerney, 1988)

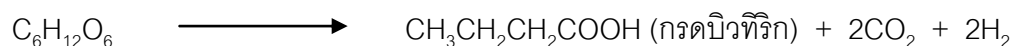
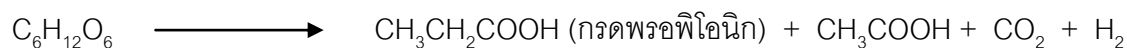
2. การสร้างกรด (Acidogenesis) ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิส เช่น น้ำตาล กรดไขมันสายยาว และกรดอะมิโน จะถูกใช้เป็นซับสเตรทเพื่อผลิตกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดพรอปิโอนิก กรดบิวทีริก เป็นต้น (Kalyuzhnyi และคณะ, 2000) ซึ่งจะเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนของระบบ แสดงดังปฏิกิริยา (มันลิน ตันกุลเวศม์, 2542 )

ปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนการสร้างกรด

ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ



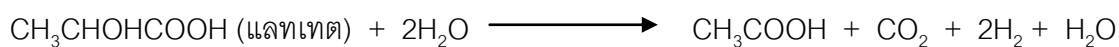
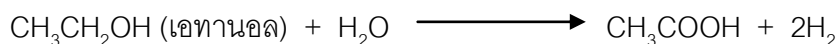
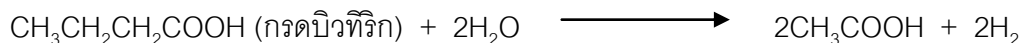
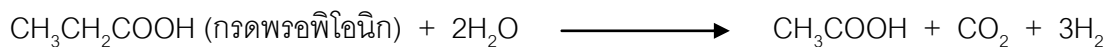
ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนสูง



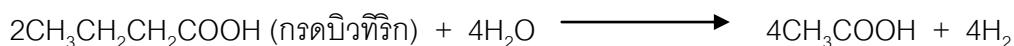
กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ ซึ่งในขั้นตอนการสร้างกรดของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ กรดจะถูกผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนเด็ดขาด (Obligate anaerobes) แบคทีเรียที่มีบทบาทก็คือ *Clostridium* sp. ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ ใช้สารอาหารได้หลากหลาย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น กรดบิวทีริก กรดอะซิติก เอทานอล อะซิโตน เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีแบคทีเรีย *Propionibacterium* sp. สร้างกรดพรอปิโอนิก (มันลิน ตันกุลเวศม์, 2546) ซึ่งในขั้นตอนการสร้างกรดนี้จะเกิดเซลล์แบคทีเรียใหม่ที่มีปริมาณน้อยกว่าในขั้นตอนไฮโดรไลซิส

3. การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญในขั้นตอนนี้ได้แก่ (ดัดแปลงจาก Sekiguchi และคณะ, 2001)

ปฏิกิริยาอะซิโตเจนิค (Acetogenic reaction)



ปฏิกิริยาซินโทรฟิก (Syntrophic reaction)



เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังกล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้จึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นกรดอะซิติกโดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกก่อน ซึ่งได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกอย่างเดียว (Homoacetogenic bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา ตัวอย่างของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียในสกุล *Acetobacterium* sp. และ *Clostridium* sp. เป็นต้น ซึ่งแบคทีเรียในสกุล *Clostridium* sp. พบอยู่ที่ในกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก เพราะเนื่องมาจากแบคทีเรียสกุลนี้มีเมตาบอลิซึมที่

หลากหลาย

- แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ -Producing Acetogenic Bacteria)

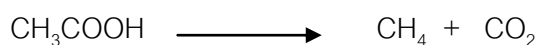
แบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทน โดยพบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้จะอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนแบบ Syntrophy คือให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง

กล่าวคือแบคทีเรียสร้างกรดจะสร้างอาหารให้กับจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทน โดยจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนก็ช่วยทำลายแก๊สไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างกรด โดยตัวอย่างของแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้แก่แบคทีเรียในสกุล *Synthrophomonas* sp. และ *Synthrophobacter* sp. เป็นต้น (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2546 )

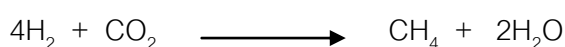
4. การสร้างแก๊สมีเทน (Methanogenesis) จุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทน (Methanogen) เป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศชนิดดีดขาด ไม่ทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอาหารประมาณ 10 ชนิด ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ฟอर्मेट เมทานอล เมทิลลาไมด์ ไดเมทิลลาไมด์ ไตรเมทิลลาไมด์ เมทิลเมอร์เซปแทน ไดเมทิลซัลไฟด์ และอะซิเตต สารอาหารอื่นนอกจากนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่นกรดบิวทิริก จุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนจะไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ โดยภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของวิธีการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของการสร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ในขั้นตอนนี้มีจำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2546 )

จุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักตามประเภทของสารอาหารที่ใช้ได้แก่

- เมทาโนเจนที่ใช้อะซิเตต (Obligate acetoclastic methanogen) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการดังนี้

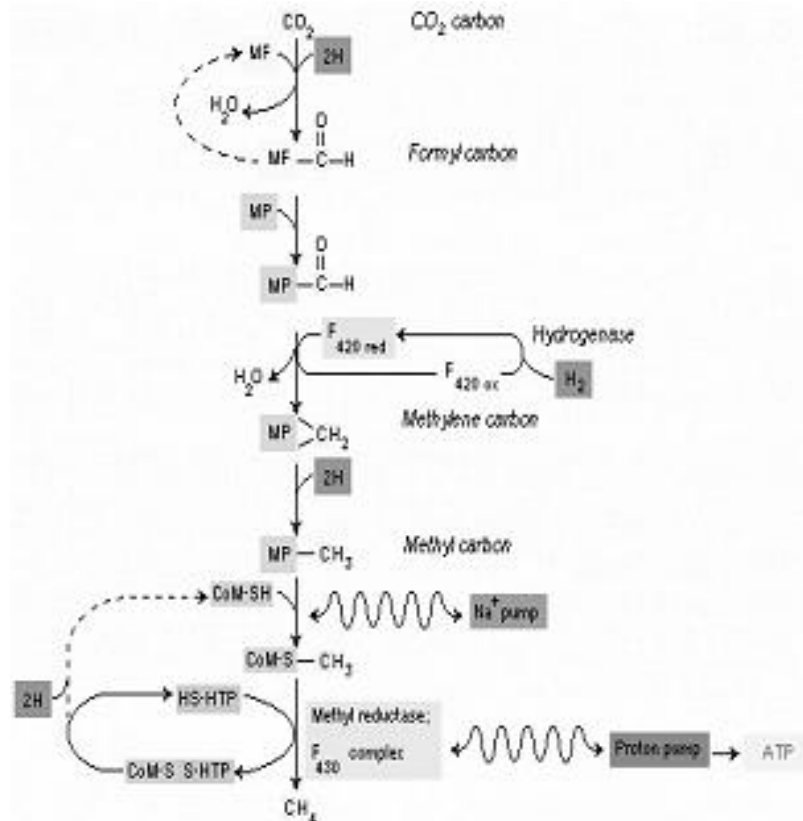


- เมทาโนเจนที่ใช้แก๊สไฮโดรเจน (Obligate hydrogenotrophic methanogen หรือ Hydrogen utilizer) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนผลิตแก๊สมีเทนโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนตามสมการดังนี้



- เมทาโนเจนที่ใช้ได้ทั้งแก๊สไฮโดรเจนและอะซิเตต (Hydrogenotrophic/

Acetoclastic methanogen) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจน แต่ใช้แก๊สไฮโดรเจนได้ดีกว่า (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2546 )



ภาพที่ 2.5: วิธีการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของการสร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Madigan และคณะ, 1997

3.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2546 )

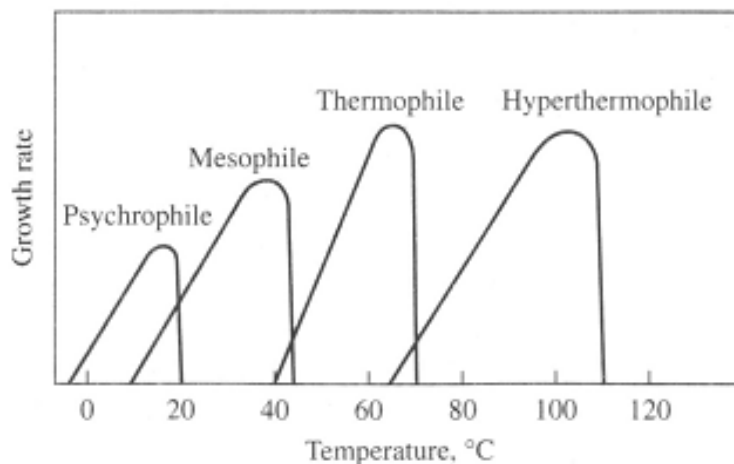
(1) อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วง คือ

- ช่วง 8 - 45 องศาเซลเซียส เรียกว่า มีโซฟิลิก (Mesophilic)
- ช่วง 40 - 70 องศาเซลเซียส เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (Thermophilic)

ตามปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้นส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่เซลล์จะทำงาน

ได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วมาก (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6: อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

ที่มา: Rittmann McCarty 2001

## (2) พีเอช

แบคทีเรียแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่ง ซึ่งค่าพีเอชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดก็จะอยู่ในช่วงนี้ แบคทีเรียส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5-10 เพราะสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมีค่าพีเอชในช่วงนี้ ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศควรอยู่ระหว่าง 6.8-7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

## (3) สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้อากาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน มีอยู่หลายชนิด โดยระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะกลายเป็นพิษได้ ซึ่งตัวอย่างของสารพิษที่สำคัญได้แก่

- ไอออนบวกในน้ำเสีย ไอออนเหล่านี้ถ้ามีในปริมาณที่พอเหมาะจะถูกใช้เป็นอาหารเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย ตัวอย่างของสารเหล่านี้ได้แก่ โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น

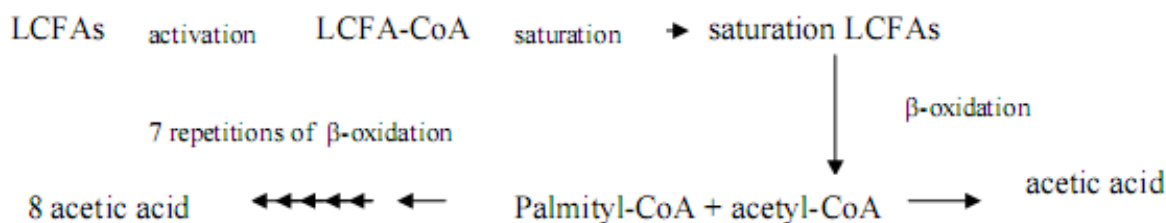
- โลหะหนัก โลหะหนักที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และแคดเมียม เป็นต้น
- แอมโมเนีย แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมาจากการย่อยสลายสารพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ดังสมการ



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ในทางตรงกันข้ามถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาก็จะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นที่พีเอชสูงชั้นระบบก็จะมีแอมโมเนียมากขึ้น โดยแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศมากกว่าแอมโมเนียมไอออน

### 2.2.3 การย่อยสลายแบบไร้อากาศของไขมัน

การย่อยสลายแบบไร้อากาศของ ไขมันจะเป็นไปตามทั้ง 4 ขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ในขั้นตอนแรกกระบวนการไฮโดรไลซิสของไขมัน โมเลกุลไขมันจะถูกแปรสภาพเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ) และกลีเซอรอล โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันเกิดขึ้นเร็วกว่าการไฮโดรไลซิสคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน (Pavlostsahis และ Giraldo-Gomez, 1991) หลังจากทีไขมันถูกย่อยสลายให้เล็กลงได้เป็นกรดไขมันสายยาวหรือแอลซีเอฟเอแล้ว โมเลกุลแอลซีเอฟเอจะถูกนำไปใช้เป็นซับสเตรทในกระบวนการสร้างกรดหรือกระบวนการหมัก โดยต้องการตัวรับอิเล็กตรอนจากภายนอกมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผ่านกระบวนการเบต้า-ออกซิเดชัน ( $\beta$ -oxidation) ได้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ และต่อมาเข้าสู่กระบวนการสร้างกรดอะซิติก และกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนเหมือนกันกับในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศทั่วไป (Kuang, 2002)



ภาพที่ 2.7: วิธีการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของโมเลกุลแอลซีเอฟเอในขั้นตอนไฮโดรไลซิส การสร้างกรด และการสร้างอะซิเตท

ที่มา: Kuang, 2002

## 2.3 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพถูกพิจารณาว่าเป็นพลังงานทางเลือกประเภทหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆมากมาย ดังนั้นการเข้าใจถึงความหมาย องค์ประกอบ และประโยชน์ของแก๊สชีวภาพจึงมีความสำคัญต่อการวิจัย ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ความหมายของแก๊สชีวภาพ

คำจำกัดความของ “แก๊สชีวภาพ ” ถูกระบุความหมายจากหน่วยงานและองค์กรต่างๆ ทั้งในและต่างประเทศ ดังนี้

ตามพจนานุกรมของราชบัณฑิตยสถานได้ระบุไว้ว่า แก๊สชีวภาพหมายถึง แก๊สที่เกิดจากการเสื่อมสลายตัวของสิ่งมีชีวิต ติดไฟได้ ใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น (พจนานุกรมไทยฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ.2542, 2554)

แก๊สชีวภาพ เป็นสสารที่อยู่ในรูปของแก๊ส เกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิต ทั้งซากพืช ซากสัตว์และของเสียจากสัตว์ รวมถึงขยะมูลฝอยที่เป็นขยะอินทรีย์ โดยกระบวนการย่อยสลายทั้งหมดเกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในสภาวะที่ไร้อากาศ ซึ่งแก๊สชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติถ้ามีสภาพที่เหมาะสม หรือเกิดขึ้นในระบบผลิต แก๊สชีวภาพที่สร้างขึ้น (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2554)

แก๊สชีวภาพ คือแก๊สชนิดหนึ่งที่เกิดในเครื่องย่อยสลายแบบไร้อากาศประกอบด้วยแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ และแก๊สอื่นๆอีกในปริมาณเล็กน้อย (American Biogas Council, 2011)

แก๊สชีวภาพ คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สได้รับจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ (จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยแก๊สมีเทน 50-80 เปอร์เซ็นต์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 20-50 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆอีกเล็กน้อย เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น (U.S. Department of Energy, 2011)

เมื่อก้าวโดยสรุปแล้วสำหรับในงานวิจัยนี้ แก๊ส ชีวภาพ หมายถึง ผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดที่ได้รับจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ

### 2.3.2 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

สำหรับระบบแบบไร้อากาศนั้นแก๊สมีเทนจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ โดยองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและปริมาณที่ผลิตได้จะขึ้นกับชนิดและธรรมชาติของของเสียที่ย่อยสลายได้ทาง



ชีวภาพได้แก่ เซลลูโลสบริสุทธิ์จะผลิตแก๊สชีวภาพที่มีแก๊สมีเทน 50 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์ ของเสียผสมผลิตแก๊สมีเทน 40-60 เปอร์เซ็นต์ (โดยปริมาตร) ขณะที่ไขมันและน้ำมันสามารถผลิตแก๊สชีวภาพที่มีปริมาณแก๊สมีเทนได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ (Demirbas, 2010) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2: องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจากของเสียแต่ละชนิด

ประเภทของเสีย	ปริมาณแก๊สชีวภาพ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	
	แก๊สมีเทน	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
เซลลูโลสบริสุทธิ์	50	50
ของเสียผสม	40-60	40-60
ไขมันและน้ำมัน	70	30

ที่มา: Demirbas, 2010

นอกจากประเภทของของเสียตั้งต้นแล้ว เรายังสามารถบ่งบอกถึงองค์ประกอบแก๊สชีวภาพตามเทคโนโลยีการบำบัด ดังตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพโดยทั่วไปจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศและจากหลุมฝังกลบ

ตารางที่ 2.3: องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและแก๊สจากหลุมฝังกลบ

แก๊สองค์ประกอบ	สูตรเคมี	แก๊สชีวภาพทั่วไป	แก๊สจากหลุมฝังกลบ
มีเทน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	CH <sub>4</sub>	55-70	40-60
คาร์บอนไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	CO <sub>2</sub>	30-45	20-40
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	H <sub>2</sub> S	100-500	20-200
แอมโมเนีย (พีพีเอ็ม)	NH <sub>3</sub>	80-100	0

ที่มา: Demirbas, 2009

### 2.3.3 ประโยชน์ของแก๊สชีวภาพ

พลังงานจากแก๊สชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้หลายทาง ได้แก่

1. ผลิตพลังงานความร้อน
2. ผลิตกระแสไฟฟ้า
3. ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง

ซึ่งได้แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 3.8

โดยการทดแทนทางด้านพลังงาน ที่เทียบจากปริมาณ แก๊สชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2554) เทียบได้กับ

พลังงานไฟฟ้า 1.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

แอลพีจี 0.46 ลิตร

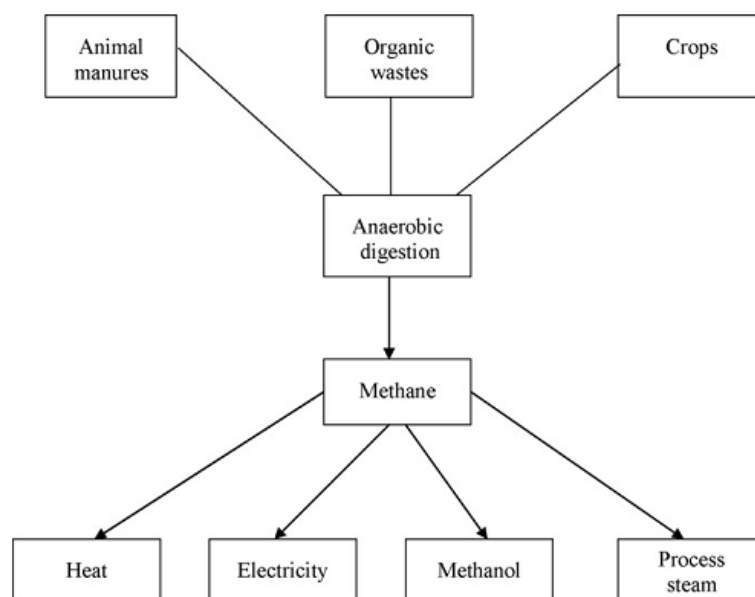
น้ำมันเตาเกรดเอ 0.55 ลิตร

น้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร

น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร

ฟืนไม้ 1.50 กิโลกรัม

นอกจากนี้กากตะกอนที่เหลือ (Excess sludge) จากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพยังสามารถนำมาใช้และจำหน่ายเป็นปุ๋ยได้อีก ซึ่งจะมีคุณภาพที่ดีกว่า ปุ๋ยคอก (มูลสัตว์สด) รวมทั้งยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าปุ๋ยเคมีในการปรับปรุงสภาพของดินให้ดีขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 2.8: การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ

ที่มา: Jingura และ Matengaifa, 2009

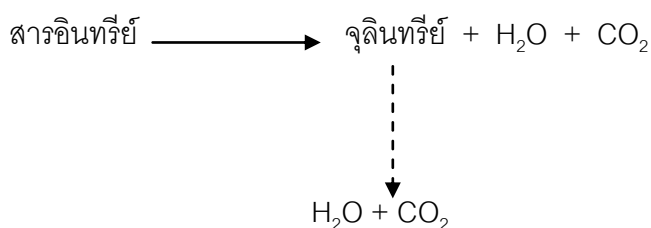
## 2.4 สมดุลมวลและจลนพลศาสตร์ของระบบชีวภาพ

การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์มีความสำคัญในการพิจารณา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานในภาคสนามได้ กล่าวคือใช้ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในการประเมินปริมาณ อาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้จะส่งผลต่อวิธีการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัด และระยะเวลา เป็นต้น (ธีระ เกรอต, 2539)

### 2.4.1 สมดุลมวลของระบบชีวภาพ (ธีระ เกรอต, 2539)

สมดุลมวล (Stoichiometry) เป็นระบบติดตามตัวทำปฏิกิริยา และผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อนำมาประยุกต์กับปฏิกิริยาทางชีวเคมี จะแสดงถึงปริมาณของเซลล์ที่เกิดขึ้น สารอาหารต่างๆที่ต้องการ เป็นต้น

ในระบบชีวภาพตัวทำปฏิกิริยาก็คือ สารอาหาร ได้แก่สารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสีย สารอนินทรีย์ เช่น ธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace elements) และแก๊สออกซิเจน เป็นต้น เมื่อทำการเติมจุลินทรีย์ลงไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นจุลินทรีย์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (การหายใจแบบใช้อากาศ) พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์จุลินทรีย์ใหม่ขึ้นมา ได้มาจากการออกซิเดชันของส่วนหนึ่งของสารอาหารแล้วได้ พลังงาน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ออกมา ดังนั้นถ้าเราทราบปริมาณของสารเหล่านี้ก็อาจคำนวณหาสัมประสิทธิ์ต่างๆที่ต้องการในการเขียนสมการสมดุลมวลของปฏิกิริยาได้



แต่เมื่อจุลินทรีย์ใช้สารอาหารจนหมด ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมวลจุลินทรีย์ จะยังไม่คงที่ เนื่องจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ยังคงทำงานเพื่อสร้างพลังงานให้เพียงพอต่อการรักษาตัวเอง และนอกจากนี้ในระบบอาจมีจุลินทรีย์ที่เป็นผู้ล่า ส่งผลให้มวลจุลินทรีย์ลดลงไปเรื่อยๆ กรณีนี้นี้จะดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแหล่งคาร์บอนทั้งหมดเปลี่ยนเป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณที่จุลินทรีย์เหลืออยู่ในระบบเท่ากับมวลที่เติมลงไป

เนื่องจากการเขียนสมการเชิงปริมาณของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงซับซ้อน และใช้น้อยมากทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในที่นี้จึงพิจารณาเพียงกลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่สังเคราะห์แสง ปฏิกริยาทั้งหมดประกอบด้วย 2 ส่วนคือ การสร้างเซลล์ และการสร้างพลังงาน คาร์บอนส่วนนี้ใช้ในการสร้างเซลล์จะอยู่ในเซลล์ ขณะที่คาร์บอนส่วนที่ใช้สร้างพลังงานจะถูกใช้และแปรสภาพไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การหายใจแบบใช้อากาศ) ปฏิกริยาลักษณะเช่นนี้ เป็นปฏิกริยา ออกซิเดชัน -รีดักชัน จึงเกี่ยวกับการถ่ายถอดอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน การเขียนสมการสมดุลมวลของระบบชีวภาพ โดยทั่วไปใช้แนวคิดครึ่งปฏิกริยา (half-reaction) เขียนสมการเชิงปริมาณสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สมการครึ่งปฏิกริยาดังกล่าวประกอบด้วย 3 สมการย่อยคือ (1) สมการสำหรับตัวให้อิเล็กตรอน ( $R_d$ ) (2) สมการสำหรับตัวรับอิเล็กตรอน ( $R_a$ ) (3) สมการสำหรับเซลล์จุลินทรีย์ ( $R_c$ ) โดยสมการทั้งหมดเขียนในรูปสมมูลอิเล็กตรอน (Electron equivalent) ประกอบรวมกันเป็นสมการสมดุลมวลรวม (R)

$$R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$$

โดยที่

$f_e$  = ส่วนของตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้สร้างพลังงาน

$f_s$  = ส่วนของตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้สร้างเซลล์

$$f_e + f_s = 1.0$$

#### 2.4.2 การคำนวณหาปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากการย่อยสลายน้ำมันพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทางทฤษฎี จากสมการสมดุลมวลของระบบชีวภาพ

วิธีทำ

##### 1) หาค่า $f_s$ และค่า $f_e$

กำหนด  $Y = 0.038$  กรัมเซลล์ต่อกรัมซีโอดีที่ถูกใช้ไป (เป็นค่าyieldที่เกิดขึ้นในระบบแบบไร้อากาศที่ใช้ไขมันเป็นซับสเตรท) (Speece, 1996)

เนื่องจากเซลล์มีส่วนเวลาโกลด์ 85 เปอร์เซ็นต์

$$Y = (0.85)(0.038) = 0.0323 = 0.03 \text{ กรัมวีเอสต่อกรัมซีโอดี}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } f_s &= 1.42Y \\ &= (1.42)(0.03) \\ &= 0.0426 \\ &= 0.04 \end{aligned}$$

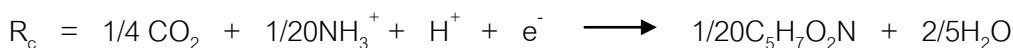
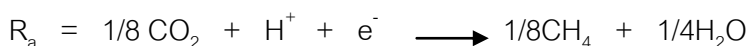
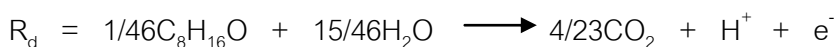
$$f_e = 1 - 0.04 = 0.96$$

## 2) สร้างสมการสมดุลมวล

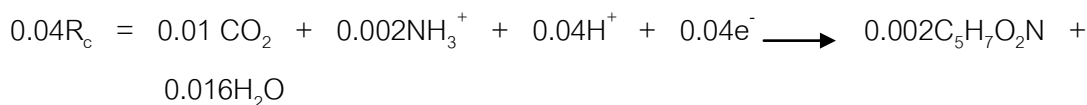
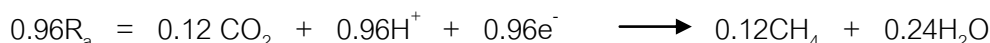
$$\text{จากสมการ } R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$$

$$\text{ดังนั้น } R = R_d - 0.96R_a - 0.04R_c$$

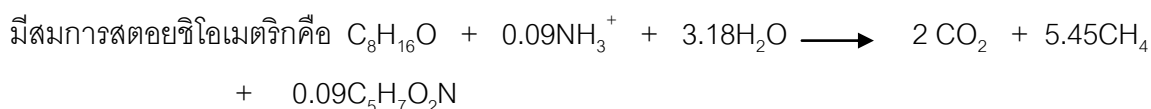
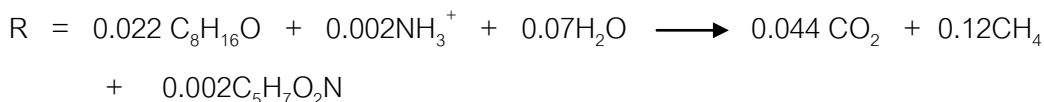
ตัวให้อิเล็กตรอนเป็นไขมัน ตัวรับอิเล็กตรอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้สมการครึ่งปฏิกิริยาดังนี้



เพราะฉะนั้น



ดังนั้น



## 3) หาปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP)

ในงานวิจัยนี้กำหนด: ความเข้มข้นไขมันสูงสุดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงมีไขมันในน้ำเสีย 60 มิลลิลิตร หรือประมาณ 60 กรัม

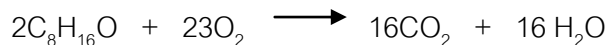
สมมติประสิทธิภาพระบบบำบัด 80 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิ = 28 องศาเซลเซียส = 301 องศาเคลวิน

เพราะฉะนั้น

$$\text{ปริมาณไขมันในน้ำเสียที่ถูกบำบัด} = 60 \times 0.8 = 48 \text{ กรัม}$$

จากสมการ



$$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O} \text{ 1 โมล มีซีไอดี} = (23 \times 32) / 2 = 368 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น

$$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O} (1 / 368) / 48 = 0.13 \text{ โมล มีซีไอดี} = 48 \text{ กรัม}$$

หาปริมาณแก๊สชีวภาพ

$$0.13 = V_{\text{stp}} / (22.4 \times (0.044 + 0.12))$$

ได้

$$V_{\text{stp}} = 0.478 \text{ ลิตร}$$

$$= 478 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{จาก } V_1/T_1 = V_2/T_2$$

$$\text{แทนค่า } 478/273 = V_2/301$$

$$V_2 = 527 \text{ มิลลิลิตร}$$

เพราะฉะนั้น

ปริมาณแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ผลิตได้ 527 มิลลิลิตร

4) หาเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นต่อปริมาณแก๊สรวมทั้งหมด

$$\text{CO}_2 = 0.044 \text{ โมล}$$

$$\text{CH}_4 = 0.12 \text{ โมล}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทน} = (0.12 / (0.044 + 0.12)) \times 100$$

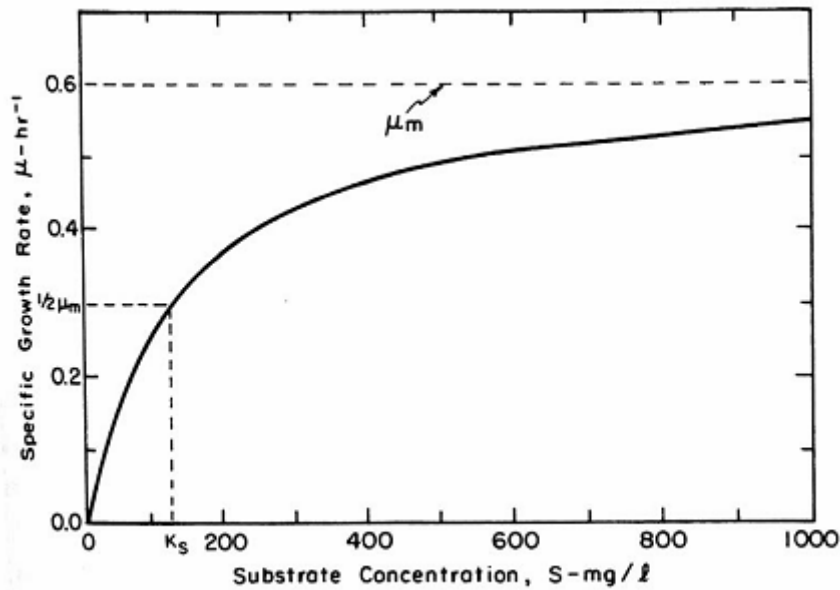
$$= 73 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

#### 2.4.3 สมการของโมนอด (Monod Equation)

โมนอดได้สร้างสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S และ  $\mu$  มีสมการดังนี้

$$\mu = \frac{1}{x} r_{gx} = \frac{u_m \cdot S}{K_s + S}$$

สมการนี้จึงเรียกว่าเป็น “สมการของโมนอด” ปัจจุบันสมการโมนอดถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นทางจลนศาสตร์ของระบบชีวเคมีที่มีแบคทีเรียเป็นตัวเร่งของปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์และในปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ (Grady และ Lim, 1980)



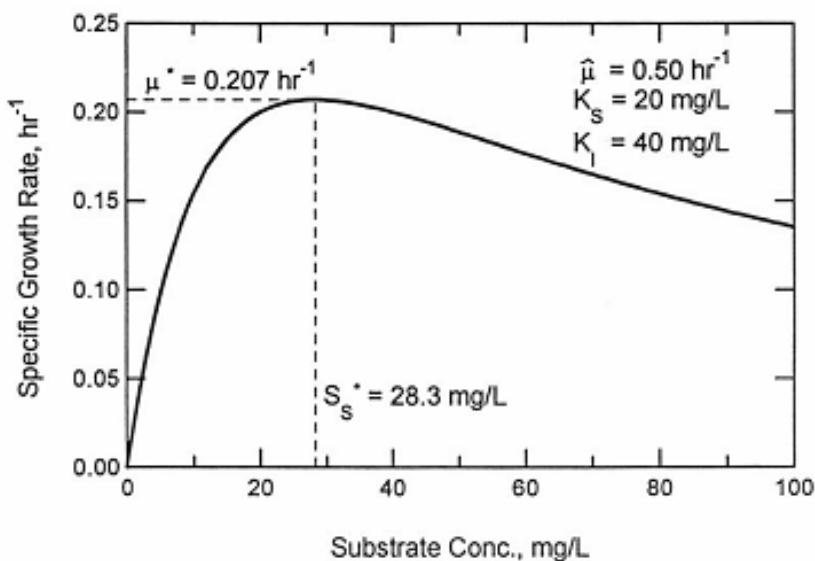
ภาพที่ 2.9: อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆจากสมการของ ไมนอด  
ที่มา: Grady และ Lim, 1980

กราฟที่ได้จากสมการไมนอดจะมีลักษณะดังภาพที่ เมื่อหาค่าของ  $\mu_m$  ในกราฟได้ จะสามารถประมาณค่า  $K_s$  ได้โดย  $K_s$  เท่ากับค่าความเข้มข้น (S) ที่ทำให้ได้ค่า  $\mu = \mu_m/2$

เนื่องจากมีซับสเตรทบางชนิดที่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น จะไปจับกับสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับซับสเตรทได้ดีกว่าเอนไซม์อิสระภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ (Grady และ Lim, 1980) ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ถูกยับยั้งหรือเป็นการชะลอการเจริญเติบโต ซึ่งสมการไมนอดแบบธรรมดาไม่สามารถใช้อธิบายในกรณีเช่นนี้ได้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2546) จึงมีการพัฒนาเป็นกราฟไมนอดแบบที่ชะลอการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรท (Substrate inhibition) มีสมการดังนี้

$$\mu = \frac{\mu_m S}{(K_s + S + S^2) K_i}$$

โดยที่  $K_i$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการชะลอตัว



ภาพที่ 2.10: ลักษณะกราฟของโมนอดที่มีการชะลอการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรท  
ที่มา: Grady และ คณะ, 1999

จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $K_1$  มีค่ามากๆ สมการนี้จะกลายเป็นสมการโมนอดแบบธรรมดา นั่นคือซับสเตรทที่มีผลในการชะลอการเจริญเติบโตได้มากจะมีค่า  $K_1$  ต่ำ ซับสเตรทที่มีผลน้อยกว่าจะมีค่า  $K_1$  สูง

