

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล  
โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



นางสาวปนัดดา นิลอาญา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

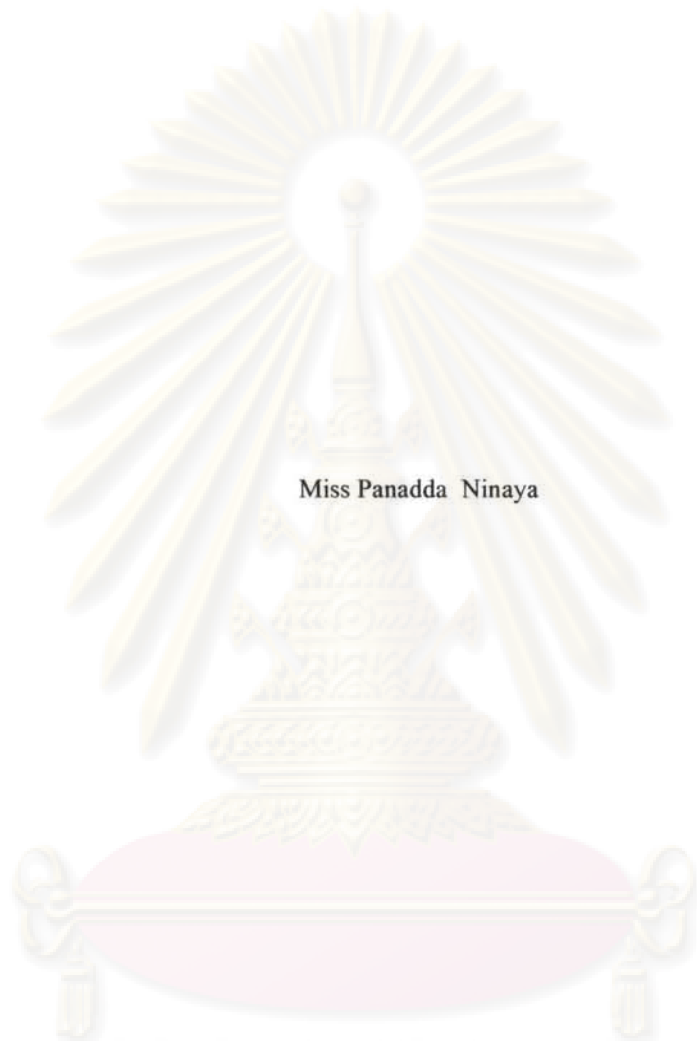
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIODIESEL WASTEWATER TREATMENT  
BY TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM



Miss Panadda Ninaya

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520854

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจน  
แบบสองขั้นตอน

โดย

นางสาวปนัดดา นิลอาญา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

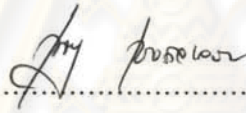
รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

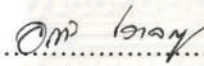


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

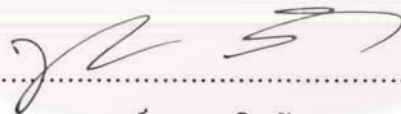
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)



..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สมชาย ดารารัตน์)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปนัดดา นิลอาญา : การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (BIODIESEL WASTEWATER TREATMENT BY TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 165 หน้า.

การวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว โดยใช้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ทำการทดลองโดยใช้ถังหมักกรดแบบกวนสมบูรณขนาด 0.5 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังหมักก๊าซมีเทนแบบกวนสมบูรณ ขนาด 5 ลิตร ด้วยอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ 0.5 ลิตรต่อวัน คงที่ตลอดการทดลอง โดยถังหมักกรดมีระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์เท่ากับ 1 วัน และถังหมักก๊าซมีเทนมีระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์เท่ากับ 10 วัน ผลการวิจัยพบว่า อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46-1.50 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีละลาย เมทานอล และกลีเซอรอล มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 93.30 –98.04 88.00-100 และ 67.00-100 ตามลำดับ ซึ่งระบบมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูง โดยพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีที่ถูกกำจัด และปริมาณก๊าซมีเทนต่อชีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.21-0.39 และ 0.19-0.25 ล./ก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าเฉลี่ยของปริมาณก๊าซมีเทนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงร้อยละ 63.32 – 68.58 โดยการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.46 – 1.50 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารต่างๆ ในน้ำเสีย ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีที่ถูกกำจัด และร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีละลายสูงสุด เท่ากับร้อยละ 98 มีปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีที่ถูกกำจัด และปริมาณก๊าซมีเทนต่อชีโอดีที่ถูกกำจัดสูงสุด เท่ากับ 0.30 และ 0.20 ล./ก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....ปนัดดา นิลอาญา.....  
สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....อ.ท. 1019Y  
ปีการศึกษา.....2552.....



## 4970420321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : COD REMOVED / BIODIESEL WASTEWATER / TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM

PANADDA NINAYA : BIODIESEL WASTEWATER TREATMENT BY TWO STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 165 pp.

The aim of this research was to investigate the performance of Two Stage Anaerobic Digestion for treat biodiesel wastewater and the effect of organic loading rate (OLR) to biodiesel wastewater treatment efficiency. Wastewater used in this study was collected from biodiesel production process with alkali-catalyzed transesterification of Refined Bleached and Deodorized (RBD Palm Oil). CSTR acidification tank (0.5 L) was connected to 5 L CSTR methane tank in series, while the flow rate constantly was kept at 0.5 L/d throughout all experiments. The retention time of acid tank and methane tank was 1 day and 10 days, respectively. At Organic loading rates 0.46-1.50 kgCOD/m<sup>3</sup>-d. , showed that the removal efficiencies of soluble COD, methanol and glycerol were 93.30–98.04%, 88-100% and 67-100%, respectively. The biogas yield and methane yield were 0.21-0.39 and 0.19-0.25 l/gCOD removed, respectively. The biogas analysis showed that ratio of methane in biogas was ranged from 63.32-68.58 %. It was observed that the COD removal efficiency and biogas yield were increased with additional OLR from 0.46-1.50 kg-COD/m<sup>3</sup>-day. The optimum OLR was occurred at 1.10 kg-COD/m<sup>3</sup>-day, the highest COD removal efficiency was achieved at 98% while biogas yield and methane yield were 0.30 and 0.20 l/gCOD removed respectively.

Department : Environmental Engineering.....

Student's Signature Panadda Ninaya

Field of Study : Environmental Engineering..

Advisor's Signature Orathai Chavalparit

Academic Year : .....2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล และอาจารย์ ดร. สมชาย คารารัตน์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนประสบความสำเร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไบโอดีเซล.....	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมาและการวิจัยไบโอดีเซล.....	4
2.1.2 ศักยภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย.....	5
2.1.3 ประเภทของไบโอดีเซล.....	7
2.1.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	8
2.1.5 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม.....	11
2.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน .....	12
2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Treatment Process).....	13
2.2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Treatment Process).....	14
2.2.3 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment Process).....	15
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) .....	15
2.3.1 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของกระบวนการไร้ออกซิเจน .....	15
2.3.2 ประเภทของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน...	17
2.3.3 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจน.....	20
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไร้ออกซิเจน.....	23
2.5 ก๊าซชีวภาพ.....	25
2.6 รูปแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ .....	26



	หน้า
2.7 ระบบบำบัดแบบถังหมักไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester).....	29
2.7.1 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน.....	31
2.7.2 ข้อมูลการออกแบบระบบถังหมักไร้ออกซิเจน.....	32
2.8 ระบบถังปฏิริยาแบบสองขั้นตอน (two-stage process).....	32
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>38</b>
3.1 แผนการวิจัย.....	38
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	40
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3.1 ชุดอุปกรณ์ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	42
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.4 การเตรียมน้ำเสียและหัวเชื้อจุลชีพ.....	49
3.4.1 การเตรียมน้ำเสีย.....	49
3.4.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลชีพ.....	50
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.5.1 การออกแบบและติดตั้งระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	51
3.5.2 การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	52
3.5.3 การควบคุมและการเดินระบบ.....	53
3.6 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย.....	55
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....</b>	<b>57</b>
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียไป โอดีเซล.....	57
4.2 ลักษณะสมบัติของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ (Seed).....	60
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไป โอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	61
4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไป โอดีเซล.....	63
4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไป โอดีเซล.....	80
4.3.3 สภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไป โอดีเซล.....	82

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.....	106
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์เมทานอล.....	137
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์กัลลีเซอรอล.....	148
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน.....	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	165

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน).....	12
ตารางที่ 2.2	สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้.....	19
ตารางที่ 2.3	ข้อมูลการออกแบบระบบถังหมักไร้ออกซิเจน.....	32
ตารางที่ 3.1	แผนการวิจัย.....	40
ตารางที่ 3.2	วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	41
ตารางที่ 3.3	สรุปขนาดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	43
ตารางที่ 3.4	แผนการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลเข้าสู่สภาวะคงตัว.....	56
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
ตารางที่ 4.2	แผนการเดินระบบในระยะเริ่มต้นการเดินระบบ.....	61
ตารางที่ 4.3	แผนการเดินระบบในระยะเดินระบบตามแผนการทดลอง.....	62
ตารางที่ 4.4	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสลายโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	69
ตารางที่ 4.5	เมทานอลในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	72
ตารางที่ 4.6	กลีเซอรอลในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	76
ตารางที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	81
ตารางที่ 4.8	ค่าเฉลี่ยพีเอชในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4.9	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	86
ตารางที่ 4.10	ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	88
ตารางที่ 4.11	ค่าเฉลี่ยสภาพค่างทั้งหมดในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	91

ตารางที่ 4.12	อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4.13	เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียประเภทต่างๆ.....	97
ตารางที่ ก-1	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09 0.18 และ 0.27 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีไอดีละลาย.....	107
ตารางที่ ก-2	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีไอดีละลาย.....	108
ตารางที่ ก-3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีไอดีละลาย.....	109
ตารางที่ ก-4	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีไอดีละลาย.....	110
ตารางที่ ก-5	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีไอดีละลาย.....	111
ตารางที่ ก-6	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์เมทานอล.....	112
ตารางที่ ก-7	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กลีเซอรอล...	113
ตารางที่ ก-8	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	114
ตารางที่ ก-9	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช...	117
ตารางที่ ก-10	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิ.....	127
ตารางที่ ก-11	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-0.27 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหยสภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด.....	132

ตารางที่ ก-12	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตรา ภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ชี โอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด.....	133
ตารางที่ ก-13	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตรา ภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ชี โอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด.....	134
ตารางที่ ก-14	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตรา ภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ชี โอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด.....	135
ตารางที่ ก-15	ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตรา ภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ชี โอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพ ค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด.....	136
ตารางที่ ข-1	ผลการวิเคราะห์หม่ทานอล ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ชี โอดี-ลบ.ม.-วัน.	138
ตารางที่ ค-1	ผลการวิเคราะห์หลักชีเซอร์อล ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ชี โอดี-ลบ.ม.-วัน.	149
ตารางที่ ง-1	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ของระบบถังหมักกรด	160
ตารางที่ ง-2	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ของระบบ ถังหมักก๊าซ.....	160
ตารางที่ ง-3	ผลการวิเคราะห์ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน.....	160



## สารบัญภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 2.1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์.....	9
ภาพที่ 2.2	กระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม.....	10
ภาพที่ 2.3	กลไกการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	22
ภาพที่ 2.4	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB.....	27
ภาพที่ 2.5	ระบบ ADI-BVF.....	28
ภาพที่ 2.6	ถังย่อยแบบอัตราต่ำ.....	29
ภาพที่ 2.7	ถังย่อยแบบอัตราสูงชนิดขึ้นตอนเดียว.....	30
ภาพที่ 2.8	ถังย่อยแบบอัตราสูงชนิดสองชั้นตอน.....	30
ภาพที่ 2.9	ถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมชนิดของแบคทีเรีย.....	33
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	39
ภาพที่ 3.2	ขนาดของถังหมักกรด.....	44
ภาพที่ 3.3	ขนาดของถังหมักก๊าซมีเทน.....	45
ภาพที่ 3.4	ลักษณะของถังหมักกรด.....	49
ภาพที่ 3.5	ลักษณะของถังหมักก๊าซมีเทน.....	46
ภาพที่ 3.6	เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	48
ภาพที่ 3.7	ทิศทางการไหลของน้ำเสียในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน.....	51
ภาพที่ 3.8	ชุดการทดลองระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน.....	51
ภาพที่ 3.9	ขั้นตอนการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน.....	54
ภาพที่ 3.10	จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย.....	55
ภาพที่ 4.1	ลักษณะน้ำเสียไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัย.....	58
ภาพที่ 4.2	ลักษณะของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ.....	61
ภาพที่ 4.3	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักกรด.....	63
ภาพที่ 4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักก๊าซมีเทน.....	64
ภาพที่ 4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน.....	64
ภาพที่ 4.6	ค่าเฉลี่ยซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน.....	67

ภาพที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	68
ภาพที่ 4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบถังหมักกรด.....	72
ภาพที่ 4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบถังหมักก๊าซมีเทน.....	73
ภาพที่ 4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน.....	73
ภาพที่ 4.11	ค่าเฉลี่ยเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	74
ภาพที่ 4.12	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	75
ภาพที่ 4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบถังหมักกรด.....	77
ภาพที่ 4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบถังหมักก๊าซมีเทน.....	77
ภาพที่ 4.15	ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน..	78
ภาพที่ 4.16	ค่าเฉลี่ยกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	78
ภาพที่ 4.17	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	79
ภาพที่ 4.18	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	80
ภาพที่ 4.19	พีเอชของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	83
ภาพที่ 4.20	ค่าเฉลี่ยพีเอชของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	85
ภาพที่ 4.21	อุณหภูมิของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	87
ภาพที่ 4.22	กรดไขมันระเหยของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	89
ภาพที่ 4.23	ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	90
ภาพที่ 4.24	สภาพค่างทั้งหมดในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	92
ภาพที่ 4.25	ค่าเฉลี่ยสภาพค่างทั้งหมดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	93
ภาพที่ 4.26	อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของระบบถังหมักกรด	95
ภาพที่ 4.27	อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของระบบถังหมักก๊าซมีเทน.....	95
ภาพที่ 4.28	อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.....	96
ภาพที่ ข-1	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1.....	139
ภาพที่ ข-2	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 3,891)	139