ในกรณีเช่นนี้ทำให้ไม่สามารถหาค่า  $\mu_m$  ได้จากการทดลอง และค่า  $K_s$  จึงเป็นค่าที่หาได้อย่างไม่แม่นยำนัก ค่า  $\mu$  สูงสุดของกราฟในรูป จึงเป็นค่า  $\mu^*$  ซึ่งได้จากการทดลอง

$$\mu^* = \frac{\mu_m}{[2 (K_s / K_1)^{0.5} + 1]}$$

และ 
$$S^* = (K_s / K_1)^{0.5}$$

โดยที่  $S^*$  เป็นความเข้มข้นของซับสเตรท เมื่อ  $\mu = \mu^*$

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมการของ โมนอด ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในงานวิจัยอื่นๆ มากมาย อีกทั้งยังเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ในการพัฒนาสมการอื่นๆ โดยค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่



ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate;  $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว (Half saturation constant;  $K_S$ )

## 2.5 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ผลของความเข้มข้นของสารประเภทไขมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่ออัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ

การศึกษาในเรื่องผลของกรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ) ต่อกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก และกลุ่มแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนมีมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 80 โดย 2-3 ปีแรกกลุ่มนักวิจัยเชื่อว่าเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศอัตราเร็วสูงมีความไม่เหมาะสมในการนำไปบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไขมันสูง อีกทั้งกรดไขมันสายยาวยังไปมีผลในการเป็นสารฆ่าทำลายหรือยับยั้งแบคทีเรียอย่างถาวร (Alves และคณะ, 2009) ตัวอย่างงานวิจัยได้แก่

Hanaki และคณะ (1981) ศึกษากลไกการยับยั้งที่มีสาเหตุมาจากกรดไขมันสายยาวในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ รายงานว่ากระบวนการหมักกลูโคสไม่มีผลต่อการแสดงออกของกรดไขมันสายยาว สำหรับการเติมอะซิเตตและบิวทิเรตทำให้ผลความเป็นพิษของกรดไขมันสายยาวรุนแรงขึ้น ส่วนการเติมโอเลอเตตส่งผลการยับยั้งน้อยกว่าสารผสมกรดไขมันสายยาว

Angelidaki และ Ahring (1992) ศึกษาผลของกรดไขมันสายยาว อิศระต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ พบว่าการเติมกรดไขมันสายยาวอิศระบางความเข้มข้นในปริมาณมากมีผลโดยตรงต่อการทำให้ระบบล้มเหลวซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของกรดไขมันสายยาวที่ปนเปื้อนมาจากรีดักชันของกรดอะซิติก และกลุ่มแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน

ข้อสรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมาจึงก่อให้เกิดการพัฒนาแนวคิดใหม่และกระตุ้นให้มีการศึกษาทางด้านจุลชีววิทยาของการย่อยสลายกรดไขมันสายยาวในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบไร้อากาศ และทำให้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมากโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Alves และคณะ (2001) ศึกษาผลของไขมันและกรดโอเลอิกต่อการพัฒนาของตะกอนจุลินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบเบดนิ่ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการยับยั้งด้วยกรดไขมันสายยาวเป็นแบบไม่ถาวรและการปรับตัวของตะกอนจุลินทรีย์ต่อไขมันและกรดไขมันสายยาวสามารถเกิดขึ้นได้ อีกทั้งถ้ามีการเติมกรดโอเลอิกลงไปเป็นสารตั้งต้นที่เพิ่มเข้าไปจะสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้เพิ่มขึ้น

Lalman และ Bagley (2001) ศึกษากระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศและผลของการยับยั้งกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนของกรดโอเลอิกและกรดสเตียริก ผลการทดสอบการย่อยสลายของกรดโอเลอิกและกรดสเตียริกความเข้มข้นต่ำ ( $\leq 100$  มิลลิกรัมต่อลิตร) ของการเลี้ยงเชื้อที่ถูกทำให้

ปรับตัวด้วยกลูโคส ที่ 21 องศาเซลเซียส แสดงออกมาว่ากรดโอเลอิกถูกย่อยสลายได้หมดภายใน 30 วัน ขณะที่กรดสเตียริกถูกย่อยสลายได้ช้ากว่าโดยใช้เวลามากกว่า 50 วัน ส่วนผลการประเมินผลของการยับยั้งกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนของกรดโอเลอิกและกรดสเตียริกความเข้มข้นต่ำ ( $\leq 100$  มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสภาวะที่เหมือนกับการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่า กรดโอเลอิกที่ความเข้มข้นมากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตรยับยั้งกระบวนการย่อยสลายของอะซิเตต แต่กรดสเตียริกไม่ยับยั้งกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนจากอะซิเตต (Aceticlastic methanogenesis) ที่ความเข้มข้นมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนจากไฮโดรเจนพบว่าถูกยับยั้งเพียงเล็กน้อยจากกรดโอเลอิกและกรดสเตียริก

Pereira และคณะ (2002) เปรียบเทียบความแตกต่างของตะกอนจุลินทรีย์แบบเม็ด (Granular sludge) และแบบแขวนลอย (Suspended sludge) ในเรื่องของปริมาณที่ทำให้เกิดการสะสมและการย่อยสลายกรดไขมันสายยาว พบว่าตะกอนจุลินทรีย์แบบแขวนลอยมีประสิทธิภาพมากกว่าตะกอนจุลินทรีย์แบบเม็ด โดยค่าการสะสมกรดไขมันสายยาวมากที่สุดเท่ากับ  $3271 \pm 877$  มิลลิกรัมซีโอดี-แอลซีเอฟต่อกรัมวีเอสเอส และอัตราการสร้างแก๊สมีเทนมากที่สุดเท่ากับ  $434 \pm 60$  มิลลิกรัมซีโอดี-มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน สำหรับการเพาะเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์แบบแขวนลอยสามารถทำให้อัตราการสร้างแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นได้ด้วยการกวนผสม และจะถูกยับยั้งด้วยการเติมกรดโอเลอิก นอกจากนี้ผลจากระบวนการการสกัดและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงให้เห็นว่า สารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบหลักในการดูดติดผิวคือ ปาล์มไมเอตไม่ใช่โอเลเอต กล่าวคือ การแปรสภาพของโอเลเอตไปเป็นปาล์มไมเอตเกิดขึ้นได้ง่ายในระบบ แต่จะไม่เกิดการแปรสภาพของปาล์มไมเอต

Pereira และคณะ (2004) ประเมินความสามารถในการสร้างแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นต่อจากกระบวนการแปรสภาพเป็นธาตุ (Mineralization) ของกรดไขมันสายยาวที่เกาะรวมกลุ่มอยู่กับตะกอนจุลินทรีย์ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการยับยั้งโดยกรดไขมันสายยาวสามารถย้อนกลับได้ในช่วงปริมาณกรดไขมันสายยาวเท่ากับ 1,000-5,000 มิลลิกรัมซีโอดี-แอลซีเอฟต่อกรัมวีเอสเอส โดยค่าปริมาณแอลซีเอฟจำเพาะ (Optimal specific LCFA content) เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดี-แอลซีเอฟต่อกรัมวีเอสเอส ซึ่งแปรผลจากอัตราการแปรสภาพเป็นธาตุสูงสุด (Maximal mineralization rate) การทดลองนี้จึงเป็นการทำลายความเชื่อเดิมที่ว่ากรดไขมันสายยาวเป็นพิษถาวรและเป็นสารฆ่าทำลายแบคทีเรีย สำหรับการประเมินผลกระทบของกรดไขมันระเหย (วีเอฟเอ) แต่ละตัวต่อกระบวนการแปรสภาพเป็นธาตุของกรดไขมันสายยาวที่เกาะรวมกลุ่มอยู่กับตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าอะซิเตตและบิวทิเรตถูกใช้เป็นอาหารโดยกลุ่มจุลินทรีย์ แต่ในกรณีของโพรพิโอเนตไม่มีหลักฐานว่าถูกใช้เป็นอาหาร

Pereira และคณะ (2005) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศของกรดโอเลอิกและปาล์มิติก ในประเด็นของการยับยั้งการเคลื่อนย้ายมวลสารที่มีสาเหตุมาจากการสะสมของกรดไขมันสายยาวต่อตะกอนจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ ผลการทดลองแสดงหลักฐานว่าการยับยั้งทางกายภาพขึ้นกับผลของการกำจัดคาร์บอนย้ายมวลสาร ซึ่งข้อสรุปของงานวิจัยนี้มีความสำคัญในการสนับสนุนประเด็นที่ว่าภายหลังจากการยับยั้งของกรดไขมันสายยาวต่อตะกอนจุลินทรีย์นั้นเป็นปฏิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ สำหรับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกรดโอเลอิกและกรดปาล์มิติก พบว่ากรดโอเลอิกมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบจากค่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ แต่พบว่าจะมีระยะปรับตัว (Lag phase) ที่ยาวนานกว่า โดยกรดโอเลอิกที่ความเข้มข้น 900 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพมากที่สุดคือ  $62 \pm 8$  มิลลิกรัมชีโอดี-มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน ขณะที่กรดปาล์มิติกที่ความเข้มข้น 900 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ  $40 \pm 4$  มิลลิกรัมชีโอดี-มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน

Fountoulakis และคณะ (2008) ประเมินศักยภาพสำหรับการผลิตแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก วัสดุเหลือทิ้งจากการหมักไวน์และน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ในการทดลองแบบแบตช์ ภายใต้สภาวะชอบอุณหภูมิปานกลาง (มีไซฟิติก) และอุณหภูมิสูง (เทอร์โมฟิติก) จากผลการทดลองพบว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ วัสดุเหลือทิ้งจากการหมักไวน์ และน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกมีค่าเท่ากับ 297, 147 และ 108 ลิตร-มีเทนต่อกิโลกรัม-ชีโอดี ปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการย่อยสลายร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกกับน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ (1:1) น้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกกับวัสดุเหลือทิ้งจากการหมักไวน์ (1:1) และวัสดุเหลือทิ้งจากการหมักไวน์กับน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ (1:1) มีค่าเท่ากับ 184, 214 และ 188 ลิตร-มีเทนต่อกิโลกรัม-ชีโอดี ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงของน้ำเสียผสมเดียวกันนี้มีค่าเท่ากับ 282, 301 และ 219 ลิตร-มีเทนต่อกิโลกรัม-ชีโอดี

#### - จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารประเภทไขมัน

Novak และ Carlson (1970) ศึกษาจลนพลศาสตร์การย่อยสลายแบบไร้อากาศของกรดไขมันสายยาวโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอัตราการย่อยสลายของกรดไขมันสายยาวในระบบแบบไร้อากาศภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง (CSTR) ระดับห้องปฏิบัติการ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรดไขมันสายยาวแบบไม่อิ่มตัวจะถูกย่อยสลายได้มากที่สุดและรวดเร็วกว่า โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จะถูกกำจัดได้ที่ระยะเวลาภายใน 10 วัน ขณะที่อัตราการย่อยสลายของกรดไขมันอิ่มตัวที่มีคาร์บอน 14 และ 16 อะตอมจะถูก

ย่อยสลายได้น้อยกว่ามาก ส่วนข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ซึ่งใช้สมการโมนอดเป็นโมเดลพื้นฐานในการวิเคราะห์ พบว่าไลโนเลอตเป็นซับสเตรทที่มีค่าคงที่อัตราการเจริญจำเพาะ ( $\mu_m$ ) และค่าyield (Y) สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.55 ต่อวัน และ 0.055 ตามลำดับ ขณะที่สเทียเรตเป็นซับสเตรทที่ให้ค่าคงที่การอิมตัว ( $K_s$ ) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.295 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร

Angelidaki และคณะ (1999) ต้องการพัฒนาโมเดลที่มีเนื้อหาครอบคลุมการแปรสภาพทางชีวภาพแบบไร้อากาศของซับสเตรทเชิงซ้อนไปเป็นแก๊สชีวภาพ การทดลองเริ่มจากการศึกษารายละเอียดซับสเตรทในแง่ขององค์ประกอบทางอินทรีย์พื้นฐานของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน รวมถึงความเข้มข้นของสารมัธยันตร์ (Intermediates) เช่น กรดไขมันระเหย กรดไขมันสายยาว และสารอินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ แอมโมเนีย และฟอสเฟต เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (Input data) และใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกส์ของกระบวนการที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของซับสเตรทเพื่อที่จะนำไปใช้จำลองข้อมูลนำเข้าของซับสเตรท จากนั้นได้นำข้อมูลนำเข้าป้อนเข้าสู่โมเดลที่พวกเขาพัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าทางจลนพลศาสตร์ และเพื่อให้แน่ใจว่าโมเดลมีความถูกต้องน่าเชื่อถือจึงได้มีการทวนสอบ /ทดสอบเพื่อยืนยันผล (Validate) โมเดลนี้โดยใช้ข้อมูลจากโรงงานผลิตแก๊สชีวภาพที่มีการย่อยสลายร่วมระหว่างมูลสัตว์กับน้ำเสียที่มีโปรตีนและน้ำมันที่จับกับดินเบนโทไนต์ ซึ่งเป็นของเสียที่มีปริมาณไขมันสูง โดยค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้คือ ค่าyield (Y) เท่ากับ 0.05 ค่าคงที่อัตราการเจริญจำเพาะ ( $\mu_m$ ) เท่ากับ 0.55 ต่อวัน และค่าคงที่การอิมตัว ( $K_s$ ) เท่ากับ 0.058 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร

Masse และคณะ (2002) ศึกษากระบวนการไฮโดรไลซิสของไขมัน และกระบวนการออกซิเดชันของกรดไขมันสายยาวในระหว่างการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ วัตถุประสงค์ของการทดลองคือเพื่อที่จะประเมินกระบวนการไฮโดรไลซิสและกระบวนการออกซิเดชันของอนุภาคไขมันที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ที่ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเอเอสบีอาร์ (Anaerobic Sequencing Batch Reactor; ASBRs) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยผลการหาค่าทางจลนพลศาสตร์ด้วยสมการโมนอดพบว่า ค่าคงที่การอิมตัว ( $K_s$ ) เท่ากับ 0.102 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร

กาญจนา ครองธรรมชาติ และคณะ (2549) ศึกษาความสัมพันธ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตนมสดมีค่าชีโอดีตั้งต้น 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำอัดลมซึ่งมีค่าชีโอดีเท่ากับ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองในขวดซีรัม (Serum bottle) ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส โดยตะกอนจุลินทรีย์ได้รับจากโรงงานน้ำอัดลม มีค่า

เอมแอลวีเอสเอสเริ่มต้นทุกชุดการทดลองเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทุกชุดการทดลองศึกษา 3 ชั่วโมง และทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำ โดยแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลองนำไปวิเคราะห์สัดส่วน แก๊สมีเทน และนำไปหาสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่ได้จากจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์จากน้ำเสียโรงงานผลิตนมสดที่อุณหภูมิห้อง มีค่า  $K$  และ  $K_s$  เท่ากับ 0.22 กรัมซีไอดีต่อกรัมจุลินทรีย์ต่อวัน และ 2.01 กรัมซีไอดีต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส มีค่า  $K$  และ  $K_s$  เท่ากับ 0.37 กรัมซีไอดีต่อกรัมจุลินทรีย์ต่อวัน และ 0.26 กรัมซีไอดีต่อลิตร ตามลำดับ ค่า  $K$  และ  $K_s$  ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสียจากโรงงานน้ำอัดลมที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 0.19 กรัมซีไอดีต่อกรัมจุลินทรีย์ต่อวัน และ 0.52 กรัมซีไอดีต่อลิตร ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส  $K$  และ  $K_s$  มีค่าเท่ากับ 0.19 กรัมซีไอดีต่อกรัมจุลินทรีย์ต่อวัน และ 2.30 กรัมซีไอดีต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4: เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนไขมันประเภทต่างๆ

ชั้นสเตรท	$K_s$ (กิโลกรัมซีไอดีต่อ ลูกบาศก์เมตร)	$Y$	$\mu_m$ (ต่อวัน)	อ้างอิง
สเทียเรต	0.295	0.055	0.1	Novak และ Carlson (1970)
ปาล์มิเอต	0.41	0.054	0.11	Novak และ Carlson (1970)
มิสทีเรต	1.23	0.053	0.08	Novak และ Carlson (1970)
โอเลเอต	9.21	0.054	0.44	Novak และ Carlson (1970)
ไลโนเลเอต	5.19	0.055	0.55	Novak และ Carlson (1970)
กรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ)	0.105-3.18	0.06-0.16	0.085-0.55	Pavlostathis และ Giraldo-Gomez (1991)
โอเลเอต/มูลสัตว์/ น้ำมัน	0.058	0.05	0.55	Angelidaki และคณะ (1999)
น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์	0.102	-	-	Masse และคณะ (2002)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

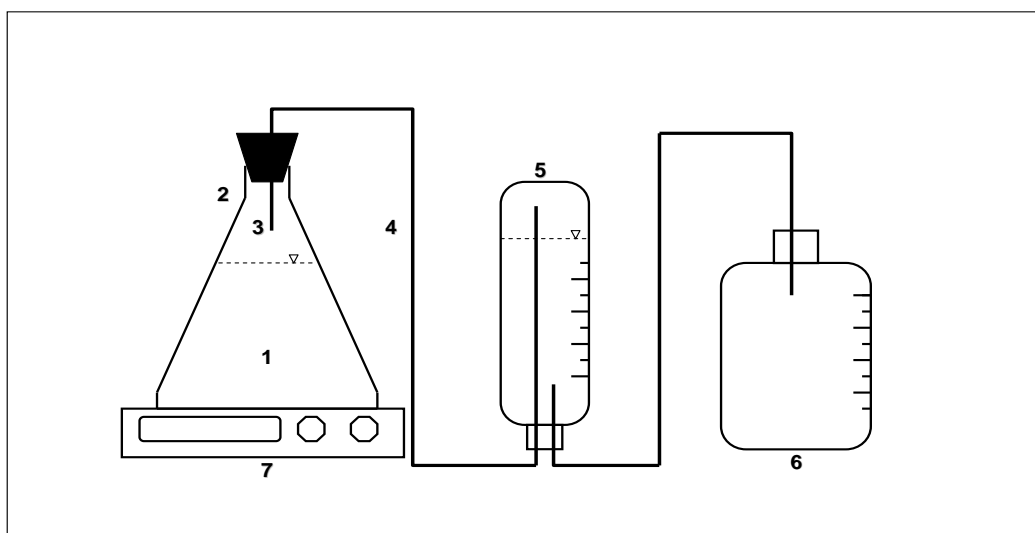
การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการทดลอง ระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นและตะกอนจุลินทรีย์ ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์การเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และขั้นตอนที่ 3 ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาคชีววิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) ชุดอุปกรณ์เลี้ยงเชื้อแบบแบตช์ 1 ชุดประกอบด้วย (ดังภาพที่ 3.1)
  - ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร (Erlenmeyer flask)
  - จุกยางปิดขวดรูปชมพู่ (Close trap)
  - ท่อแก้วนำแก๊ส (Gas tube)
  - ท่อยางซิลิโคน (Silicone rubber tube)
  - ขวดวัดปริมาตรแก๊สขนาด 1.5 ลิตร (Gas measuring bottle)
  - ถังพลาสติกขนาด 6 ลิตร (Plastic tank)
- (2) ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วสำหรับการทดลอง
  - ปีกเกอร์ขนาด 250, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร (Beaker)
  - กระบอกตวงขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร (Cylinder)
  - ปิเปตขนาด 0.1, 1, 5 และ 10 มิลลิลิตร (Pipette)
  - หลอดทดลองสำหรับวัดค่าซีโอดี (COD test tube)
  - กรวย (Cone)
  - แท่งแก้วคนสาร (Glass rod)
  - บิวเรต (Buret)
- (3) ตู้อบความร้อน (Oven)
- (4) พีเอชมิเตอร์ (pH meter) รุ่น water proof pH Testr 30DJ บริษัท EUTECH Instruments

- (5) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- (6) เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น Shimadzu-2010 (Gas chromatography; GC)
- (7) เครื่องเขย่า (Shaker)
- (8) ถาดพลาสติกสำหรับวางขวดวัดปริมาตรแก๊ส (Plastic tray)
- (9) อลูมิเนียมฟลอยด์ (Aluminium foil)
- (10) กาวซิลิโคน (Silicone glue)
- (11) เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) รุ่น ORION 4star series บริษัท Thermo scientific



ภาพที่ 3.1: ชุดอุปกรณ์เลี้ยงเชื้อแบบแบคทีเรีย 1 ชุด; 1 = พลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร; 2 = จุกยางปิดพลาสติก; 3 = ท่อแก้วนำแก๊ส; 4 = ท่อสายยางซิลิโคน; 5 = ขวดวัดปริมาตรแก๊สขนาด 1.5 ลิตร; 6 = ถังรองรับน้ำ, 7 = เครื่องเขย่า ( Shaker)

### 3.1.2 สารเคมี

- (1) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล
- (2) สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ )
- (3) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.025 นอร์มอล
- (4) สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)
- (5) น้ำมันปาล์ม (Palm oil)

- (6) นมผงขาดมันเนย (Non fat milk)
- (7) น้ำประปา (Water supply)
- (8) โฟสเฟอรัสไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- (9) ไดโพสเฟอรัสไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- (10) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate; SDS)
- (11) แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )
- (12) เฟอริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ )

### 3.1.3 ตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ได้รับจากบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด

## 3.2 การออกแบบงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ

ขั้นตอนที่ 1: การศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เริ่มต้นและตะกอนจุลินทรีย์ ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากนมขาดมันเนยถูกใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน และถูกทำให้ปนเปื้อนด้วยน้ำมัน ปาล์มที่ความเข้มข้น 0, 100, 500, 2,000 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ค่า TCOD SCOD MLSS MLVSS และ pH ตามวิธีของออร์ท ซวาลภาฤทธิ์ (2545) และวิเคราะห์ค่า ORP ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (APHA, AWWA and WPCF, 2005)

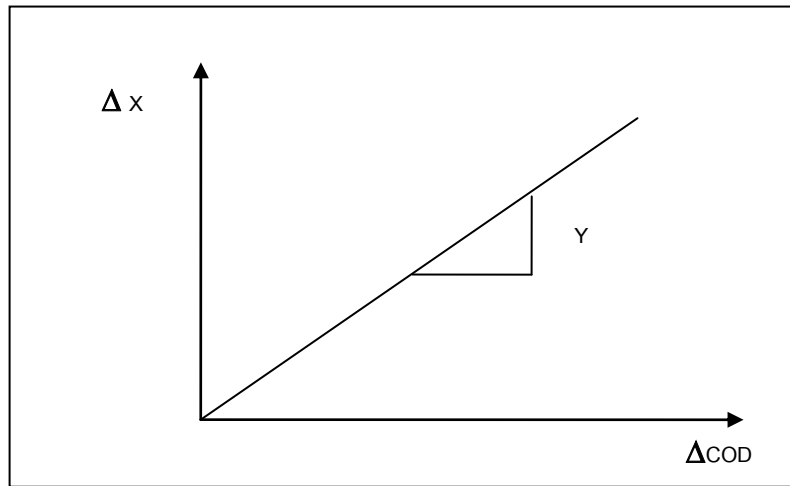
ขณะที่หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับจากบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด ทำการวิเคราะห์ค่า MLSS ค่าเอ็ม MLVSS และ ค่าพีเอช ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2: การศึกษาการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

แบ่งการทดลองย่อยออกเป็นการศึกษาค่าอีลด์ของตะกอนจุลินทรีย์แบบเต็มและไม่เต็มสารลดแรงตึงผิว (SDS) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียและนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และค่าซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ต่อมาจึง รวบรวมค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลอง เช่น ค่าเซลล์ซีโอดี (Cell COD) ค่าซีโอดีทั้งหมด และค่าซีโอดีละลายน้ำไปสร้างกราฟแสดงค่าผลต่างของเซลล์ซีโอดี ( $\Delta$ Cell COD) เทียบกับค่าผลต่างของซีโอดีละลายน้ำ ( $\Delta$ SCOD) เพื่อหาค่าอีลด์จากค่าความชันของกราฟ



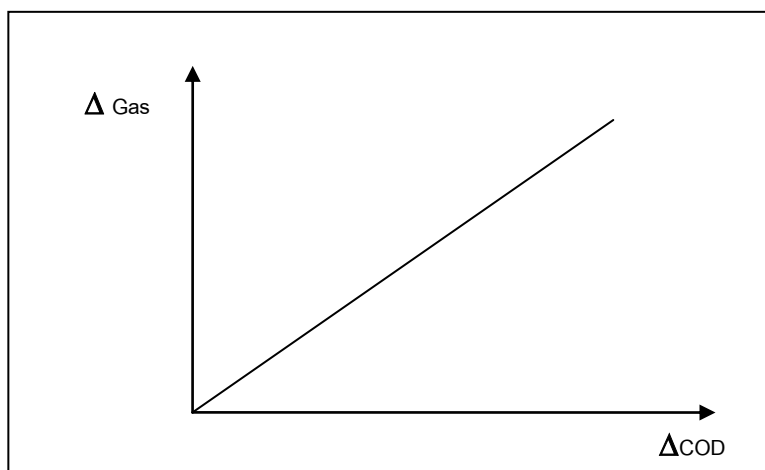
แสดงดังภาพที่ 3.2 โดยชุดที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ใช้ SDS ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปละลายน้ำมันโดยสมบูรณ์



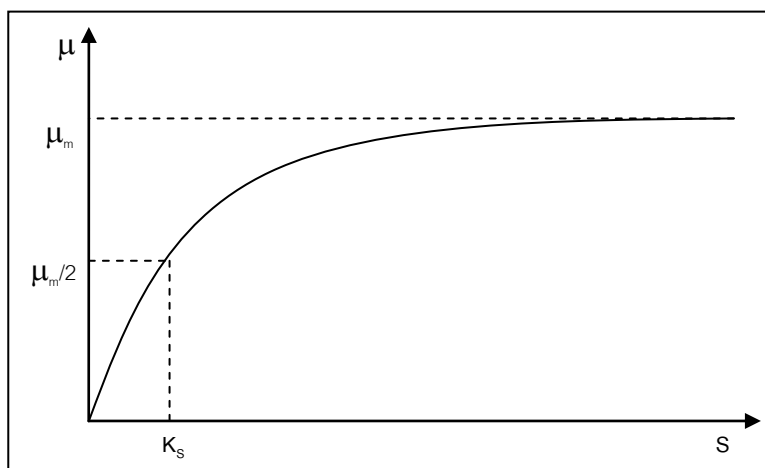
ภาพที่ 3.2: ตัวอย่างการสร้างกราฟแสดงการประมาณค่าผิดพลาดของจุลินทรีย์

ขั้นตอนที่ 3: การศึกษาค่า คงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว ( $K_s$ ) ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

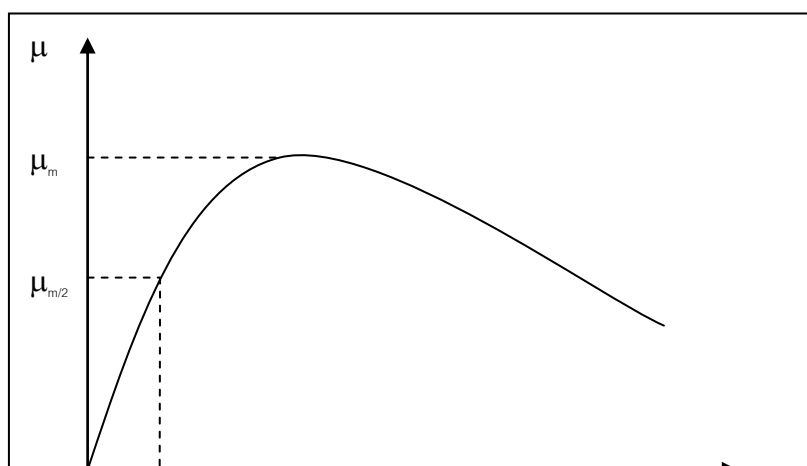
แบ่งการทดลองย่อยออกเป็นการ วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ เริ่มต้น และการเริ่มเดินระบบการ ผลิตแก๊สชีวภาพจากการ ย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม พร้อมกับ วิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้และตัวอย่างน้ำเสียสุดท้าย โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้แก่ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มทั้ง 6 ความเข้มข้น (0, 100, 500, 2,000 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สชีวภาพกับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี (ภาพที่ 3.3) ของทั้ง 6 ชุดการทดลอง ซึ่งจะนำไปใช้ในการสร้างกราฟสมการของโมโนอดแบบธรรมดาและแบบชะลอการเจริญเติบโตด้วยซีสเตรท เพื่อหาค่า  $\mu_m$  และ ค่า  $K_s$  ได้กราฟลักษณะดังภาพที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี



ภาพที่ 3.3: ตัวอย่างการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของแก๊สชีวภาพกับการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี



ภาพที่ 3.4: ตัวอย่างการสร้างกราฟสมการของโมนอด (Monod) แบบธรรมดา



ภาพที่ 3.5: ตัวอย่างการสร้างกราฟสมการของโมนอด (Monod) แบบชะลอการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรท (Substrate inhibition)

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1: การศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นและตะกอนจุลินทรีย์

#### 3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมขึ้นจากนมขาดมันเนยเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน มีค่าซีไอดีเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำให้ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยความเข้มข้นต่างๆกัน โดยมีรายละเอียดวิธีการเตรียมตามสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 และแสดงรายละเอียดการคำนวณหาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมในภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.1: ปริมาณสารที่เติมต่อ 1 แบทช์

ชุดการทดลอง	น้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าซีไอดีน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้าจากการคำนวณโดยประมาณ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารที่เติมต่อ 1 แบทช์ (300 มิลลิลิตร)			
			น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	นมขาดมันเนย (มิลลิลิตร) (800มิลลิกรัม-ซีไอดี/ลิตร)	น้ำมันปาล์ม (กรัม)	ตะกอนจุลินทรีย์ (มิลลิลิตร) จากความเข้มข้น 168,200 มิลลิกรัม/ลิตร
1	0	800	298.35	1.65	0	0
2	100	886	294.35	1.65	0.03	4
3	500	1,231	294.35	1.65	0.15	4
4	2,000	2,526	294.35	1.65	0.6	4
5	10,000	9,264	278.35	1.65	3	20
6	50,000	43,856	98.35	1.65	15	200

การเติมธาตุอาหาร (Nutrients) และบัฟเฟอร์ (Buffer) จัดเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหารเสริมอื่นนอกเหนือจากคาร์บอน ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก เป็นต้น ซึ่งอัตราส่วนระหว่างซีไอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อเหล็กของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ควรมีอย่างน้อยเท่ากับ 100: 2.1: 0.6: 1.7 (Speece, 1983) ในงานวิจัยนี้ได้เติมธาตุอาหารที่สำคัญ ดังกล่าวทั้ง 3 ชนิด ในทั้ง 6 ชุดการทดลอง โดยเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งธาตุไนโตรเจน สารประกอบฟอสเฟตที่มากเกินไปจากฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นแหล่งของฟอสฟอรัส และ เฟอร์ริก คลอไรด์เป็นแหล่งของเหล็ก ปริมาณสารที่เติม และ

รายละเอียดการคำนวณ แสดง ในภาคผนวก ค ระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการใช้ควบคุมค่าพีเอชของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 2 ชนิดในการควบคุมค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ได้แก่ โมโนโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต จำนวนมาจาก โปรแกรม Phosphate Buffer Calculator ที่พัฒนาขึ้นโดย Dave Robinson ปริมาณสารที่เติม และรายละเอียดการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ค

การวิเคราะห์น้ำเสียส่งเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ทำการวิเคราะห์ค่า TCOD SCOD MLSS MLVSS และ pH ตามวิธีของอรรถัย ชวาลภาฤทธิ์ (2545) และวิเคราะห์ค่า ORP ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (APHA, AWWA and WPCF, 2005) แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2: วิธีหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธี/อุปกรณ์
ซีโอดี (TCOD และ SCOD)	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545)
ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (MLSS)	การวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนัก (Gravity method) (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545)
ความเข้มข้นของแข็งแขวน ลอยระเหยได้ (MLVSS)	การวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนัก (Gravity method) (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545)
พีเอช	การหาค่าพีเอชโดยใช้เครื่องมือวัด (pH meter) (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545)
โออาร์พี	การหาค่าโออาร์พีโดยใช้เครื่องมือวัด (ORP probe) (APHA, AWWA and WPCF, 2005)

### 3.3.2 การศึกษาลักษณะตะกอนจุลินทรีย์

ทำการศึกษาลักษณะตะกอนจุลินทรีย์เบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ค่า MLSS ค่า MLVSS และค่าพีเอช โดยวิธีมาตรฐานและอุปกรณ์มีลักษณะเดียวกันกับการวิเคราะห์น้ำเสียในตารางที่ 3.2

ขั้นตอนที่ 2: การศึกษาการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

### 3.3.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของทั้ง 6 ขวดปฏิบัติการ (ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 0, 100, 500, 2,000, 10,000 และ 50,000 ตามลำดับ) แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 โดยแบ่งเป็น 2 การทดลองย่อย คือมีการเติม/ไม่เติมโซเดียมไดออกไซด์ซัลเฟต (SDS) ลงในขวดปฏิบัติการ
2. เติมตะกอนจุลินทรีย์ลงไปในชุดอุปกรณ์เลี้ยงเชื้อแบบแบตช์ของทั้ง 6 ขวดปฏิบัติการ
3. ทำการเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นสารละลายบัฟเฟอร์คุมค่าพีเอชให้ได้ประมาณ 7.3 โดยปริมาณที่เติมลงในระบบแสดงดังตารางที่ 3.3
4. เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ เพอร์ริกคลอไรด์ และสารประกอบฟอสเฟตลงในระบบให้มีอัตราส่วน COD: N: P: Fe = 100: 2.1: 0.6: 1.7 (Speece, 1983) ปริมาณสารที่เติมแสดงดังตารางที่ 3.2
5. นำลูมิเนียมฟลอยด์ห่อขวดปฏิบัติการเพื่อป้องกันปฏิบัติการโฟโตแอคทีเวชัน (Photo activation) ของแสงแดดจากภายนอก
6. เก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนเริ่มเดินระบบเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และค่าซีโอดีละลายน้ำ (SCOD)
7. เริ่มเดินระบบการย่อยสลายแบบแบตช์ที่ 150 รอบต่อวินาที ภายใต้สภาวะไร้อากาศ
8. เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกๆ 5 วัน ในช่วงแรก และค่อยๆลดเป็น 3 วันต่อครั้ง ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 6.
9. ได้ค่า TCOD และ SCOD ที่มาจากการทดลอง แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่ายี่ลต์ต่อไป