ภาพที่ ข-3	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 45,031).....	139
ภาพที่ ข-4	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 429,597) .....	140
ภาพที่ ข-5	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 2,237,670) .....	140
ภาพที่ ข-6	มาตรฐานเมทานอล ครั้งที่2.....	141
ภาพที่ ข-7	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 (พื้นที่เท่ากับ 58,064)...	141
ภาพที่ ข-8	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (พื้นที่เท่ากับ 94,863)...	141
ภาพที่ ข-9	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 (พื้นที่เท่ากับ 215,859)..	142
ภาพที่ ข-10	มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.00 (พื้นที่เท่ากับ 494,119)..	142
ภาพที่ ข-11	น้ำเสียไบโอดีเซล (น้ำเสียจริง) มีพื้นที่เท่ากับ 1,455,548 มาตรฐานที่สมการ $Y=0.223X+123.18$ .....	142
ภาพที่ ข-12	ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน...	143
ภาพที่ ข-13	ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน...	144
ภาพที่ ข-14	ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน...	145
ภาพที่ ข-15	ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน...	146
ภาพที่ ข-16	ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน...	147
ภาพที่ ค-1	มาตรฐานกลีเซอรอล ครั้งที่ 1.....	150
ภาพที่ ค-2	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 31,831)...	150
ภาพที่ ค-3	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.2 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 52,521)...	150
ภาพที่ ค-4	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 101,638)...	151
ภาพที่ ค-5	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 1.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 171,188)...	151
ภาพที่ ค-6	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 2.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 338,102)...	151
ภาพที่ ค-7	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 5.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 880,211)...	151
ภาพที่ ค-8	มาตรฐานกลีเซอรอล ครั้งที่ 2	152
ภาพที่ ค-9	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 33,539)....	152
ภาพที่ ค-10	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2.0 ที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 112,118)...	152
ภาพที่ ค-11	มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 221,991)....	153
ภาพที่ ค-12	น้ำเสียไบโอดีเซล (น้ำเสียจริง) มีพื้นที่เท่ากับ 399,604 ใช้สมการ $y=0.0058x-52.874$	153

	หน้า
ภาพที่ ค-13 ผลการวิเคราะห์หักลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน..	154
ภาพที่ ค-14 ผลการวิเคราะห์หักลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน..	155
ภาพที่ ค-15 ผลการวิเคราะห์หักลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.	156
ภาพที่ ค-16 ผลการวิเคราะห์หักลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.	157
ภาพที่ ค-17 ผลการวิเคราะห์หักลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.	158
ภาพที่ ง-1 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน...	161
ภาพที่ ง-2 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.64 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.	162
ภาพที่ ง-3 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีไอดีบ.ม.-วัน.....	163
ภาพที่ ง-4 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.....	164



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากภาวะวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานและเศรษฐกิจ รวมทั้งภาวะวิกฤตการณ์ทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลก ทำให้ทุกประเทศทั่วโลกได้แสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนที่สามารถทดแทนพลังงานปิโตรเลียมได้ “ไบโอดีเซล” จึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน เพราะเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้โดยไม่ต้องมีการคัดแปลงเครื่องยนต์ ง่ายต่อการผลิต มีการลงทุนต่ำ และใช้วัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ และในส่วนของประเทศไทยนั้น ยังเป็นการตอบสนองต่อนโยบายของรัฐบาลในการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตขึ้นเองภายในประเทศอีกด้วย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีข้อได้เปรียบในการจัดหาวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน ทำให้สามารถช่วยประหยัดเงินตราและลดการพึ่งพาน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้ อีกทั้งยังช่วยเหลือเกษตรกรในการเพิ่มรายได้และผลผลิตจากการเกษตร เป็นการช่วยเพิ่มฐานะทางเศรษฐกิจในระดับรากหญ้าตามนโยบายของรัฐอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้การใช้พลังงานไบโอดีเซลยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อสุขภาพอนามัย เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น จากสายพระเนตรอันยาวไกลขององค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ซึ่งได้ทรงศึกษาไบโอดีเซลมาเป็นระยะเวลาอันจนได้รับรางวัลในระดับนานาชาติ รวมทั้งได้ทรงจัดสิทธิบัตร B5 (กรณีที่ใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 5:95) และทรงพระราชทานให้เป็นสมบัติของชาติแก่ ปวงชนชาวไทย หากทั้งประเทศได้ปฏิบัติตามการปลูกกระแสไบโอดีเซลก็สามารถประหยัดการนำเข้าน้ำมันดีเซลเป็นจำนวนเงินนับพันล้านบาทในแต่ละปี (ศิระพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550)

การผลิตไบโอดีเซลนับเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำของเสียจำพวกน้ำมันที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตอาหารมาใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้สารด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันนับเป็นวิธีที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ง่ายและเกิดในระยะเวลาอันสั้น (Suchara และคณะ, 2005) ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซล ประกาศ ณ วันที่ 18 มกราคม 2548 วัตถุดิบหลักของไบโอดีเซลได้แก่ ปาล์มน้ำมัน ซึ่งปัจจุบันสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 500,000 ลิตรต่อวันจากน้ำมันปาล์มที่เหลือจากการบริโภคในประเทศ นอกจากนี้ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบยังสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของผลปาล์มดิบได้เกือบสองเท่า ปัจจุบันมีชุมชน หน่วยงาน บริษัท และผู้ให้ความสนใจในการผลิตไบโอดีเซลเป็นจำนวนมาก แต่อุปสรรคในการผลิตไบโอดีเซลคือ



ปัญหาน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งยากต่อการกำจัดให้หมดไป ปัญหาเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ดังนั้นผู้ผลิตแต่ละรายจึงพยายามหาวิธีการกำจัดที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามการจัดการของเสียและการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลยังคงมีการศึกษาและพัฒนาอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อรองรับการผลิตไบโอดีเซลที่กำลังขยายตัวสูงขึ้นในอนาคต

งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่นิยมนำมาใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และหากแบ่งการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนออกเป็นสองขั้นตอน จะสามารถลดระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียและลดขนาดของระบบได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการควบคุมระบบ นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการติดตั้งร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว อีกทั้งยังได้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดเป็นผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย ซึ่งผลจากการทดลองสามารถบอกถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล เพื่อรองรับการแก้ไขปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากการขยายตัวของการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันและอนาคตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนเป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของการวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนขนาดห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนต่อเนื่องกัน โดยถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์

1.3.2 กำหนดให้ระบบหมักไรรีออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์รวม 11 วัน โดยให้ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์เท่ากับ 1 วันและ 10 วัน ตามลำดับ

1.3.3 ทำการทดลองโดยแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 5,000 7,500 12,000 และ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ

1.3.4 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อให้เกิดความบริสุทธิ์ โดยใช้น้ำมันพืชกึ่งบริสุทธิ์ (RBD Palm Oil) เป็นวัตถุดิบในการผลิต และใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพและตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ซีโอดีละลาย กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด เมทานอล กลีเซอรอล ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยใช้ระบบหมักไรรีออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลที่เหมาะสมทั้งสำหรับชุมชน อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ โดยเป็นระบบที่สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ได้สูง อีกทั้งยังได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อยอดเพิ่มเติม นำไปสู่การประยุกต์ใช้ระบบหมักไรรีออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย และการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไบโอดีเซล

เนื่องจากภาวะวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานและเศรษฐกิจของโลก รวมทั้งภาวะวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อม การแสวงหาแหล่งเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนปิโตรเลียมได้ ซึ่งต้องเป็นพลังงานที่ยั่งยืนและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญและต้องกระทำอย่างเร่งด่วน ดังนั้น ไบโอดีเซลจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้

##### 2.1.1 ประวัติความเป็นมาและการวิจัยไบโอดีเซล

ในปี ค.ศ. 1900 ดร.รูคอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) ได้นำเครื่องยนต์ดีเซลที่ออกแบบไว้มาจัดแสดงครั้งแรกในงาน World Exhibition ที่กรุงปารีส ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันที่สกัดมาจากถั่วลิสงร้อยละ 100 โดย ดร.รูคอล์ฟ ดีเซล ได้กล่าวว่า “เครื่องยนต์ดีเซลนั้นสามารถใช้ น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงได้ และเพื่อเป็นการส่งเสริมและพัฒนาการเกษตร เราควรจะใช้ น้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง” หลังจากนั้นเป็นต้นมาได้มีการศึกษาและพัฒนาการวิจัยมากมายเพื่อที่จะผลิตไบโอดีเซลให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีกว่า

การวิจัยและพัฒนาเรื่องของไบโอดีเซลมีมานานแล้วในต่างประเทศทั้งนี้สืบเนื่องจากวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมมีการขาดแคลนในปีพ.ศ. 2513 ผลกระทบที่ตามมาคือน้ำมันมีราคาแพงและมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการ ประกอบกับผลผลิตทางการเกษตรมีปริมาณมากเกินความต้องการ จึงทำให้มีการคิดค้นและวิจัยเพื่อนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้เป็นแหล่งพลังงานจึงเริ่มมีการวิจัยเรื่องของไบโอดีเซลอย่างจริงจัง โดยในปีพ.ศ. 2525 มีรายงานการค้นพบเอสเทอร์ (esters) ที่มาจากไขสัตว์ในประเทศนิวซีแลนด์ และในปีเดียวกันนี้ที่ประเทศออสเตรเลียก็มีการค้นพบเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) ที่ผลิตจาก rape seed และในปีพ.ศ. 2532 เริ่มเกิดโครงการนำร่องในการผลิตไบโอดีเซลขึ้น และมีการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในช่วงปีพ.ศ. 2533-2543 โดยในปี 2534 กลุ่มอียูเสนอลดภาษีร้อยละ 90 สำหรับการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งรวมถึงไบโอดีเซลด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549) และเนื่องจากไบโอดีเซลมีความสำคัญต่อทั้งสภาพเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมโดยรวม อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการสร้างงานให้กับหลายๆ กลุ่มคน ทำให้ปัจจุบันในหลายๆ ประเทศ รวมทั้งประเทศไทยต่างหันมาให้ความสำคัญกับเรื่องของพลังงานมากขึ้น โดยประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปเป็นกลุ่มประเทศหลักที่ให้ความสนใจในไบโอดีเซล โดยมีถึง 11 ประเทศ ซึ่งประเทศที่มีบทบาทสำคัญได้แก่ ประเทศเยอรมัน ประเทศฝรั่งเศสและประเทศอิตาลี โดย

ประเทศเยอรมันเป็นประเทศที่ผลิตไบโอดีเซลได้มากเป็นอันดับหนึ่งของกลุ่ม ซึ่งเน้นไปที่การผลิตไบโอดีเซลสูตร B100 (กรณีที่ใช้ไบโอดีเซลร้อยละ 100) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์และเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือน

หากมองในตลาดของประเทศอเมริกาจะเห็นได้ว่า นอกจากมีความจำเป็นในการใช้งานสูงแล้ว ปัญหาในเรื่องการตัดแปลงพันธุกรรมของพืชโดยเฉพาะถั่วเหลืองและพืชที่ตัดแปลงพันธุกรรม(GMO) อื่นๆ ที่หลายประเทศไม่อนุญาตให้นำเข้า ทำให้อเมริกามีวัตถุดิบเหลือใช้อยู่เป็นจำนวนมากจึงหันมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลแทน โดยมีกำลังการผลิตรวมทั้งประเทศอยู่ในระดับประมาณแสนตันต่อปี

ส่วนในทวีปเอเชีย เช่น ประเทศญี่ปุ่น ได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับไบโอดีเซลไม่แพ้ประเทศอื่นๆ โดยในปี ค.ศ.1995 ญี่ปุ่นเริ่มทำการศึกษาความเสี่ยงของการผลิตไบโอดีเซลรวมไปถึงการใช้ประโยชน์ของไบโอดีเซลภายในประเทศ ต่อมาในปี ค.ศ.1997 ได้มีการสร้างโรงงานไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วซึ่งได้มาจากร้านอาหารกว่า 60 ร้าน มาเป็นวัตถุดิบโดยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ถึง 600,000 ลิตรต่อปี หลังจากปลายปี ค.ศ.2002 รัฐบาลญี่ปุ่นได้มีการสนับสนุนการผลิตไบโอดีเซลจากพืชและจากน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยหวังว่าจะรวบรวมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลเพื่อใช้สำหรับรถยนต์และขายให้กับผู้อื่น ซึ่งประมาณการว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจะมีปริมาณถึง 400,000 ตันต่อปี นอกจากประเทศอื่นๆ จะมีความตื่นตัวในเรื่องของไบโอดีเซลแล้ว ประเทศไทยเองก็เป็นประเทศหนึ่งที่ตระหนักถึงความสำคัญของการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญเช่นเดียวกัน (ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550)

### 2.1.2 ศักยภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย

ปัจจุบันพบว่าประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลในปริมาณมากถึง 43 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 46.6 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดที่ใช้ภายในประเทศ ซึ่งหากมีการสนับสนุนให้ทั้งประเทศหันมาใช้ไบโอดีเซลเพียงร้อยละ 10 จะสามารถลดความต้องการน้ำมันดีเซลจากต่างประเทศได้ถึง 1,400 ล้านลิตรต่อปี หากคิดเป็นมูลค่าแล้วนับว่าสูงมาก โดยเฉพาะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีพืชน้ำมันหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีไขมันจากสัตว์ต่างๆ ที่สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้ ทำให้สามารถช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศและลดปัญหาผลกระทบต่อปัญหาการราคาน้ำมันดีเซลที่สูงขึ้นได้ (ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550)

วัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย ได้แก่ น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว และน้ำมันพืชสกัดใหม่อีก 8 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดทานตะวันและน้ำมันสบู่ดำ ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซล (18 มกราคม 2548) วัตถุดิบหลักของไบโอดีเซล ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น ทั้งด้านการผลิตและ



การตลาด (คณะกรรมการการพลังงาน, 2545) โดยพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชฯ ทรงมีพระราชดำริเกี่ยวกับการพัฒนาเชื้อเพลิงจากวัสดุทางการเกษตรมาเป็นระยะเวลาร่วม 20 ปีแล้ว เพื่อเป็นการสนองแนวพระราชดำรินพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ประกอบกับในปี พ.ศ.2547 ประเทศไทยต้องเผชิญกับภาวะที่น้ำมันมีราคาสูง รัฐบาลจึงได้กำหนดเป้าหมายส่งเสริมการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซล โดยจะผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ให้ได้ 300,000 ลิตรต่อวันและจะจำหน่ายไบโอดีเซลทั่วประเทศในปี พ.ศ.2554 ซึ่งจะทำได้โดยใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซลได้ร้อยละ 10 ภายในปี พ.ศ.2555 หรือประมาณ 8.5 ล้านลิตรต่อวัน โดยส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันจำนวน 5 ล้านไร่ ภายในปี พ.ศ.2549-2552 เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งใน พ.ศ.2548 มีน้ำมันปาล์มเหลือจากการบริโภคถึง 150,000 ตัน โดยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ประมาณ 500,000 ลิตรต่อวัน

ในปี พ.ศ.2548 กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดคุณลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้ และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ทดลองนำไบโอดีเซล B5 (กรณีที่ใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 5:95) มาจำหน่ายที่สถานีบริการในกรุงเทพมหานคร 8 แห่ง และที่สถานีบริการที่จังหวัดเชียงใหม่ 7 แห่ง ซึ่งบริษัทยานยนต์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยยอมรับการใช้ B5 ตามการส่งเสริมของรัฐบาล และในปีเดียวกันนี้กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้จัดทำชุมชนต้นแบบ 2 ชุมชน ได้แก่ ชุมชนวัดพยัคฆาราม จังหวัดสุพรรณบุรีและชุมชนนาหว้า จังหวัดนครพนม และในปี พ.ศ.2549 กระทรวงพลังงานกำหนดเป้าหมายพัฒนาส่งเสริมการผลิตและเพิ่มการใช้ไบโอดีเซลระดับชุมชนขนาด 100 ลิตรต่อวัน เพิ่มอีก 60 แห่ง ภายใต้ชื่อ “โครงการไบโอดีเซล 60 ชุมชน เพื่อถวายในวโรกาสฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว”