### 3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่า yield ที่แท้จริง (True growth yield) ของตะกอนจุลินทรีย์

1. รวบรวมค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลอง เช่น ค่า Cell COD โดยหาจากค่า TCOD และค่า SCOD ของทั้ง 6 ชุดการทดลอง
2. สร้างกราฟแสดงค่า Cell COD เทียบกับค่า SCOD ของแต่ละความเข้มข้น ทั้ง 6 ชุดการทดลอง โดยค่า Cell COD และ SCOD ที่นำมาใช้จะใช้ค่าในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเดินระบบถึงค่าที่เริ่มคงที่ (ใช้ค่าที่ Cell COD เริ่มคงที่เข้าสู่ Stationary phase)
3. หาค่า yield ที่แท้จริงของแต่ละชุดการทดลองได้จากค่าความชันของกราฟ

ขั้นตอนที่ 3: การศึกษาค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว ( $K_s$ ) ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

### 3.3.5 การเริ่มเดินระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ดัดแปลงจาก Pereira และคณะ, 2005) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.7

1. นำหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้นที่คำนวณได้ (แสดงในตารางที่ 3.1) และผ่านการเลี้ยงปรับสภาพ (Pre-culture) ให้เคยชินกับน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 1 เดือน เติมนลงในฟลาสก์เลี้ยงเชื้อแบบแบตช์ทั้ง 6 ชุดการทดลอง
2. เริ่มเดินระบบโดยนำฟลาสก์เลี้ยงเชื้อทั้ง 6 ชุดการทดลอง ไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้อากาศ
3. ดำเนินการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์จนการผลิตแก๊สชีวภาพเริ่มคงที่ โดยสังเกตปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการอ่านค่าที่ขวดวัดปริมาตรแก๊สแบบแทนที่น้ำในสภาพกรด
4. เมื่อระบบคงที่ ทำการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียพร้อมกับวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย เก็บข้อมูลปริมาณแก๊สสะสม และวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี ที่มีแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาความเร็ว 20 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ดีเทคเตอร์แบบทีซีดี (TCD) โดยตั้งอุณหภูมิที่ช่องใส่สาร (Injection port) คอลัมน์ (Column) และดีเทคเตอร์ (Detector) เท่ากับ 150, 80 และ 200 องศาเซลเซียสตามลำดับ
5. สร้างกราฟแสดงผลต่างของปริมาณแก๊สชีวภาพเทียบกับผลต่างของปริมาณค่าซีไอดีของทั้ง 6 ชุดการทดลอง

6. สร้างกราฟแสดงปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟีของทั้ง 6 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.3: ความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียและแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์	ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)
ซีไอดีทั้งหมด (TCOD)	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด	ก่อนและหลังเดินระบบ	5-10
ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (MLSS)	การวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนัก	ก่อนและหลังเดินระบบ	5-10
ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (MLVSS)	การวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนัก	ก่อนและหลังเดินระบบ	5-10
พีเอช	การหาค่าพีเอชโดยใช้เครื่องมือวัด	ก่อนและหลังเดินระบบ	-
ไออาร์พี	การหาค่าไออาร์พีโดยใช้เครื่องมือวัด	ก่อนและหลังเดินระบบ	-
ปริมาตรแก๊สชีวภาพ	หลักการแทนที่น้ำสภาพกรด	ทุกวัน	-
องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ	แก๊สโครมาโตกราฟฟี	หลังเดินระบบ	1

### 3.3.6 การสร้างกราฟด้วยสมการของโมนอด (Monod)

1. รวบรวมข้อมูลการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมของทั้ง 6 ชุดการทดลอง
2. หาค่าคงที่ของอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ ( $k$ )
3. สร้างกราฟตามสมการของโมนอด
4. ได้สมการโมนอด และค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ได้แก่ ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate;  $\mu_m$ ) ค่าคงที่การอิ่มตัว (Half saturation constant;  $K_s$ )



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากนมขาดมันเนยเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน โดยมีค่าซีโอดีประมาณ 800 มิลลิกรัม-ซีโอดีต่อลิตร ทำให้ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้น 0,100, 500, 2,000, 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเติมหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยประมาณ 900 มิลลิกรัม-เอมแอลเอสเอสต่อลิตรในชุดการทดลอง 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยประมาณ 3,000 มิลลิกรัม-เอมแอลเอสเอสต่อลิตรในชุดการทดลอง 5 และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยประมาณ 30,000 มิลลิกรัม-เอมแอลเอสเอสต่อลิตรในชุดการทดลอง 6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติพื้นฐานของน้ำเสียเริ่มต้นแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1: ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นของการทดลองเรื่องการผลิตแก๊สชีวภาพ

พารามิเตอร์ ชุดการทดลอง	ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) (มก/ล.)	ค่าของแข็ง แขวนลอย (MLSS) (มก/ล.)	ค่าของแข็ง แขวนลอยระเหยได้ (MLVSS) (มก/ล.)	ค่าพีเอช (pH)	ค่าความต่างศักย์ ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) (มิลลิโวลต์)
1 ชุดควบคุม (น้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม)	760-798	-	-	7.2	104
2 (น้ำเสียสังเคราะห์ ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.)	5,200-5,900	900-950	800-850	7.3	-19
3 (น้ำเสียสังเคราะห์ ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.)	7,200-12,600	700-900	650-750	7.3	-22
4 (น้ำเสียสังเคราะห์ ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.)	18,000-36,592	500-900	450-800	7.4	-26

ตารางที่ 4.1: ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นของการทดลองเรื่องการผลิตแก๊สชีวภาพ (ต่อ)

พารามิเตอร์ ชุดการทดลอง	ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) (มก/ล.)	ค่าของแข็ง แขวนลอย (MLSS) (มก/ล.)	ค่าของแข็ง แขวนลอยระเหยได้ (MLVSS) (มก/ล.)	ค่าพีเอช (pH)	ค่าความต่างศักย์ ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) (มิลลิโวลต์)
5 (น้ำเสียสังเคราะห์ปน เปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.)	48,410-55,020	2,450-2800	1,700-2,400	7.5	-100
6 น้ำเสียสังเคราะห์ปน เปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.)	173,650 - 210,870	29,500-31,800	18,150-21,500	7.3	-233

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยปริมาณสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มปนเปื้อนในน้ำเสียมากขึ้น ดังนั้นน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้จึงมีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพ ขณะที่ค่า MLSS ที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างเป็นไปตามปริมาณที่คำนวณได้จากสตอยชิโอเมตริก พารามิเตอร์ทางกายภาพที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช และค่า ORP ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของทุกๆแบบตั้งอยู่ในช่วงระหว่าง 7.2-7.5 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ระบบบัฟเฟอร์ในการควบคุม ส่วนค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน พบว่ามีค่าเป็นลบในแบบที่ที่มีความเข้มข้นน้ำมันปาล์มตั้งแต่ 100 – 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเป็นลบเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันปาล์มในน้ำเสียและค่า MLSS เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ระบบจะมีแนวโน้มในการให้โอเล็คตรอนมากกว่าและบ่งบอกได้เบื้องต้นว่าระบบอยู่ในสภาวะแบบไร้อากาศ

ส่วนผลการวิเคราะห์น้ำเสียในเรื่องของการหาค่าyield แสดงดังตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ในชุดการทดลองทั้งแบบเต็ม และไม่เต็ม SDS และรายงานค่าออกมาเป็นค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าซีโอดีละลายน้ำ และค่าเซลล์ซีโอดี ซึ่งจะนำค่าต่างๆดังกล่าวไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเวลา แล้วนำไปหาค่าyieldที่แท้จริง (True growth yield) ต่อไป โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อภายหลัง

ตารางที่ 4.2: ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นของการทดลองเรื่องการหาค่ายี่ลด์

พารามิเตอร์ ชุดการทดลอง	ไม่เติม SDS			เติม SDS		
	ค่าซีไอดี ทั้งหมด (TCOD) (มก/ล.)	ค่าซีไอดีละลาย น้ำ (SCOD) (มก/ล.)	ค่าเซลล์ซีไอดี (CellCOD) (มก/ล.)	ค่าซีไอดี ทั้งหมด (TCOD) (มก/ล.)	ค่าซีไอดีละลาย น้ำ (SCOD) (มก/ล.)	ค่าเซลล์ซีไอดี (CellCOD) (มก/ล.)
ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม 100 มก/ล.	1,500-1,700	1,200-1,635	265-300	4,300-5,700	4,170-5,548	130-152
ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม 500 มก/ล.	2,600-3,000	2,400-2,800	200	5,676-7,700	5,487-7,544	156-189
ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม 2,000 มก/ล.	6,200-8,200	5,050-6,940	1,150-1,260	9,400-13,600	9,200-13,400	200
ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม 10,000 มก/ล.	24,300- 38,300	18,600-31,000	5,700-7,300	48,200- 52,010	40,571	7,629-11,439
ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม 50,000 มก/ล.	78,000- 82,000	67,396-70,824	10,604- 11,376	140,000- 180,000	137,838- 178,240	11,760- 12,160

#### 4.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้น ความเข้มข้นประมาณ 168,200 มิลลิกรัม-เอมแอลเอสเอสต่อลิตร จากตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ได้รับจากบริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด (ภาพที่ 4.2) ผ่านการเลี้ยงปรับสภาพ (Pre-culture) ให้เคยชินกับน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 1 เดือน โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ 2 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.1: ตะกอนจุลินทรีย์จากบริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด

ตารางที่ 4.3: ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอน จุลินทรีย์	พารามิเตอร์			
	MLSS (มก/ล.)	MLVSS (มก/ล.)	MLVSS/MLSS	pH
	143,300 - 172,100	93,330 - 110,336	0.64-0.65	7.7

จากผลการวิเคราะห์พบว่าตะกอนจุลินทรีย์มีค่า MLSS และค่า MLVSS ที่สูงมาก นั้นหมายถึงหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ มีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยถึง 143,300-172,100 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยได้ 93,330-110,336 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (MLVSS/MLSS) อยู่ในช่วง 0.64-0.65

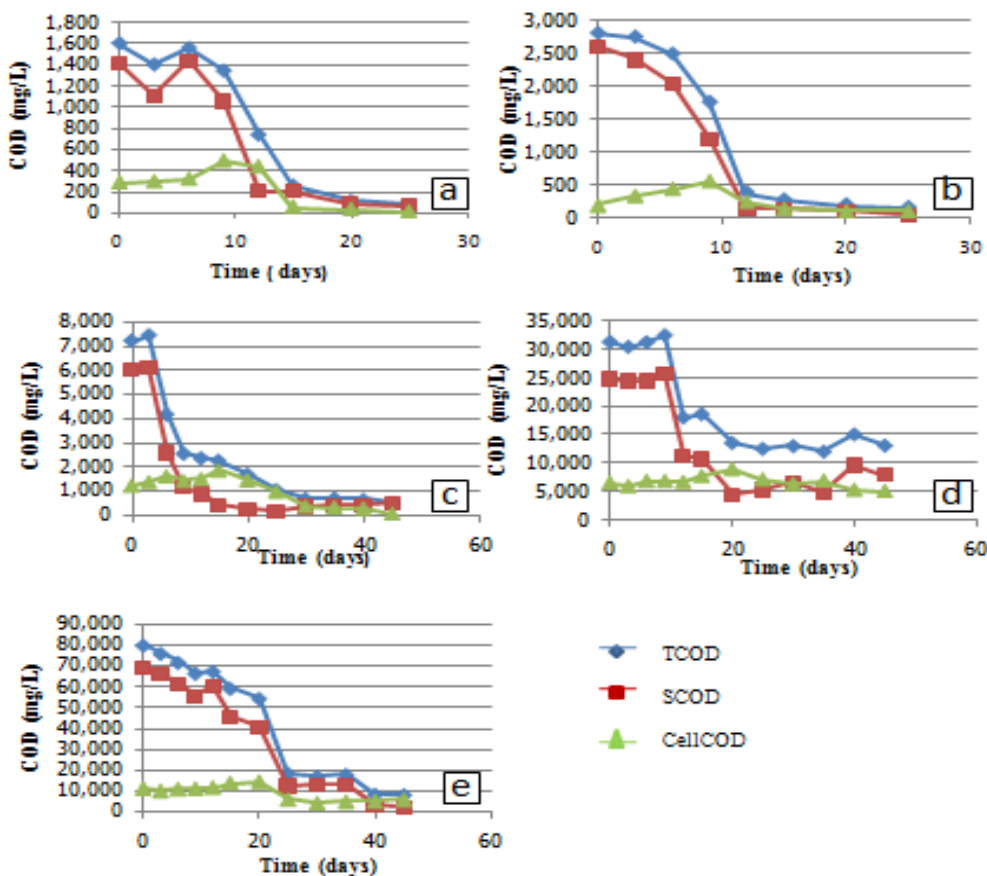
#### 4.3 : การศึกษาการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

การทดลองแบ่งออกเป็นการศึกษาค่าyieldของตะกอนจุลินทรีย์แบบเต็มและไม่เต็มสารลดแรงตึงผิว (Sodium dodecyl sulfate; SDS) เริ่มจากเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นส่วนน้ำด้านบน (Supernatant) ปริมาณ 4 มิลลิลิตรลงในน้ำเสีย จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียและนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และค่าซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ต่อมาจึง รวบรวมค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลอง เช่น ค่าเซลล์ซีโอดี (Cell COD) ค่าซีโอดีทั้งหมด และค่าซีโอดีละลายน้ำไปสร้างกราฟแสดงค่าผลต่างของเซลล์ซีโอดี ( $\Delta$ Cell COD) เทียบกับค่าผลต่างของซีโอดีละลายน้ำ ( $\Delta$ SCOD) โดยจะคิดค่าต่างๆในช่วงเวลาเริ่มเดินระบบถึงเวลาที่ค่าเซลล์ซีโอดีเริ่มคงที่เข้าสู่ Stationary phase เพื่อหาค่าyield ที่

แท้จริง (True growth yield) จากค่าความชันของกราฟ โดยชุดที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ใช้ SDS ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปละลายน้ำมันโดยสมบูรณ์

#### 4.3.1 การศึกษาค่าyieldของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบไม่เติม SDS

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.2 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอดีทั้งหมด ซีไอดีละลายน้ำ และเซลล์ซีไอดี (CellCOD) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

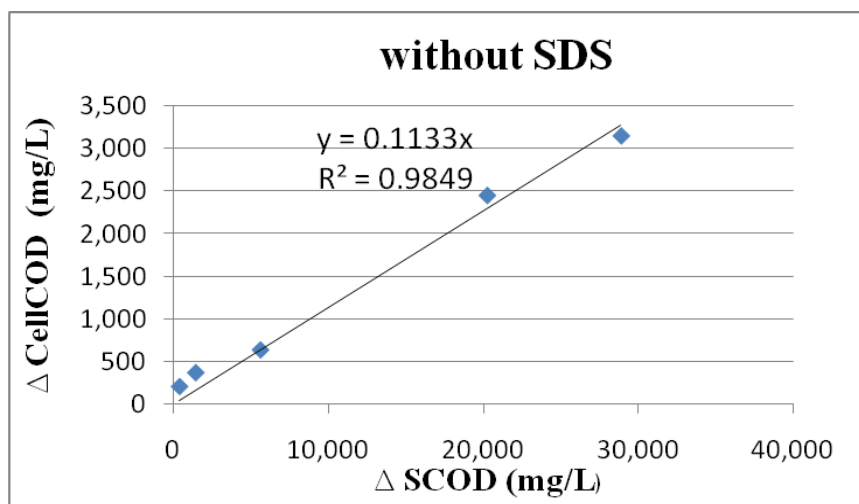


ภาพที่ 4.2: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีทั้งหมด ค่าซีไอดีละลายน้ำและค่าเซลล์ซีไอดีกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพของทุกๆแบบที่ไม่มีเติม SDS; (a) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร; (b) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร; (c) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร; (d) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร; (e) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่าค่าซีไอดีทั้งหมดและค่าซีไอดีละลายน้ำซึ่งแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นในทุกๆแบบที่ ขณะที่ค่าเซลล์ซีไอดีที่แสดงถึงปริมาณของจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนคงที่และลดลงเมื่อเวลานานขึ้นซึ่งเป็นไปตาม

กราฟการเจริญของแบคทีเรีย (Bacterial growth curve) โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเซลล์ซีโอดีจะเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ในวันที่ 9 ขณะที่ในชุดการทดลองที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรจะเริ่มคงที่ในวันที่ 16 ของการทดลอง ส่วนในชุดการทดลองที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 และ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตรจะเริ่มคงที่ในวันที่ 20 ของการทดลอง และมีระยะปรับตัวของจุลินทรีย์ (lag phase) ที่ยาวนานที่สุดในทั้ง 5 ชุดการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้ในห้องปฏิบัติการสามารถนำไปวิเคราะห์ค่ายัลด์ ที่แท้จริง ของตะกอนจุลินทรีย์ โดยหาได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์ซีโอดีที่เกิดขึ้นต่อค่าซีโอดีละลายน้ำที่ถูกใช้เป็นอาหารโดยจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 4.3

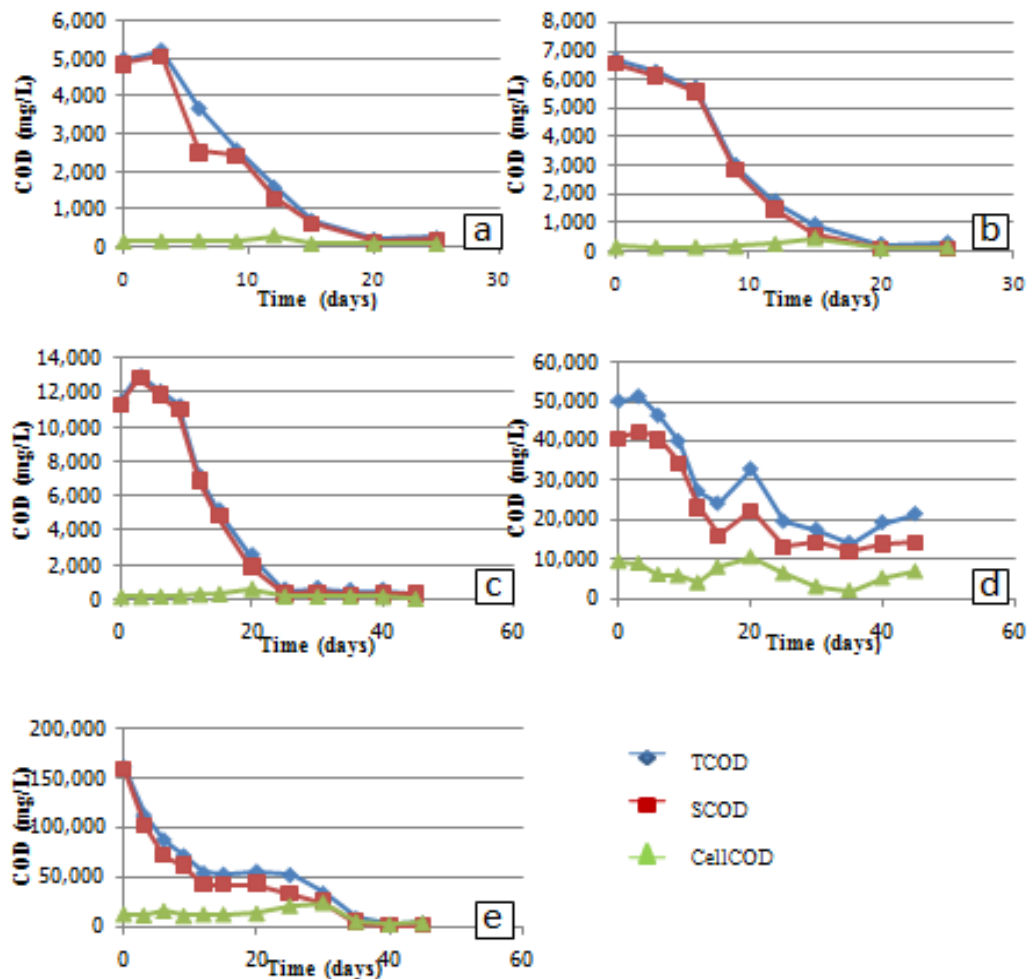


ภาพที่ 4.3: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์ซีโอดีกับค่าซีโอดีละลายน้ำเพื่อกำหนดค่ายัลด์ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายที่ไม่มีการเติม SDS

จากรูปพบว่าค่ายัลด์ที่แท้จริงของตะกอนจุลินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบไม่มีการเติม SDS มีค่าประมาณ 0.11 กรัม-เซลล์ซีโอดีต่อกรัม -ซีโอดี โดยรายละเอียดการเปรียบเทียบค่าตัวแปรกับงานวิจัยที่ผ่านมาจะกล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไปในหัวข้อภายหลัง

#### 4.3.2 การศึกษาค่ายัลด์ของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบที่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)

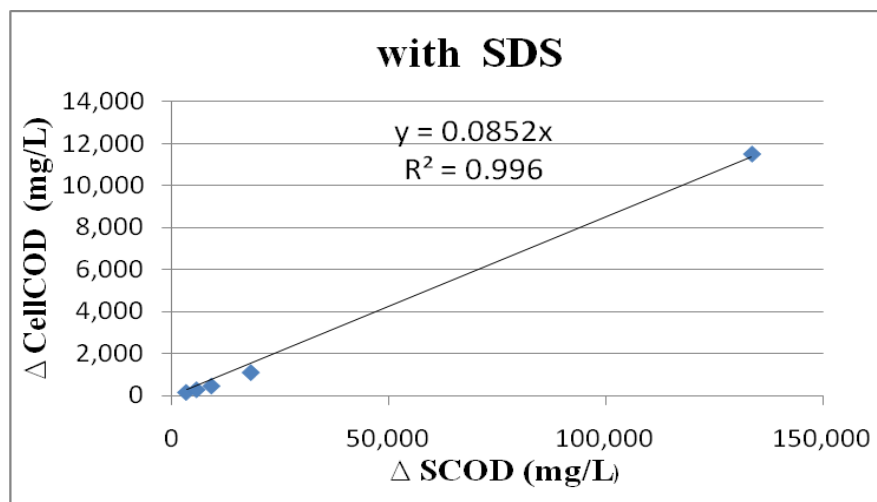
ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลายน้ำ และเซลล์ซีโอดีเทียบกับเวลาเช่นเดียวกับในการทดลองก่อนหน้า



ภาพที่ 4.4: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีทั้งหมด ค่าซีไอดีละลายน้ำและค่าเซลล์ซีไอดีกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพของทุกๆแบบที่มีการเติม SDS; (a) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร; (b) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร; (c) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร; (d) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร; (e) = ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่า การเติม SDS 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่าซีไอดีเพิ่มขึ้นประมาณ 5,520 มิลลิกรัม-ซีไอดีต่อลิตร และเหมือนกับการทดลองก่อนหน้านี้คือ ค่าซีไอดีทั้งหมดและค่าซีไอดีละลายน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นในทุกๆแบบ และค่าเซลล์ซีไอดีที่เพิ่มขึ้นจนคงที่และลดลงเมื่อผ่านไป ขณะประเด็นที่แตกต่างคือค่าซีไอดีทั้งหมดและค่าซีไอดีละลายน้ำจะมีค่ามากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการเติม SDS ลงไปในระบบ ส่วนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเซลล์ซีไอดีในทุกๆแบบพบว่าจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและใช้ระยะเวลาในการทดลองแรก ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก SDS ที่เติมลงไปมีผลไปยังการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเป็นพิษต่อเซลล์ทำให้จุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวที่นานขึ้นจึงมีระยะปรับตัว (lag phase) ที่ยาวนานกว่าในการทดลองแรกค่อนข้างมาก และ

เนื่องจาก SDS มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถละลายไขมันได้ จึงอาจเป็นไปได้ว่า SDS มีผลไปละลายไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งมีไขมันเป็นองค์ประกอบทำให้เซลล์แตก (Cell lysis) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้รับไปหาค่ายัดที่แท้จริงของตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์ซีโอดีกับค่าซีโอดีละลายน้ำเพื่อกำหนดค่ายัดของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายที่มีการเติม SDS

จากกราฟพบว่าค่ายัดที่แท้จริงของตะกอนจุลินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มแบบไม่มีการเติมและเติม SDS มีค่าประมาณ 0.11 และ 0.085 กรัม-เซลล์ซีโอดีต่อกรัม-ซีโอดี ตามลำดับ ในการทดลองนี้พบว่าค่ายัดของตะกอนจุลินทรีย์จะลดลงเมื่อมีการเติม SDS ลงไปในน้ำเสีย ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลที่มีต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบนั่นเอง และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่าค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pavlostathis และ Giraldo-Gomez (1991) ที่อยู่ในช่วง 0.06-0.16 กรัม-เซลล์ซีโอดีต่อกรัม-ซีโอดี บ่งชี้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้น้ำมันละลายได้สมบูรณ์ในน้ำนั้น แทนที่จะส่งผลดีต่อการย่อยสลายน้ำมันกลับทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้น้อยลง

ตารางที่ 4.4: ค่ายัดที่แท้จริง (True growth yield) ที่วิเคราะห์ได้

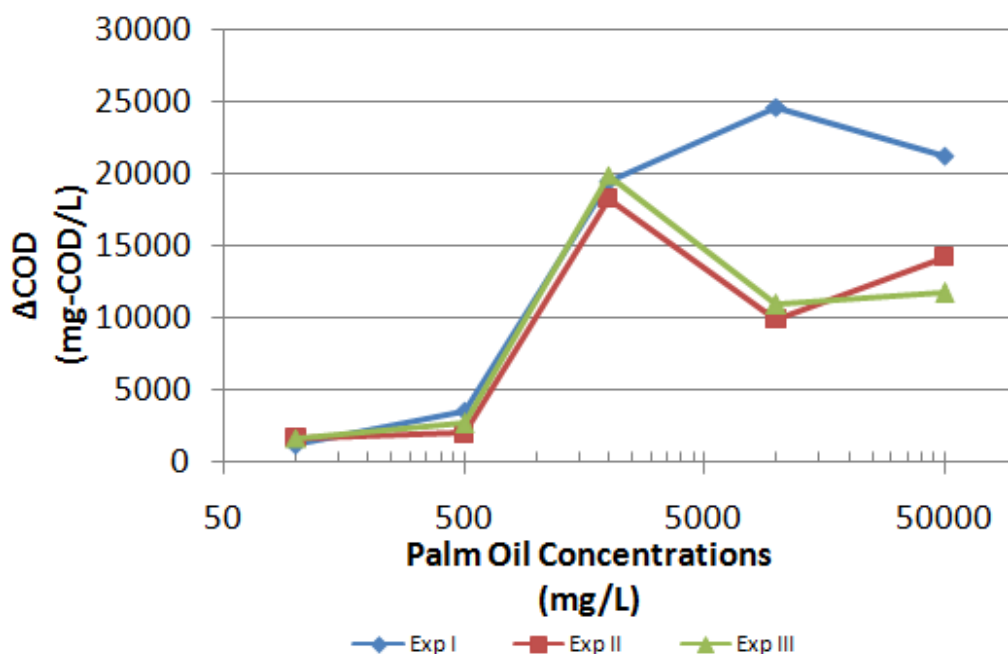
การย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	ค่ายัดของตะกอนจุลินทรีย์ (True growth yields; Y) (กรัม-เซลล์ซีโอดีต่อกรัม-ซีโอดี)
ไม่เติม SDS	0.11
เติม SDS	0.085



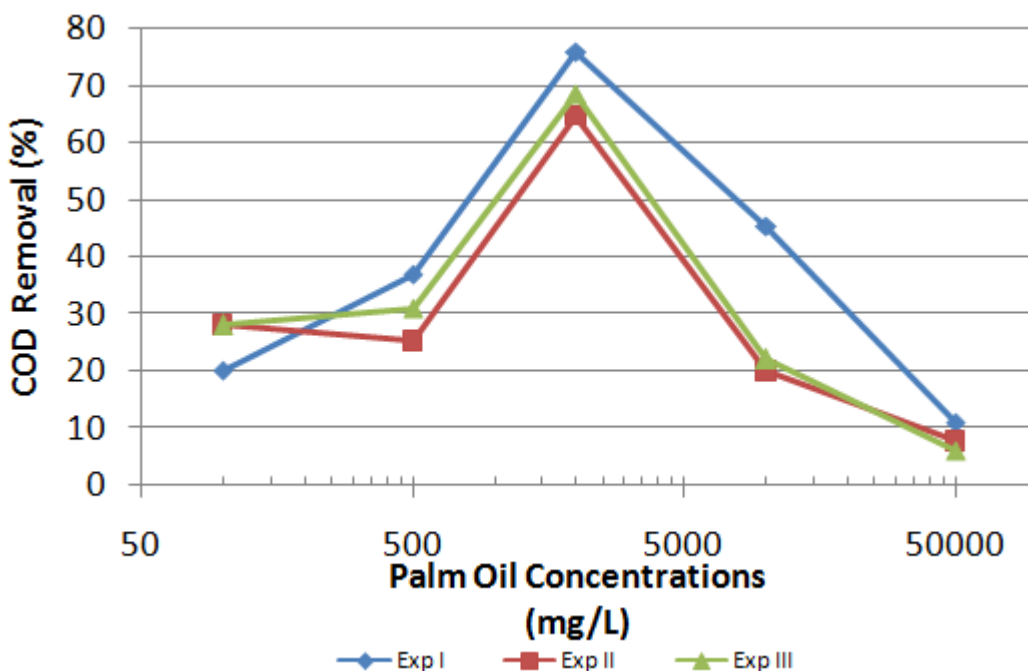
#### 4.4 การศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

##### 4.4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียเริ่มต้นและสุดท้าย

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากระบบการผลิตแก๊สชีวภาพของทั้ง 6 แบตช์ ในวันเริ่มต้นและสุดท้ายของการเดินระบบ ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลต่างซีโอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์มในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมัน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองที่ 1 ผลต่างค่าซีโอดีมีมากที่สุด ส่วนการทดลองอีก 2 ครั้งต่อมา ผลต่างค่าซีโอดีมีมากที่สุดที่ความเข้มข้นน้ำมัน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากภาพที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อความเข้มข้นน้ำมันปาล์มในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้นน้ำมัน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้มากที่สุด 75.89, 64.76 และ 68.47 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับจากนั้นประสิทธิภาพจึงลดลงที่ความเข้มข้นน้ำมันประมาณ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และต่ำสุดที่ความเข้มข้นน้ำมัน 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพียง 11.08, 7.64 และ 6.20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเหลืออยู่ประมาณ 170,589, 171,500 และ 176,350 มิลลิกรัม-ซีโอดีต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง บ่งชี้ว่าจุลินทรีย์อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) แล้วเพราะถูกกระตุ้นด้วยอาหารเป็นเวลา 1 เดือน



ภาพที่ 4.6: ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างซีโอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์มในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง



ภาพที่ 4.7: ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

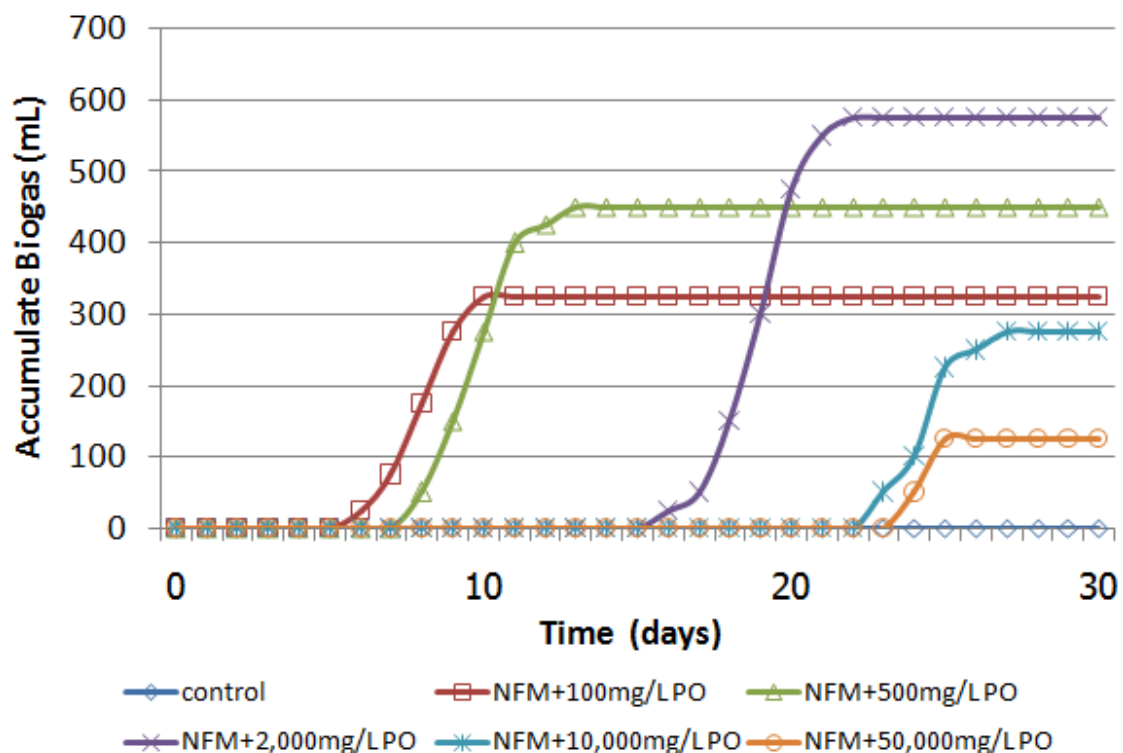
การวิเคราะห์ค่าพีเอชของระบบใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมี และแสดงถึงความสามารถของระบบบัพเฟอร์ที่ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช โดยได้กำหนดค่าพีเอชให้อยู่ที่ประมาณ 7.3 ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นพบว่าในแบคทีเรียที่ 4 และ 5 (ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยจากที่กำหนดไว้ตามทฤษฎี จึงอาจเป็นไปได้ว่าในทางปฏิบัติแล้วในน้ำเสียมิโมเลกุลของสารอินทรีย์ และอนินทรีย์มากมาย ทำให้โมเลกุล  $H^+$  อาจไปรวมกับสารประกอบอื่นในระบบ ขัดขวางการวัดค่าพีเอชเล็กน้อยก็เป็นได้ ขณะที่ผลจากการวัดค่าพีเอชหลังเดินระบบพบว่าในทุกๆแบคทีเรียจะมีค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นจากที่กำหนดไว้ (เพิ่มขึ้น 0.1-0.2) นั้นแสดงว่าในทางปฏิบัติแล้วระบบบัพเฟอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ค่อนข้างมีความเหมาะสมในการใช้ควบคุมสภาวะกรด-ด่างในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

#### 4.4.2 การหาค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว ( $K_s$ )

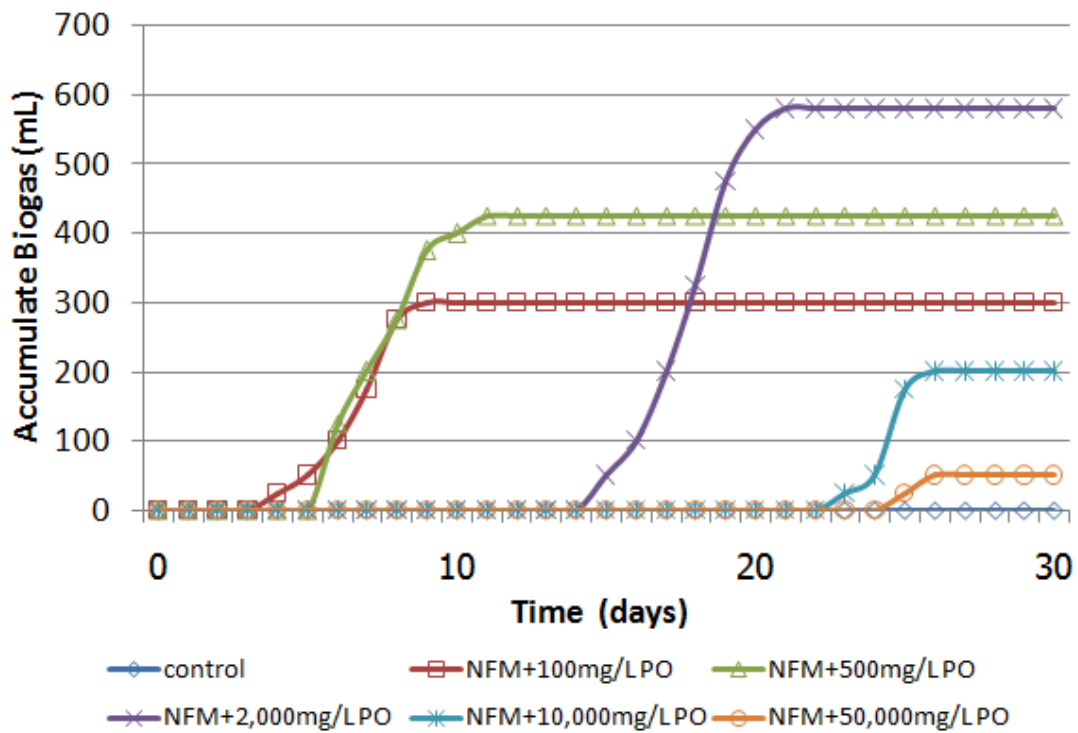
ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มของการทดลองทั้ง 3 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4.8-4.10 (control หมายถึงน้ำเสียที่ไม่มีสารปนเปื้อนน้ำมัน, NFM; Non fat milk หมายถึง น้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนย PO; Palm oil หมายถึง

น้ำมันปาล์ม) ผลการทดลองพบว่า ในการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมผลิตมากที่สุดเท่ากับ 575 มิลลิลิตร ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีช่วงการผลิตแก๊สชีวภาพมากที่สุดคือ 8 วัน โดยเริ่มผลิตในวันที่ 16 และสิ้นสุดในวันที่ 24 ของการทดลอง ส่วนการทดลองครั้งที่ 2 พบว่า ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมมากที่สุดเท่ากับ 580 มิลลิลิตร ได้จากการย่อยสลายของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มผลิตแก๊สในวันที่ 15 ของการทดลอง จากนั้นผลิตต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน จนสิ้นสุดในวันที่ 21 ของการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 3 การย่อยสลายของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมมากที่สุดเช่นกัน พบว่าจะเริ่มผลิตแก๊สในวันที่ 11 ของการทดลอง จากนั้นผลิตต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 วัน จนสิ้นสุดในวันที่ 16 ของการทดลองและได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมมากที่สุดเท่ากับ 525 มิลลิลิตร

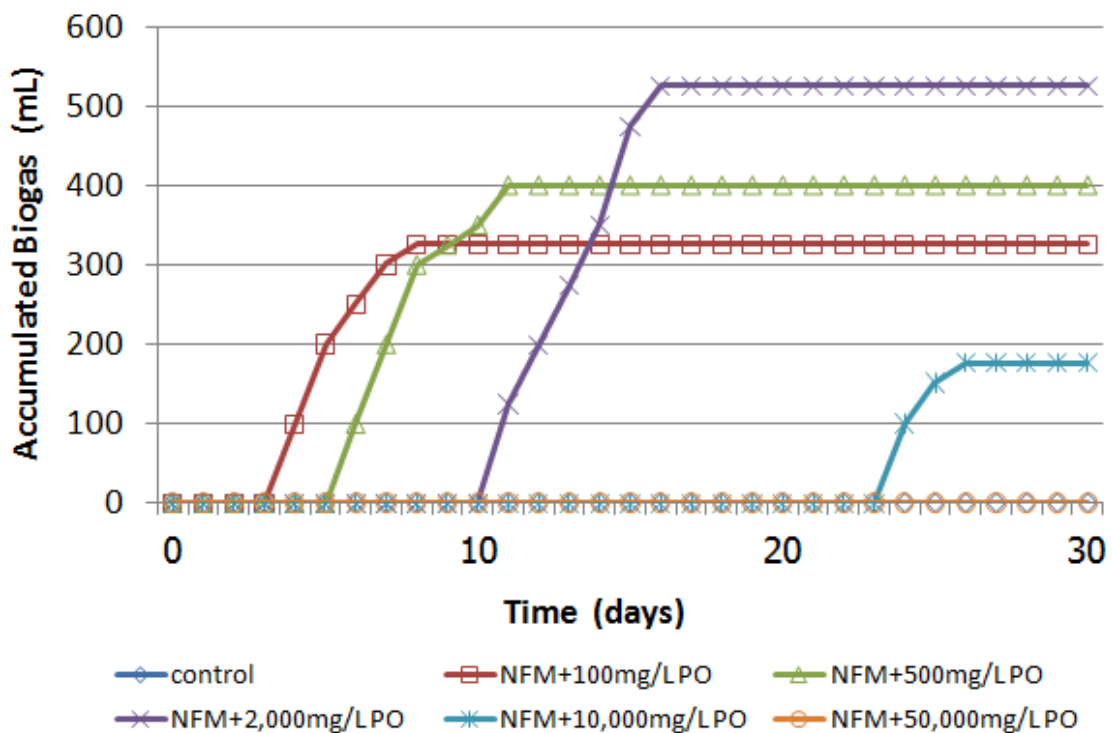
เมื่อเปรียบเทียบในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมัน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลิตแก๊สชีวภาพสะสมได้มากที่สุดทั้ง 3 ครั้ง โดยปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมมากที่สุดในงานวิจัยนี้เท่ากับ 580 มิลลิลิตร มาจากการทดลองในครั้งที่ 2



ภาพที่ 4.8: ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มครั้งที่ 1

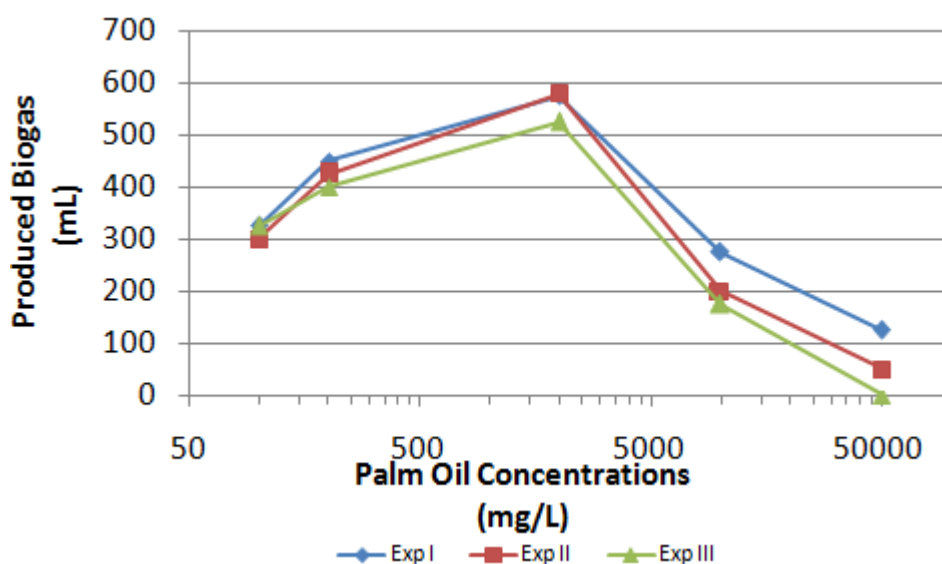


ภาพที่ 4.9: ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มครั้งที่ 2



ภาพที่ 4.10: ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มครั้งที่ 3

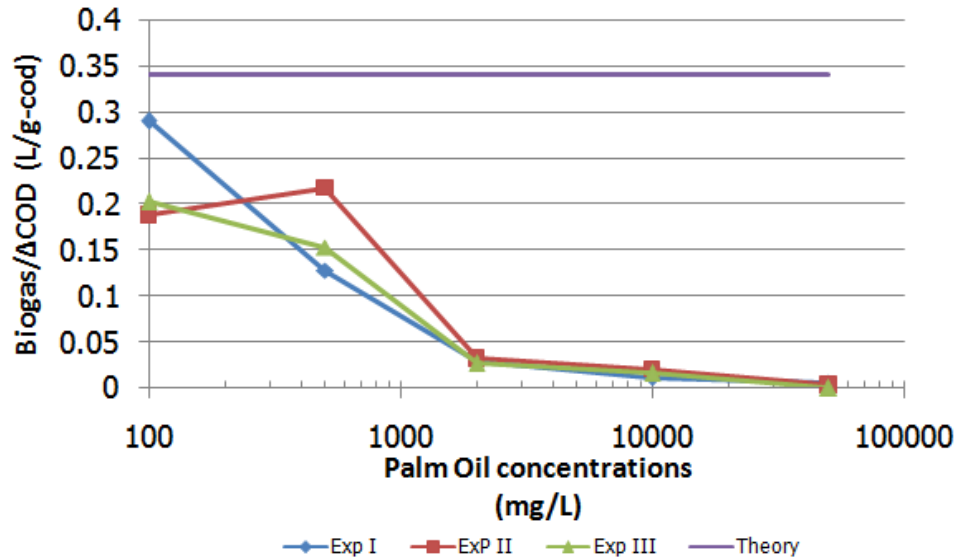
ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4.11 (Exp I คือการทดลองครั้งที่ 1, EXP II คือการทดลองครั้งที่ 2, Exp III คือการทดลองครั้งที่ 3) พบว่าระบบจะผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนเพิ่มมากขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบจะผลิตแก๊สชีวภาพได้มากที่สุด จากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 2,000 มิลลิกรัม ต่อลิตร โดยอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นน้ำมัน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในงานวิจัยนี้ และสาเหตุที่ระบบจะผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 2,000 มิลลิกรัม ต่อลิตรนั้น อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของน้ำมันที่มีมากเกินไปจนไปส่งผลต่อความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์



ภาพที่ 4.11: ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

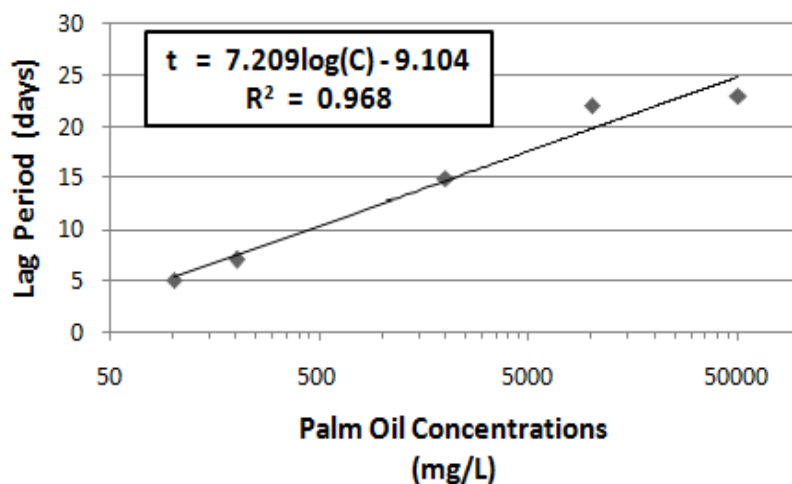
ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีไอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์มของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง (Exp I คือการทดลองครั้งที่ 1, EXP II คือการทดลองครั้งที่ 2, Exp III คือการทดลองครั้งที่ 3) พบว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าอัตราส่วน แก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีไอดีสูงสุด โดยถ้าความเข้มข้นน้ำมันเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีไอดีจะค่อยๆลดลง ที่ผลการทดลองแสดงออกมาเช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากในชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นน้ำมันมากส่งผลให้ค่าซีไอดีมีค่าที่มากตามไปด้วย และเมื่อคำนวณเป็นผลต่างของซีไอดีก็ยังมีค่าที่สูง

อยู่เมื่อเปรียบเทียบกับในชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นน้ำมันต่ำกว่า ส่งผลให้ที่ความเข้มข้นน้ำมันมากขึ้นมีค่าอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีโอดีที่น้อยนั่นเอง



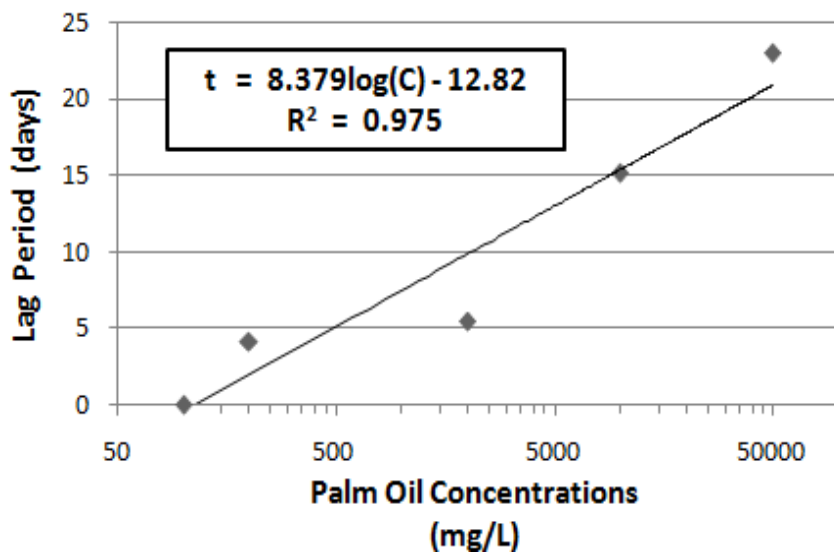
ภาพที่ 4.12: ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีโอดีกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

ในเรื่องของผลกระทบของความเข้มข้นน้ำมันต่อระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะปรับตัวของจุลินทรีย์กับฟังก์ชันลอการิทึมของน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4.12 4.13 และ 4.14 ในการทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น จุลินทรีย์ในระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจะใช้ระยะปรับตัวยาวนานมากขึ้น กล่าวคือระยะปรับตัวจุลินทรีย์จะแปรผันตามฟังก์ชันลอการิทึมของน้ำมันนั่นเอง



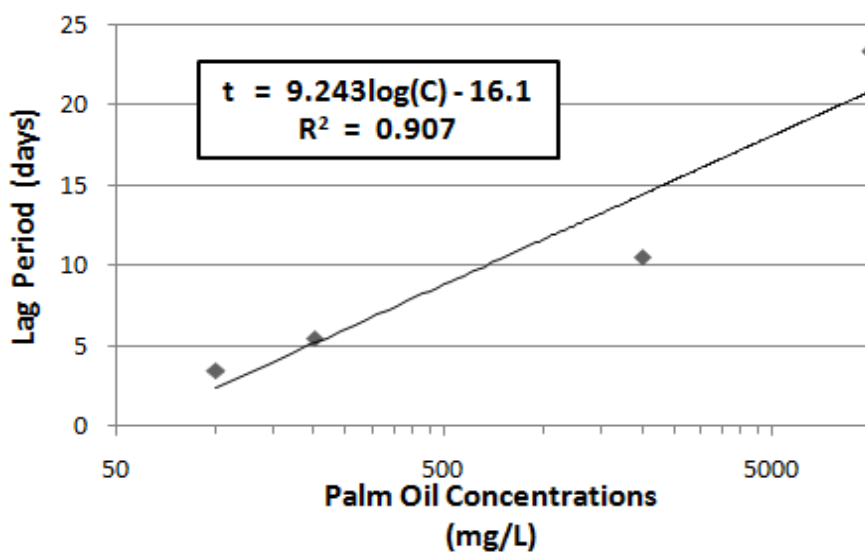
ภาพที่ 4.13: ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์

(t; ระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์, C; ความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ) ในการทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ 4.14: ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะเวลาปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์

(t; ระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์, C; ความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ) ในการทดลองครั้งที่ 2

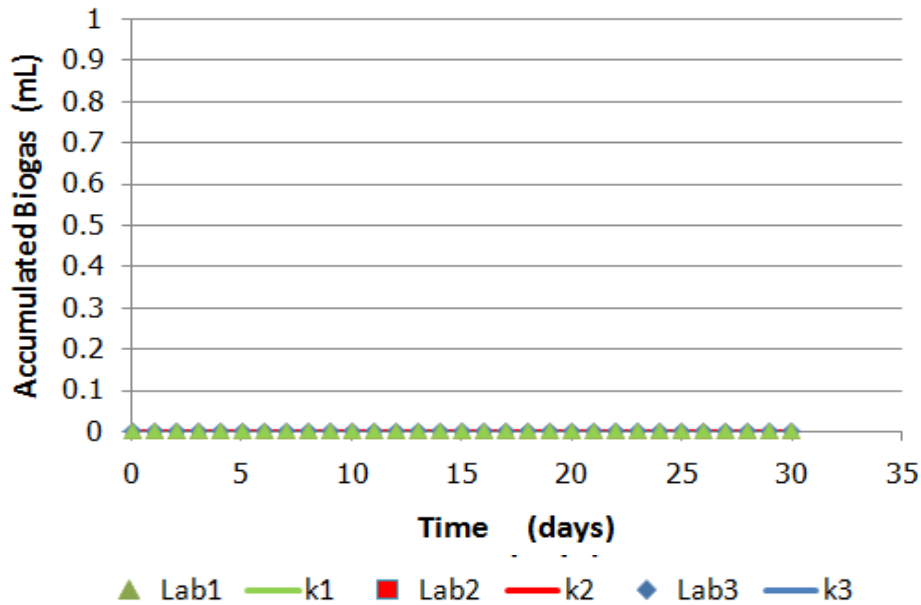


ภาพที่ 4.15: ผลของความเข้มข้นน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต่อระยะเวลาปรับตัว (Lag period) ของจุลินทรีย์

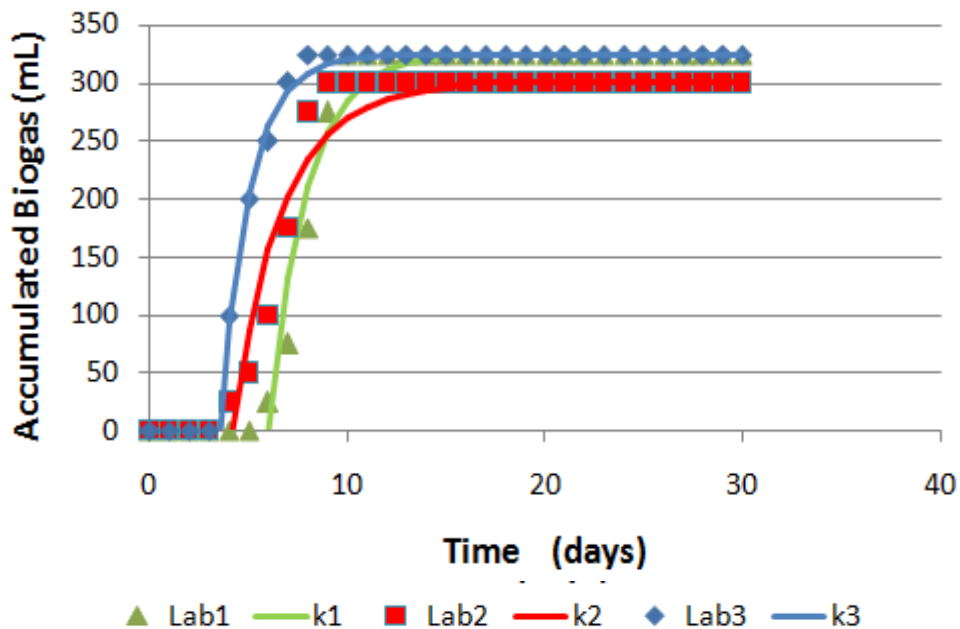
(t; ระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์, C; ความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม ) ในการทดลองครั้งที่ 3

จากนั้นนำข้อมูลปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองของทั้ง 6 แบบตซ์มาวิเคราะห์ด้วยสมการ  $G = G_m (1 - e^{-k(t-t_0)})$  ซึ่งสมการนี้สร้างขึ้นมาจากพื้นฐานที่กำหนดว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบเป็นปฏิกิริยอันดับที่ 1 (First-order reaction) กล่าวคือความเข้มข้นของซับสเตรตลดลงตามเวลา โดยที่ G คือปริมาณแก๊สชีวภาพที่เวลาต่างๆ,  $G_m$  คือปริมาณแก๊สชีวภาพมากที่สุด, k คือค่าคงที่อัตรา

การผลิตแก๊สชีวภาพ,  $t$  คือ เวลาในการผลิตแก๊สชีวภาพ และ  $t_0$  ระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์ ต่อมาสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้ฟังก์ชันการแก้สมการหาค่าตัวแปรของโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพหรือค่า  $k$  (1/วัน) แสดงในตารางที่ 4.5

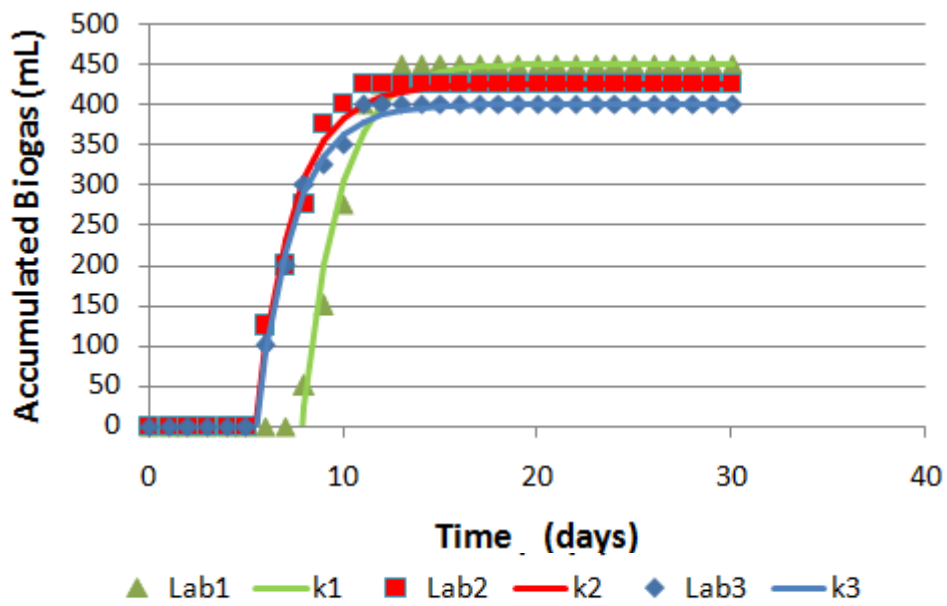


ภาพที่ 4.16: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

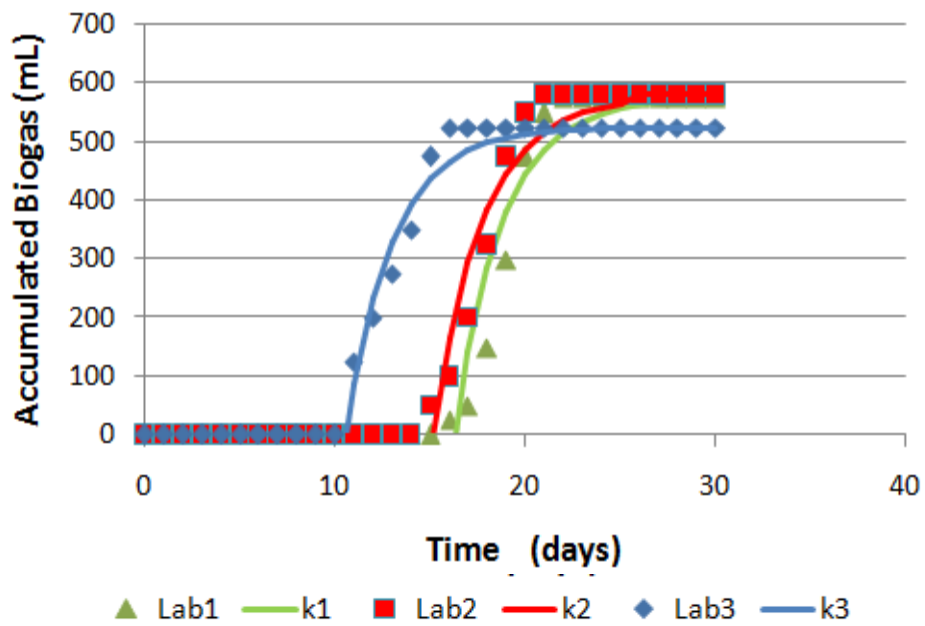


ภาพที่ 4.17: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

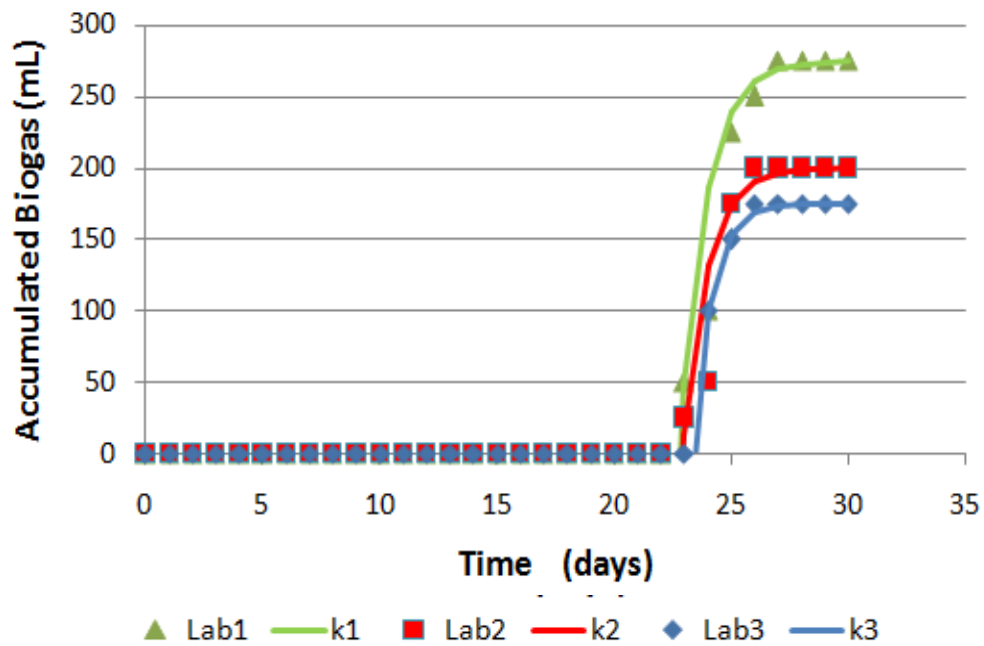




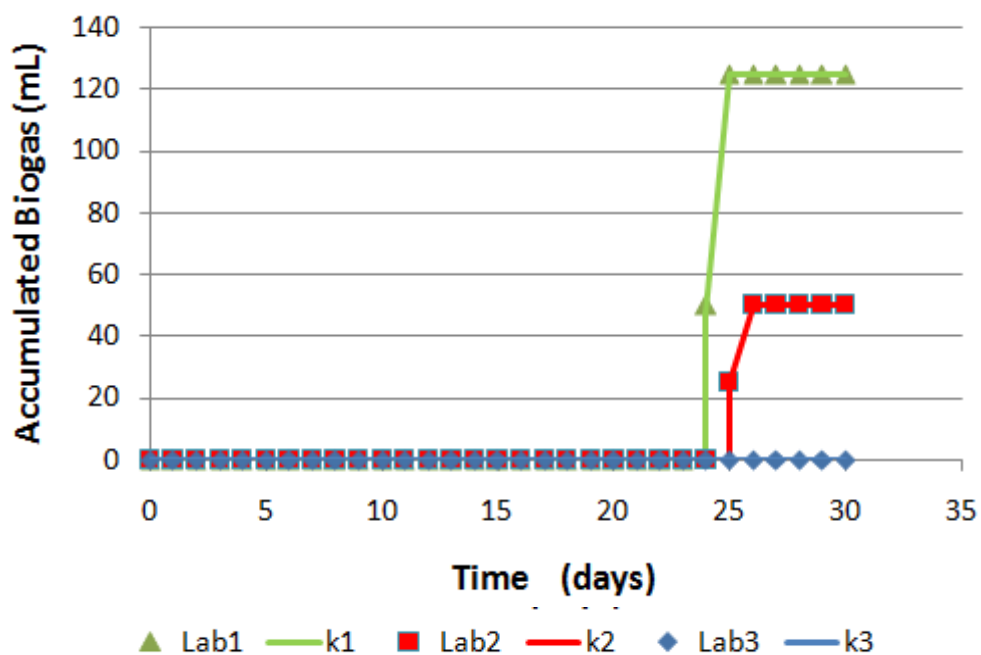
ภาพที่ 4.18: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิบัติการการผลิตแก๊สชีวภาพ  
ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.19: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิบัติการการผลิตแก๊สชีวภาพ  
ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.20: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ  
ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.21: การสร้างกราฟเส้นจำลองปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพ  
ที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มลิตรปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

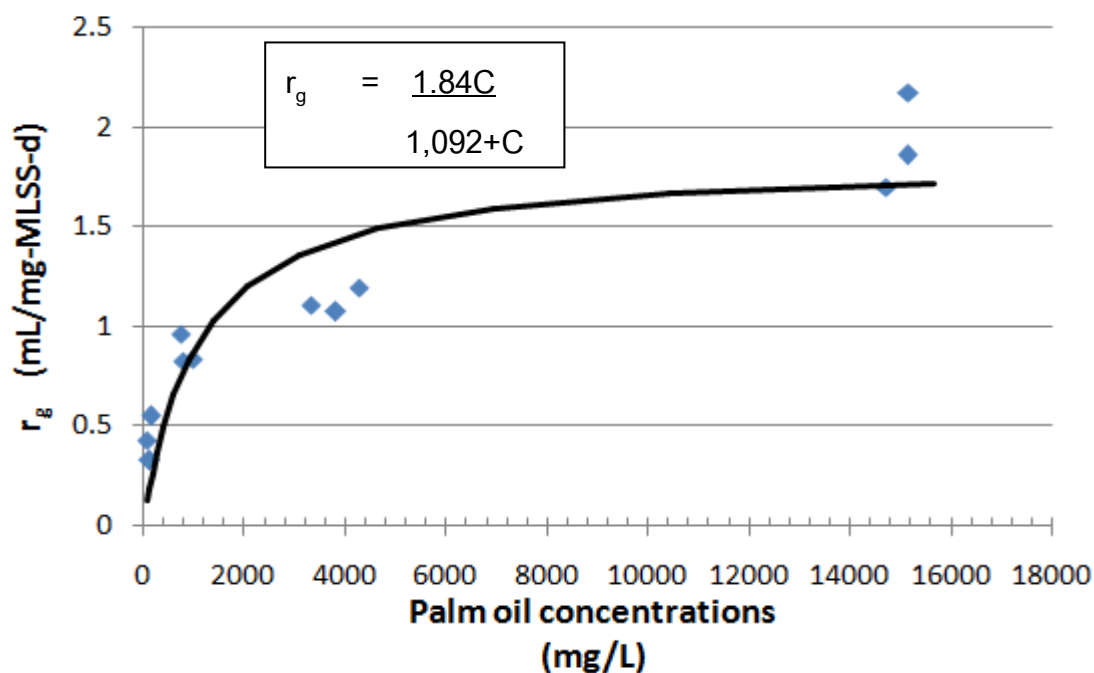
ตารางที่ 4.5: อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม ของชุดการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