นอกจากผลผลิตทางการเกษตรจากน้ำมันพืชแล้ว น้ำมันพืชที่ใช้แล้วก็ยังเป็นอีกแหล่งวัตถุดิบหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลอีกด้วย เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นของเหลือจากการทำอาหารและมีราคาต่ำกว่าน้ำมันใหม่ และสามารถช่วยลดการใช้ของเสียจากน้ำมันได้ (Al-Widyan และคณะ, 2002) จากข้อมูลพบว่าโรงงานจำนวน 257 โรงทั่วประเทศไทยมีน้ำมันที่ใช้แล้วเหลือจากขบวนการผลิตประมาณ 16.5 ล้านลิตรต่อปี นอกจากนี้ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วยังได้มาจากภาคครัวเรือนและสถานประกอบการต่างๆ อีกด้วย หากมองในสเกลขนาดเล็กในระดับชุมชนที่มีความรู้ในการผลิตไบโอดีเซลได้เอง แหล่งน้ำมันพืชเก่าจากชุมชนรวมไปถึงน้ำมันพืชใหม่ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตรก็ยังส่งเข้ามาผลิตในสเกลระดับเล็กๆ ในระดับชุมชนได้ ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี ช่วยลดต้นทุนในการทำเกษตร และนอกจากจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้ว ด้วยคุณสมบัติของไบโอดีเซลยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวทำละลายในรูปแบบต่างๆ ได้อีกด้วย โดยสามารถใช้ล้างทำความสะอาดรถบรรทุกได้ ไม่แตกต่างจากการใช้

น้ำมันเครื่องเช่นกัน (ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550) ในปัจจุบันได้มีหน่วยงานต่างๆ ทำการศึกษาและดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาไบโอดีเซล ซึ่งมีความร่วมมือกันในหลายองค์กร ทั้งหน่วยงานของรัฐและสถาบันการศึกษา โดยมีการดำเนินการทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับกึ่งอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมอุทกหารเรือ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

### 2.1.3 ประเภทของไบโอดีเซล (ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550)

ไบโอดีเซล คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ใช้แล้ว เช่น น้ำมันที่ได้จากการทอดไก่ ทอดปลาทอดไก่มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล โดยมีชื่อทางเคมีคือเอสเทอร์ ซึ่งในทางวิชาการไบโอดีเซล หมายถึงน้ำมันที่ผลิตได้จากการนำน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ หรือไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่ใช้ปรุงอาหารแล้วมาแปรสภาพโดยผ่านขบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ ได้เป็นน้ำมันชนิดใหม่อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ โดยการเรียกชื่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอสเทอร์ (เมื่อใช้เมทิลแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา) เป็นต้น

โดยอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมันที่นำมาใช้ได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ

#### 1) น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลืองหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่น หรือไม่ต้องเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันให้เปลืองเวลาและเปลืองทรัพยากรธรรมชาติ

#### 2) ไบโอดีเซลแบบถูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นถูกผสมระหว่างน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันอะไรก็ได้ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เช่น โคโคดีเซล (coco-diesel) ที่ อ. ทับสะแก จ.ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าดหรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) ที่เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล

#### 3) ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นประเภทของไบโอดีเซลตามความหมายสากลที่ทั่วโลกยอมรับ สำหรับไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นการนำเอาน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่มี



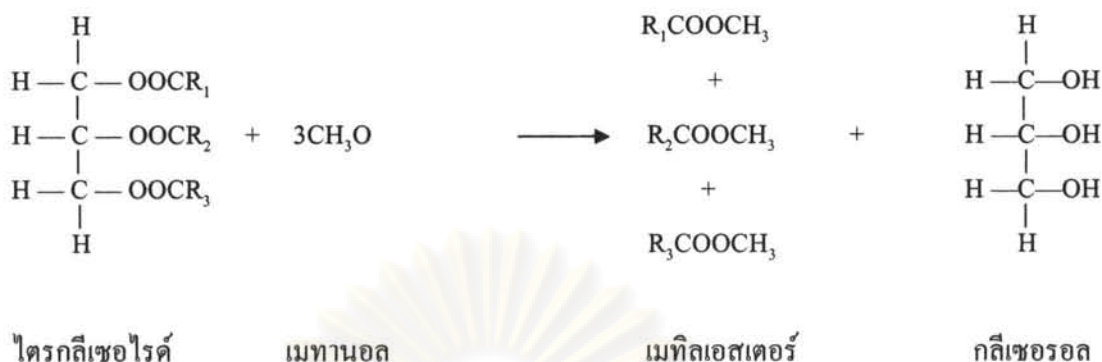
กรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์ โดยเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับเครื่องยนต์ได้ ข้อดีอันดับแรกของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ คือ มีค่าซีเทน (cetane) ซึ่งคือค่าดัชนีการจุดติดไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือสามารถจุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซลทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเกิดขึ้นน้อย ไม่เกิดควันดำและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) นอกจากนี้ยังมีความหนืดคงที่อีกด้วย แต่ยังมีข้อเสียอยู่คือมีต้นทุนสูงกว่าไบโอดีเซลแบบอื่น เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เพิ่มขึ้น และอาจต้องดัดแปลงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ที่เป็นยาง (rubber) ซึ่งอาจถูกทำลายโดยไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้สามารถใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงอย่างรถยนต์ได้ นอกจากนี้กรรมวิธีทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการแปรรูปน้ำมันพืชโดยใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นยังสามารถผลิต Palm Oil Di-Ethyl Ester (PODEE) ซึ่งสามารถนำไปผสมใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดี และยังสามารถผลิตไบสบูและกลีเซอรอล (Glycerol) ได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

#### 2.1.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์เป็นไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยกรดไขมัน (Fatty acid) และกลีเซอริน (Glycerin) เมื่อไตรกลีเซอไรด์นี้รวมตัวกับสารเร่งปฏิกิริยาชนิดที่เป็นด่าง (Base catalyst) เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide (KOH)) โดยมีปริมาณแอลกอฮอล์ที่เกินพอ (Excess alcohol) จะทำให้เกิดการรวมพันธะของกรดไขมันและแอลกอฮอล์เกิดเป็นไบโอดีเซล โดยได้กลีเซอรอลซึ่งเป็นสารเคมีที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมยา และเครื่องสำอางเป็นผลพลอยได้ (By product) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยที่ R คือ คาร์บอน 16-18 อะตอม ซึ่งมีพันธะคู่ระหว่าง C = C ตั้งแต่ 1-3 คู่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



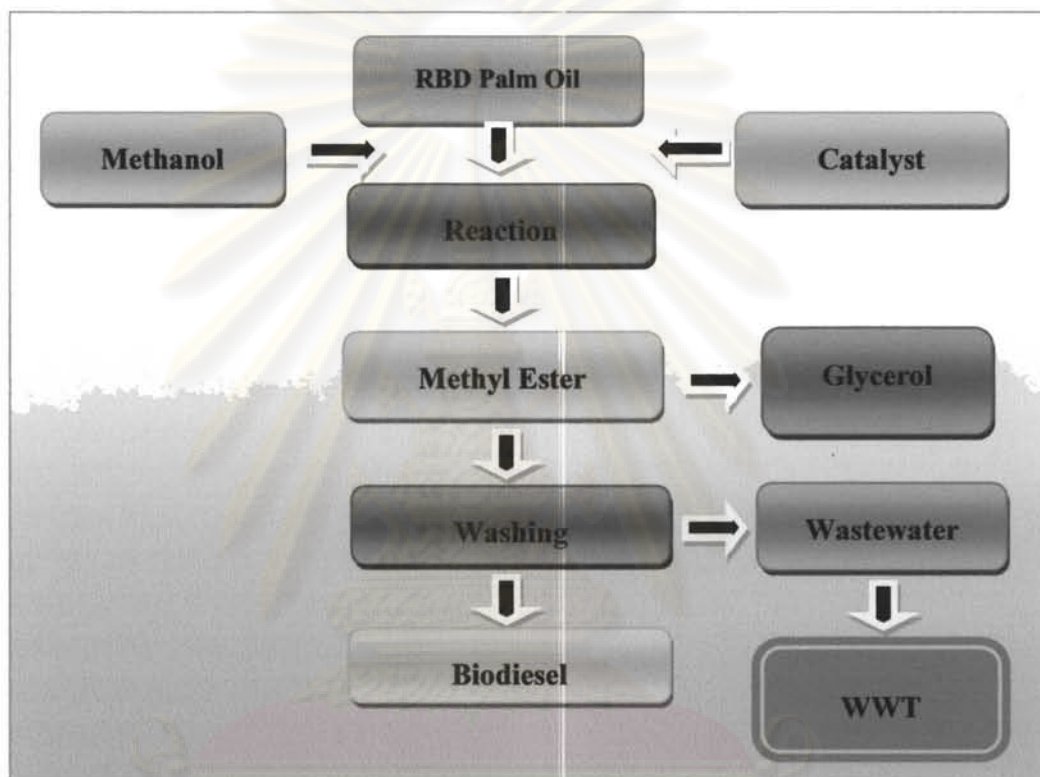


ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์  
ที่มา : คณะกรรมการการพลังงาน, 2545

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีข้อดีคือเป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำคือประมาณ 20-30 องศาเซลเซียส ใช้ความดันต่ำประมาณ 0.01-0.02 MPa ผลได้ของปฏิกิริยาสูงถึงร้อยละ 98 แต่กระบวนการนี้ไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เนื่องจากจะเกิดสบู่และส่งผลให้ผลได้ของกระบวนการลดลง ซึ่งปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลใช้งานเองในชุมชนหรือองค์กรต่างๆ ที่เรียกว่า “ไบโอดีเซลระดับชุมชน” ได้รับความนิยมแพร่หลาย เนื่องจากทำได้ง่ายและไม่ต้องมีเครื่องจักรราคาแพง ผู้ผลิตไบโอดีเซลสามารถจัดการผลิตและใช้ไบโอดีเซลได้ด้วยตนเอง ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลระดับชุมชนนี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

โดยน้ำเสียไบโอดีเซลที่เลือกใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม ของโรงงานผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกิ่งบริสุทธิ์แห่งหนึ่ง (ปทุมธานี) ซึ่งมีกำลังการผลิต 800,000 ลิตรต่อวัน จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ซึ่งคือเมทานอลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ ให้เปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล โดยใช้ด่างได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งน้ำมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลเป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีเบื้องต้นที่เรียกว่าน้ำมันปาล์มกิ่งบริสุทธิ์ (RBD) ที่ยังไม่ได้แยกส่วนปาล์มโอเลอินออกจากไขปาล์มสเตอรินในสภาพอุณหภูมิถึงแวคคูลัม โดยมีลักษณะเป็นกิ่งของเหลว เมื่อให้ความร้อนประมาณ 55 องศาเซลเซียส จะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของ RBD โดยค่าความร้อนของน้ำมัน RBD ร้อยละ 100 จะมีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10 สำหรับค่า

ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนน้ำมัน RBD การอุ่นน้ำมันที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียสและสัดส่วน RBD ร้อยละ 70 จะสามารถช่วยลดค่าความหนืดของน้ำมันให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนช้า ซึ่งสามารถที่จะใช้กับเครื่องของการไฟฟ้าได้ จึงเลือกที่สัดส่วน RBD ร้อยละ 70 ใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของเครื่องยนต์ โดยขอเสนอกรรมวิธีการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรมของโรงงานผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกิ่งบริษัทที่แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม

ที่มา : บริษัทบีเอ็นบี อินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, 2550

จากภาพที่ 2.2 สามารถอธิบายกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยแบ่งเป็น 6 ขั้นตอนพอสังเขป ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ขั้นตอนแรกในการผลิตไบโอดีเซลจะต้องเตรียมสารเคมีให้พร้อมที่จะทำการผลิต ซึ่งจะประกอบด้วยสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ เมทานอล (Methanol) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในขั้นตอนนี้จะต้อง

คำนวณหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการผลิตไบโอดีเซลก่อน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refined) ขั้นตอนการกำจัดสีออกจากน้ำมัน (Bleached) และ ขั้นตอนกำจัดกลิ่น (Deodorized) หรือที่เรียกกันว่า RBD

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา เมื่อเตรียมสารเคมีและน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบแล้ว ให้นำน้ำมันวัตถุดิบผสมกับเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารผสมดังกล่าวจะมีความร้อนและก่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยจะได้ส่วนผสมระหว่างน้ำมันและสารเคมี เมื่อส่วนผสมทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์จะเกิดสาร 2 ชนิดขึ้นในส่วนผสม คือน้ำมันไบโอดีเซล หรือเรียกว่าเอสเทอร์ และ ไชสบู่หรือกลีเซอรอล

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการทิ้งให้เกิดการแยกชั้น เมื่อส่วนผสมทำปฏิกิริยากันสมบูรณ์แล้ว ให้ตั้งพักทิ้งไว้ เพื่อรอให้ส่วนผสมที่ทำปฏิกิริยาแยกชั้นออกจากกัน โดยไบโอดีเซลจะลอยอยู่ด้านบนและกลีเซอรอลจะจมอยู่ด้านล่าง

ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการถ่ายกลีเซอรอลออก เมื่อไบโอดีเซลเกิดการแยกชั้นแล้ว ให้ระบายกลีเซอรอลซึ่งถือเป็นผลพลอยได้ (By-product) ที่จมอยู่ด้านล่างออกไปเก็บไว้ ให้เหลือเฉพาะไบโอดีเซลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 6 ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล หลังจากที่แยกกลีเซอรอลออกไปแล้วจะเหลือเฉพาะไบโอดีเซล แต่ยังคงไม่บริสุทธิ์เพียงพอที่จะใช้งานได้ เพื่อให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ยิ่งขึ้นจึงต้องมีการล้างน้ำไบโอดีเซล เพื่อกำจัดสารเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เมทานอล และสิ่งตกค้างต่างๆ ออกจากไบโอดีเซล โดยการล้างน้ำแบ่งออกเป็น 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำสะอาดและปล่อยทิ้งไว้รอให้น้ำมันกับน้ำแยกชั้นออกจากกัน โดยไบโอดีเซลจะลอยอยู่ด้านบนและน้ำจะอยู่ด้านล่าง จากนั้นให้ระบายน้ำทิ้งออกสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย และนำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่ผลิตได้ไปใช้งานต่อไป

#### 2.1.5 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะเกิดน้ำเสียจากการล้างไบโอดีเซลเพื่อให้น้ำมันดีเซลที่ทำการผลิตมีความบริสุทธิ์มากขึ้น น้ำเสียดังกล่าวนี้จะชะล้างสิ่งสกปรกจากกระบวนการผลิตออกมาด้วย เช่น สบู่ เมทานอล สารเคมีและกลีเซอรอล จากการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรมของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด ซึ่งมีการล้างไบโอดีเซลทั้งหมด 5 ครั้ง ผลการวิเคราะห์ลักษณะตัวอย่างน้ำเสียไบโอดีเซล พบว่าน้ำเสียนี้ออกเป็นค่า อยู่ในช่วง 7.68-10.33 โดยมีซีโอดีของน้ำล้างที่ 1 และ 2 สูงมากอยู่ในช่วง 107,950-712,800 มิลลิกรัม/ลิตร และมีการปนเปื้อนของ