ความเข้มข้น น้ำมันปาล์ม	$k_1$ (1/d)	$k_2$ (1/d)	$k_3$ (1/d)	$k_{avg}$ (1/d)
ไม่ปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์ม	0	0	0	0
100 มก/ล.	0.53	0.39	0.65	0.52±0.13
500 มก/ล.	0.54	0.50	0.52	0.52±0.02
2,000 มก/ล.	0.40	0.37	0.40	0.39±0.02
10,000 มก/ล.	0.93	1.01	1.27	1.07. ±0.18
50,000 มก/ล.	5.32	5.28	0.00	3.53 ±3.01

ผลการหาค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สชีวภาพพบว่า มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นน้ำมันสูงขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นน้ำมันเพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกันในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง โดยค่าอัตราเร็วในการเกิด ปฏิกิริยา ที่ได้จะถูกนำไปสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม (ภาพที่ 4.10) เพื่อวิเคราะห์หาค่าทางจลนพลศาสตร์ด้วยสมการ

$$r_g = \frac{k_m C}{K_s + C}$$

สมการดังกล่าวข้างต้นคือสมการโมนอดซึ่งเป็นสมการที่สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ทางชีวภาพของระบบที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ได้ เริ่มต้นด้วยการหาค่า  $r_g$  จากการนำค่าคงที่ ( $k$ ) คูณกับค่าซีโอดีเริ่มต้นและหารด้วยค่าของแฉ่งแขวนลอย จากนั้นนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $r$  กับความเข้มข้นน้ำมันตามสมการของ Monod และใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์หาค่าตัวแปรแบบ Non-Linear Regression ได้ผลดังภาพที่ 4.22 และค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ค่าได้ คือ  $k_m = 1.84 \pm 0.19$  ต่อวัน และ  $K_s = 1,092 \pm 452$  มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ  $1.09 \pm 0.45$  กิโลกรัม -ซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร โดยการเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์กับงานวิจัยอื่นจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 4.5



ภาพที่ 4.22: การสร้างกราฟโมนอดจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (Rate of Biogas) กับความเข้มข้นน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

#### 4.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงผลดังตารางที่ 4.6 – 4.8 พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีองค์ประกอบเป็นแก๊สมีเทนมากที่สุดในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ได้แก่ 65.66, 65.62 และ 61.60 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองครั้งที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6: องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 1

ชุดการทดลอง	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (เปอร์เซ็นต์)		
	มีเทน	คาร์บอนได-ออกไซด์	อื่นๆ
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	-	-	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	45.09	54.91	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	48.78	51.22	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	56.50	43.39	0.12
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	61.60	38.40	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	45.52	54.46	-

หมายเหตุ: โครมาโตแกรมของทั้ง 6 ชุดการทดลองแสดงในภาคผนวก

ตารางที่ 4.7: องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 2

ชุดการทดลอง	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (เปอร์เซ็นต์)		
	มีเทน	คาร์บอนได-ออกไซด์	อื่นๆ
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	-	-	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	44.68	55.32	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	46.99	53.01	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	55.19	44.46	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	65.62	34.53	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	49.39	50.61	-

หมายเหตุ: โคโรมาโตรแกรมของทั้ง 6 ชุดการทดลองแสดงในภาคผนวก

ตารางที่ 4.8: องค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ของชุดการทดลองครั้งที่ 3

ชุดการทดลอง	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (เปอร์เซ็นต์)		
	มีเทน	คาร์บอนได-ออกไซด์	อื่นๆ
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	-	-	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	44.01	55.99	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	48.85	51.58	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	61.49	38.51	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	65.66	34.34	-
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	-	-	-

หมายเหตุ: โคโรมาโตรแกรมของทั้ง 6 ชุดการทดลองแสดงในภาคผนวก

ในภาพรวมการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 พบว่าปริมาณมีเทนที่ผลิตได้เท่ากับ  $52.94 \pm 8.64$  เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ  $47.06 \pm 8.65$  เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆอีก  $0.008 \pm 0.018$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีแล้ว ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก็มีค่าน้อยกว่าทฤษฎีประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน

ตารางที่ 4.9: สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ

ชุดการทดลอง	องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (เปอร์เซ็นต์)		
	มีเทน	คาร์บอนได- ออกไซด์	อื่นๆ
การทดลองครั้งที่ 1	51.50±7.27	48.48±4.28	0.024±0.0537
การทดลองครั้งที่ 2	52.31±8.42	47.57±8.35	0.00
การทดลองครั้งที่ 3	55.00±10.24	45.11±10.32	0.00
เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง	52.94±8.64	47.06±8.65	0.008±0.018
จากสตอยซิโอเมตรี	73.00	27.00	0.00

#### 4.5 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ค่าyieldที่แท้จริง (True growth yield:  $Y$ ) ได้จากการทดลองเรื่องการการศึกษาค่าyieldของตะกอนจุลินทรีย์ใน กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปาล์มแบบที่มี/ไม่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate;  $\mu_m$ ) และค่าคงที่การอิ่มตัว (Half saturation constant;  $K_s$ ) ได้จากการทดลองเรื่องการหาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม ทั้ง 3 ครั้ง โดยทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆที่ได้รับกับงานวิจัยอื่นที่มีความสอดคล้องกันในประเด็นของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมัน ชับสเตรตอยู่ในกลุ่มสารประกอบประเภทไขมันและน้ำเสียจริงที่มีสารประกอบประเภทไขมันเป็นส่วนประกอบ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่

#### 4.10

จากตารางพบว่าค่าyieldที่ได้รับทั้งแบบที่ไม่เติม/เติม SDS คือ 0.11 และ 0.085 กรัม-เซลล์ซีไอดีต่อกรัม-ซีไอดีตามลำดับ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pavlostathis และ Giraldo-Gomez (1991) ที่อยู่ในช่วง 0.06-0.16 กรัม-เซลล์ซีไอดีต่อกรัม-ซีไอดี โดยมีกรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ) เป็นซับสเตรต ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับในงานวิจัยข้างต้น กล่าวคือในน้ำเสียทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบของสารประเภทไขมันเหมือนกัน ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก็มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นโมเลกุลของกรดไขมันสายยาวจึงทำให้ค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยดังกล่าว

ในส่วนของการเปรียบเทียบค่า  $k_m = 1.84 \pm 0.19$  ต่อวัน พบว่ามีค่ามากกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ ส่วนค่า  $K_s = 1,092 \pm 452$  มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ  $1.09 \pm 0.45$  กิโลกรัม-ซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Novak และ Carlson (1970) ซึ่งใกล้เคียงกับในกรณีที่ใช้ มีสทิเรต เป็นซับสเตรต งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มเป็นซับสเตรตร่วม (Co-substrate) ปนเปื้อนลงไปในการเลี้ยง ซึ่งน่าจะมีมีสทิเรตเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน จึงทำให้ค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และยังพบว่าอยู่ในช่วงของงานวิจัยของ Pavlostathis และ Giraldo-Gomez (1991) ที่รายงานไว้โดยใช้กรดไขมันสายยาว (แอลซี-เอฟเอ) เป็นซับสเตรต

ตารางที่ 4.10: การเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์กับงานวิจัยก่อนหน้า

ชั้นเสถียร/น้ำเสีย	Y (กรัม-เซลล์ซีไอดีต่อ กรัม-ซีไอดี)	$k_m$ (ต่อวัน)	$K_s$ (กิโลกรัม-ซีไอดี ลูกบาศก์เมตร)	อ้างอิง
น้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนย ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	0.11 (ไม่เติม SDS) 0.085 (เติม SDS)	1.84±0.19	1.09±0.45	งานวิจัยนี้
สเทียเรต	0.055	0.1	0.295	Novak และ Carlson (1970)
ปาล์มิเอต	0.054	0.11	0.41	Novak และ Carlson (1970)
มิสทีเรต	0.053	0.08	1.23	Novak และ Carlson (1970)
โอเลเอต	0.054	0.44	9.21	Novak และ Carlson (1970)
ไลโนเลเอต	0.055	0.55	5.19	Novak และ Carlson (1970)
กรดไขมันสายยาว (แอลซีเอฟเอ)	0.06-0.16	0.085-0.55	0.105-3.18	Pavlostathis และ Giraldo-Gomez (1991)
น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก	0.18	-	-	Borja และคณะ (1995)
โอเลเอต/มุลส์ตอร์/น้ำมัน	0.05	0.55	0.058	Angelidaki และคณะ (1999)
น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์	-	-	0.102	Masse และคณะ (2002)
น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก	0.057	-	-	Beltran และคณะ (2007)
น้ำเสียจากโรงงานผลิตนมสด	-	-	2.01	กาญจนา ครอบธรรมชาติ และคณะ (2549)



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ ดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตที่ทำการวิเคราะห์ คือ ค่าyield ที่แท้จริง ของตะกอนจุลินทรีย์พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.11 มิลลิกรัม-เซลล์ซีไอต่อมิลลิกรัม -ซีไอดีในการทดลองของการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่ไม่เติม SDS และเท่ากับ 0.085 มิลลิกรัม-เซลล์ซีไอต่อมิลลิกรัม -ซีไอดีในการทดลองของการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เติม SDS การเติม SDS ซึ่งมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ลงไปในระบบการย่อยสลาย มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และส่งผลให้ค่า yield ของตะกอนจุลินทรีย์ลดลง 22.73 เปอร์เซ็นต์
- 2) การผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุด และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณมากที่สุดในงานวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนระหว่างแก๊สชีวภาพต่อผลต่างค่าซีไอดียังคงสูง อยู่ที่ความเข้มข้นน้ำมันประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) ระยะเวลาปรับตัวของจุลินทรีย์ (Lag period) ในการผลิตแก๊สชีวภาพ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ และแปรผันตามฟังก์ชันลอการิทึมของความเข้มข้นน้ำมัน
- 4) ค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ในงานวิจัยนี้ได้แก่  $k_m = 1.84 \pm 0.19$  ต่อวัน และค่า  $K_s = 1,092 \pm 452$  มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถนำไปประมาณขีดสเตรตที่ต้องการ และออกแบบถังปฏิกิริยาได้ต่อไปในอนาคต
- 5) ค่าต่างๆที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในระดับโรงงานต้นแบบ และระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต ตัวอย่างเช่น สมการระยะปรับตัวของจุลินทรีย์สามารถนำไปประมาณระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบ (Start-up) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มได้

#### 5.2 ความสำคัญด้านวิศวกรรม และการนำไปใช้งาน

ผลที่ได้จากการทำงานวิจัยสามารถนำไปใช้ในด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) ค่าอัตราการกำจัดซีไอดี และค่าอัตราส่วนแก๊สชีวภาพต่อผลต่างซีไอดี สามารถนำไปใช้ในการประเมินระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบได้

- 2) สมการระยะปรับตัวของจุลินทรีย์สามารถนำไปประมาณระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบ (Start-up) ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มได้
- 3) ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ หรือปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพต่อไปในอนาคต

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้พบประเด็นที่น่าสนใจ และเหมาะแก่การนำมาเสนอแนะเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยชิ้นนี้ต่อไปในอนาคต โดยสรุปได้ดังนี้

- 1) ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติของน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อรวบรวมข้อมูลในการนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียต่อไปในอนาคต
  - 2) นำสมการระยะปรับตัวของจุลินทรีย์ไปใช้กับน้ำเสียจริง เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการ และปรับปรุงพัฒนาสมการให้ดียิ่งขึ้น
  - 3) นำข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ที่ได้พัฒนาเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางชีวภาพ และพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปต่อไปในอนาคต

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กาญจนาภา ครองธรรมชาติ, สมชาย ดารารัตน์ และปรียาพร พันธุ์สุธา. 2549. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 20, 1: 61-67.
- กรมควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือแนวทางการจัดการน้ำมันและไขมันจากบ่อดักไขมันและการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับชุมชน. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ, 2551.
- ธีระ เกรอต. วิศวกรรมน้ำเสีย : การบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- พจนานุกรมไทยฉบับวิจิตรราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ.2542. แก๊สชีวภาพ [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา : <http://rirs3.royin.go.th/new-search/word-search-all-x.asp> [12 กุมภาพันธ์ 2554]
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์, เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์, คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ. เล่มที่ 2. โครงการจัดทำคู่มือระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ดำเนินการโดยศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และฝ่ายควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2546.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม . ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับแก๊สชีวภาพ [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา : <http://efe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=cMS7s93gtBdrFxFPI&doc=ITFaKGjJSRsnVCNy> [12 กุมภาพันธ์ 2554]
- สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพณิชยกิจ. ชีวมวลเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฑทอง, 2545.

### ภาษาอังกฤษ

- Alves, M.M., Vieira, J.A., Pereira, R.M., Pereira, M.A. and Mota, M. 2001. Effects of Lipids and Oleic Acid on Biomass Development in Anaerobic Fixed-Bed Reactors. Part I: Oleic Acid Toxicity and Biodegradability. Water Resources. 35: 264-270.
- Alves, M.M., Pereira, M.A., Sousa, D.Z., Cavaleiro, A.J., Picavet, M., Smidt, H. and Stams, A.J.M. 2009. Waste Lipids to Energy: How to Optimize Methane Product

- ion from Long-Chain Fatty Acids (LCFA). Microbial Biotechnology. 2: 538-550.
- American Biogas Council. 2011. Biogas [Online]. 2011 Available from: [http://www.americanbiogascouncil.org/biogas\\_questions.asp](http://www.americanbiogascouncil.org/biogas_questions.asp) [2011, February 12]
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. 1992. Effects of Free Long-Chain Fatty Acids on Thermophilic Anaerobic Digestion. Applied Microbiology and Biotechnology. 37: 808-812.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. and Ahring, B.K. 1999. A Comprehensive Model of Anaerobic Bioconversion of Complex Substrates to Biogas. Biotechnology and Bioengineering. 63: 363-372.
- APHA; AWWA; and WPCF. 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21<sup>st</sup> ed., APHA Inc.
- Chipasa, K.B. and Medrzycka, K. 2006. Behavior of Lipids in Biological Wastewater Treatment Processes. Industrial Microbiology and Biotechnology. 33: 635-645.
- Demirbas, A. Green Energy and Technology. Biohydrogen. London, UK: Springer-Verlag, 2009.
- Demirbas, A. Green Energy and Technology. Biorefineries London, UK: Springer-Verlag, 2010.
- Eastmann, J.A. and Ferguson, J.F. 1981 Solubility of Particulate Organic During The Acid Phase of Anaerobic Digestion. Water Pollution Control Federation. 53: 352-366.
- Elefsiniotis, P. and Oldham, W.K. 1994. Substrate Degradation Patterns in Acid-Phase Anaerobic Digestion of Municipal Primary Sludge. Environmental Technology. 15: 741-751.
- Fountoulakis, M.S., Drakopoulou, S., Terzakis, S., Georgaki, E. and Manios, T. 2008. Potential for Methane Production from Typical Mediterranean Agro-Industrial By-Products. Biomass and Bioenergy. 32: 155-161.
- Grady, C.P.L. Jr. and Lim, H.C. Biological Wastewater Treatment.: Theory and Applications. New York, USA: Marcell Dekker Inc., 1980.
- Grady, C.P.L. Jr., Daigger, G.T. and Lim, H.C. Biological Wastewater Treatment. 2<sup>nd</sup> ed., New York, USA: Marcell Dekker Inc., 1999.
- Hanaki, K., Nagase, M., and Matsuo, T. 1981. Mechanism of Inhibition Caused by Long-Chain Fatty Acids in Anaerobic Digestion Process. Biotechnology and

- Bioengineering. 23: 1591-1610.
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [Online]. 2011. Available from: <http://old.iupac.org/goldbook/F02330.pdf> [2011, January 24]
- Jingura, R.M. and Matengaifa, R. 2009. Optimization of Biogas Production by Anaerobic Digestion for Sustainable Energy Development in Zimbabwe. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 1116–1120.
- Kalyuzhnyi, S., Veeken, A. and Hamelers, B. 2000. Two-Particle Model of Anaerobic Solid-State Fermentation. Water Science Technology. 41: 43-50.
- Kuang, Y. Enhancing Anaerobic Degradation of Lipids in Wastewater by Addition of Co-substrate. Doctoral dissertation, Program in Environmental science, Murdoch University, Australia, 2002.
- Lalman, J.A. and Bagley, D.M. 2001. Anaerobic Degradation and Methanogenic Inhibitory Effects of Oleic and Stearic Acids. Water Resources. 35: 2975-2983.
- Lalman, J.A. and Bagley, D.M. 2002 Effects of C18 Long Chain Fatty Acids on Glucose, Butyrate and Hydrogen Degradation. Water Resources. 36: 3307-3313.
- Lema, J.M. and Omil, F. 2001 Anaerobic Treatment: A Key Technology for Sustainable Management of Wastes in Europe. Water Science and Technology. 44: 133-140.
- Madigan T.M., Martinko J.M. and Parker J. 1997. Brock Biology of Microorganisms. 8<sup>th</sup> ed., Prentice Hall International, USA.
- Masse, L., Masse D.I., Kennedy, J.K. and Chou, S.P. 2002. Neutral Fat Hydrolysis and Long Chain Fatty Acid Oxidation During Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Wastewater. Biotechnology and Bioengineering. 79: 43-52.
- McInerney, M.J. Anaerobic Hydrolysis and Fermentation of Fats and Proteins. In A.J.B. Zehnder (ed.), Biology of Anaerobic Microorganisms, pp.373-416. John Wiley and Sons, 1988.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 2003.
- Mongkolthananuk, V. and Dharmsthiti, S. 2002. Biodegradation of Lipid-Rich Wastewater by A Mixed Bacterial Consortium. International Biodeterioration and Biodegradation. 50: 101-105.

- Mohamed, H., Ebtessam, E.B. and Nawal, I. 2004. Bioremediation of Vegetable Oil and Grease from Polluted Wastewater using A Sand Biofilm System. Microbiology and Biotechnology. 20: 551-557.
- Novak, J.T. and Calson, D.A. 1970. The Kinetics of Anaerobic Long Chain Fatty Acid Degradation. Water Pollution Control Federation. 42: 1932-1943.
- Pavlostathis, S.G. and Giraldo-Gomez, E. 1991. Kinetics of Anaerobic Treatment. Water Science Technology. 24: 35-59.
- Pereira, M.A., Pires, O.C., Mota, M. and Alves, M.M. 2002. Anaerobic Degradation of Oleic Acid by Suspended and Granular Sludge: Identification of Palmitic Acid as A Key Intermediate. Water Science and Technology. 45: 139-144.
- Pereira, M.A., Sousa, D.Z. ,Mota, M. and Alves, M.M. 2004. Mineralization of LCFA Associated with Anaerobic Sludge: Kinetics, Enhancement of Methanogenic Activity, and Effect of VFA. Biotechnology and Bioengineering. 88: 502-511.
- Pereira, M.A., Sousa, D.Z. ,Mota, M. and Alves, M.M. 2005. Anaerobic Biodegradation of Oleic and Palmitic Acids: Evidence of Mass Transfer Limitations Caused by Long Chain Fatty Acid Accumulation onto The Anaerobic Sludge. Biotechnology and Bioengineering. 92: 15-23.
- Quemeneur, M. and Marty, Y. 1993. Fatty Acids and Sterols in Domestic Wastewater. Water Resources. 28: 1217-1226.
- Salminen, E. and Rintala, J. 2002. Anaerobic Digestion of Organic Solid Poultry Slaughterhouse Waste: a review. Bioresource Technology. 83: 13-26.
- Schmalz, K. and Kerrigan, P.K. 2003. Lipid Review and Teaching Tips in Nutrition. Health Promotion. 1: 164-173.
- Sekiguchi, Y., Kamagata, Y. and Harada, H. 2001 Recent Advances in Methane Fermentation Technology. Current Opinion in Biotechnology. 12: 277-282.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater. Archae Press. Nashville, Tennessee.
- U.S. Department of Energy. What is Biogas? [Online]. 2011. Available from: [http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/emerging\\_biogas\\_what\\_is.html](http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/emerging_biogas_what_is.html) [2011, January 30]

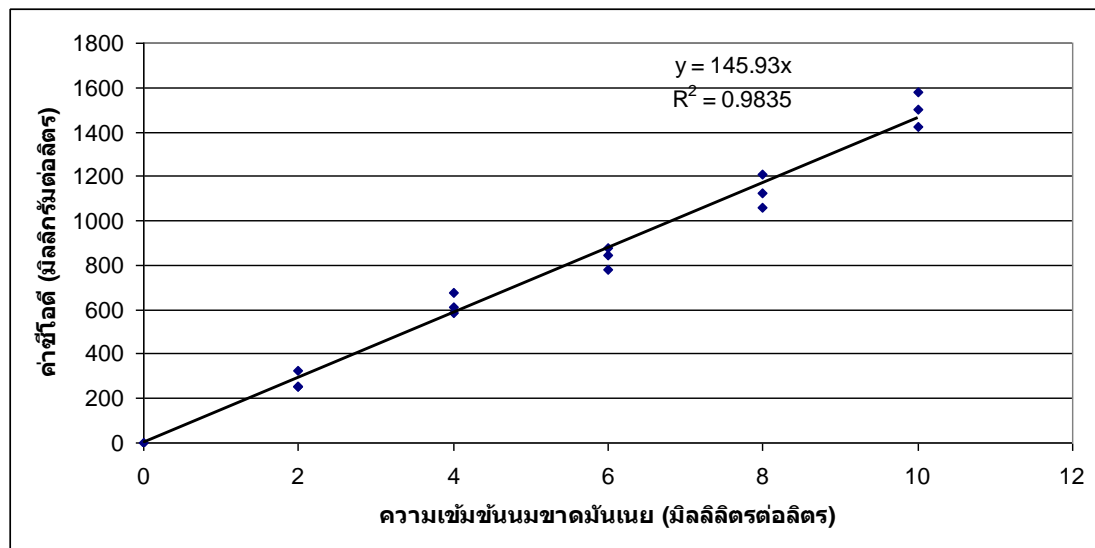
Wheatly, A.D. 1997. Applications of Anaerobic Digestion for the Treatment of Industrial Wastewater in Europe. Water and Environmental Management. 11: 39-46.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

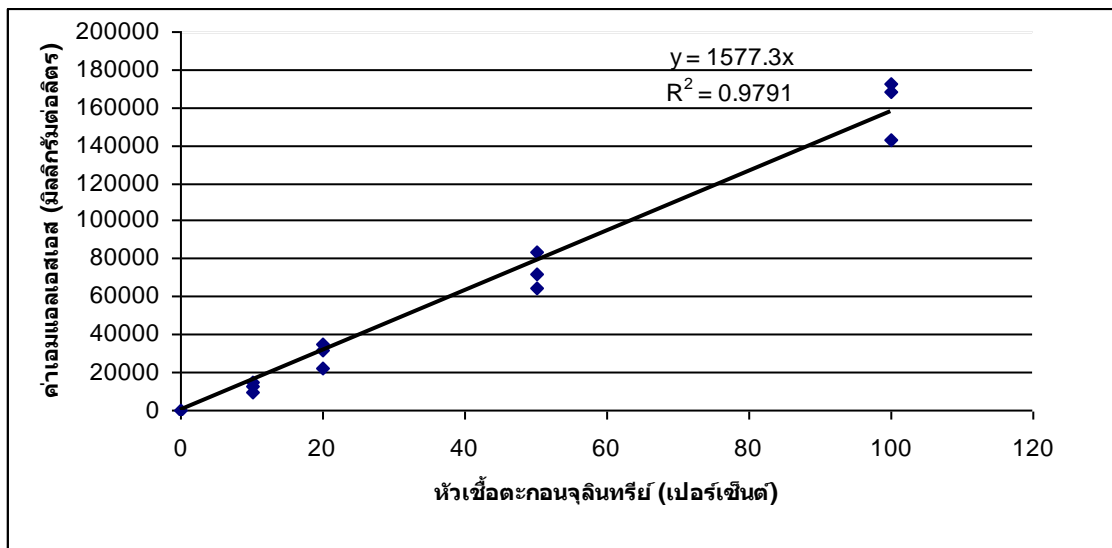
### กราฟมาตรฐานทั้งหมด



ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของนมน้ำมันเนย

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลดิบค่าซีไอดีของนมน้ำมันเนย

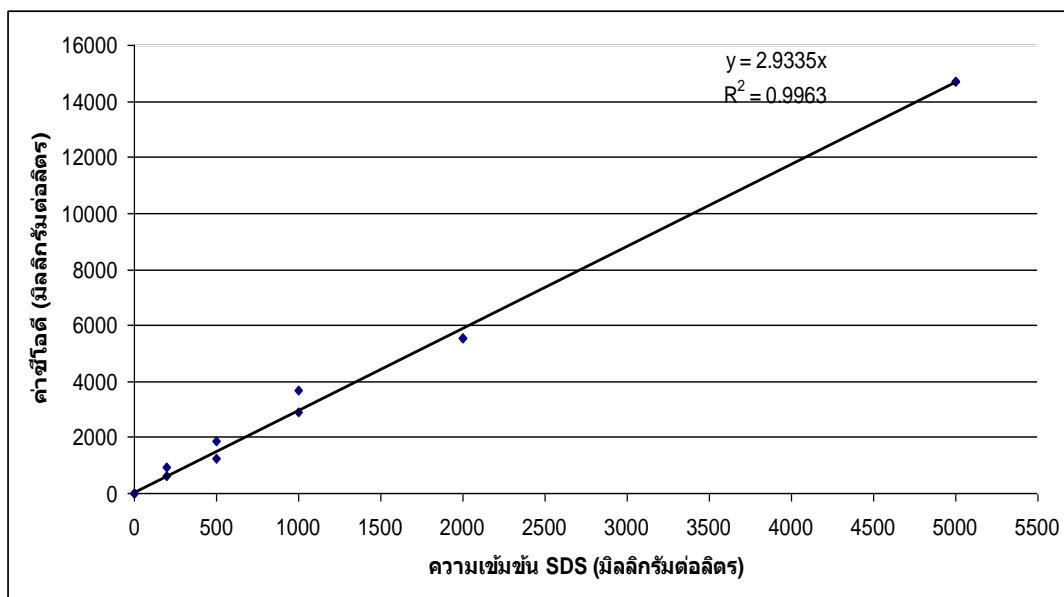
ความเข้มข้นนมน้ำมันเนย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0
0	0
0	0
2	252
2	252
2	322
4	585
4	674
4	610
6	780
6	846
6	880
8	1,060
8	1,124
8	1,210
10	1,420
10	1,500
10	1,580



ภาพที่ ก.2 กราฟมาตรฐานค่า MLSS ของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลดิบค่า MLSS ของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

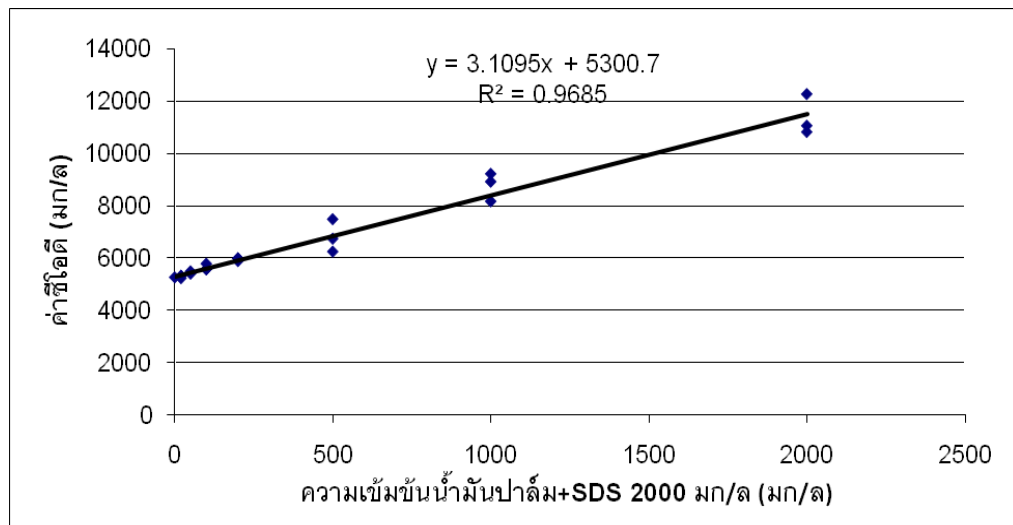
หัวเชื้อตะกอน จุลินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเอ็มแอลเอสเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0
10	9,200
10	15,200
10	12,300
20	35,010
20	22,000
20	32,000
50	72,000
50	83,120
50	65,000
100	168,200
100	172,100
100	143,300



ภาพที่ ก.3 กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)

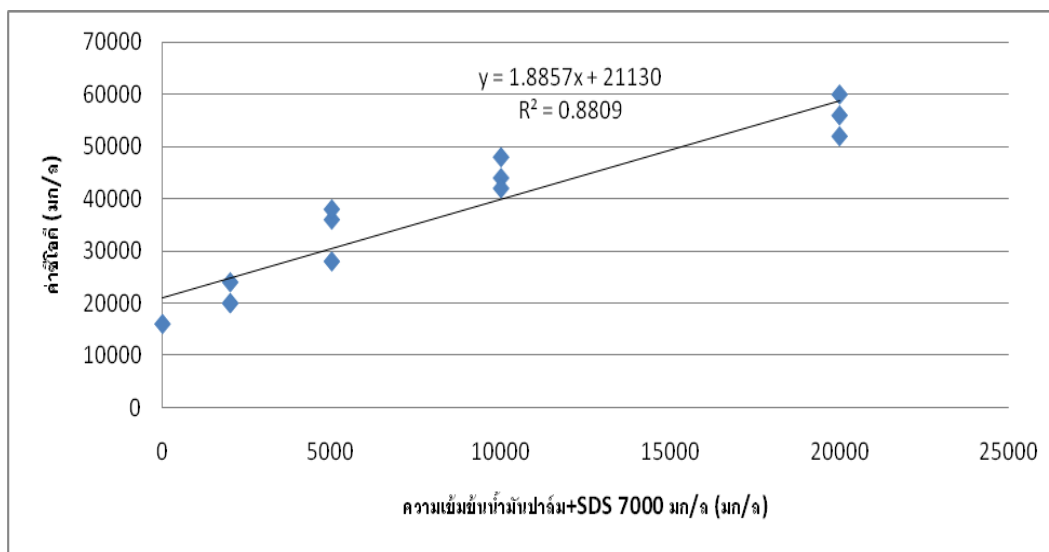
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลดิบค่าซีไอดีของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)

ความเข้มข้น SDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0
200	610
200	920
500	1,230
500	1,840
1,000	2,910
1,000	3,680
2,000	5,520
2,000	5,520
5,000	14,720
5,000	14,720



ภาพที่ ก.4 กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 0-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร  
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลดิบค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 0-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

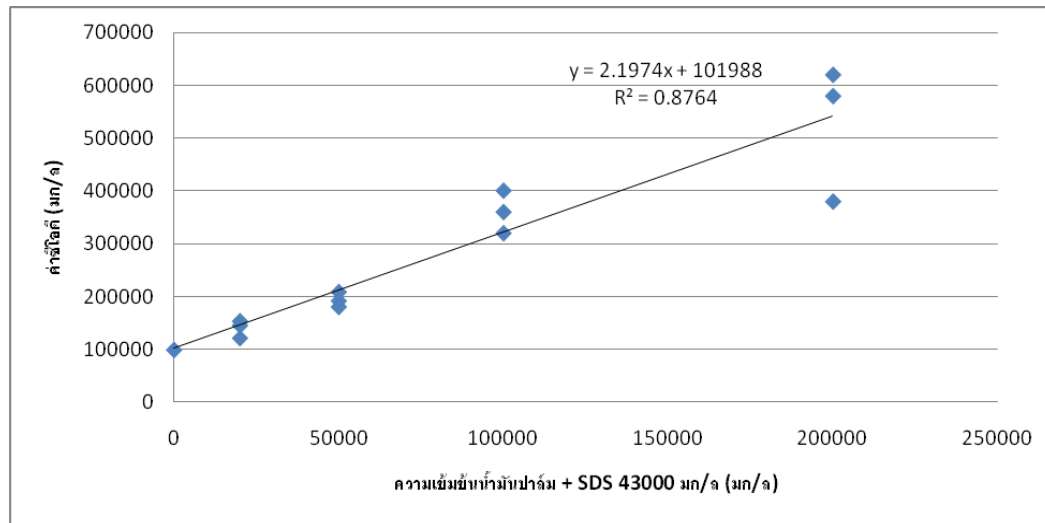
ความเข้มข้นน้ำมัน ปาล์ม+SDS 2,000 มก/ล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	5,240
20	5,300
20	5,300
20	5,210
50	5,392
50	5,392
50	5,470
100	5,552
100	5,552
100	5,760
200	5,968
200	5,968
200	5,864
500	12,416
500	10,440
500	11,376
1,000	17,512
1,000	17,512
1,000	15,420
2,000	31,240
2,000	35,200
2,000	39,240



ภาพที่ ก.5 กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 2,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลดิบค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 2,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นน้ำมัน ปาล์ม+SDS 7,000 มก/ล (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	16,000
2,000	24,000
2,000	20,000
2,000	20,000
5,000	28,000
5,000	36,000
5,000	38,000
10,000	48,000
10,000	44,000
10,000	42,000
20,000	56,000
20,000	52,000
20,000	60,000



ภาพที่ ก.6 กราฟมาตรฐานค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 20,000-200,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลดิบค่าซีไอดีของน้ำมันปาล์ม 20,000-200,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นน้ำมันปาล์ม+SDS 43,000 มก/ล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	99,200
20,000	121,600
20,000	153,600
20,000	145,600
50,000	192,000
50,000	209,000
50,000	180,800
100,000	360,600
100,000	320,400
100,000	401,000
200,000	380,400
200,000	620,500
200,000	580,200

ภาคผนวก ข











## ข้อมูลดิบจากการทดลอง

1. การศึกษาค่ายี่ลัดซ์ของตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียดังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ไม่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)









Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	1,500	1,700	1,600	1,200	1,635	1,418	265	300	282.5
3	1,100	1,700	1,400	1,000	1,218	1,109	282	300	291
6	1,556	1,556	1,556	1,291	1,387	1,439	269	365	317
9	1,428	1,656	1,342	936.8	1,173.6	1,055.2	491.2	482.4	486.8
12	776	1,100	738	410.4	600	738	365.6	500	432.8
15	257.6	257.6	257.6	184	210.8	257.6	36.8	73.6	55.2
20	72.67	145.28	108.975	42.59	111.01	108.975	30.08	34.27	32.175
25	60.48	87.36	73.92	60.48	67.52	73.92	0	19.84	9.92

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 3 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 9 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 12 เป็นต้นไป

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีการเติมโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต (SDS)









Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	4,300	5,700	4,900	4,170	5,548	4,859	130	152	141
3	4,764	5,700	5,132	4,579	5,548	5,064	152	185	169
6	3,700	3,700	5,600	2,525	2,525	2,525	175	175	175
9	2,600	2,600	2,600	2,437	2,437	2,437	163	163	163
12	1,520.8	1,714.4	1,617.6	1,180.8	1,432.4	1,306.6	282	340	311
15	736	736	736	636	654	645	82	100	91
20	181.6	290.56	236.08	115.2	192	153.6	66.4	98.56	82.48
25	268.8	275.52	272.16	190.08	197.12	193.6	78.4	78.72	78.56

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 6 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 12 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ไม่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)









Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	2,600	3,000	2,800	2,400	2,800	2,600	200	200	200
3	2,488	3,000	2,744	2,640	2,160	2,400	360	328	344
6	2,488	2,488	2,488	2,034	2,034	2,034	454	454	454
9	1,538.4	1,976.8	1,758	971.4	1,409.8	1,191	567	567	567
12	368	404.8	386.4	92.8	165.84	129.32	202.16	312	257.08
15	220.8	336.8	278.8	106.24	147.59	126.915	114.56	189.21	151.885
20	204.16	211.2	207.68	71.71	112.34	92.025	98.86	132.45	115.655
25	145.28	181.6	163.44	40.32	47.04	43.68	104.96	134.56	119.76

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 3 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 9 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 12 เป็นต้นไป

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลดิบชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีการเติมโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต (SDS)

Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	7,700	5,676	6,688	7,544	5,487	6,516	156	189	172.5
3	7,310	5,210	6,260	7,152	5,046	6,099	158	164	161
6	5,700	5,700	5,700	5,540	5,540	5,540	160	160	160
9	3,700	2,320	3,010	3,520	2,125	2,823	180	195	187.5
12	1,522.4	1,983.2	1,752.8	1,257.6	1,694.4	1,476	264.8	288.8	276.8
15	956.8	899.2	928	731.2	384	557.6	425.6	515.2	470.4
20	181.6	290.56	236.08	76.8	153.6	115.2	104.8	136.96	120.88
25	274.56	295.68	285.12	114.24	127.68	120.96	160.32	168	164.16

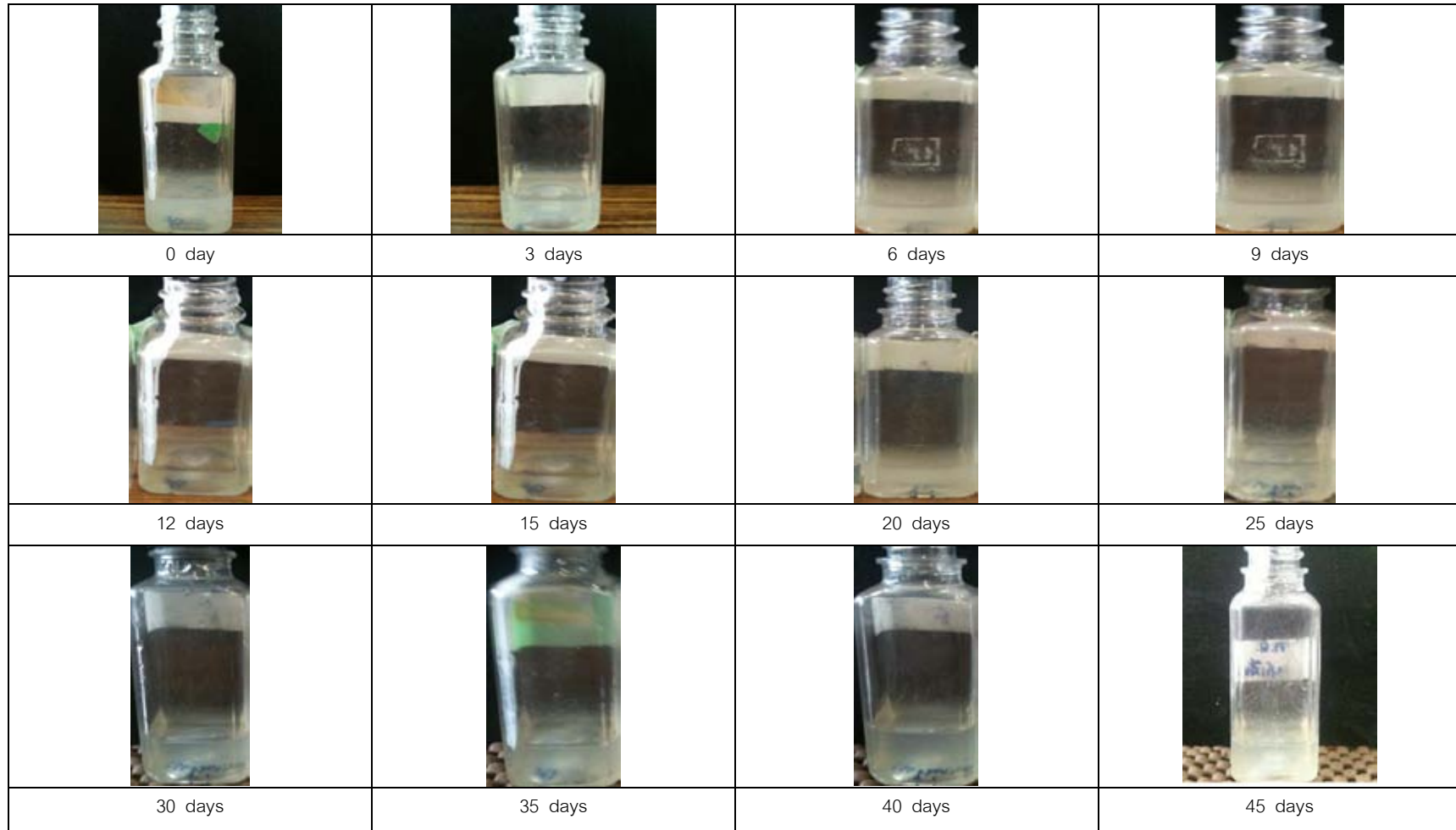
			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 3 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 12 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป



ตารางที่ ข.5 ชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ไม่มีการเติมโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต (SDS)













Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	6,200	8,200	7,200	5,050	6,940	5,995	1,150	1,260	1,205
3	6,832	8,010	7,421	5,528	6,588	6,058	1,304	1,422	1,363
6	2,912	5,408	4,160	1,328	3,776	2,552	1,584	1,632	1,608
9	2,419.2	2,649.6	2,534	741.6	1,515.2	1,128	1,677.6	1,134.4	1,406
12	2517.2	2,168.9	2,343.05	1,276	438.6	857.3	1,241.2	1,730.3	1,485.75
15	2,060.8	2,428.8	2,244.8	368	441.6	404.8	1692.8	1987.2	1,840
20	1,598.08	1,743.36	1,670.72	230.4	230.4	230.4	1367.68	1,512.96	1440.32
25	1,056	1,020.8	1,038.4	67.2	100.8	151.2	988.8	920	954.4
30	668.8	668.8	688.8	422.4	246.4	334.4	246.4	422.4	334.4
35	645.12	737.28	691.2	354.24	432.96	393.6	290.88	304.32	297.6
40	609.28	647.36	628.32	332.8	440.21	386.505	276.48	207.15	241.815
45	404.8	588.8	496.8	393.8	551.32	472.56	11	37.48	24.24



น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 6 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 20 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 30 เป็นต้นไป

ตารางที่ ข.6 ชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีการเติมโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต (SDS)













Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	9,400	13,600	11,500	9,200	13,400	11,300	200	200	200
3	12,620	13,400	13,010	12,400	13,205	12,803	220	195	208
6	11,000	13,200	12,100	10,770	12,945	11,857.5	230	255	242.5
9	11,280.9	11,280.9	11,281	11,035.6	10,982.4	11,009	245.3	298.5	271.9
12	7865.4	6,543.2	7,204.3	7,519.4	6,224.7	6,872.05	346	318.5	332.25
15	5,094.8	5,340	5,217.4	4,662.6	5,014.3	4,838.45	432.2	325.7	378.95
20	3,019.6	2,187.3	2,603.45	2,251.7	1,608.7	1,930.2	767.9	578.6	673.25
25	598.4	598.4	598.4	336	369.6	352.8	262.4	228.8	245.6
30	668.8	668.8	668.8	352.2	528.2	440.2	316.6	140.6	228.6
35	599.04	506.88	552.96	314.88	314.88	314.88	284.16	192	238.08
40	509.26	647.6	578.31	228.48	495.04	361.76	280.78	152.32	216.55
45	404.8	404.8	404.8	315.04	393.8	354.42	89.76	113	101.38

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days
			
30 days	35 days	40 days	45 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นในวันที่ 6 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 20 จากนั้นจะเริ่มใสขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 30 เป็นต้นไป

ตารางที่ ข.7 ชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ไม่มีการเติมโซเดียมโอดีเซดซัลเฟต (SDS)

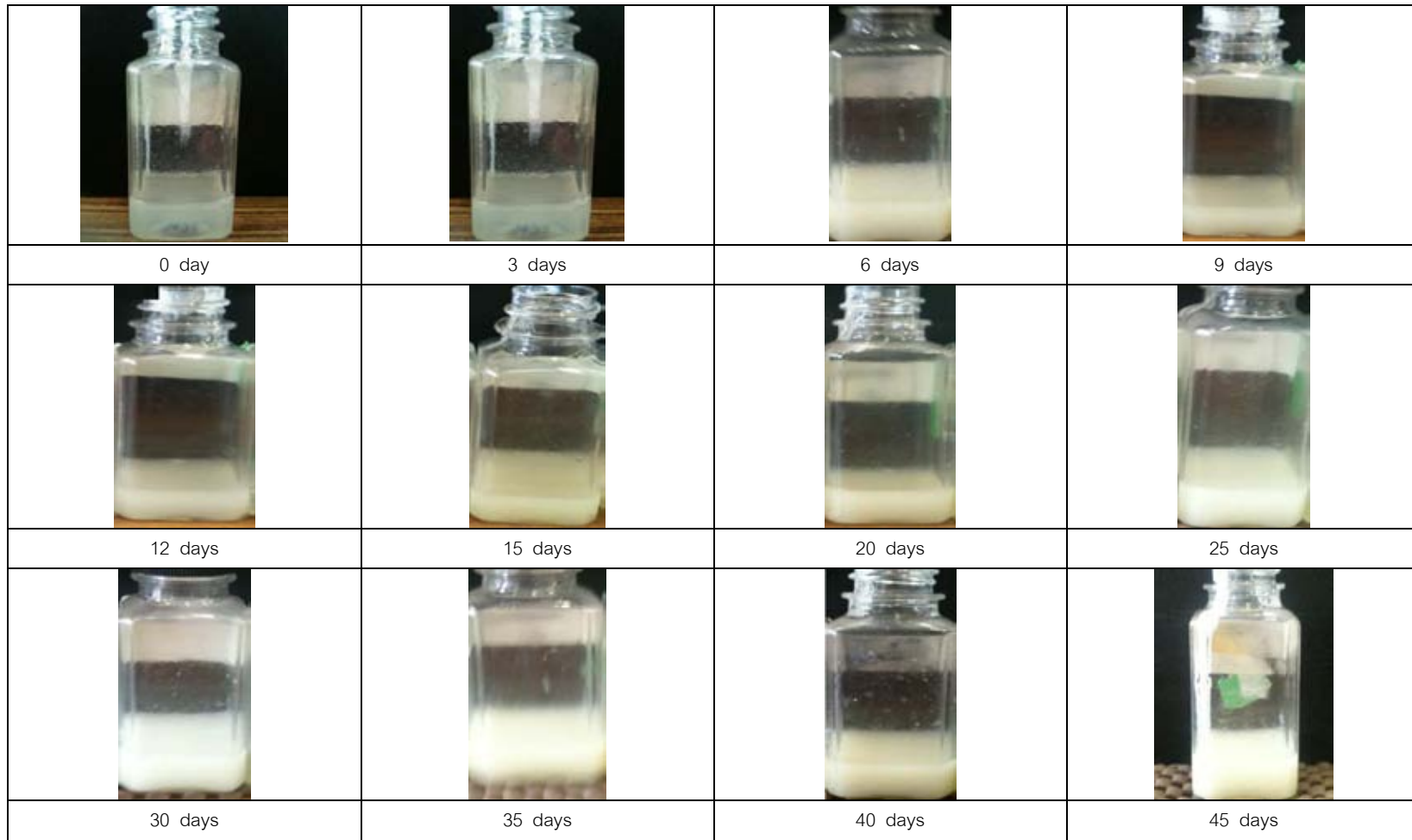
Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	24,300	38,300	31,300	18,600	31,000	24,800	5,700	7,300	6,500
3	25,540	38,320	30,430	15,900	33,080	24,490	6,640	5,240	5,940
6	30,030	32,450	31,240	23,295.6	25,562.2	24,428.9	6,734.4	6,887.8	6,811.1
9	31,79.52	33,177.6	32,486	25,795.2	25,577.6	25,686	6,000	7,600	6,800
12	20,000	16,000	18,000	12,600	10,100	11,350	7,400	5,900	6,650
15	18,585.6	18,585.6	18,585.6	11,105.6	10,625.6	10,865.6	7,480	7,960	7,720
20	13,939.2	13,094.4	13,516.8	4,408.32	4,723.2	4,565.76	9,530.88	8,371.2	8,951.04
25	13,428	11,528.8	12,478.4	6,890.4	3,837.6	5,364	6,537.6	7,691.2	7,114.4
30	14,890.2	10,987	12,938.6	9,045.4	4,212.6	6,629	5,844.8	6,774.4	6,309.6
35	13,909.2	10,010	11,959.6	5,408.32	4,723.2	5,065.76	8,500.88	5,286.8	6,893.84
40	14,720	15,308.8	15,014.4	9,451.2	10,081.28	9,766.24	5,268.8	5,227.52	5,248.16
45	13,040	13,040	13,040	7,046.4	8,950.4	7,998.4	5,993.6	4,089.6	5,041.6

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days
			
30 days	35 days	40 days	45 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นมากในวันที่ 6 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นตลอดการทดลองจนถึงวันที่ 45

ตารางที่ ข.8 ชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)

Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	48,200	52,010	50,105	40,571	40,571	40,571	7,629	11,439	9,534
3	51,320	51,320	51,320	44,183.7	40,333	42,258	7,136.3	10,987	9,062
6	40,920	52,010	46,465	34,863.7	45,887	40,375.35	6,056.3	6,123	6,089.65
9	43,024.6	36,892.3	39,958	36,926.3	31,394.1	34,160	6,098.3	5,498.2	5,798.25
12	27,065.6	27,219.2	27,142.4	23,120	23,120	23,120	3,945.6	4,099.2	4,022.4
15	24,020.8	24,020.8	24,020.8	16,163.9	15,675.2	15,919.55	7,856.9	8,345.6	8,101.25
20	36,795.3	28,790.5	32,792.9	27,394.7	16,899.8	22,147.25	9,400.6	11,890.7	10,645.65
25	19,852.8	19,008	19,430.4	13,024	12,956.8	12,990.4	6,828.8	6,051.2	6,440
30	16,473.6	18,163.2	17,318.4	14,259.2	14,435.2	14,347.2	2,214.4	3,728	2,971.2
35	13,914.88	13,914.88	13,914.88	12,067.52	11,808	11,937.76	1,847.36	2,106.88	1,977.2
40	17,958.4	20,313.6	19,136	13,231.68	14,491.84	13,861.76	4,726.72	5,821.76	5,274.24
45	21,324.8	21,324.8	21,324.8	14,662.4	14,043.2	14,352.8	6,662.4	7,281.6	6,972















น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นมากในวันที่ 6 ของการเดินระบบ และเพิ่มมากขึ้นตลอดการทดลองจนถึงวันที่ 45



ตารางที่ ข.9 ชุดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ไม่มีการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)













Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	82,000	78,000	80,000	70.624	67,396	69,010	11,376	10,604	10,990
3	82,000	70,000	76,000	71,792	60,600	66,196	10,208	9,400	9,804
6	71,684	71,684	71,684	59,674	62,248	60,961	10,210	9,436	10,723
9	71,075.2	61,766.4	66,421	60,866.2	50,390.2	55,628	10,209	11,376.2	10,792
12	64,195.2	70,532.8	67,364	63,201.6	57,642.3	60,421.95	9,993.6	12,890.5	11,442.05
15	53,704.64	64,576.32	59,140.48	40,501.44	50.898.12	45,699.78	13,203.2	13,678.2	13,440.7
20	65,261.4	43,268.8	54,265.1	50,685.08	29,564.16	40,124.62	14,576.32	13,704.64	14,140.48
25	18,659.2	17,603.2	18,131.2	12,352	12,352	12,352	6,307.2	5,251.2	5,779.2
30	16,476.8	17,040	16,768.4	12,675.2	12,675.2	12,675.2	3,801.6	4,364.8	4,083.2
35	16,588.8	18,432	17,510.4	1,259.04	12,912.64	12,715.84	4,069.76	5,519.36	4,794.56
40	7,654.4	8,243.2	79,48.8	2,362.8	3,544.2	2,953.5	5,291.6	4,699	4,995.3
45	5,826.4	9,70.4	77,68.4	1,980.16	2,056.32	2,018.4	3,846.24	7,654.08	5,750.16

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days
			
30 days	35 days	40 days	45 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นมากในวันที่ 3 ของการเดินระบบโดยเพิ่มมากที่สุดในวันที่ 20 จากนั้นจึงลดลงเล็กน้อยและมีความขุ่นคงที่จนถึงวันที่ 45

ตารางที่ ข.10 ชูบน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีการเติมโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต (SDS)

Days	TCOD (mg/l)			SCOD (mg/l)			cell-COD (mg/l)		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	เฉลี่ย
0	140,000	180,000	160,000	137,838	178,240	158,039	12,162	11,760	11,961
3	125,690	98,238	111,964	114,594	87,368	100,981	11,096	10,870	10,983
6	87,360	87,360	87,360	72,400	71,440	71,920	14,960	15,920	15,440
9	76,176	66,419.5	71,298	68,322	53,428	60,875	7,854	12,991.5	10,422.75
12	53,571.2	54,608	54,089.6	40,368	44,078.4	42,223.2	13,203.2	10,529.6	11,866.4
15	52,760	53,091.2	52,925.6	41,067.2	40,956.8	41,012	11,692.8	12,134.4	11,913.6
20	55,590.4	55,801.6	55,696	42,873.6	42,873.6	42,873.6	12,716.8	12,928	12,822.4
25	51,950.4	52,217.6	52,084	31,689.6	31,830.4	31,760	20,262.8	20,387.2	20,324
30	46,961.6	48,804.8	33,789.97	24,787.2	24,102.08	24,444.64	22,174.4	24,702.72	23,438.56
35	5,603.5	11,890.2	8,746.85	3,043.5	4,999.9	4,021.7	2,560	6,890.3	4,725.15
40	2,355.2	2,944	2,649.6	866.36	1,260.16	1,063.26	1,488.84	1,683.84	1586.34
45	3,236.8	4,551.52	3,894.16	837.76	837.76	837.76	2,399.04	3,713.76	3,056.4

			
0 day	3 days	6 days	9 days
			
12 days	15 days	20 days	25 days
			
30 days	35 days	40 days	45 days

น้ำเสียเริ่มมีความขุ่นมากในวันที่ 6 ของการเดินระบบโดยเพิ่มมากที่สุดในวันที่ 30 จากนั้นจึงลดลงเล็กน้อยและมีความขุ่นคงที่จนถึงวันที่ 45

หมายเหตุ: ค่าyieldที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ประมาณเป็นค่าyieldที่แท้จริง (True growth yield)

$$\text{เนื่องจาก จากสมการ } Y_{\text{obs}} = \frac{Y_g}{1+b\tau}$$

b: ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายในระบบแบบไร้อากาศ (ต่อวัน);  $\tau$  = ผลต่างของเวลาที่ค่าซีโอดีเริ่มลดลงจนคงที่ (วัน);  $Y_{\text{obs}}$ : ค่าyieldจากการทดลอง (กรัม-ซีโอดีต่อกรัม-เซลล์ซีโอดี);  $Y_g$ : ค่าyieldที่แท้จริง (กรัม-ซีโอดีต่อกรัม-เซลล์ซีโอดี)

เมื่อใช้ค่า  $b = 0.03$  ต่อวัน (Metcalf & Eddy, 2003) และค่า  $\tau$  ในการทดลองคือ 3 วัน

$$\text{จะได้ } Y_{\text{obs}} = \frac{Y_g}{1+0.03 \times 3} = 0.92 Y_g \text{ จึงได้ประมาณให้ค่า } Y_{\text{obs}} \text{ ที่วัดได้ในการทดลองนี้เท่ากับค่า } Y_g$$

2. การศึกษาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ ข.11: ข้อมูลดิบค่าซีโอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 1

ชุดการทดลอง	ค่าซีโอดีทั้งหมดเริ่มต้น (มก/ล.)		ค่าซีโอดีทั้งหมดสุดท้าย (มก/ล.)	
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	760	798	756	797
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	5,200	5,900	4,235	4,505
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	7,592	7,592	5,640	6,315
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	18,000	36,592	5,570	6,010
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	40,736	56,128	22,675	31,013
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	173,650	210,870	167,622	173,349

ตารางที่ ข.12: ข้อมูลดิบค่าซีไอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 2

ชุดการทดลอง	ค่าซีไอดีทั้งหมดเริ่มต้น (มก/ล.)		ค่าซีไอดีทั้งหมดสุดท้าย (มก/ล.)	
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	738	806	645	789
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	5,616	5,796	3,968	4,248
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	6,831	8,642	5,784	5,784
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	25,536	30,912	8,480	11,440
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	48,410	50,020	35,520	43,200
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	155,904	215,452	167,000	176,000

ตารางที่ ข.13: ข้อมูลดิบค่าซีไอดีเริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 3

ชุดการทดลอง	ค่าซีไอดีทั้งหมดเริ่มต้น (มก/ล.)		ค่าซีไอดีทั้งหมดสุดท้าย (มก/ล.)	
	ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	762	806	756
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	5,740	5,740	4,048	4,214
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	7,200	9,600	5,787	5,787
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	19,504	38,640	7,810	10,520
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	48,624	49,904	36,010	40,800
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	141,472	234,560	144,700	208,000

ตารางที่ ข.14: ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 1

ชุดการทดลอง	MLSS (มก/ล.)		MLVSS (มก/ล.)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	0	1.92	0	0
	0	3.04	0	0
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	900	5,000	800	3,550
	950	5,900	850	4,800
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	700	4,950	600	3,150
	900	5,400	750	3,150
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	500	8,350	400	5,650
	900	10,150	800	8,150
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	2,450	10,750	1,700	8,600
	2,800	13,000	2,400	10,150
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	29,500	48,550	18,150	38,750
	31,800	53,950	21,500	40,400



ตารางที่ ข.15: ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 2

ชุดการทดลอง	MLSS (มก/ล.)		MLVSS (มก/ล.)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	0	1.71	0	0
	0	3.09	0	0
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	1,150	7,850	609.5	3,250
	2,350	8,350	1,668.5	3,250
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	1,280	11,400	806.4	4,850
	4,245	13,950	1,033.3	6,300
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	7,500	16,000	5,500	7,650
	10,955	17,450	8,764	8,650
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	27,650	19,900	22,396.5	10,900
	41,700	23,700	38,364	13,350
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	23,300	29,300	15,844	9,400
	30,650	30,600	21,761.5	9,500

ตารางที่ ข.16: ข้อมูลดิบค่า MLSS และ MLVSS เริ่มต้นและสุดท้ายของชุดการทดลองครั้งที่ 3

ชุดการทดลอง	MLSS (มก/ล.)		MLVSS (มก/ล.)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
ไม่ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม	0	1.89	0	0
	0	3.25	0	0
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 100 มก/ล.	5,600	6,550	2,895	3,050
	7,400	7,950	4,440	4,140
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 500 มก/ล.	5,390	9,400	3,720	6,500
	6,900	12,200	4,480	7,420
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มก/ล.	10,950	15,500	6,590	7,900
	11,100	19,670	7,750	8,610
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มก/ล.	21,150	25,900	8,248.5	10,900
	25,000	31,080	11,500	11,100
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 50,000 มก/ล.	47,450	47,090	18,505.5	18,610
	48,200	49,800	22,654	19,010

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 1

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
14	0	0	0	325	0	450	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	325	0	450	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	325	0	450	25	25	0	0	0	0
17	0	0	0	325	0	450	25	50	0	0	0	0
18	0	0	0	325	0	450	100	150	0	0	0	0
19	0	0	0	325	0	450	150	300	0	0	0	0
20	0	0	0	325	0	450	175	475	0	0	0	0
21	0	0	0	325	0	450	75	550	0	0	0	0
22	0	0	0	325	0	450	25	575	0	0	0	0
23	0	0	0	325	0	450	0	575	50	50	0	0
24	0	0	0	325	0	450	0	575	50	100	50	50
25	0	0	0	325	0	450	0	575	125	225	75	125
26	0	0	0	325	0	450	0	575	25	250	0	125
27	0	0	0	325	0	450	0	575	25	275	0	125

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
28	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
29	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
30	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
31	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
32	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
33	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
34	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
35	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
36	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
37	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
38	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
39	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125
40	0	0	0	325	0	450	0	575	0	275	0	125

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 2

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	25	50	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	50	100	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	75	175	125	125	0	0	0	0	0	0
8	0	0	100	275	75	200	0	0	0	0	0	0
9	0	0	25	300	75	275	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	300	100	375	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	300	25	400	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	300	25	425	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	300	0	425	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
14	0	0	0	300	0	425	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	300	0	425	50	50	0	0	0	0
16	0	0	0	300	0	425	50	100	0	0	0	0
17	0	0	0	300	0	425	100	200	0	0	0	0
18	0	0	0	300	0	425	125	325	0	0	0	0
19	0	0	0	300	0	425	150	475	0	0	0	0
20	0	0	0	300	0	425	75	550	0	0	0	0
21	0	0	0	300	0	425	30	580	0	0	0	0
22	0	0	0	300	0	425	0	580	0	0	0	0
23	0	0	0	300	0	425	0	580	25	25	0	0
24	0	0	0	300	0	425	0	580	25	50	0	0
25	0	0	0	300	0	425	0	580	125	175	25	25
26	0	0	0	300	0	425	0	580	25	200	25	50
27	0	0	0	300	0	425	0	580	0	200	0	50

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
28	0	0	0	300	0	425	0	580	0	200	0	50
29	0	0	0	300	0	425	0	580	0	200	0	50
30	0	0	0	300	0	425	0	580	0	200	0	50

ตารางที่ ข.19 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 3

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	100	200	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	50	250	100	100	0	0	0	0	0	0
7	0	0	50	300	100	200	0	0	0	0	0	0
8	0	0	25	325	100	300	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	325	25	325	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	325	25	350	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	325	50	400	125	125	0	0	0	0
12	0	0	0	325	0	400	75	200	0	0	0	0
13	0	0	0	325	0	400	75	275	0	0	0	0



ตารางที่ ข.19 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 3 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
14	0	0	0	325	0	400	75	350	0	0	0	0
15	0	0	0	325	0	400	125	475	0	0	0	0
16	0	0	0	325	0	400	100	525	0	0	0	0
17	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
18	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
19	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
20	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
21	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
22	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
23	0	0	0	325	0	400	0	525	0	0	0	0
24	0	0	0	325	0	400	0	525	100	100	0	0
25	0	0	0	325	0	400	0	525	50	150	0	0
26	0	0	0	325	0	400	0	525	25	175	0	0
27	0	0	0	325	0	400	0	525	0	175	0	0

ตารางที่ ข.19 ข้อมูลดิบปริมาณแก๊สชีวภาพ ของชุดการทดลองครั้งที่ 3 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	1 (ชุดควบคุม)		2 (oil 100 mg/l)		3 (oil 500 mg/l)		4 (oil 2,000 mg/l)		5 (oil 10,000 mg/l)		6 (oil 50,000 mg/l)	
	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)	แก๊สชีวภาพต่อวัน (ml/d)	แก๊สชีวภาพสะสม (ml)
28	0	0	0	325	0	400	0	525	0	175	0	0
29	0	0	0	325	0	400	0	525	0	175	0	0
30	0	0	0	325	0	400	0	525	0	175	0	0

ภาคผนวก ค

รายละเอียดการคำนวณปริมาณสารที่เติมในการเริ่มต้นระบบ

1. วิธีคำนวณปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เติม

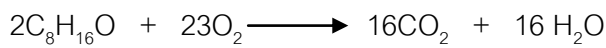
ตารางที่ ค.1 รายละเอียดการคำนวณปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เติม

ชุดการทดลอง	น้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารต่อ 300 มิลลิลิตร							
		น้ำมันปาล์ม (กรัม)	น้ำมันปาล์ม (ไมล)	น้ำมันปาล์ม (กรัม-ซีไอดี)	ตะกอนจุลินทรีย์ (กรัม-เซลล์)	ตะกอนจุลินทรีย์ (กรัม-เซลล์) 10 เท่า	ตะกอนจุลินทรีย์ (มิลลิกรัม-เซลล์)	ตะกอนจุลินทรีย์ (มิลลิลิตร)	ตะกอนจุลินทรีย์ที่เติม (มิลลิลิตร)
1 (ชุดควบคุม)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0.03	$2.34 \times 10^{-4}$	0.086	$3.268 \times 10^{-3}$	0.033	33	0.196	4
3	500	0.15	$1.17 \times 10^{-3}$	0.431	0.016	0.160	160	0.951	4
4	2,000	0.6	$4.69 \times 10^{-3}$	1.726	0.066	0.660	660	3.923	4
5	10,000	3	0.023	8.464	0.322	3.220	3,220	19.142	20
6	50,000	15	0.117	43.056	1.636	16.360	16,360	97.265	200

ตัวอย่าง: การคำนวณหาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่เติมสำหรับชุดการทดลองที่ 4 น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทำ

1. จากสมการออกซิเดชันของน้ำมัน



ซีไอดี =  $(C_8H_{16}O \text{ 1 โมล มี } 23 \times 32) / 2 = 368 \text{ กรัม-ซีไอดี}$

2. จากชุดการทดลองที่ 4 มีน้ำมันปาล์มปน 0.6 กรัม (ตารางที่ ค.1)

$$\text{น้ำมันปาล์ม 0.6 กรัม} = 0.6/128 = 4.69 \times 10^{-3} \text{ โมล}$$

$$\text{น้ำมันปาล์ม } 4.69 \times 10^{-3} \text{ โมล} = (4.69 \times 10^{-3}) 368 = 1.726 \text{ กรัม-ซีไอดี}$$

กำหนดค่าyield เท่ากับ 0.038 (Spece, 1986)

$$\text{น้ำมันปาล์ม 1.726 กรัม-ซีไอดี} = 1.726 \times 0.038 = 0.066 \text{ กรัม-เซลล์}$$

กำหนดให้เติมตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณมาก (Excess sludge) ประมาณ 10 เท่า

$$\text{ตะกอนจุลินทรีย์ 10 เท่า} = 0.66 \text{ กรัม-เซลล์}$$

$$= 660 \text{ มิลลิกรัม-เซลล์}$$

3. จากความเข้มข้นของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้นมีค่าประมาณ 168,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ปริมาณหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้น 168,200 มิลลิกรัม} \longrightarrow 1,000 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าต้องการ 660 มิลลิกรัม} &\longrightarrow (1,000/168,200) 660 \\ &= 3.923 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องเติมเท่ากับ 4 มิลลิลิตร}$$

## 2. วิธีคำนวณปริมาณธาตุอาหารที่เติม

ตารางที่ ค.2 รายละเอียดการคำนวณปริมาณธาตุอาหาร

ชุดการทดลอง	น้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารต่อ 300 มิลลิเมตร					
		น้ำมันปาล์ม (กรัม)	น้ำมันปาล์ม (ไมล)	น้ำมันปาล์ม (กรัม-ซีไอดี)	ไนโตรเจน (กรัม) ( $\times 2.1/100$ )	ฟอสฟอรัส (กรัม) ( $\times 0.6/100$ )	เหล็ก (กรัม) ( $\times 1.7/100$ )
1	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0.03	2.34 $\times 10^{-4}$	0.086	$1.806 \times 10^{-3}$	$5.160 \times 10^{-4}$	$1.462 \times 10^{-3}$
3	500	0.15	1.17 $\times 10^{-3}$	0.431	$9.051 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-3}$	$7.327 \times 10^{-3}$
4	2,000	0.6	4.69 $\times 10^{-3}$	1.726	0.036	0.010	0.029
5	10,000	3	0.023	8.464	0.178	0.051	0.144
6	50,000	15	0.117	43.056	0.904	0.258	0.732

ตัวอย่าง: การคำนวณปริมาณธาตุอาหารที่เติมสำหรับชุดการทดลองที่ 4 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทำ จาก COD: N: P: Fe = 100: 2.1: 0.6: 1.7 (Speece, 1983)

และ จากตารางที่ ค.2 พบว่า ชุดการทดลองที่ 4 มีน้ำมันปาล์มประมาณ 1.726 กรัม-ซีไอดี

ดังนั้น จึงเติม ไนโตรเจน จาก แอมโมเนียมคลอไรด์ =  $(1.726 \times 2.1) / 100 = 0.036$  กรัม

เติมฟอสฟอรัส จาก ฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่มากเกินไป =  $(1.726 \times 0.6) / 100 = 0.01$  กรัม