น้ำมันและไขมันสูงอยู่ในช่วง 10,880-17,880 มิลลิกรัม/ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นนอกจากจะมีการพัฒนากระบวนการผลิต ไบโอดีเซลให้ได้ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพดีและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว การบำบัดน้ำเสียก็เป็นสิ่งสำคัญที่เราต้องพัฒนาไปควบคู่กันเพื่อลดมลภาวะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต

**ตารางที่ 2.1** ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้น				
	น้ำล้างครั้งที่ 1	น้ำล้างครั้งที่ 2	น้ำล้างครั้งที่ 3	น้ำล้างครั้งที่ 4	น้ำล้างครั้งที่ 5
1.พีเอช	9.62	10.33	9.12	9.46	7.68
2.ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	20,450	675	60	40	30
3.ซีไอดี (มก./ล.)	712,800	107,950	19,483	7,774	2,495
4.น้ำมันและไขมัน (มก./ล.)	17,880	10,880	9,100	6,280	1,020
5.กลีเซอรอล (มก./ล.)	42,237	3,126	952	933	764
6.เมทานอล (มก./ล.)	257,917	56,016	14,406	2,574	421

ที่มา : อัญชติ ศรีรังสรรค์, 2551

## 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน

การเลือกระบบบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของน้ำเสีย ระดับการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการ สภาพทั่วไปของท้องถิ่น ค่าลงทุนก่อสร้าง ค่าดำเนินการดูแลและบำรุงรักษา รวมทั้งขนาดของที่ดินที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียที่เลือกมีความเหมาะสมกับแต่ละท้องถิ่นซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) วิธีการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย โดยปกติของแข็งหรือตะกอนแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำเสียมักบำบัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายในน้ำเสียต้องบำบัดออกโดยใช้วิธีเคมีหรือวิธีชีวภาพ ซึ่งสามารถทำให้ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายกลายเป็นตะกอนแขวนลอยที่รวมกันเป็นก้อนใหญ่ จนสามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้โดยวิธีทางกายภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียอาจจำแนกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพส่วนใหญ่

มีหน้าที่กำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ซึ่งตกตะกอนด้วยตัวเองได้ง่าย ส่วนกระบวนการทางเคมีส่วนใหญ่มีหน้าที่กำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กหรือของแข็งที่ตกตะกอนด้วยตนเองได้ ช้ำ น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีอาจมีความสกปรกเหลืออยู่ในรูปของสารละลาย จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการทางชีวภาพเพื่อกำจัดความสกปรกส่วนที่เหลือต่อไป (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

น้ำเสียหลายประเภทมีน้ำมันและไขมันปะปนอยู่ด้วย และเนื่องจากน้ำมันและไขมันเบากว่าน้ำจึงลอยตัวอยู่เหนือผิวน้ำ ทำให้ต้องหาวิธีในการบำบัดและกำจัดไขมันออกไป โดยเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

### 2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Treatment Process)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพเป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น การใช้ถังดักไขมันและไขมัน โดยเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ น้ำเสียที่มีไขมันและน้ำมันละลายอยู่ไม่สามารถใช้ถังดักไขมันได้ เนื่องจากน้ำมันจับเป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสียจึงจำเป็นต้องให้น้ำมันและน้ำเสียแยกตัวออกจากกันโดยใช้สารเคมีก่อน ซึ่งแสดงรายละเอียดของถังดักไขมันมีดังต่อไปนี้

#### ถังดักไขมันหรือบ่อดักไขมัน (Grease Trap) (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ถังดักไขมันเป็นอุปกรณ์สำหรับแยกไขมันไม่ให้ไหลปนไปกับน้ำทิ้งซึ่งเป็นการบำบัดเพื่อรักษาสภาพน้ำในขั้นต้น โดยส่วนใหญ่ถังดักไขมันมักใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียจากครัวของบ้านพักอาศัย ห้องอาหารหรือภัตตาคาร เนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวจะมีน้ำมันและไขมันปนอยู่มาก หากไม่กำจัดออกจะทำให้ท่อระบายน้ำอุดตัน โดยลักษณะน้ำเสียจากครัวของบ้านพักอาศัยกรณีที่ไม่ผ่านตะแกรงจะมีน้ำมันและไขมันประมาณ 2,700 มิลลิกรัม/ลิตร หากผ่านตะแกรงแล้วจะมีน้ำมันและไขมันประมาณ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งถังดักไขมันจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้ไขมันมีโอกาสลอยตัวขึ้นมาสะสมกันอยู่บนผิวน้ำ โดยหลักการทำงานของถังดักไขมัน คือ ใช้การแทนที่ของน้ำ ซึ่งน้ำที่อยู่ในถังดักไขมันจะถูกแทนที่จากน้ำที่ไหลเข้าไปโดยมีการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่งเพื่อเปิดโอกาสให้น้ำมันและไขมันที่ปะปนอยู่ในน้ำลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ ซึ่งเมื่อสะสมจนมีปริมาณมากก็จะสามารถดักออกไปกำจัดหรือทิ้งได้

ถังดักไขมันมีทั้งแบบสำเร็จรูปที่สามารถซื้อและติดตั้งได้ง่ายหรือสามารถสร้างเองได้ โดยใช้วงขอบซีเมนต์หรือถังซีเมนต์หินขัดซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าแบบสำเร็จรูป และสามารถปรับให้เหมาะสมกับพื้นที่และปริมาณน้ำที่ใช่ ซึ่งสามารถแบ่งบ่อดักไขมันออกเป็น 3 รูปแบบ คือ บ่อดักไขมันแบบสร้างในที่ บ่อดักไขมันแบบวงขอบซีเมนต์ และบ่อดักไขมันแบบสำเร็จรูป (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) โดยถังดักไขมันสามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้มากกว่า



ร้อยละ 60 ทำให้ไม่มีปัญหาการอุดตันของท่อน้ำ ไม่มีกลิ่นเหม็น สภาพแวดล้อมสวยงาม และทำให้น้ำที่ีความสกปรกตกลง นอกจากนั้นไขมันที่ได้จากถังดักไขมันสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้โดยไม่ต้องทิ้งให้สูญเปล่าอีกทั้งยังช่วยให้มีรายได้ในครัวเรือนอีกด้วย เช่น การนำไขมันมาทำสบู่หรือเทียน

อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่มีน้ำมันหรือไขมันละลายอยู่ หากไม่มีระบบดักจับไขมันที่ดี ทำให้ไม่สามารถใช้บ่อดักไขมันเพื่อแยกน้ำมันออกได้ร้อยละ 100 เนื่องจากน้ำมันจับเป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสีย ดังนั้นอาจต้องใช้กระบวนการบำบัดทางเคมีช่วยในการแยกน้ำมันและน้ำเสียออกจากกัน

### 2.2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Treatment Process)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ซึ่งการบำบัดโดยวิธีนี้เป็น การบำบัดโดยการตกตะกอนและรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันเป็นฟล็อก โดยใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และการสร้างสัมพันธระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี คือ Polyaluminium chloride (PAC), Cationic polymer, Anionic polymer และ Calcium Hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (ปูนขาว) ซึ่งข้อจำกัดของการบำบัดโดยวิธีนี้ คือ สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดบางตัวมีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้ต้นทุนในการบำบัดสูงตามไปด้วย

ระบบบำบัดน้ำเสียในสมัยแรกๆ ประมาณ 200 ปีที่ผ่านมาได้รู้จักการใช้สารเคมีเพื่อช่วยตกตะกอนของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) และอนุภาคขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย แต่ก็มีปัญหาอยู่คือไม่สามารถกำจัดมลสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (soluble organics) ออกได้ทำให้ในระยะต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแทน จนกระทั่งเมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้เริ่มให้ความสนใจในการใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีมากขึ้น เพื่อลดมลสารและใช้ในการปรับสภาพของตะกอน (sludge conditioning) เพื่อช่วยในการตกตะกอนและกำจัดสาร โลหะต่างๆ ที่มีมากขึ้นในน้ำเสีย (ปัทมภัทร เจริญสาคร ,2549)

วัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี แบ่งออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้ (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

- 1) สร้างตะกอนให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่าย (coagulation and flocculation)
- 2) ทำให้มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำตกตะกอน (Precipitation) หรือทำให้ไม่ละลายน้ำ (insolubilization)



- 3) ปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เติมสารอาหาร (nutrients)
- 4) ฆ่าเชื้อโรค (disinfection)
- 5) ปรับสภาพของตะกอน (sludge conditioning) เพื่อใช้ในการแยกตะกอน และ/หรือแยกเอาน้ำออกจากตะกอน

### 2.2.3 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment Process)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ หรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ในโตรเจน และ ฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms) ก็ได้

## 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย คูกจับ และเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง มลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะได้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้ออกซิเจน ส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

### 2.3.1 ชีวเคมีและจุดชีววิทยาของกระบวนการไร้ออกซิเจน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีลักษณะแตกต่างจากกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน คือ กระบวนการไร้ออกซิเจนจะไม่มีออกซิเจนอิสระซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนมาเกี่ยวข้อง โดยปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนโดยแบคทีเรีย 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนและแบคทีเรียที่สร้างมีเทน โดยมีรายละเอียดดังนี้

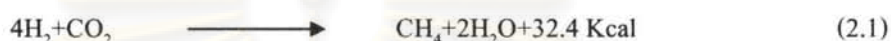
#### 1) แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

แบคทีเรียชนิดนี้ประกอบด้วย 2 พวก คือ แบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate Anaerobes) และแบคทีเรียที่อยู่ในสภาพมีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative Anaerobes)

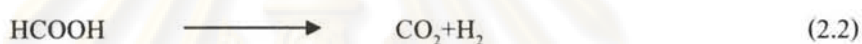
โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะผลิตไฮโดรเจนจากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดา

## 2) แบคทีเรียที่สร้างมีเทน

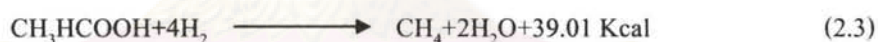
แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะเจริญเติบโตได้ช้าและยังเป็นเซลล์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก โดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic Bacteria) กล่าวคือได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ดังสมการต่อไปนี้



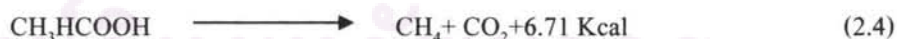
แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารได้ เนื่องจากกรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการต่อไปนี้



แบคทีเรียชนิดที่สองจะสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก โดยใช้อะซิเตดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายและใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน (Acetoclastic Methanogen) โดยการสร้างมีเทนเป็นดังสมการต่อไปนี้



นอกจากการสร้างมีเทนจากการออกซิเดชันของไฮโดรเจนแล้ว มีเทนส่วนใหญ่ยังสร้างจากการแตกตัวของอะซิเตด ดังสมการต่อไปนี้



โดยกระบวนการไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นทั้งหมด 4 ขั้นตอนตามลำดับ คือกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กระบวนการการสร้างกรด (Acidogenesis) กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis) และกระบวนการการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ซึ่งขั้นตอนทั้ง 4 ต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างอะซิเตด

แบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยแสดงรายละเอียดแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์จากกระบวนการไร้ออกซิเจนดังหัวข้อถัดไป

### 2.3.2 ประเภทของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

โดยสามารถแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria) แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) และแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

#### 1) แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไร้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่าชนิด Facultative ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเด็ดขาดมีจำนวนมากกว่า แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหยก็คือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบจึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือ โปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวไทริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionicbacterium ที่ผลิตกรดโพรไพออนิก (Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

#### 2) แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลที่เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทน ไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ได้ ในเซลล์ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหย โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

##### 2.1) แบคทีเรียผลิตอะซิเตดอย่างเดี่ยว (Homoacetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Acetyl-CoA ตัวอย่างแบคทีเรียชนิดนี้ได้แก่ Acetobacterium woodii และ Clostridium aceticum สามารถเจริญเติบโตทั้งแบบออโตโทรฟิก (autotrophic) คือ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก ดังสมการ





อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) ก็ได้โดยการหมักน้ำตาลดั่งสมการ



แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัส Clostridium พบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

### 2.2) แบคทีเรียที่สร้างอะซิเตตที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H<sub>2</sub>-Producing Acetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร และสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทในตรงนี้เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้

การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ซินโทรฟี (Syntrophy) คือ ความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตแบบให้ประโยชน์ซึ่งกันและกันและต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

### 3) แบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนที่เคี้ยวเคี้ยวไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรโทรฟดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณ 10 ชนิดเท่านั้น ดังตารางที่

2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

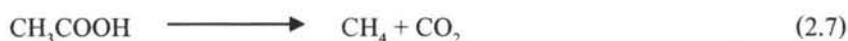
สับสเตรตประเภทคาร์บอนไดออกไซด์	
<b>คาร์บอนไดออกไซด์</b>	
$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	; $\Delta G^{0'} = -131 \text{ kJ/reaction}$
<b>ฟอร์มेट (<math>\text{HCOO}^-</math>)</b>	
$4 \text{HCOO}^- + 4 \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	; $\Delta G^{0'} = -145 \text{ kJ/reaction}$
<b>คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)</b>	
$4 \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$	; $\Delta G^{0'} = -210 \text{ kJ/reaction}$
สับสเตรตประเภทเมทิล	
<b>Methanol (<math>\text{CH}_3\text{OH}</math>)</b>	
$4 \text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	; $\Delta G^{0'} = -319 \text{ kJ/reaction}$
<b>Methylamine (<math>\text{CH}_3\text{NH}^+</math>)</b>	
$4\text{CH}_3\text{NH}_3^+ + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4^+$	; $\Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
<b>Dimethylamine (<math>(\text{CH}_3)_2 \text{NH}_2^+</math>)</b>	
$(\text{CH}_3)_2 \text{NH}_2^+ + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_4^+$	; $\Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
<b>Trimethylamine (<math>(\text{CH}_3)_3 \text{NH}^+</math>)</b>	
$4(\text{CH}_3)_3 \text{NH}^+ + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4^+$	; $\Delta G^{0'} = -666 \text{ kJ/reaction}$
อะซิเตท	
<b>Acetate (<math>\text{CH}_3\text{COO}^-</math>)</b>	
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	; $\Delta G^{0'} = -31 \text{ kJ/reaction}$

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2546

สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่น บิวทิริก หรือ โพรไพรอนิกซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลเฟด แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของสารอาหารที่ใช้ได้แก่

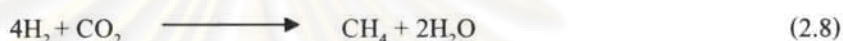
### 3.1) เมทานोजินที่บริโภคนเฉพาะอะซิเตด (Obligate Acetoclastic Methanogen)

เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการดังนี้



### 3.2) เมทานोजินที่บริโภคนเฉพาะไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic Methanogen หรือ Hydrogen Utilizer)

เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ตามสมการดังนี้



นอกจากก๊าซไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นแหล่งอาหารเพียงอย่างเดียวได้เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้

### 3.3) เมทานोजินที่บริโภคนได้ทั้งไฮโดรเจนและอะซิเตด (Hydrogenotrophic/Acetoclastic Methanogen)

เป็นแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน แต่ใช้ไฮโดรเจนได้ดีกว่า

#### 2.3.3 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจน (มันสิน ดัชนีกุลเวศม์, 2542)

กระบวนการไร้ออกซิเจนเกิดขึ้น 4 ขั้นตอนตามลำดับ คือกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กระบวนการการสร้างกรด (Acidogenesis) กระบวนการการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis) และกระบวนการการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยขั้นตอนทั้ง 4 ต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างอะซิเตด แบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 1) กระบวนการไฮโดรไลซิส

ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาวตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่อีกด้วย

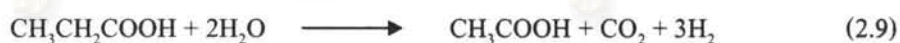


## 2) กระบวนการการสร้างกรด

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น อะซิติก บิวไทริก โพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรตและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติกและไฮโดรคาร์บอนภายใต้สภาวะที่ความดันของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวไทริกและโพรไพโอนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นอะซิติก ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิธี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูงผลผลิตที่ได้ คือ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

## 3) กระบวนการการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ

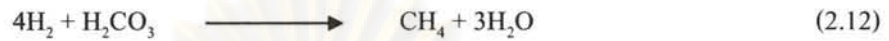
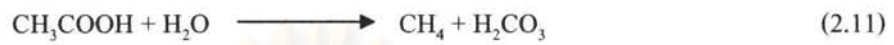
แบคทีเรียอะซิโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตด) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนในการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรตเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรตในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ และต่ำกว่า  $9 \times 10^{-3}$  บรรยากาศสำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิก ตามลำดับ



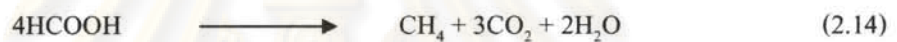
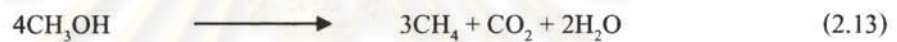
ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง

#### 4) กระบวนการการสร้างมีเทน

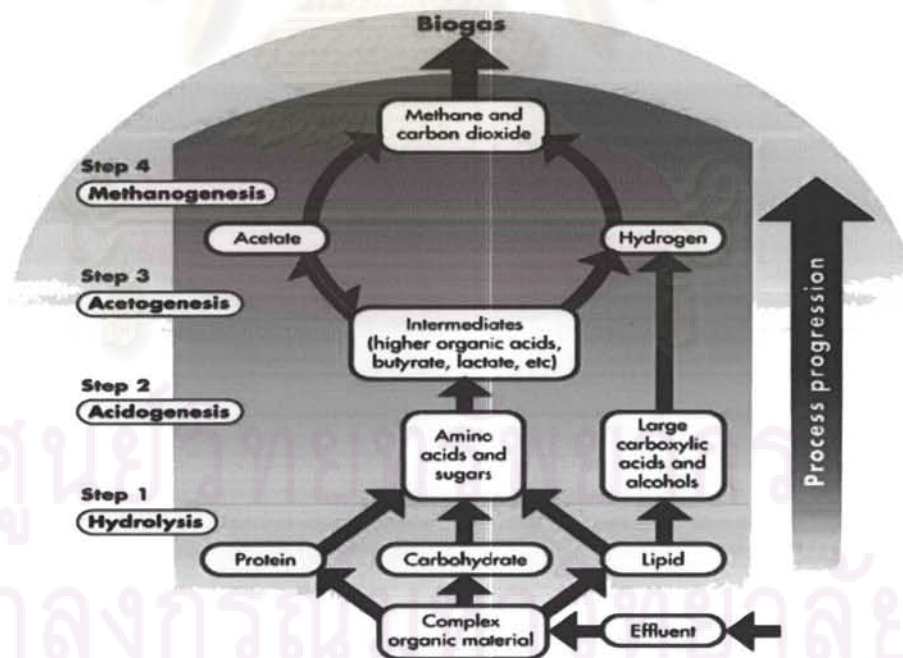
กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเคี้ยว



กรดอินทรีย์ระยะเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระยะเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก ( $\text{HCOOH}$ )



โดยแผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กลไกการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2546

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไร้ออกซิเจน

เนื่องจากกระบวนการไร้ออกซิเจนประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ทำงานอย่างต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องจะที่จะต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากจะต้องรักษาระบบให้อยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

### 1) อุณหภูมิ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้ออกซิเจน อุณหภูมิที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส และช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45-55 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อการผลิตก๊าซของแบคทีเรีย การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก

### 2) พีเอช (pH)

ค่าพีเอชเป็นตัวบ่งชี้สภาพภายในของกระบวนการไร้ออกซิเจนได้ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เมื่อค่าของกรดระเหยง่าย (Volatile Acids) มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นซ้ำ ดังนั้นค่าพีเอชจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ซ้ำสำหรับการแก้ไขสภาวะในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของกรดระเหยง่าย อย่างไรก็ตามค่าพีเอชยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.7-7.4 ซึ่งเหมาะแก่การทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน

### 3) ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (HRT) และเวลาพักพักของแข็ง (SRT)

ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (Hydraulic Retention Time) คือ ระยะเวลาที่น้ำของระบบเป็นระยะเวลาที่แบคทีเรียสัมผัสกับน้ำ การลดระยะเวลาพักน้ำจะทำให้ถึงปฏิกรณ์ลดลง แต่หากระยะเวลาพักน้ำต่ำเกินไป ตะกอนแบคทีเรียจะหลุดออกจากระบบได้มาก ซึ่งมีผลให้ค่าอายุสัปดาห์ลดลง และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์ลดลง อายุสัปดาห์ที่เหมาะสมในการทำงานของระบบไร้ออกซิเจนควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 วัน ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนมีอัตราการเจริญเติบโตช้า อายุสัปดาห์ที่มีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์สูง

### 4) สภาพความเป็นด่าง (alkalinity)

ในระบบไร้อากาศสภาพความเป็นด่างทั้งหมดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย สภาพความเป็นด่างที่มีความสำคัญคือ สภาพด่างไบคาร์บอเนต เพราะจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เมื่อมีกรดระเหยง่ายเกิดขึ้นในระบบ ปัจจัยที่สำคัญกว่าสภาพความเป็นด่าง คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อระดับสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (VFA:HCO<sub>3</sub>) ที่อัตราส่วน VFA:HCO<sub>3</sub> น้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในขั้นที่พีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ากรดไขมันระเหยง่ายมีการเพิ่มเพียงเล็กน้อย



## 5) ความเป็นพิษ (toxic substance)

### 5.1) กรดระเหยง่าย

การสะสมของกรดระเหยง่ายจะทำให้พีเอชลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดระเหยง่ายกับการเปลี่ยนกรดระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนให้สมดุลกัน โดยทั่วไประบบไร้ออกซิเจนควรมีปริมาณการระเหยง่ายประมาณ 50-500 มิลลิกรัม/ลิตร (วัดในรูปกรดอะซิติก)

### 5.2) แอมโมเนีย

แอมโมเนียเกิดจากการสลายตัวของโปรตีนและเกิดจากไนโตรเจนในสารอินทรีย์จะถูกปล่อยในรูปแอมโมเนีย โดยแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_4^+$  มากกว่า แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_3$  มากกว่าซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่า  $\text{NH}_4^+$  แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3$  จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในรูปของ  $\text{NH}_4^+$  จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000-9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 5.3) แคลไออนของโลหะเบา

ในการควบคุมรักษาค่าพีเอชของระบบต้องมีการเติมเบสเพื่อทำปฏิกิริยากับเบสที่เกิดขึ้น การเติมเบสจะส่งผลให้ปริมาณแคลไออนของโลหะเบาที่เกี่ยวข้องกับเบส ได้แก่ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ แคลเซียม และแมกนีเซียมสูงขึ้น และสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษได้

### 5.4) ซัลไฟด์

ในระบบไร้ออกซิเจนเกิดจากการรีดักชันของซัลเฟต ที่มีอยู่ในน้ำเสียและการสลายตัวของโปรตีน บทบาทของซัลไฟด์ในระบบมีทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ ซัลไฟด์ในปริมาณเล็กน้อยเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากสามารถดกผลึกเหล็ก นิกเกิล และโลหะที่จำเป็นต่างๆ และเมื่อซัลไฟด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน

### 5.5) โลหะหนัก

แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการธาตุจำเป็น 4 ชนิด คือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ แต่ในปริมาณที่ต่ำมาก การขาดแคลนธาตุที่ต้องการในปริมาณเล็กน้อยเหล่านี้ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันปริมาณโลหะหนักที่สูงเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย

## 6) ศักยภาพในการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ความแตกต่างด้านความสามารถในการรับหรือให้อิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โปเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆ ว่า โออาร์พี (ORP) ค่าโออาร์พีในทางปฏิบัติจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดโออาร์พีได้ค่าเป็นบวกมากแสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี เช่น มีออกซิเจนละลาย แต่ถ้าค่าโออาร์พีได้ค่าเป็นลบแสดงว่ามีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ในระบบไร้ออกซิเจนคาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยดึงย่อยออกซิเจนที่ทำงานได้ดีต้องมีค่าโออาร์พีในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ ถ้าโออาร์พีมีค่าเป็นลบน้อยๆ หรือมีค่าเป็นบวกย่อมแสดงว่าปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดขึ้น

### 2.5 ก๊าซชีวภาพ (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลาย และมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซมีเทน (Methane;  $\text{CH}_4$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide;  $\text{CO}_2$ ) ทั้งนี้ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถจุดติดไฟได้ และให้ค่าพลังงานความร้อนที่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์

ก๊าซชีวภาพสามารถผลิตได้จากการหมักของเสีย น้ำเสีย รวมไปถึงวัตถุดิบทางการเกษตรที่เป็นสารอินทรีย์ โดยต้องเป็นการหมักภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้อากาศหรือไม่มีออกซิเจน ดังนั้นกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจะอยู่ภายในภาชนะปิดหรือถังปิด นอกจากนี้อาจเกิดในบ่อน้ำที่มีความลึกมาก รวมไปถึงในชั้นตะกอนใต้บ่อ เป็นต้น วัตถุดิบที่สามารถใช้ในการหมักแบบไม่ใช้อากาศจึงมีมากมาย อาทิ มูลสัตว์ วัชพืช ขยะอินทรีย์ มันสำปะหลัง อ้อย น้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่เป็นสารอินทรีย์และมีค่าซีโอดีสูง โดยควรมีค่าซีโอดีสูงกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ประเทศไทยได้มีการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนมานานกว่า 10 ปี แต่เนื่องจากในอดีตราคาน้ำมันยังไม่สูงมากเมื่อเทียบกับในปัจจุบัน ทำให้ภาครัฐและเอกชนจึงไม่ค่อยให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพ แต่ในสภาวะปัจจุบันที่ราคาน้ำมันมีความผันผวนและมีราคาสูง ทำให้ความต้องการพลังงานทดแทนราคาถูกรวมมากขึ้น



## 2.6 รูปแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนถูกนำมาใช้ในการกำจัดตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน ทั้งนี้เพื่อลดปริมาตรและทำให้ตะกอนคงสภาพดีขึ้น ในประเทศเมืองหนาวจะนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปเผาในช่วง 20 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ได้จะนำไปใช้อุ่นน้ำเสียให้คงที่ประมาณ 37 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายมากขึ้นอย่างมาก ด้วยเหตุผลหลักสองประการ คือช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และสามารถช่วยลดการใช้สารพลังงานของโรงงาน ระบบผลิต ก๊าซชีวภาพหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีรูปแบบหลัก 4 แบบ คือ ระบบหมักแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter; AF) ระบบหมักแบบคอนแทค (Anaerobic Contact; AC) ระบบหมักแบบยูเอสบี (Anaerobic Upflow Sludge Blanket; UASB) และระบบหมักแบบฟลูอิดไรซ์ (Anaerobic Fluidized Bed; AFB) โดยหลักการระบบหมักประสิทธิภาพสูงเหล่านี้ เป็นการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียให้สูงในถังหมัก

ระบบถังหมักแบบตัวกลางกรอง (AF) ภายในจะบรรจุด้วยวัสดุกรอง (Packing media) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีช่องว่างสูง โดยแบคทีเรียจะเกาะเป็นเมือกบนผิววัสดุกรอง นอกจากนี้พบว่าแบคทีเรียเป็นจำนวนมากอยู่ระหว่างช่องว่าง ข้อดีของระบบหมักนี้ คือ สามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียและง่ายต่อการควบคุมระบบ แต่อย่างไรก็ตามระบบหมักนี้ก็มีข้อเสีย ได้แก่ ค่าก่อสร้างระบบสูงกว่าระบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากราคาของวัสดุกรองที่สูง และมีปัญหาอุดตันในระยะยาว ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้กับปริมาณน้ำเสียไม่สูงมากนัก และในการออกแบบระบบหมัก AF นี้จะต้องเลือกใช้วัสดุกรองที่มีช่องว่างและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และบรรจุเพียงร้อยละ 10-20 ของปริมาตรถัง ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตัน

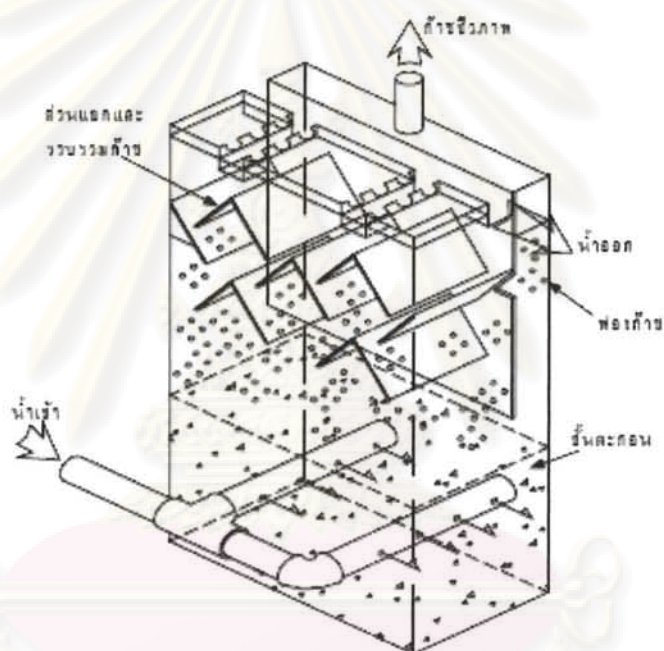
ระบบถังหมักแบบคอนแทค (AC) ซึ่งอาศัยหลักการนำตะกอนแบคทีเรียที่จมตัวในถังตกตะกอนย้อนกลับมาเติมในถังหมัก ซึ่งทำให้ถังหมักมีตะกอนแบคทีเรียสูง จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง ระบบหมักแบบนี้มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพสูง และค่าก่อสร้างระบบหมักไม่สูงมากนัก แต่ก็มีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ มีความยุ่งยากในการออกแบบและควบคุมดูแลระบบ ทั้งนี้เนื่องจากต้องระวังในการควบคุมปริมาณแบคทีเรียในระบบให้เหมาะสม ต้องมีการกวนผสมในถังหมักตลอดเวลา และตะกอนแบคทีเรียมีคุณสมบัติจมตัวยาก ดังนั้นอาจจำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นที่ช่วยทำให้ตะกอนแบคทีเรียนี้จมตัวดีขึ้น ระบบถังหมัก AC นี้ มักใช้กับน้ำเสียปริมาณสูง ซึ่งทำให้ค่าก่อสร้างระบบ ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมัก AF