เติมเหล็ก จาก เฟอร์ริกคลอไรด์ =  $(1.726 \times 1.7) / 100 = 0.029$  กรัม

### 3. วิธีคำนวณปริมาณฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดการคำนวณปริมาณฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ชุดการทดลอง	น้ำมันปาล์มที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารต่อ 300 มิลลิลิตร						บัฟเฟอร์ที่เติมในน้ำ 100 มล. (กรัม) (คำนวณจากโปรแกรม กำหนด pH = 7.3)		บัฟเฟอร์ที่เติมในน้ำ 300 มล. (กรัม) (คำนวณจากโปรแกรม กำหนด pH = 7.3)	
		น้ำมันปาล์ม (กรัม)	น้ำมันปาล์ม (ไมล)	โมลของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น (ไมล) (18 เท่าโมลน้ำมันปาล์ม)	ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ (ไมลาลิตี)	ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ (มิลลิไมลาลิตี)	ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสภาวะกรด/ด่างที่ใช้ (buffer strength)	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
1 (ชุดควบคุม)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0.03	2.34 x 10 <sup>-4</sup>	4.21 x 10 <sup>-3</sup>	0.014	14	300	1.1121	5.8803	3.33	17.64
3	500	0.15	1.17 x 10 <sup>-3</sup>	0.021	0.070	70	300	1.1121	5.8803	3.33	17.64
4	2,000	0.6	4.69 x 10 <sup>-3</sup>	0.084	0.280	280	300	1.1121	5.8803	3.33	17.64
5	10,000	3	0.023	0.414	1.380	1,380	1,500	5.5605	29.4014	16.68	88.20
6	50,000	15	0.117	2.106	7.020	7,020	30,000	111.2094	588.0282	333.60	1,764

ตัวอย่าง: การคำนวณปริมาณฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เติมสำหรับชุดการทดลองที่ 4 น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทำ

1. คำนวณหาความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงสภาวะกรด/ด่างที่ใช้ (Buffer strenght) กำหนดให้ คิดปริมาณกรดที่เกิดขึ้นในระบบมาจากกรดอะซิติก เนื่องจากสภาวะกรดที่เกิดขึ้นในระบบส่วนใหญ่ มาจากกรดอะซิติกที่ย่อยสลายมาจากโมเลกุลของน้ำมัน



จากสมการพบว่า 1 โมล ของน้ำมัน จะสามารถเกิดกรดประมาณ 18 โมล

ดังนั้น น้ำมันปาล์ม  $4.69 \times 10^{-3}$  โมล (ชุดการทดลองที่ 4)

สามารถเกิดกรด  $(4.69 \times 10^{-3}) \times 18 = 0.084$  โมล

หรือ สามารถเกิดกรด  $0.084 / 0.3 = 0.28$  โมลาร์ลิตี

= 280 มิลลิโมลาร์ลิตี

เพราะฉะนั้น สำหรับชุดการทดลองที่ จึงเลือกใช้ Buffer strength ประมาณ 300 มิลลิโมลาร์ลิตี

2. คำนวณปริมาณฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เติมจากโปรแกรมโปรแกรม Phosphate Buffer Calculator ที่พัฒนาขึ้นโดย Dave Robinson

เริ่มจาก 1. ป้อนข้อมูลนำเข้า (Input) ที่จำเป็นสำหรับโปรแกรม ได้แก่ Buffer strength และ ค่าพีเอช โดยในงานวิจัยนี้กำหนดค่าพีเอชเท่ากับ 7.3 (ภาพที่ค.1)

pH  Buffer Strength  mM

Monosodium phosphate, monohydrate  %

Disodium phosphate, heptahydrate  %

ภาพที่ค.1 โปรแกรม Phosphate Buffer Calculator ที่พัฒนาขึ้นโดย Dave Robinson



2. นำข้อมูลที่ได้ (Output) ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของฟอสเฟตบัพเฟอร์ทั้ง 2 ชนิด มาเทียบหาปริมาณเป็นกรัมที่เติมในเบตซ์ 300 มิลลิลิตร (เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับน้ำ 100 มิลลิลิตร)

3. ได้ปริมาณที่เติมเท่ากับ

$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$= 1.1121 \times 3$	$= 3.33$	กรัม
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	$= 5.8803 \times 3$	$= 17.64$	กรัม

ภาคผนวก ง

## โครมาโตแกรมและวิธีวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

## 1. สภาวะ วิธี และรายละเอียดของเครื่องที่ใช้วิเคราะห์

lab GC Shimadzu - 2010

Method

<Analytical Line 1>

[Injection Port WB11]

Injection Mode	: Direct
Temperature	: 150.0 C
Carrier Gas	: He
Flow Control Mode	: Pressure
Pressure	: 100.0 kPa
Column Flow	: 20.00 mL/min
Linear Velocity	: 0.0 cm/sec
Purge Flow	: 3.0 mL/min

[Column Oven]

Initial Temperature	: 80.0 C
Equilibration Time	: 3.0 min

-Column Oven Temperature Program-

Total Program Time	: 4.00 min	
Rate(C/min)	Temperature(C)	Hold Time(min)
-----	80.0	4.00

[Column Information]

Column Name	: <del>MS-5A</del> PMS
Serial Number	:
Film Thickness	: 0.00 um
Column Length	: 2.0 m
Inner Diameter	: 3.00 mm ID
Column Max Temp	: 400 C
Description	: PQS

[Detector Channel 1 TCD1]

Temperature	: 200.0 C
Signal Acquire	: Yes
Sampling Rate	: 40 msec
Stop Time	: 4.00 min
Delay Time	: 0.00 min
Subtract Detector	: None
Current	: 80 mA
Polarity	: -
Makeup Gas	: He
Makeup Flow	: 20.0 mL/min

[General]

< Ready Check Heat Unit >

Column Oven	: Yes
WB11	: Yes
TCD1	: Yes

< Ready Check Detector (FTD) >

< Ready Check Baseline Drift >

TCD1	: No
------	------

< Ready Check Injection Flow >

WB11 Carrier	: Yes
WB11 Purge	: Yes

< Ready Check Add. Flow >

< Ready Check Detector APC Flow >

TCD1 Makeup	: Yes
-------------	-------

External Wan : No

Auto Flame On : No

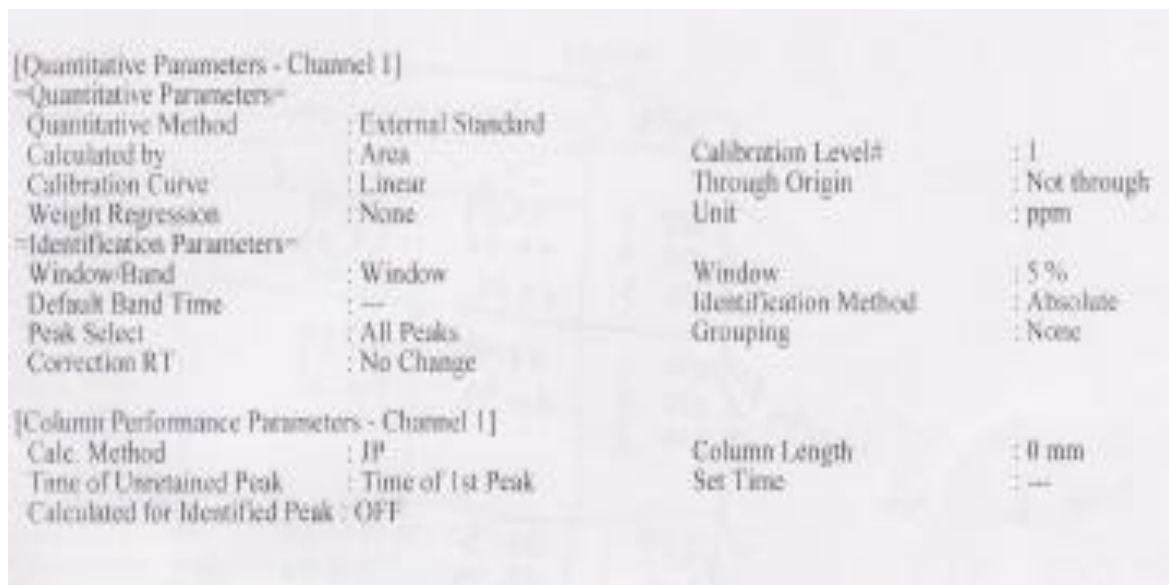
Auto Flame Off : Yes

Resignite : No

Auto Zero After Ready : Yes

[Peak Integration Parameters - Channel 1]

Width	: 3 sec	Slope	: 1000 uV/min
Drift	: 0 uV/min	T.DBL	: 1000 min
Min.Area/Height	: 1000 counts		



ภาพที่ ง.1สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี

ตารางที่ ง.1 สรุปลักษณะของเครื่องในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี

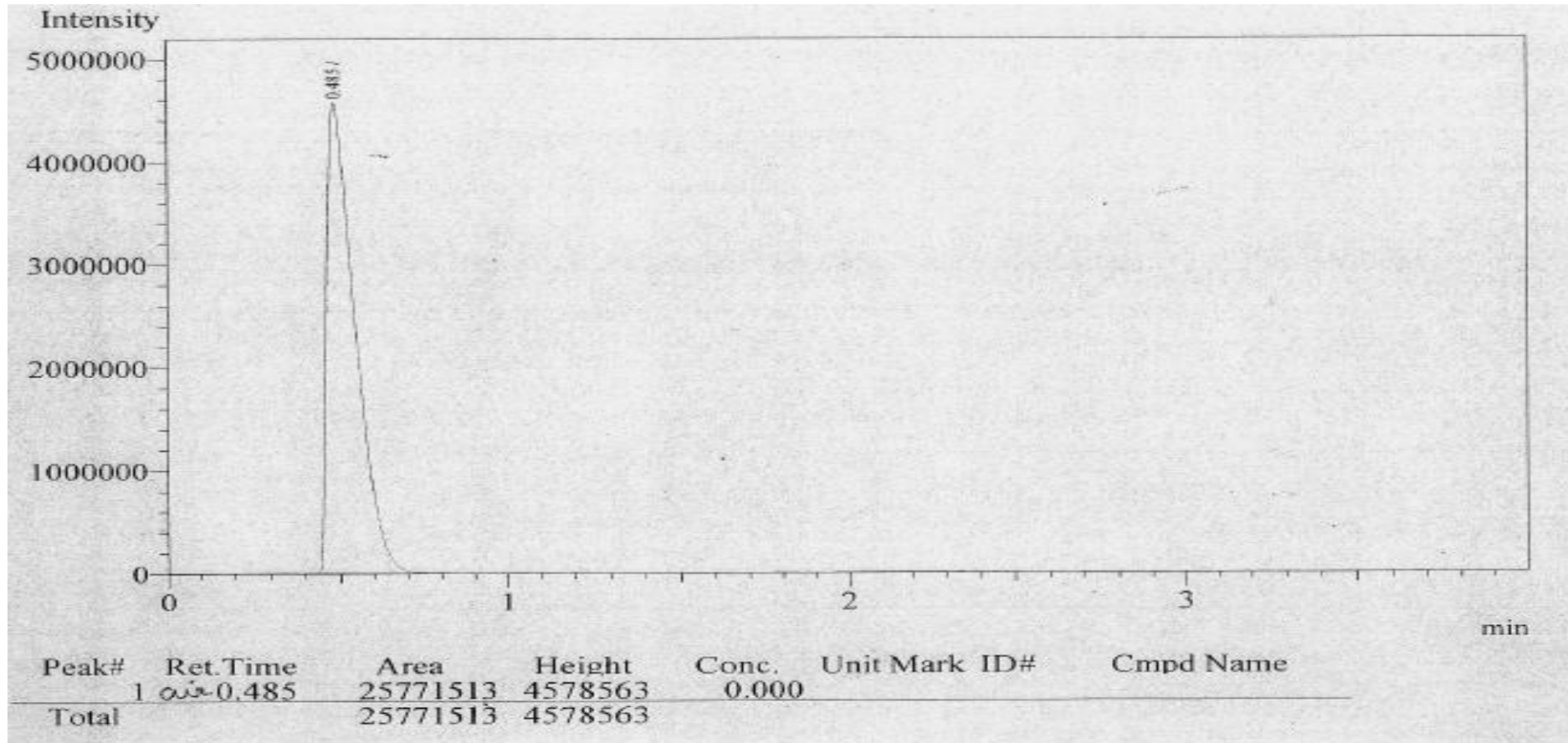
สภาวะ	สภาวะที่ใช้/วิธี
แก๊สพา (Carrier gas)	ฮีเลียม
ความเร็วแก๊สพา	20 มิลลิลิตรต่อนาที
ชนิดดีเทคเตอร์ (Column)	ทีซีดี (TCD)
อุณหภูมิที่ช่องใส่สาร (Injection port)	150 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (Column)	80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector)	200 องศาเซลเซียส
วิธี	Gas-tight syringe method
ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์	1 mL

ตารางที่ ง.2 สรุป Retention time ของโมเลกุลแก๊สในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

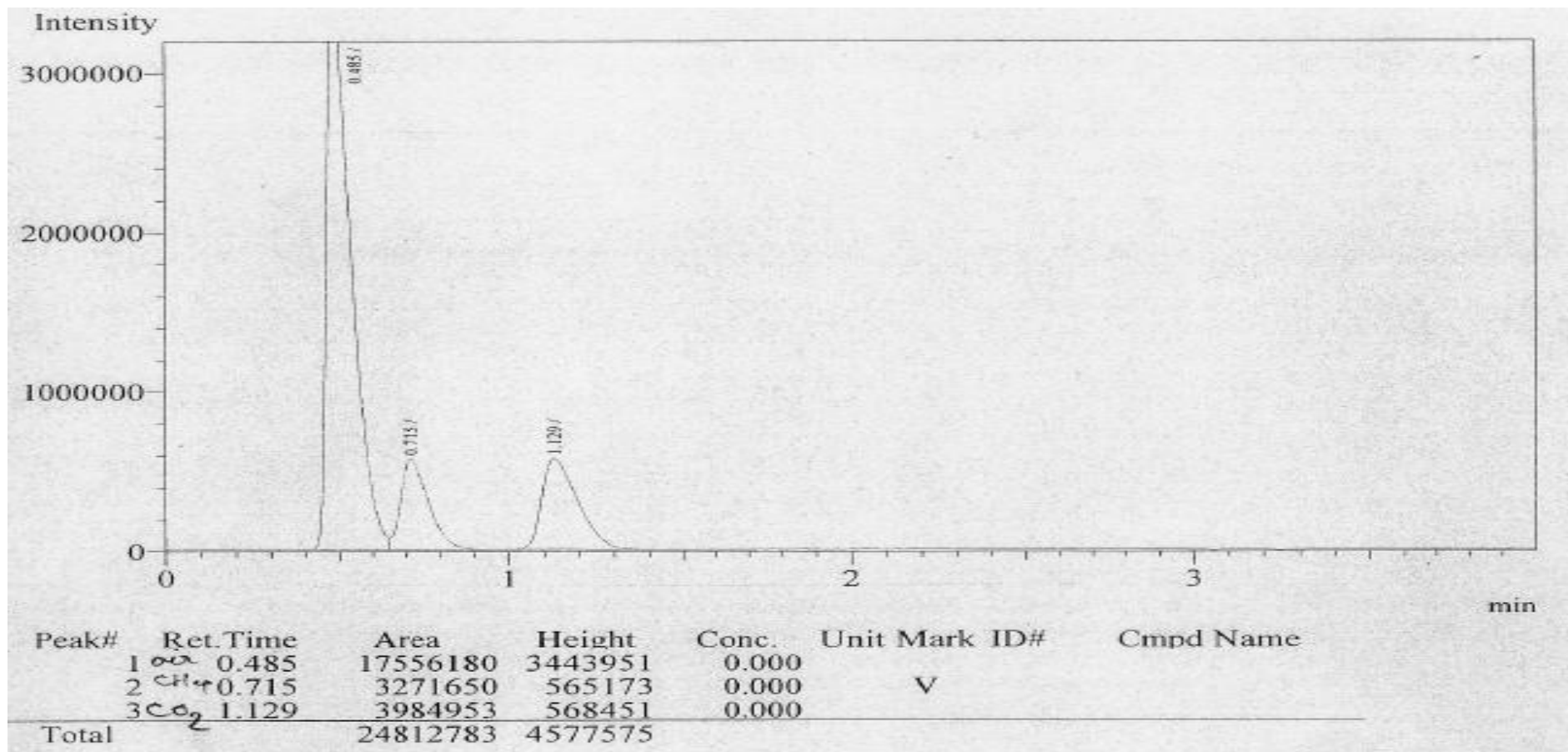
ชนิดแก๊ส	Retention time (วินาที)
โมเลกุลอากาศ	0.45 - 0.519
โมเลกุลมีเทน	0.638 - 0.727
โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์	1.068 – 1.138
โมเลกุลแก๊สอื่นๆ	3.558

หมายเหตุ; Retention time เป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลสาร ใช้บ่งบอกชนิดของสารในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแบบเชิงคุณภาพ โดยสารที่มีมวลโมเลกุลน้อย (Molecular weight) จะออกจากคอลัมน์ก่อนและทำให้มี Retention time น้อย ในทางตรงกันข้ามสารที่มีมวลโมเลกุลมากจะออกจากคอลัมน์ทีหลังและทำให้ Retention time นาน

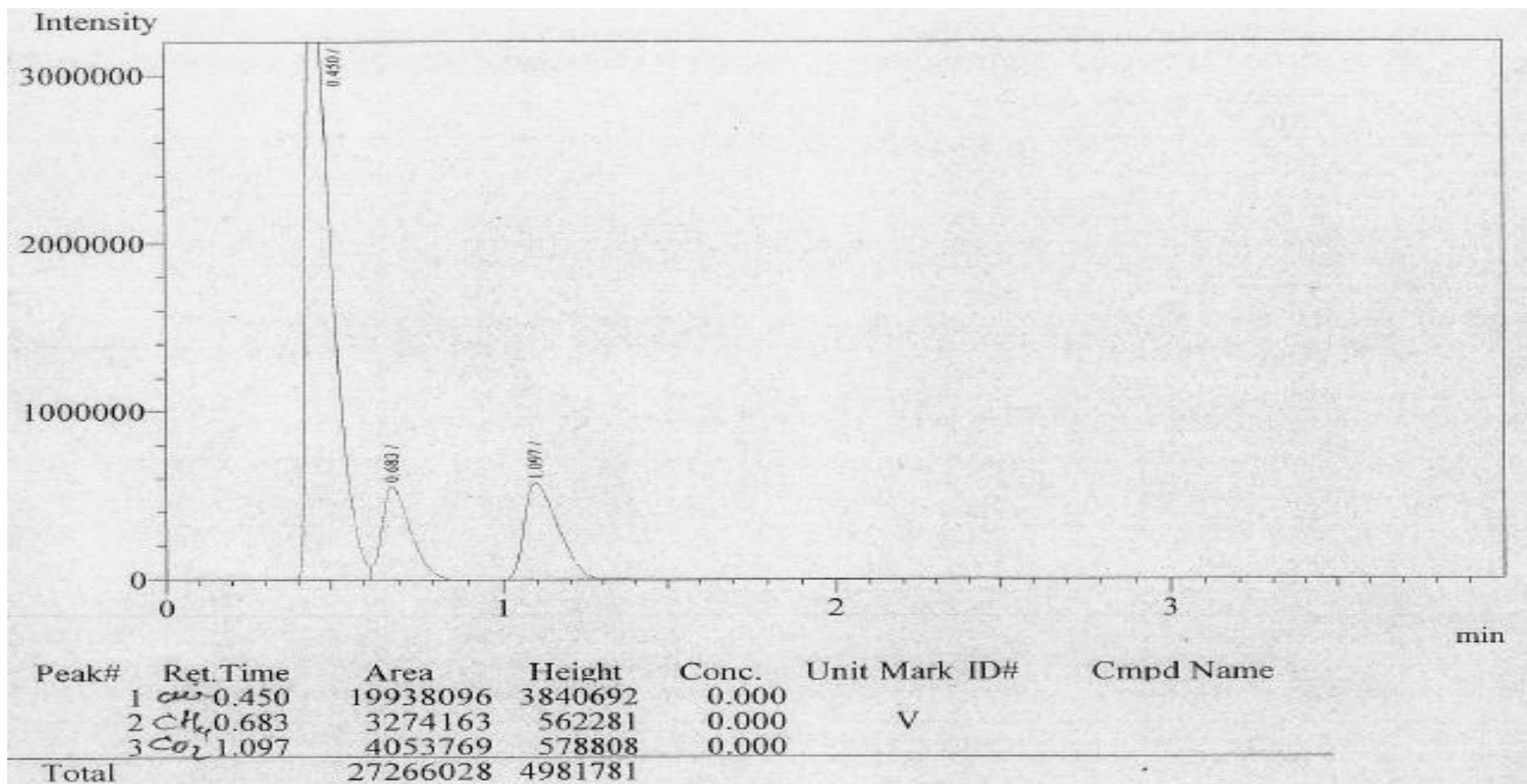
2. โครมาโตแกรม



ภาพที่ ง.2 โครมาโตแกรมของอากาศ

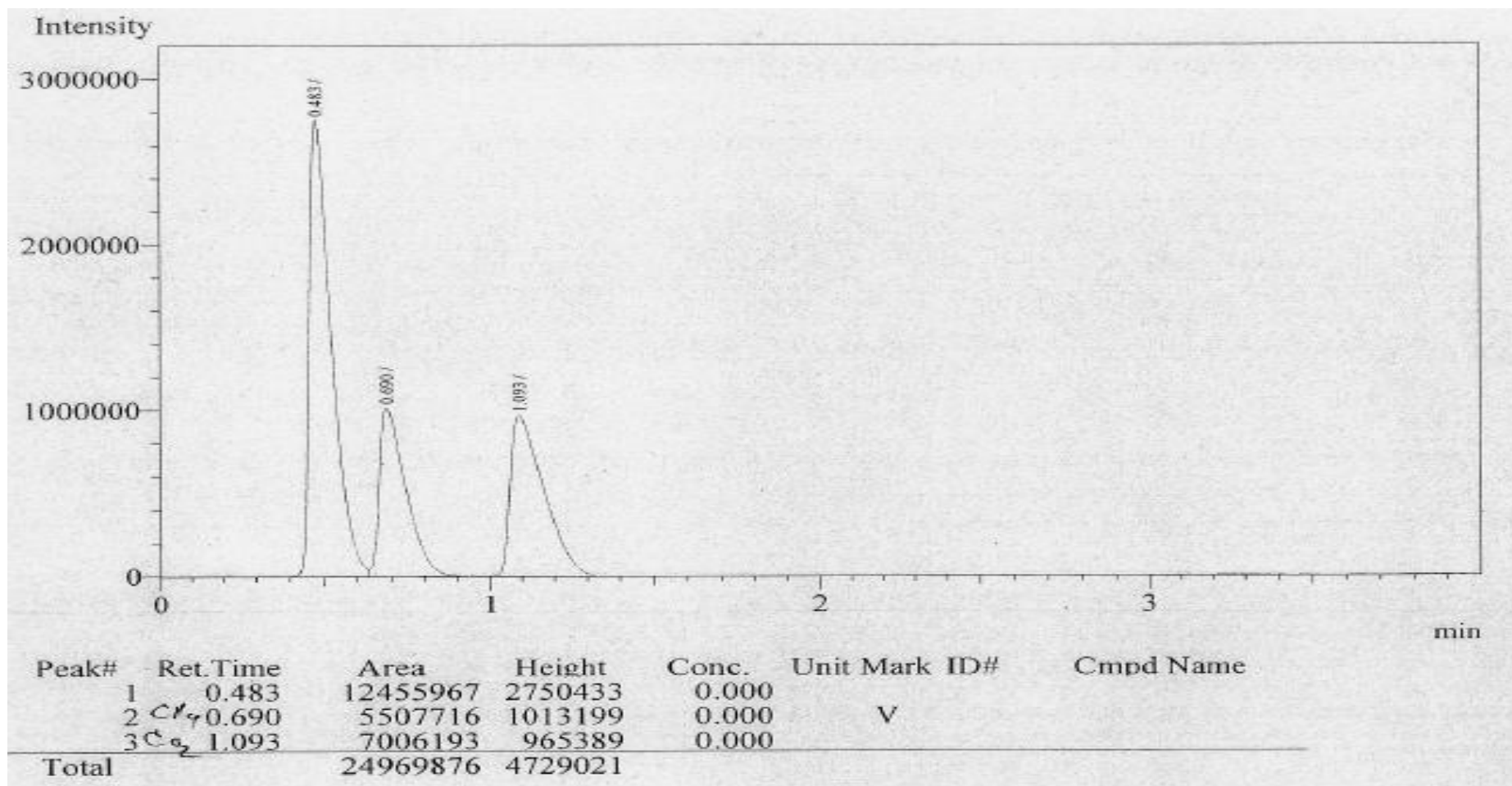


ภาพที่ ง.3 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1

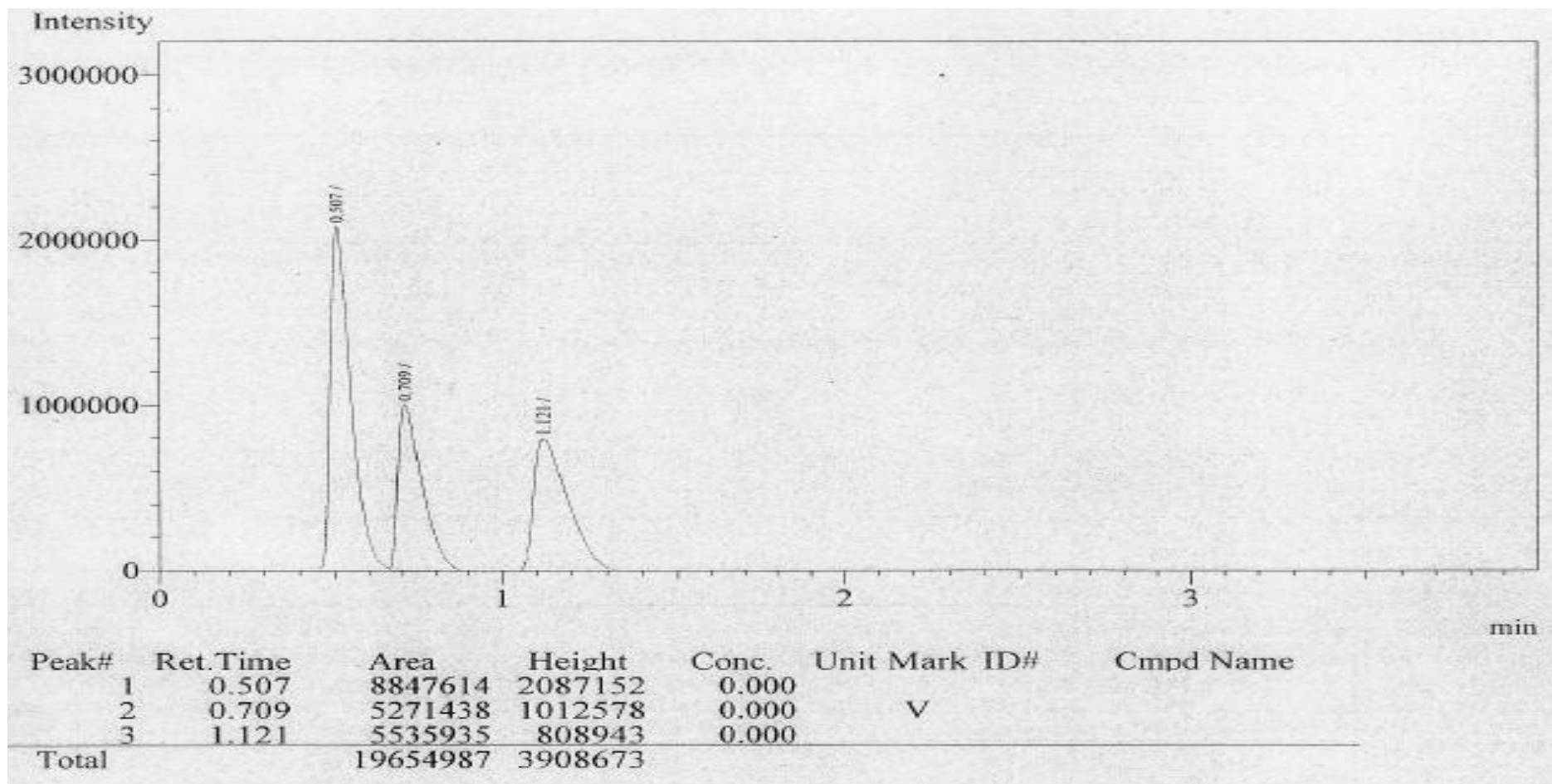


ภาพที่ ง.4 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2

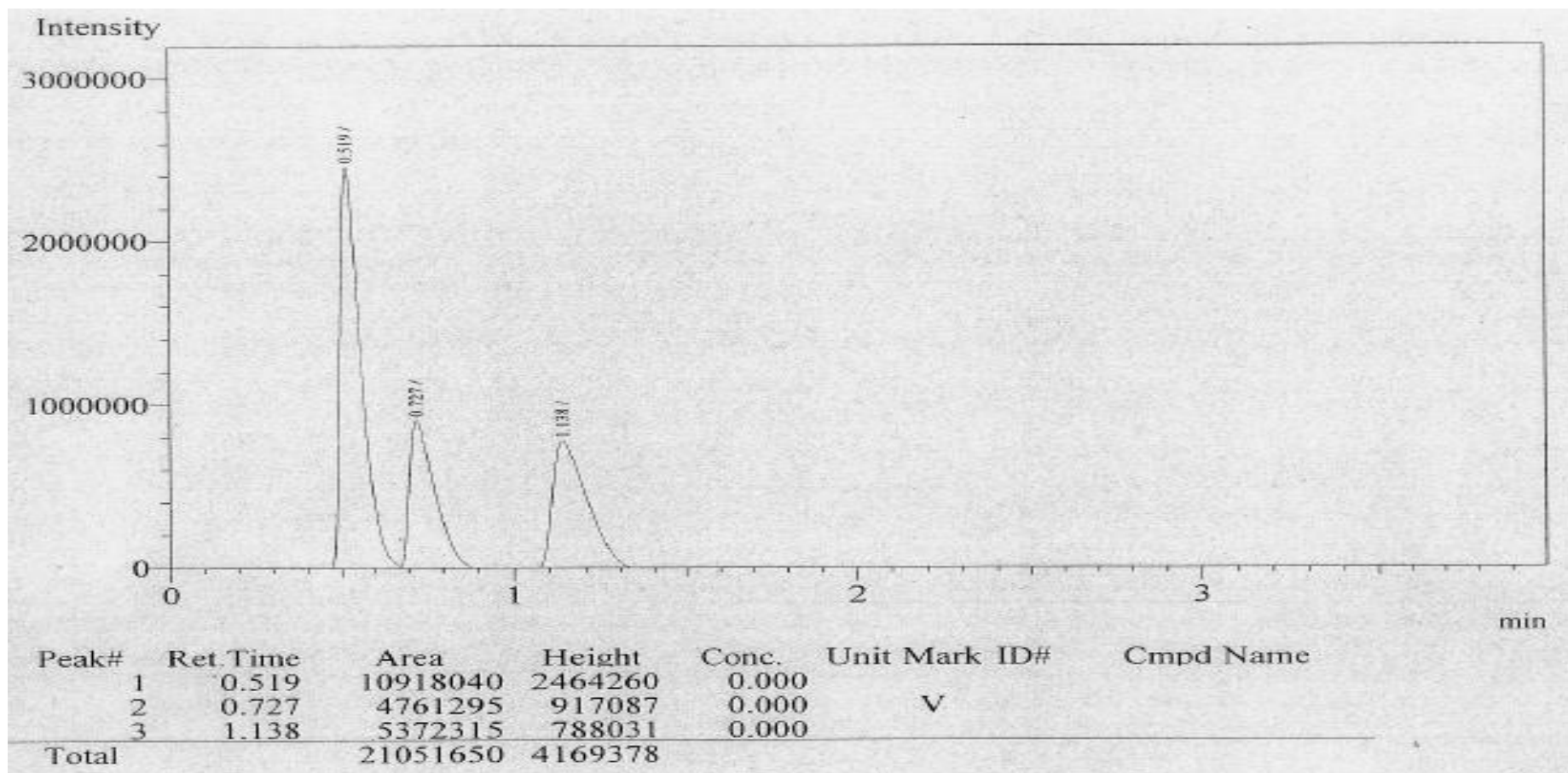




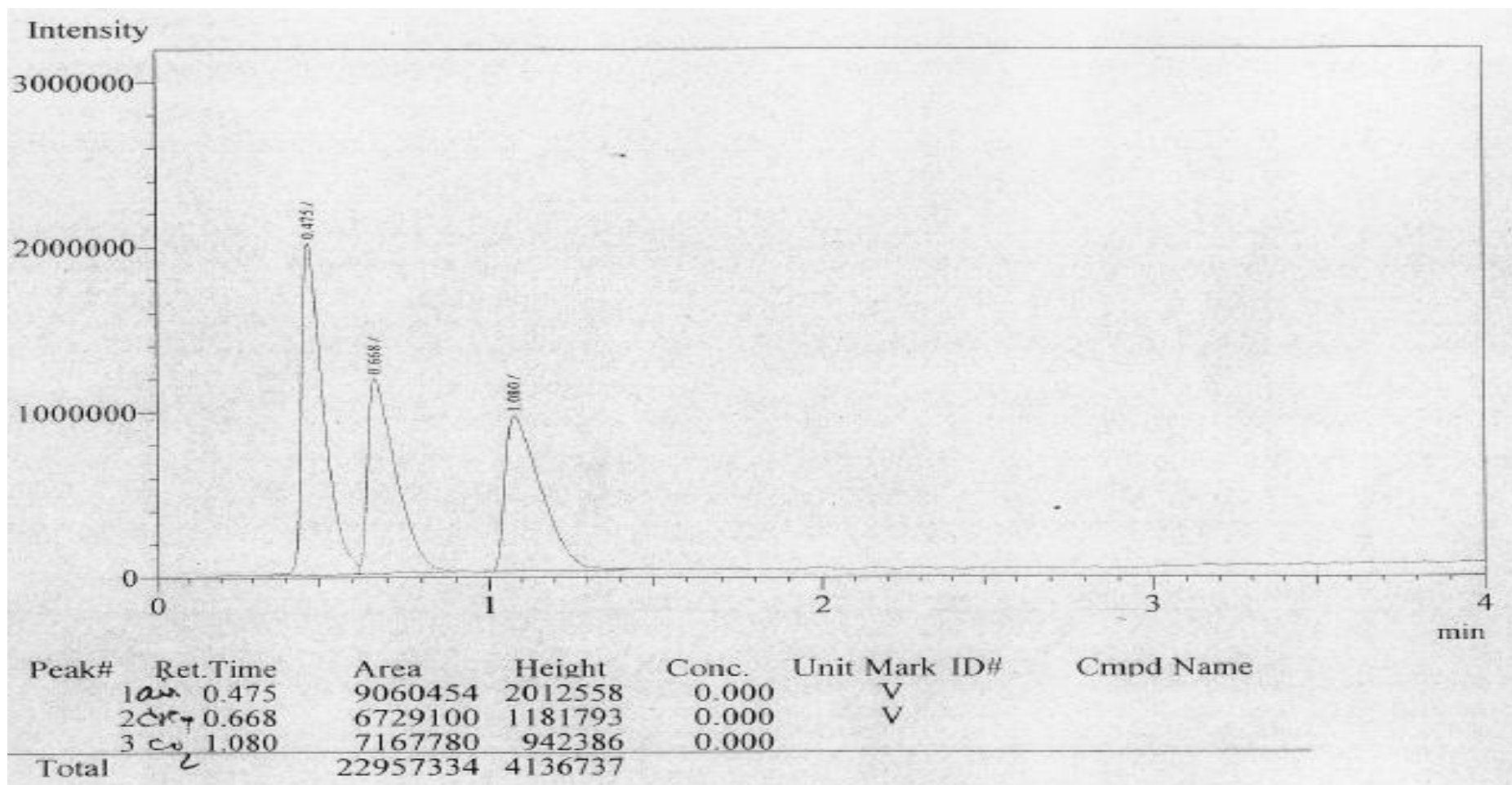
ภาพที่ ง.5 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3