ระบบหมักแบบยูเอสบี (UASB) เป็นระบบหมักที่ถูกพัฒนาในช่วงหลัง โดยอาศัยหลักการสร้างสภาวะในถังหมักให้เหมาะสม ทำให้แบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular bacteria) สามารถเจริญเติบโตและมีปริมาณสูงในถังหมัก เม็ดแบคทีเรียนี้มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณเซลล์สูง



จึงทำให้ระบบหมักนี้มีประสิทธิภาพสูง ระบบหมัก UASB นี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในช่วงหลังมากกว่าระบบหมักแบบอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีค่าก่อสร้างต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องการเครื่องกวนผสมและถังตกตะกอน และสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูง แต่อย่างไรก็ตามระบบหมัก UASB นี้มีข้อเสีย คือมีความยุ่งยากในการเริ่มต้นเดินระบบ

ระบบหมักแบบแบบฟลูอิดซ์ (AFB) มีหลักการที่ทำให้เม็ดวัสดุขนาดเล็กลอยตัวเป็นอิสระในถังหมัก (Fluidization) โดยแบคทีเรียจะเกาะเป็นเมือกบนผิวเม็ดวัสดุ ระบบหมักแบบนี้ อาจกล่าวได้ว่ามีประสิทธิภาพสูงมาก แต่มีข้อเสียที่มีความยุ่งยากในการออกแบบและควบคุมดูแล และมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งการก่อสร้างระบบหมักและการควบคุมดูแล ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีการหมุนเวียนอัตราน้ำไหลขึ้นที่สูงและคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงทำให้ระบบหมักแบบนี้ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB

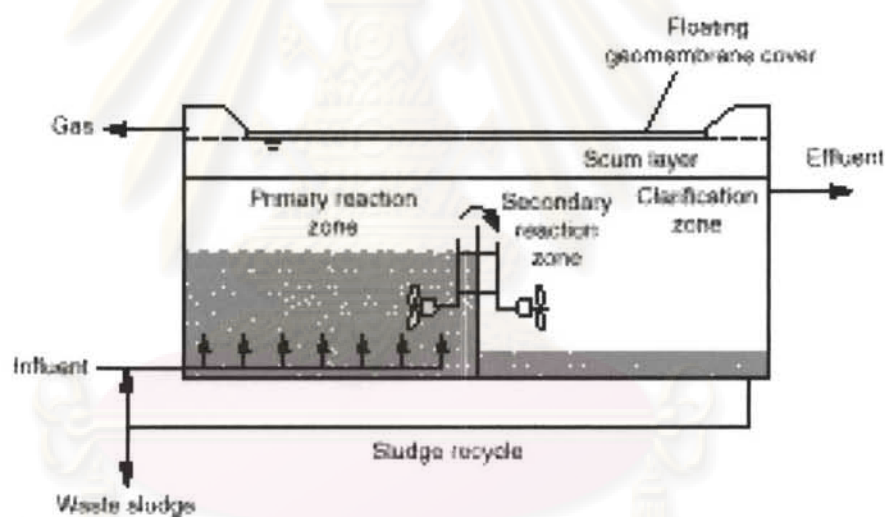
ที่มา: Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 2005 อ้างถึงในกระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

นอกจากหลักการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมักดังได้กล่าวมาแล้ว ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ได้แก่ ระบบสองขั้นตอน (Two-Stage Process) การควบคุมระบบหมักอุณหภูมิสูง (Thermophilic Operation) ระบบผสม (Hybrid Process) และการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียโดยการกรอง (Membrane Filtration)

การควบคุมถังหมักที่อุณหภูมิสูง เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพถังหมักได้ โดยทำการควบคุมที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่แบคทีเรียอุณหภูมิสูง (Thermophiles) ทำงานได้ดีที่สุด การประยุกต์ใช้หลักการนี้จะเหมาะสมเมื่อน้ำเสียมีอุณหภูมิสูงอยู่แล้ว เพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำเสีย

ส่วนการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียโดยการกรองนี้ กล่าวได้ว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรีย และยังทำให้น้ำเสียที่ผ่านถังหมักแล้วมีคุณภาพดีที่สุด แต่การกรองนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานสูง จึงไม่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

ระบบ ADI-BVF เป็นระบบถังย่อยแบบอัตราค่า ซึ่งมีกรวนแบบไม่ต่อเนื่องและมีการหมุนเวียนสลัดจ์ ภายในถังย่อยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณปลายทางน้ำเข้าและส่วนที่เกิดการตกตะกอนทำให้น้ำใสที่บริเวณปลายทางน้ำออก รูปแบบของถังปฏิกิริยาสามารถสร้างให้เป็นถังอยู่เหนือพื้นดิน หรือเป็นบ่อดินที่มีการปิดฝาด้วยเมมเบรนสำหรับนำก๊าซที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ใหม่ และเพื่อควบคุมอุณหภูมิและกลิ่น (Eckenfelder, 2000)



ภาพที่ 2.5 ระบบ ADI-BVF

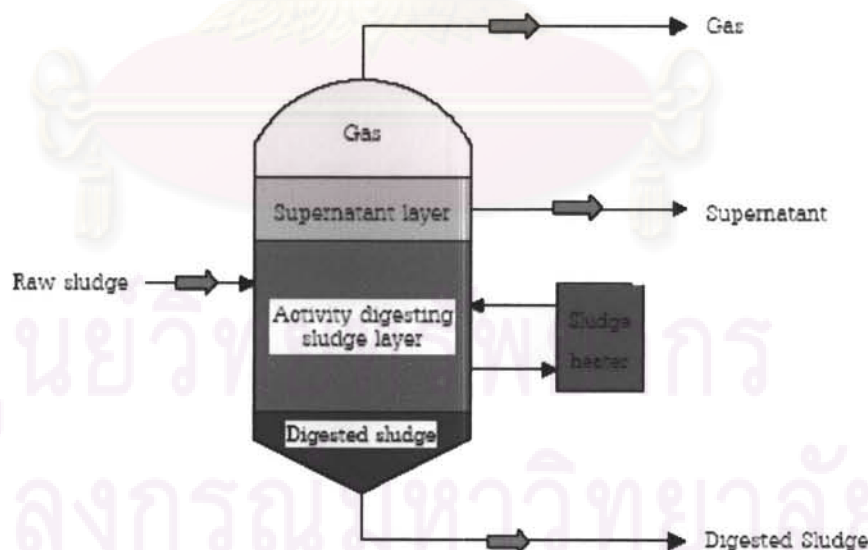
ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

## 2.7 ระบบบำบัดแบบถังหมักไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester)

ถังหมักไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester) ทำหน้าที่ในการหมักย่อยของเสียทั้งในรูปของตะกอนและน้ำเสีย โดยมีผลพลอยได้เกิดขึ้นคือก๊าซชีวภาพ ในถังหมักไร้ออกซิเจนมีก๊าซอินทรีย์เกิดขึ้นจำนวนมากขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพจากสารโมเลกุลใหญ่ โดยส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณร้อยละ 60-65 และ  $\text{CO}_2$  ประมาณร้อยละ 35-38 ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 2 จะเป็นก๊าซอื่นๆ ซึ่งได้แก่  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{H}_2\text{S}$  สัดส่วนของก๊าซขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ในขณะที่ระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ องค์ประกอบของน้ำเสีย พีเอช สภาพค่าคง ระยะเวลาพักกักขัง (HRT) ระยะเวลาพักของแข็ง (SRT) สารพิษ สารอาหาร และธาตุอาหารเสริม (Metcalf และ Eddy, 2003; Gerardi, 2003)

รูปแบบถังปฏิกริยาสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพอาจออกแบบเป็นขั้นตอนเดียว (Single-stage) หรือสองขั้นตอน (Two-stage) ดังภาพที่ 2.5-2.6 ซึ่งแต่ละรูปแบบสามารถแบ่งตามภาระบรรทุกและการเดินระบบได้ 2 ประเภทได้แก่

1) ถังย่อยแบบอัตราต่ำ (Low-Rate Digesters) เป็นถังปฏิกริยาแบบพื้นฐาน มีระยะเวลาพักกักขัง (Hydraulic Retention Time; HRT) 30-60 วัน ภาระบรรทุก (Organic Loading Rate; OLR) 0.64-1.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การเดินระบบอาจจะทำการผสม (Mixing) การเติมน้ำเสียและการเอาสลัดจ์ (Sludge) ออกเป็นครั้งคราว ถังปฏิกริยาชนิดนี้สามารถใช้ฝาปิดที่ลอยได้หรือแบบติดกับที่ แต่การใช้ฝาปิดชนิดติดกับที่จะไม่สะดวกในการเดินระบบหรือการทำงานของตู้เดินระบบ (Reynolde และ Richards, 1996) ดังภาพที่ 2.6

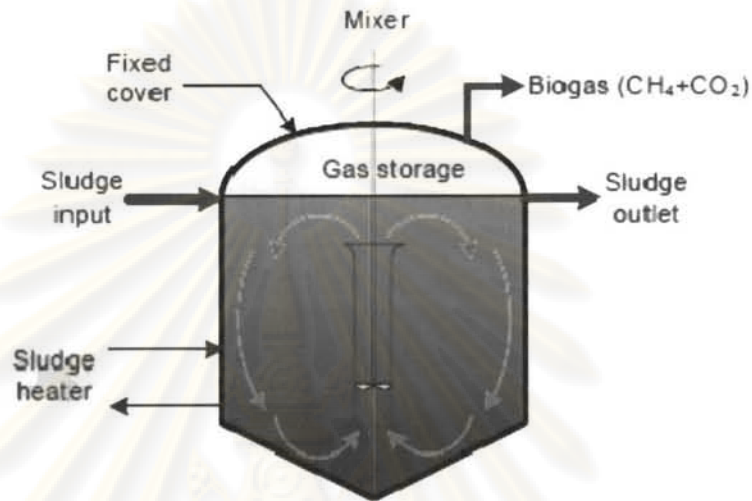


ภาพที่ 2.6 ถังย่อยแบบอัตราต่ำ

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2542

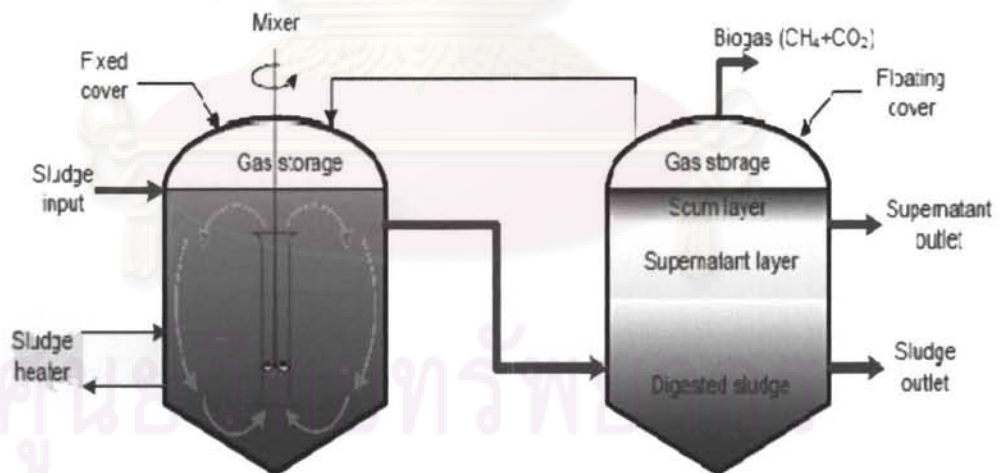


2) ถังย่อยแบบอัตราสูง (High-Rate Digesters) ถังปฏิกริยาชนิดนี้มีระยะเวลาพักชลศาสตร์ (HRT) 10-20 วัน ภาระบรรทุก 2.4-6.4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การเดินระบบจะผสมเติมน้ำเสียและการทิ้งสลัดจ์อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปถังปฏิกริยาชนิดนี้มักจะใช้ฝาปิดแบบติดกับที่ (Reynolde และ Richards, 1996) ดังภาพที่ 2.7-2.8



ภาพที่ 2.7 ถังย่อยแบบอัตราสูงชนิดขั้นตอนเดียว

ที่มา : Reynolde และ Richards, 1996



ภาพที่ 2.8 ถังย่อยแบบอัตราสูงชนิดสองขั้นตอน

ที่มา : Reynolde และ Richards, 1996

### 2.7.1 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายมีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าทำให้ช่วงการเริ่มเดินระบบ (Start up) ช้า อีกทั้งประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดต่ำจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time; HRT) นานขึ้น ระบบบำบัดจึงมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ระบบยังมีการปรับตัวไม่คืนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม และในระหว่างการบำบัดบางครั้งอาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) เกิดขึ้นด้วย ทำให้มีกลิ่นเหม็น ระบบนี้จึงมีข้อจำกัดการใช้งาน แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศพบว่าข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

#### 1) ข้อดีของระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน

- 1.1) เกิดมวลตะกอนจุลินทรีย์น้อยมากจึงไม่เป็นภาระในการบำบัดตะกอน
- 1.2) ไม่ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศและได้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงาน
- 1.3) สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เข้มข้นสูงได้
- 1.4) ระบบสามารถรับอัตราภาระสารอินทรีย์ได้สูง
- 1.5) มีความต้องการสารอาหารต่ำ
- 1.6) ระบบตอบสนองต่อสารอินทรีย์ได้ไวหลังจากหยุดเติมสารอินทรีย์
- 1.7) ตะกอนที่เหลือมีสภาพคงตัวสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยแก่พืชได้

#### 2) ข้อจำกัดของระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน

- 2.1) ใช้เวลาเริ่มต้นให้ระบบทำงาน (Start up) เพื่อสร้างมวลจุลินทรีย์นาน
- 2.2) ระบบต้องมีกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) สูงเพื่อไม่ให้ค่าพีเอชของระบบลดต่ำลงมากเกินไปซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียในระบบได้
- 2.3) เกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งมีสมบัติในการกัดกร่อนท่อและอุปกรณ์ต่างๆ ได้
- 2.4) อ่อนไหวต่อสารพิษที่เข้ามาในระบบ
- 2.5) ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้
- 2.6) อ่อนไหวต่ออุณหภูมิที่ลดลงเป็นอย่างมาก จึงต้องเดินระบบในช่วงอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า โดยถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อัตราการบำบัดจะลดต่ำลงมาก (Metcalf และ Eddy, 2004)
- 2.7) ในเขตหนาวต้องเสียค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่ระบบ
- 2.8) คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบยังไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง จึงต้องมีการบำบัดต่อด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน

### 2.7.2 ข้อมูลการออกแบบระบบถังหมักไร้ออกซิเจน

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบถังหมักไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester) แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลการออกแบบระบบถังหมักไร้ออกซิเจน