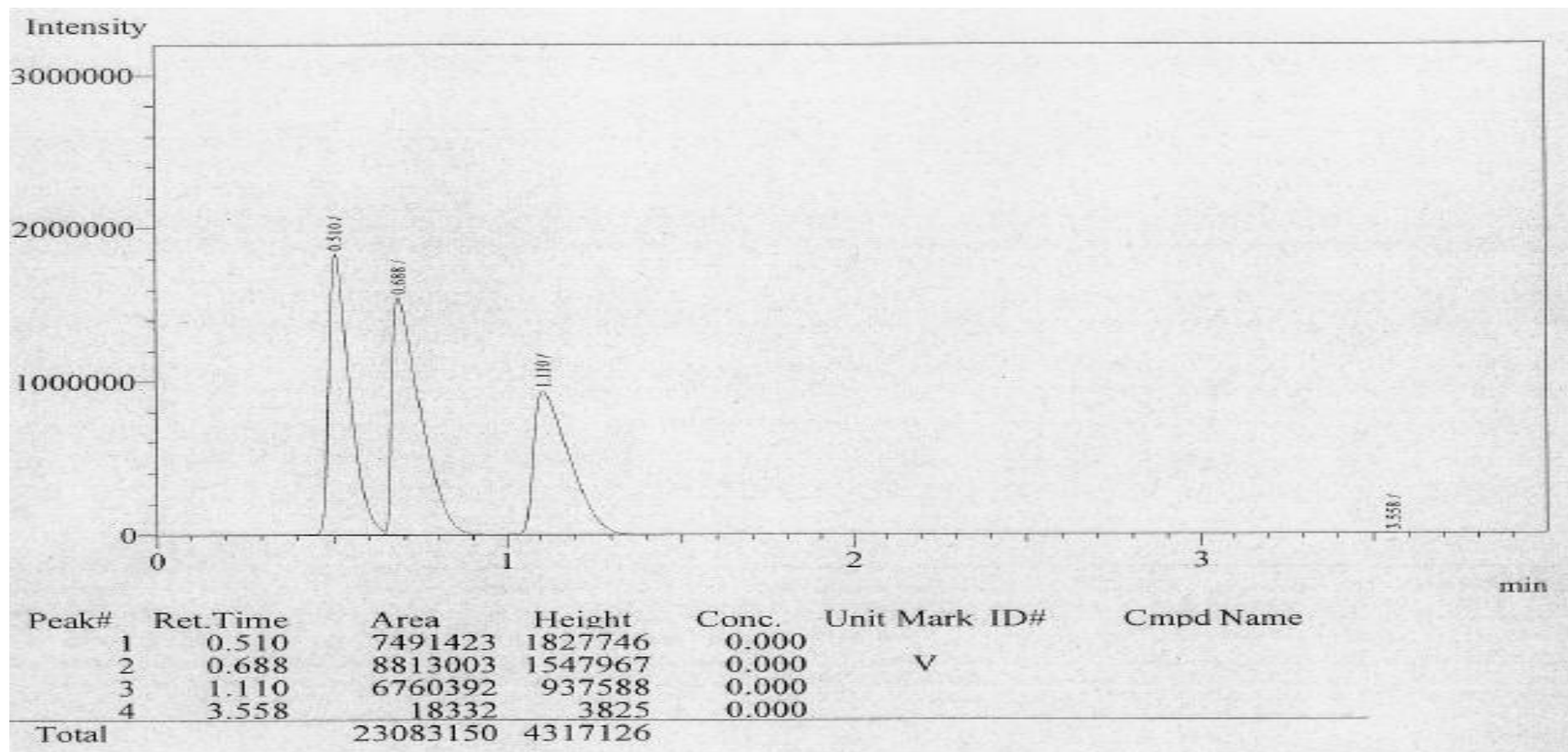
ภาพที่ ง.6 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1



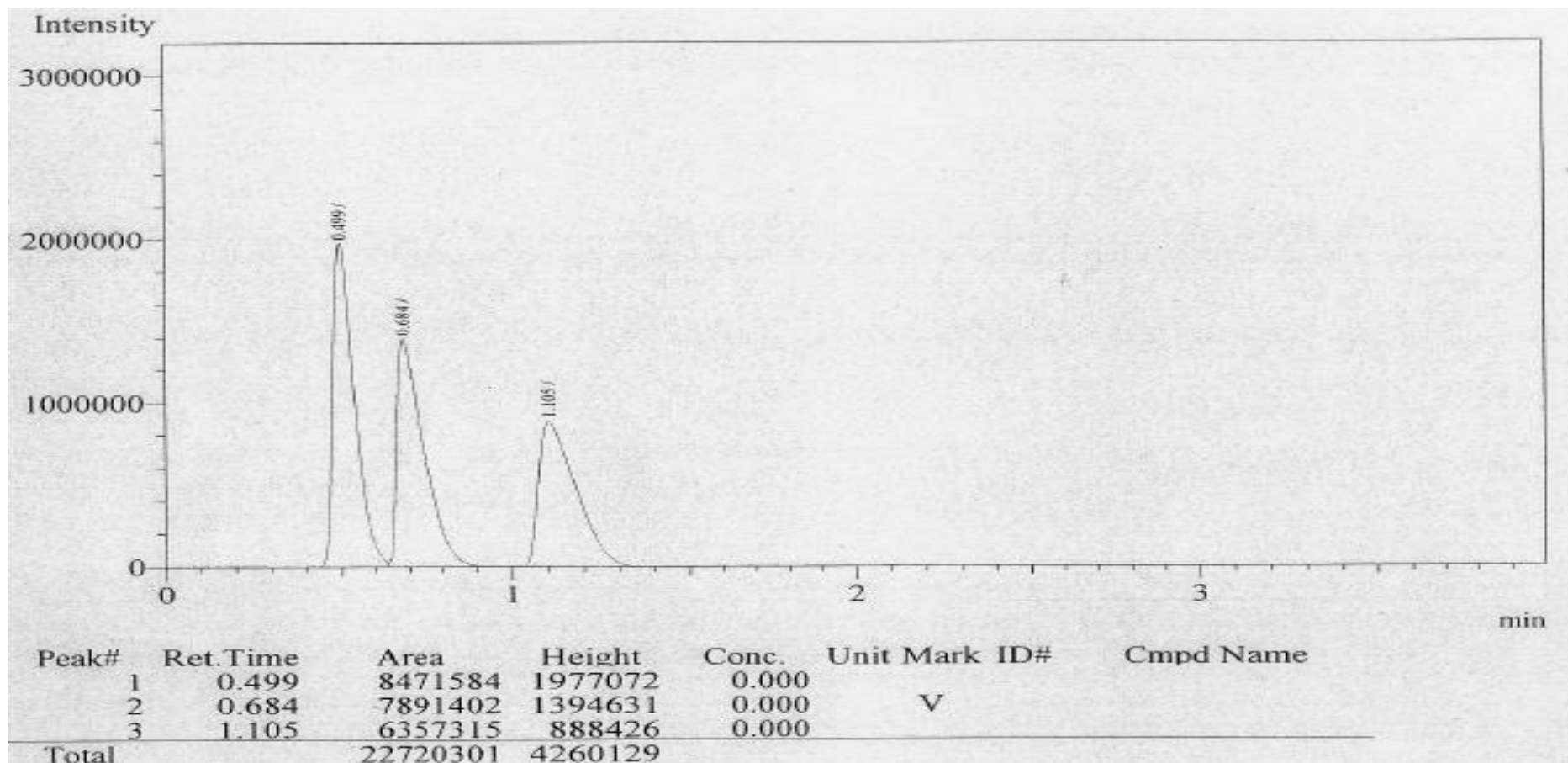
ภาพที่ ง.7 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2



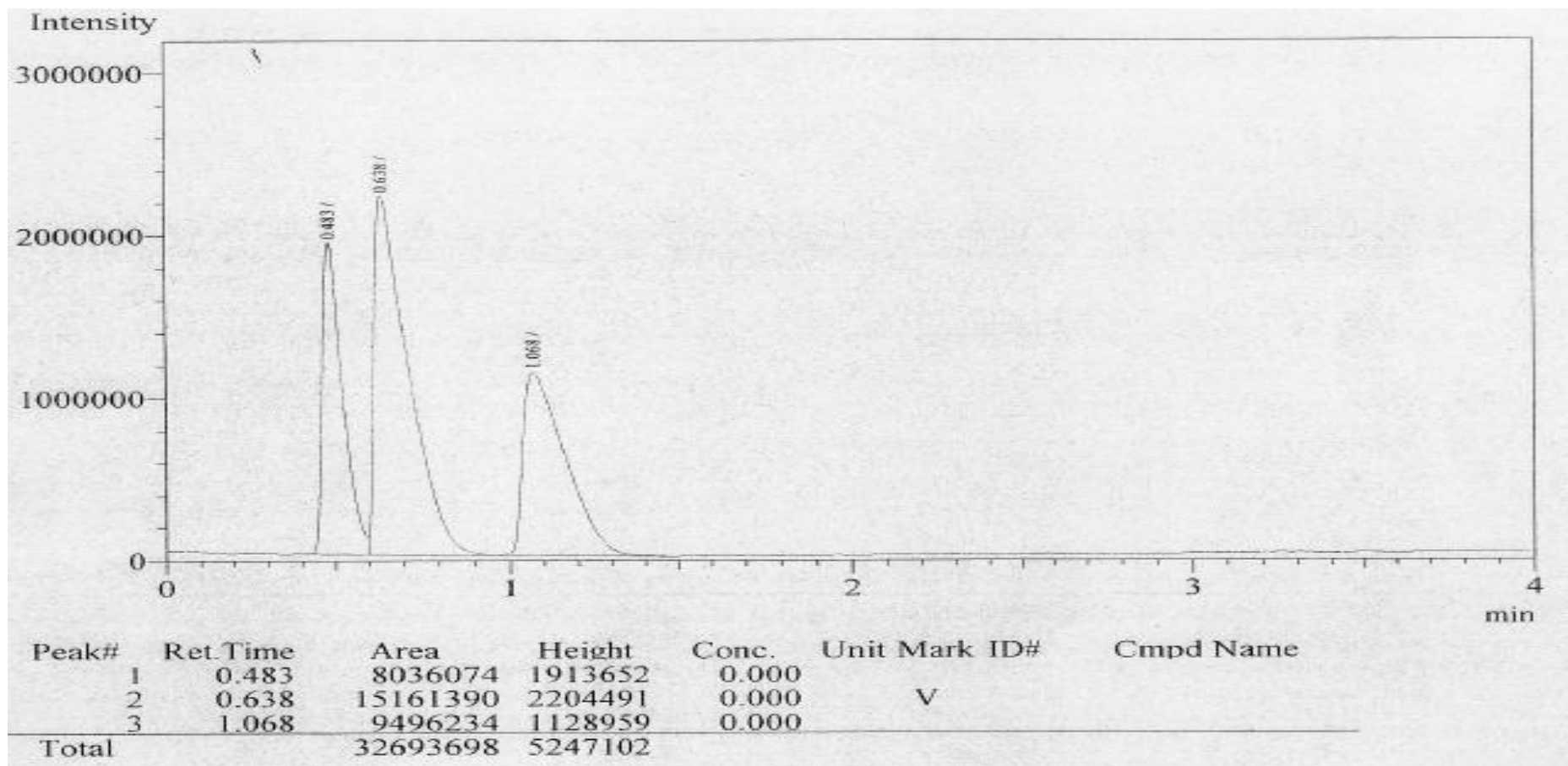
ภาพที่ ง.8 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3



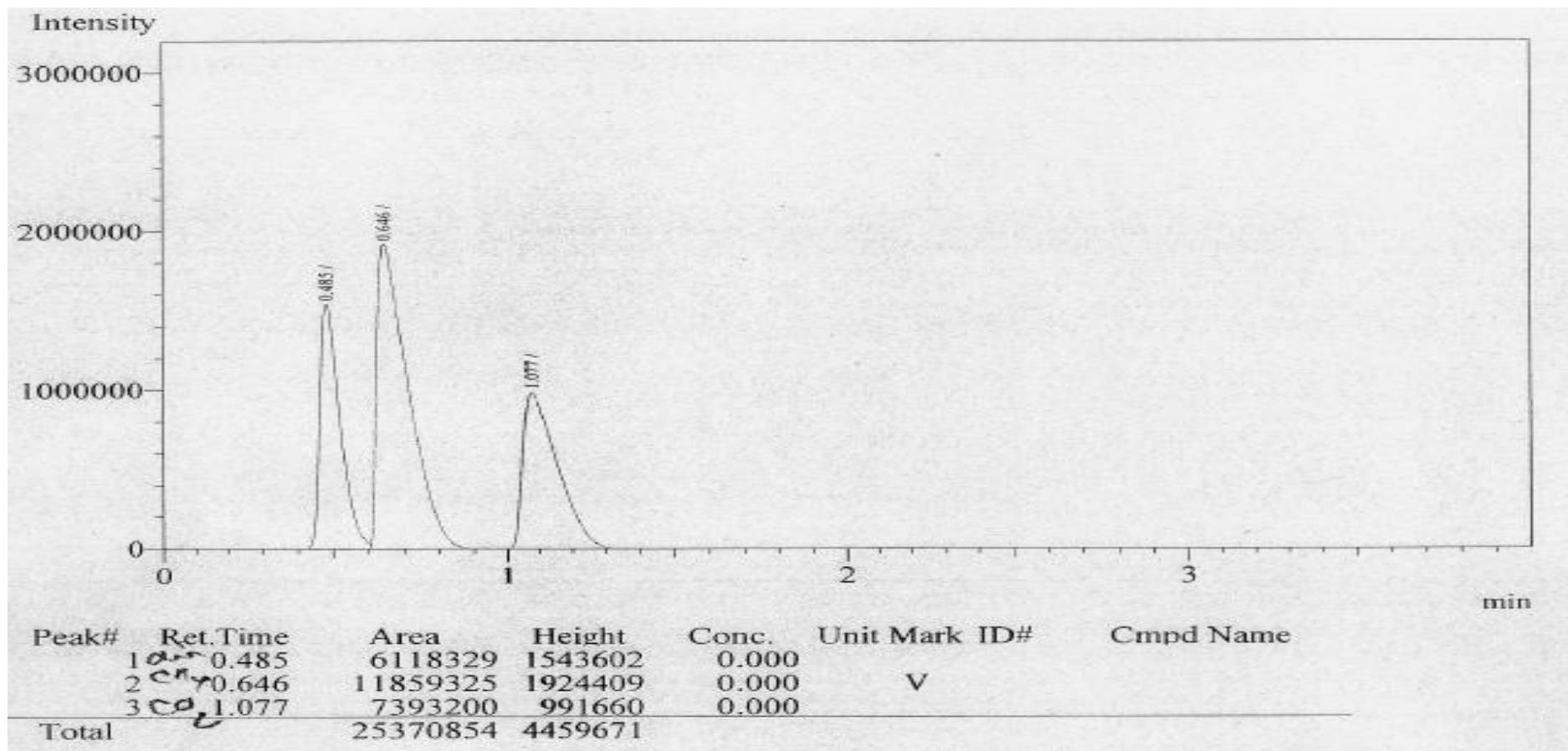
ภาพที่ ง.9 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ ง.10 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2

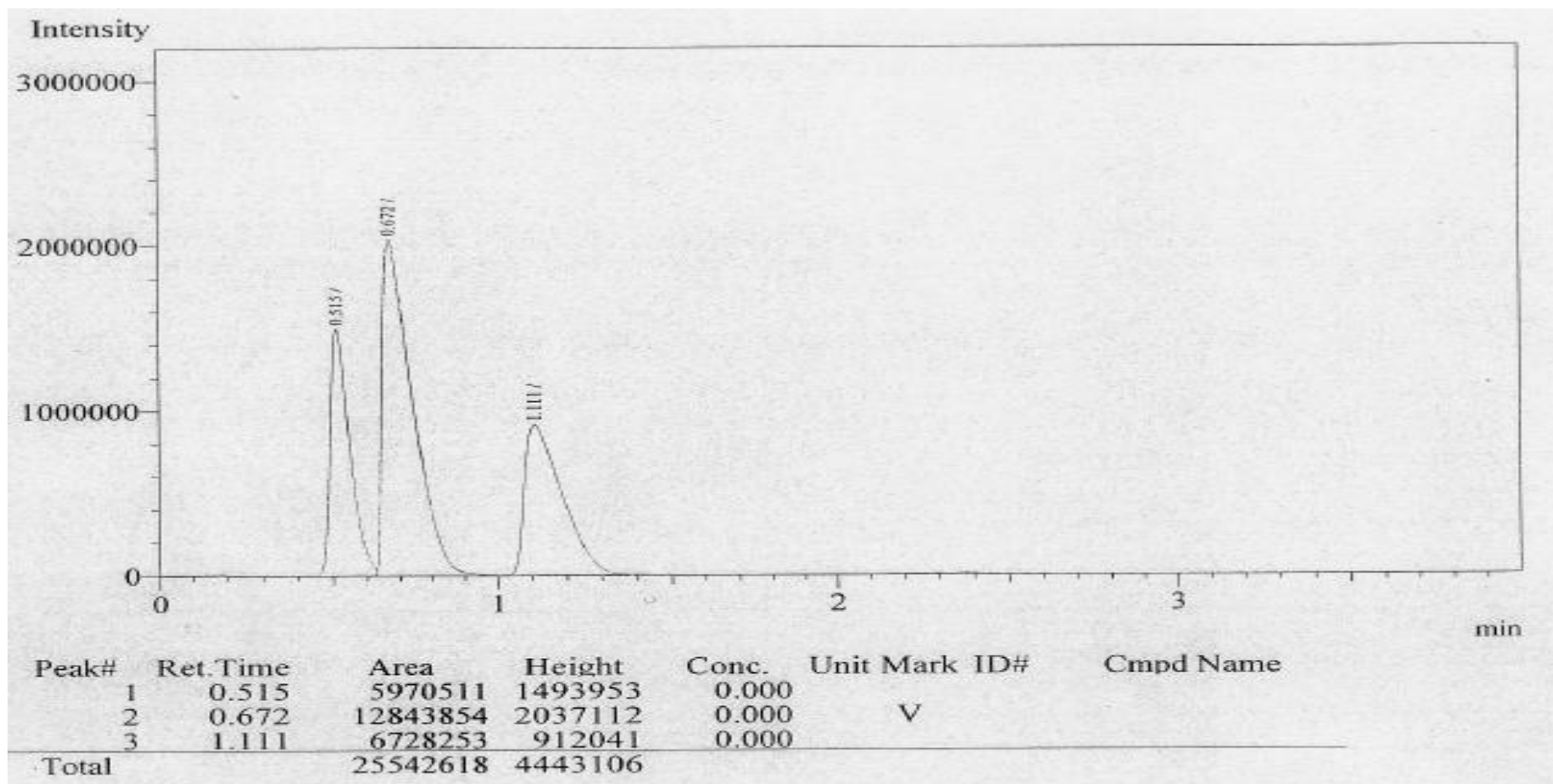


ภาพที่ ง.11 โคโรมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3

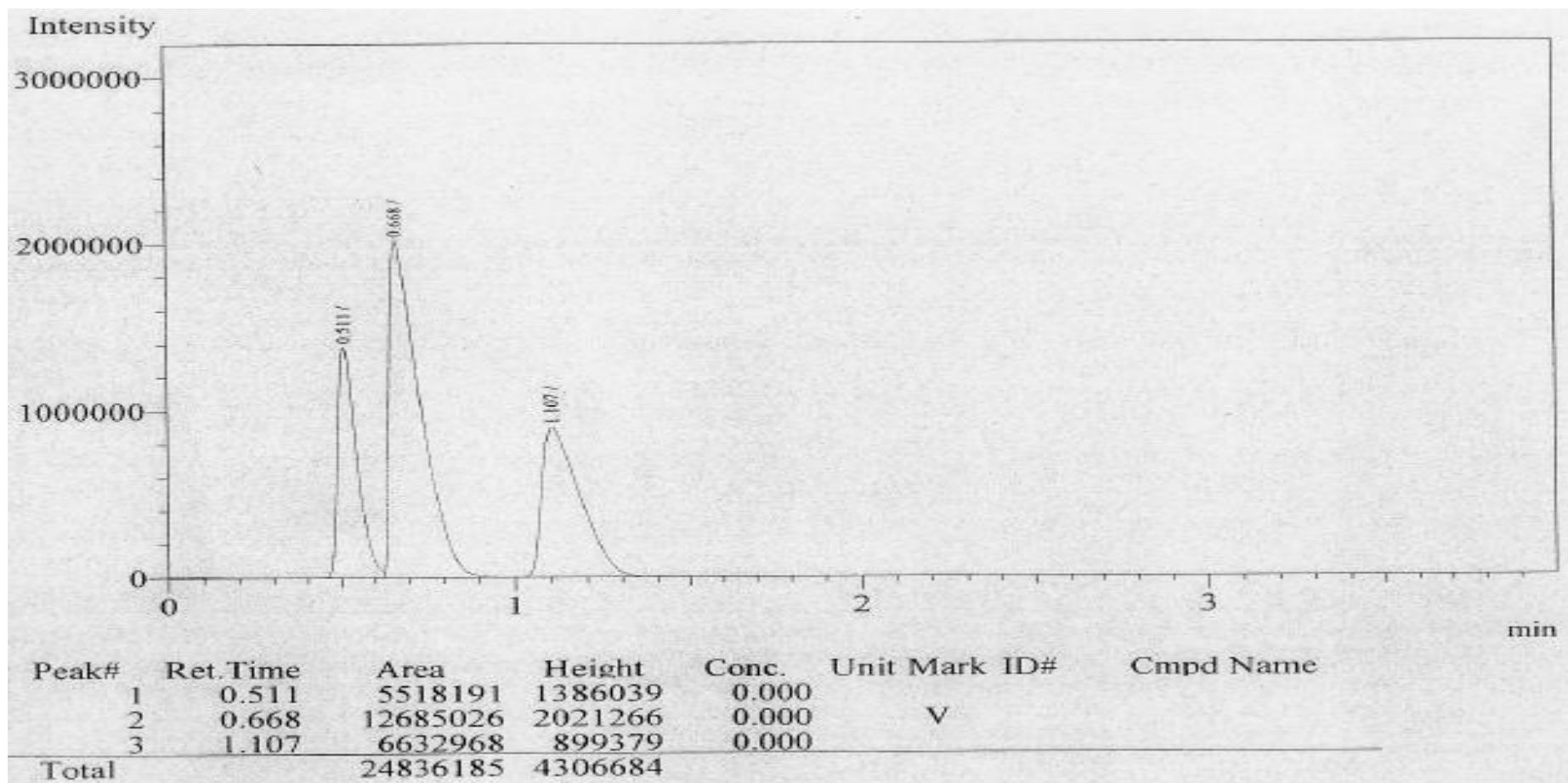


ภาพที่ ง.12 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1

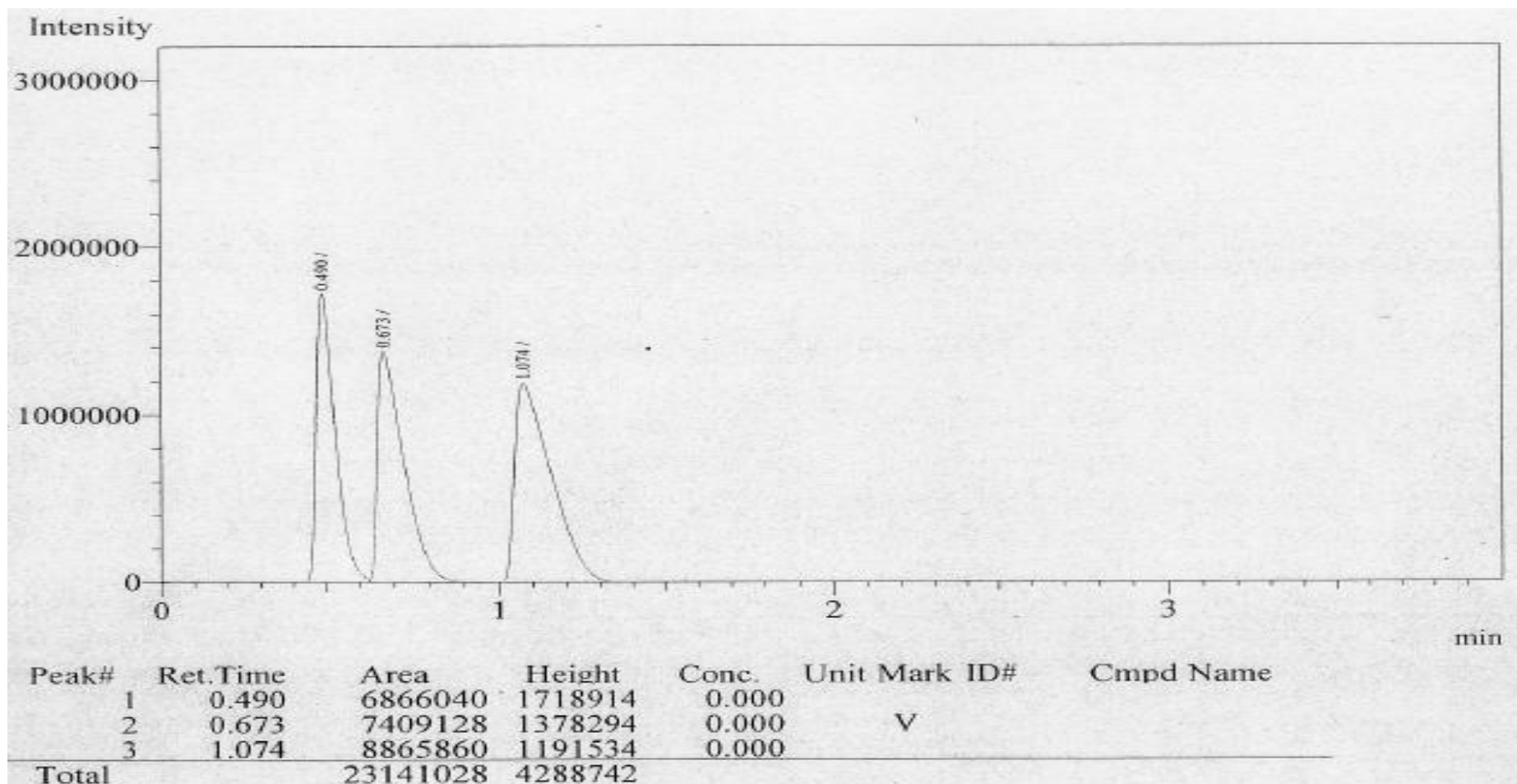




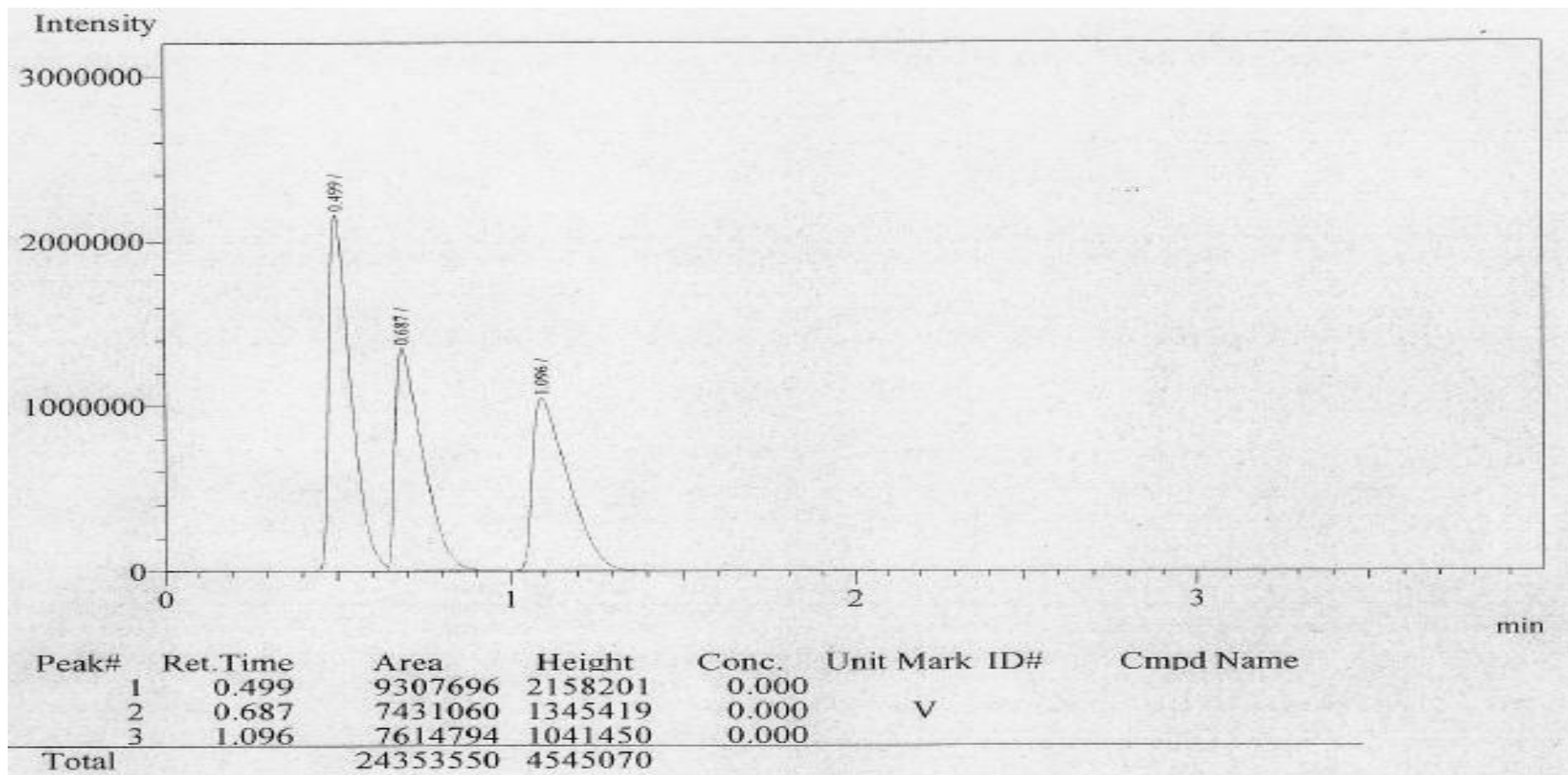
ภาพที่ ง.13 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2



ภาพที่ ง.14 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3



ภาพที่ ง.15 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ ง.16 โครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันปาล์ม 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 2

### 3. ตัวอย่างการคำนวณ

วิธีทำ จากโครมาโตแกรมของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3 (ภาพที่ ง.14) พบว่า

1) Total peak area = 24,638,185 และ Air peak area ที่ Retention time 0.511 วินาที = 5,118,191

ดังนั้น Real total peak area =  $24,638,185 - 5,118,191 = 19,519,994$

2) CH<sub>4</sub> peak area ที่ Retention time 0.668 วินาที = 12,685,026

ดังนั้น % Normalization Area =  $(12,685,026/19,519,994) \times 100 = 64.98 \%$

3) CO<sub>2</sub> peak area ที่ Retention time 1.107 วินาที = 6,632,968

ดังนั้น % Normalization Area =  $(6,632,968/19,519,994) \times 100 = 33.98 \%$

เพราะฉะนั้น องค์ประกอบแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองครั้งที่ 3 มีปริมาณมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ 64.98 % และ 33.98 % ตามลำดับ

#### 4. ภาพเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟีและอุปกรณ์เสริม



ภาพที่ ง.17 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น Shimadzu-2010 ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ ง.18 ชื่อรุ่นของเครื่อง และเครื่องหมายทางการค้า



ภาพที่ ง.19 ช่องใส่สาร (Injection port)



ภาพที่ ง.20 อุปกรณ์ใส่สารแบบอัตโนมัติ (Auto injector)



ภาพที่ ง.21 เข็ม GC สำหรับฉีดแก๊สตัวอย่าง





## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติรัช อัจศิริ เกิดเมื่อวันที่ 24 เมษายน พ.ศ.2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา จากภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศา สตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2552