ถังย่อยแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester)	ข้อมูลการออกแบบ	
1. สภาพแวดล้อมที่ควรมี:		
พีเอช (pH)	> 6.0	
อุณหภูมิที่นิยมใช้ (องศาเซลเซียส)	35-40	
อุณหภูมิที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (องศาเซลเซียส)	45-65	
2. ประเภทของระบบย่อยแบบไร้ออกซิเจน	อัตรามาตรฐาน	อัตราสูง
3. ระยะเวลาพักพิงกลศาสตร์ (HRT) วัน	30-60	10-20
4. ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน	0.6-1.6	2.4-6.4
5. ก๊าซที่ผลิตได้จากระบบ:		
ก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> )	ร้อยละ 60-70	
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	ร้อยละ 25-30	
ก๊าซอื่นๆ (H <sub>2</sub> S, N <sub>2</sub> ฯลฯ)	เล็กน้อย	

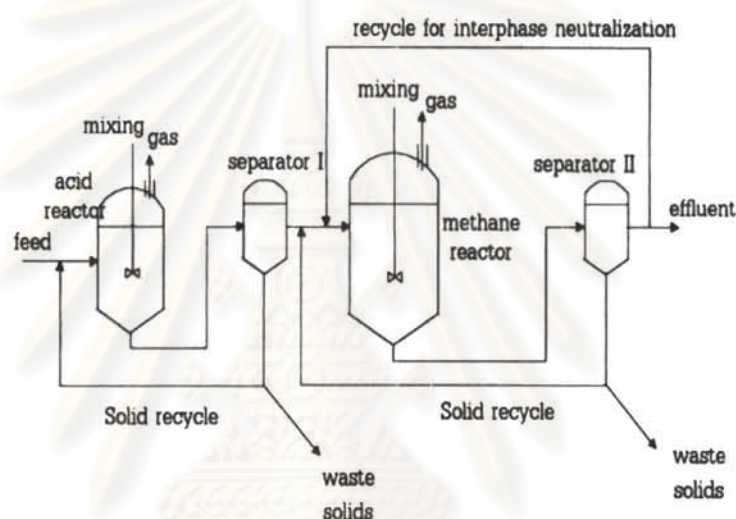
ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2547

### 2.8 ระบบถังปฏิริยาแบบสองขั้นตอน (two-stage process)

ระบบถังปฏิริยาแบบสองขั้นตอนหรือถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนเป็นถังย่อยที่พัฒนามาจากถังย่อยไร้ออกซิเจนแบบธรรมดา โดยเกิดจากแนวคิดที่ต้องการแยกขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนออกจากกันเพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากภายในถังย่อยแบบไร้ออกซิเจนทั่วไปจะประกอบด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่มอาศัยอยู่ด้วยกัน โดยแบคทีเรียแต่ละกลุ่มนั้นต่างก็มีความต้องการสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การแยกแบคทีเรียแต่ละกลุ่มออกจากกัน โดยใช้ค่าพีเอชหรือปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ (Chu และคณะ, 2008; Lee และคณะ, 2009) เวลากักพิงตะกอน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545; Liu และคณะ, 2006) เป็นต้น เป็นตัวกำหนดชนิดของแบคทีเรียภายในถังจะช่วยให้แบคทีเรียแต่ละกลุ่มสามารถย่อยสลาย



สารอินทรีย์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและยังช่วยให้การควบคุมดูแลระบบทำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542) จากรูปที่ 2.9 แสดงรูปถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมชนิดของแบคทีเรีย โดยหลักการการทำงานของถังย่อยแบบแยกเชื้อชนิดนี้คือ จะมีการแบ่งถังย่อยออกเป็น 2 ถังได้แก่ ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน สารอินทรีย์ที่เข้าระบบจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันชนิดต่างๆ ภายในถังหมักกรดซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4–6.5 จากนั้นน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดจะเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นก๊าซมีเทนต่อไป ค่าพีเอชของถังหมักก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนเหมือนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนทั่วไปคือ 6.5–8.2



ภาพที่ 2.9 ถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนด และควบคุมชนิดของแบคทีเรีย

ที่มา : มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542

ในปัจจุบันระบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนยังมีการนำมาใช้ไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลาและความเข้าใจพอสมควรในการเดินระบบให้มีสภาวะที่เหมาะสมกับชนิดของแบคทีเรีย และอีกสาเหตุหนึ่งคือความคิดที่ว่าราคาก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบสองขั้นตอนหรือแบบแยกเชื้อนั้นสูงกว่าระบบแบบทั่วไป (Choi และคณะ, 1997; De Baere, 2000 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) อย่างไรก็ตามหากระบบชนิดนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าฮิลด์สูงกว่าหรือให้พลังงานที่สูงกว่าระบบแบบธรรมดาทดแทนค่าใช้จ่ายดังกล่าวได้ก็ถือว่ามี ความคุ้มค่าในการเลือกใช้ระบบชนิดนี้ (Lee และคณะ, 2009)

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียหรือของเสียอย่างจริงจัง ซึ่งในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนี้ น้ำที่ออกจากระบบยังคงมีปริมาณมลสารค่อนข้างสูงและมีความจำเป็นที่จะต้องบำบัดด้วยระบบอื่น การนำเอาระบบแบบสองขั้นตอนมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจึงถือว่ามีความเหมาะสมเพราะก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานต่อหน่วยและมีมูลค่าค่อนข้างสูงโดยมีราคาเท่ากับ 5 ดอลลาร์สหรัฐ/กก. (CPCB, 2000; Logan, 2008 อ้างถึงใน Mohan และคณะ, 2009) สามารถทดแทนในส่วนของการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบสองขั้นตอนได้ โดยจากงานวิจัยของ Liu และคณะ (2006) พบว่าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจากห้องครัวด้วยระบบแบบสองขั้นตอน นอกจากจะผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในปริมาณสูงแล้ว ระบบชนิดนี้ยังมีค่ายึดของก๊าซมีเทนสูงกว่าในระบบแบบขั้นตอนเดียวถึงร้อยละ 21 อีกด้วย

## 2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกียรติพงษ์ เจริญสุข (2546) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำมันสำหรับน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย โดยใช้สาร โคแอกกูแลนต์ คือ สารส้มและ โพลิเมอร์ ประจุบวก ส่วนฟล็อกกูแลนต์เอคที่ใช้ คือ โพลิเมอร์ ประจุลบและการทดลองด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันตามด้วยการตกตะกอน คือ ค่าพีเอช 6 ปริมาณโพลิเมอร์ประจุลบ 1 มิลลิกรัม/ลิตร สารส้ม 20 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยของแข็งทั้งหมด ซีไอดี น้ำมันและไขมัน เท่ากับ 89.6 3.6 51.8 และ 81.4 ตามลำดับ และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย คือ ค่าพีเอช 6 ปริมาณ โพลิเมอร์ประจุลบ 1 มิลลิกรัม/ลิตร สารส้ม 20 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด ซีไอดี น้ำมันและไขมันเท่ากับ 86.5 6.4 49.2 และ 87.2 ตามลำดับ

ปัทมากร เจริญสาคร (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ จากผลการวิเคราะห์น้ำเสียที่แยกชั้นน้ำมันออกแล้วพบว่า มีซีไอดี สูงถึง 58,620 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมทั้งมีค่าน้ำมันและไขมัน เมทานอล และกลีเซอรอลเท่ากับ 2,300 47,237 และ 12,750 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การบำบัดทางเคมีโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสีย ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และสารโคแอกกูแลนต์เอค โดยสารโคแอกกูแลนต์และสารโคแอกกูแลนต์เอคที่ใช้ ได้แก่ โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ โพลิเมอร์ประจุบวก และ โพลิเมอร์ประจุลบ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การปรับพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น



เท่ากับ 4 ร่วมกับการใช้ โพลีเมอร์ประจุบวก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร่วมกับการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ 62.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุบวก 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้สูงถึงร้อยละ 98 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี บีโอดี กลีเซอรอลและเมทานอลเท่ากับ ร้อยละ 38-41 29-41 16-23 และ 25-33 ตามลำดับ

การบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียจากการตกตะกอนทางเคมีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยแบ่งการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพออกเป็น การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน การทดสอบการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดสอบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนปรับเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 3,500 5,200 และ 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน คือ ที่ซีโอดีเริ่มต้นสูงถึง 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งเป็นเวลาถึง 4 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 93 96 และ 99 ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนควรมีค่าซีโอดีเริ่มต้นน้อยกว่า 5,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งเท่ากับ 13 วัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลสูงถึงร้อยละ 98 99 และ 98 ตามลำดับ

Al-Shamrania และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารอลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกซัลเฟตเป็นตัวทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน พีเอช ระยะเวลาและความเร็วของการกวนเร็วและกวนช้า จากการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าหยคน้ำมันมีค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นลบและไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ และสารสร้างตะกอนทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีตาโพเทนเชียลของหยคน้ำมัน โดยอลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกซัลเฟตมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงถึงร้อยละ 99.3 ที่พีเอช 8 และร้อยละ 99.94 ที่พีเอช 7 ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการกวนเร็วที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันด้วยระบบลอยตัวด้วยอากาศละลาย คือ 120 วินาที และเวลาในการรวมตะกอนอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 นาที

Ito และคณะ (2005) ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและเอทานอลจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกลีเซอรอล โดยกระบวนการหมักด้วยเชื้อ *Enterobacter aerogenes* HU-101 โดยเจือจางน้ำเสียด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์และเติมสารสกัดยีสต์ร่วมกับ



ทรัพย์สินเพื่อเร่งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและเอทานอล เมื่อใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ในการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและเอทานอลที่ผลิตได้จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียไบโอดีเซลและ กลีเซอรอลบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำน้ำเสียไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกลีเซอรอลมาทดลอง เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และเอทานอลของน้ำเสียไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกลีเซอรอลจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ใช้ กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ซึ่งสาเหตุบางส่วนอาจเกิดจากน้ำเสียไบโอดีเซลมีส่วนประกอบของเกลือ ในปริมาณที่สูง การทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกลางพบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน สูงสุดจากกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีค่า 80 มิลลิโมล/ลิตร-ชั่วโมง และเกิดเอทานอล 0.8 โมล/โมลกลีเซอรอล ขณะที่น้ำเสียไบโอดีเซลจะมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน 30 มิลลิโมล/ลิตร-ชั่วโมง แต่เมื่อนำวัสดุที่ ทำจากเซรามิกที่มีรูพรุนมาใช้เป็นตัวกลางช่วยในการบดเกาะของจุลินทรีย์ พบว่าอัตราการผลิต ก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดมีค่าสูงถึง 63 มิลลิโมล/ลิตร-ชั่วโมง และเกิดเอทานอล 0.85 โมล/โมลกลีเซอรอล

Saatci และคณะ (2001) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำมันจากโรงงานน้ำมันพืช โดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีโดยใช้ปูนขาว สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ใน การตกตะกอน รวมทั้งการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า เมื่อนำปูนขาวทำการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันพืชจะสามารถกำจัดซีไอดี และน้ำมันและ ไขมันได้ร้อยละ 63.19-80.66 และร้อยละ 76.95-83.38 ตามลำดับ สารส้มสามารถกำจัดซีไอดี และน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 88.14-92.99 และ 69.89-92.11 ตามลำดับ เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถ กำจัดซีไอดี และน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 94.66-96.25 และ ร้อยละ 93.81-86.16 ตามลำดับ และการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายสามารถกำจัดซีไอดีและน้ำมันและไขมันได้ ร้อยละ 17.65-69.12 และร้อยละ 93.8-86.16 ตามลำดับ

Suchara และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากโรงงานผลิตไบโอดีเซล โดยใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยน้ำเสียดิบมี ค่าพีเอชและมี ปริมาณน้ำมันที่สามารถถูกสกัดได้ด้วยเฮกเซนสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ ซึ่งการบำบัดน้ำเสีย ทางชีวภาพของน้ำเสียไบโอดีเซลสามารถทำได้ยากเพราะน้ำเสียอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้ยีสต์ *Rhodotorula mucilaginosa* เพื่อมาทำ การย่อยสลายน้ำมัน โดยควบคุมพีเอชเริ่มต้นที่ 6.8 และเติมสารอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน, yeast extract  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  และ  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  โดยความเข้มข้นของ yeast extract ที่เหมาะสม คือ 1 กรัมต่อ ลิตร และมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 17-68 เมื่อใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการ เจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าหากมีปริมาณของแข็งในชั้นน้ำที่ได้จากการสกัดแยกน้ำมัน

ออกด้วยเฮกเซนเกิน 2.14 กรัมต่อลิตร จะทำให้จุลชีพไม่สามารถเจริญได้ ซึ่งเมื่อนำน้ำเสียดิบมาทำการเจือจางด้วยน้ำในปริมาณเท่ากันก่อนการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมข้างต้นพบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 98

Vieira และคณะ (2005) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการขุดเจาะน้ำมันกลางทะเลโดยใช้กระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจน และใช้แบคทีเรียกลุ่ม Sulphate-Reducing Bacteria (SBR) จากผลการทดลองพบว่าพีเอชเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรีย รวมทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดภายหลังจากการบำบัด 15 วัน ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันและไขมันและปริมาณฟีนอลทั้งหมดคือ ร้อยละ 61 และ 78 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าระบบบำบัดทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจนและใช้แบคทีเรียกลุ่ม Sulphate-Reducing Bacteria (SBR) นี้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการขุดเจาะน้ำมันกลางทะเล



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

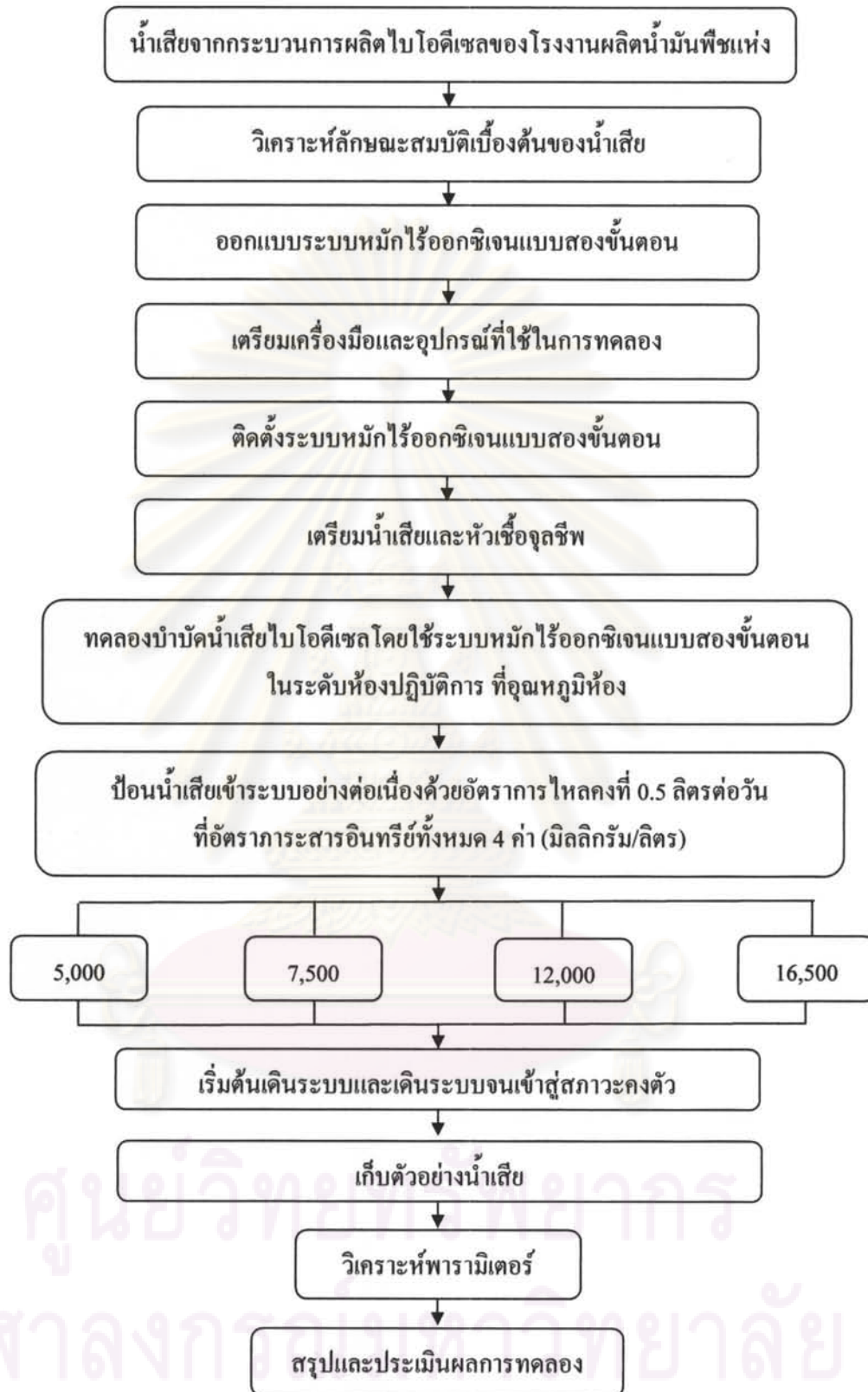
#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองบำบัดน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของโรงงานผลิตน้ำมันพืชแห่งหนึ่งที่มีกำลังการผลิตไบโอดีเซล 800,000 ลิตรต่อวัน โดยใช้น้ำมันปาล์มกิ่งบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซลโดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยหน่วยบำบัดย่อย 2 หน่วย ได้แก่ ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนต่อเนื่องกัน โดยป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลคงที่อย่างต่อเนื่อง

ระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนที่ใช้ในงานวิจัยออกแบบให้เป็นถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ มีปริมาตรการใช้งานจริงอยู่ที่ 0.5 ลิตร และ 5 ลิตร ตามลำดับ กำหนดให้ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์คงที่ 1 วัน และ 10 วัน ตามลำดับ ดังนั้นระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนจึงมีระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์รวมทั้งหมดเท่ากับ 11 วัน งานวิจัยนี้ได้ทำการแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียป้อนเข้าระบบทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ ค่าความเข้มข้นซีโอดีที่ 5,000 7,500 12,000 และ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ โดยเริ่มต้นการเดินระบบด้วยการเติมหัวเชื้อตะกอนจุลชีพและป้อนน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นซีโอดีต่ำ เมื่อจุลชีพปรับสภาพจนเกิดความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบแล้ว ให้เดินระบบบำบัดน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.5 ลิตรต่อวัน ตามแผนการวิจัยที่ได้ออกแบบไว้และทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด โดยแผนการวิจัยและขั้นตอนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.1 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แผนการวิจัย

ชุดการทดลอง	อัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ (ล./วัน)	ความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบ(มก./ล)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (วัน)
1	0.50	5,000	0.46	11
2	0.50	7,500	0.64	11
3	0.50	12,000	1.10	11
4	0.50	16,500	1.50	11

### 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

จากการทดลองได้ทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ โดยแบ่งตัวแปรที่ศึกษาออกเป็น 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรกำหนด ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม โดยตัวแปรอิสระคือตัวแปรที่ต้องการศึกษาและสนใจในงานวิจัยนี้ ตัวแปรกำหนดคือตัวแปรที่มีการควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการวิจัย และตัวแปรตาม คือ ตัวแปรที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระ มุ่งวัดเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์เพื่อตอบคำถามของการวิจัยว่าเป็นผลมาจากสิ่งใด ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและพารามิเตอร์ที่ต้องตรวจวิเคราะห์เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวมีดังต่อไปนี้

#### ตัวแปรกำหนด ได้แก่

- 1) พีเอชของน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 7.2
- 2) ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 11 วัน โดยกำหนดให้ระบบถังหมักกรดมีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 1 วันและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 10 วัน
- 3) อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 0.5 ลิตร/วัน

#### ตัวแปรอิสระ ได้แก่

ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 5,000 7,500 12,000 และ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ

#### ตัวแปรตาม ได้แก่

- 1) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ได้แก่
  - 1.1) ซีโอดีละลาย (Chemical Oxygen Demand: COD)
  - 1.2) เมทานอล (Methanol)

- 1.3) กลีเซอรอล (Glycerol)
- 2) พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบหมัก  
ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ได้แก่
- 2.1) พีเอช (pH)
  - 2.2) อุณหภูมิ (Temperature)
  - 2.3) สภาพด่างทั้งหมด (Total Alkalinity)
  - 2.4) กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid: VFA)
  - 2.5) ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด
  - 2.6) ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน

โดยแผนการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
1. ซีไอดีละลาย	วิธีฟลักซ์แบบปิด
2. ปริมาณของแข็งแขวนลอย	วิธีอบแห้งที่ 103-105 °ซ
3. น้ำมันและไขมัน	วิธีการสกัดด้วยกรวยแยก
4. เมทานอล	เครื่อง GC (Gas Chromatography)
5. กลีเซอรอล	เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography)
6. สภาพด่างทั้งหมด	วิธีไตเตรต
7. กรดไขมันระเหย	วิธีไตเตรต
8. พีเอช/อุณหภูมิ	เครื่องวัดพีเอช
9. ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	เครื่องวัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ
10. ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน	เครื่อง GC (Gas Chromatography)



### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ชุดอุปกรณ์ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

##### 1) ถังปฏิกริยา

ในการทดลองนี้ประกอบด้วยถังปฏิกริยา 2 ถังต่ออนุกรมกัน ได้แก่ ถังหมักกรด และถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 1.1) ถังหมักกรด (Acid Tank)

ถังหมักกรดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor:CSTR) ระดับห้องปฏิบัติการ รูปทรงกระบอก โดยกำหนดปริมาตรใช้งาน (working volume) เท่ากับ 0.50 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 8.50 เซนติเมตรและ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวถังทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส (Acrylic) ซึ่งติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการกวนผสมได้แก่มอเตอร์และใบพัดกวนเพื่อกวนผสมน้ำเสียและจุลชีพให้มีโอกาสสัมผัสกันอย่างทั่วถึง และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำเสียที่อยู่ภายในระบบ โดยน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถังและไหลล้นออกทางด้านบนของถังด้วยเครื่องสูบน้ำชนิดสายรีดเพื่อป้องกันการไหลล้นของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยลักษณะและขนาดของถังหมักกรดแสดงดังภาพที่ 3.2 และภาพที่ 3.4 ตามลำดับ

##### 1.2) ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane Tank)

ถังหมักก๊าซมีเทนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ระดับห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกับถังหมักกรด มีรูปทรงกระบอก โดยกำหนดปริมาตรใช้งานจริงเท่ากับ 5 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 15.50 เซนติเมตร และ 31 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวถังทำด้วยวัสดุอะคริลิกใสซึ่งติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการกวนผสมได้แก่มอเตอร์และใบพัดกวนเพื่อกวนผสมน้ำเสียและจุลชีพให้มีโอกาสสัมผัสกันอย่างทั่วถึง และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำเสียที่อยู่ภายในระบบ โดยน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถังและไหลล้นออกทางด้านบนของถังด้วยเครื่องสูบน้ำชนิดสายรีดเพื่อป้องกันการไหลล้นของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งลักษณะและขนาดของถังหมักก๊าซมีเทนแสดงดังภาพที่ 3.3 และ ภาพที่ 3.5 ตามลำดับ โดยสรุปขนาดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนได้ ดังตารางที่ 3.3

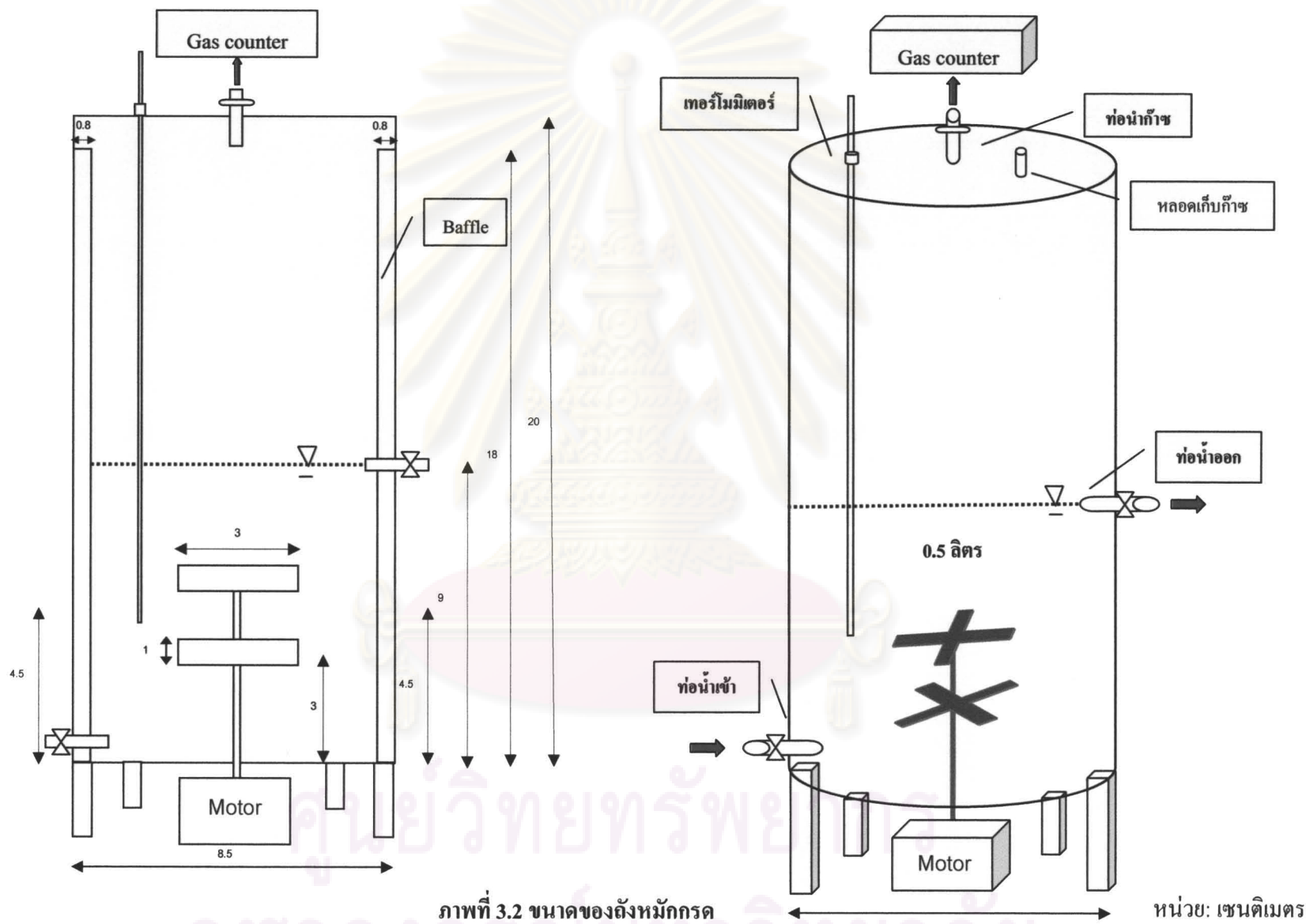
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 สรุปขนาดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน	ระบบบำบัดย่อย	
	ถังหมักกรด	ถังหมักก๊าซมีเทน
ปริมาตรที่ใช้งาน (ลิตร)	0.50	5
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	8.50	15.50
สูง (ซม.)	20	31
ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (วัน)	1	10



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย







ภาพที่ 3.4 ลักษณะของถังหมักกรด



ภาพที่ 3.5 ลักษณะของถังหมักก๊าซมีเทน

## 2) ชุดอุปกรณ์ป้อนน้ำเสียเข้าระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ชุดอุปกรณ์ป้อนน้ำเสียเข้าระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วย

### 2.1) เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบ

เครื่องสูบน้ำเสียที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ มีจำนวน 2 เครื่อง โดยใช้ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบถึงหมักกรดจำนวน 1 เครื่อง และป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบถึงหมักก๊าซมีเทน 1 เครื่อง ด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.50 ลิตรต่อวัน การเลือกใช้เครื่องสูบน้ำเสียชนิดสายรัด (peristaltic pump) เนื่องจากเครื่องสูบน้ำชนิดนี้สามารถป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่ต่ำได้ และเกิดปัญหาการอุดตันของสายยางน้อย

### 2.2) เครื่องควบคุมเวลา (timer)

เครื่องควบคุมเวลาแบบอัตโนมัติ (Auto timer) จำนวน 2 เครื่อง สำหรับควบคุมระยะเวลาของการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบถึงหมักกรดและระบบถึงหมักก๊าซมีเทน โดยติดตั้งอยู่กับเครื่องสูบน้ำชนิดสายรัด

## 3) ชุดอุปกรณ์ปรับสภาพน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบ

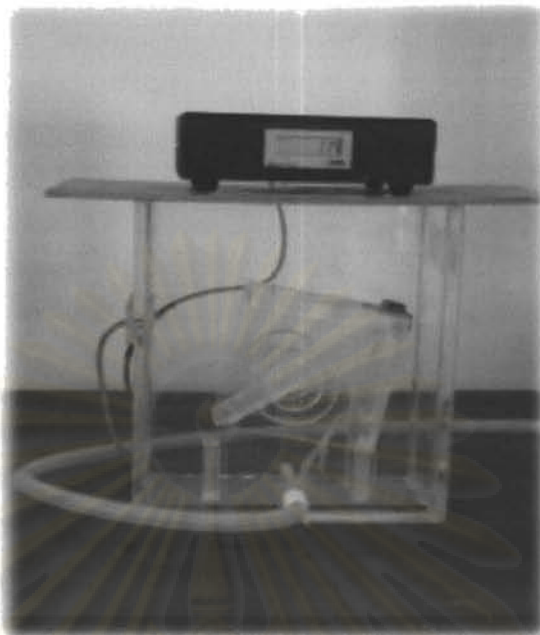
ก่อนที่จะป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบต้องมีการเตรียมน้ำเสียโดยเติมธาตุอาหารที่จำเป็น และธาตุอาหารเสริมในปริมาณที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพภายในระบบและเติมค่าเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับปรับสภาพน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกวนผสมแบบแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) จำนวน 2 ชุดอุปกรณ์ สำหรับกวนผสมน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบถึงหมักกรดและถึงหมักก๊าซมีเทน เพื่อให้ความเข้มข้นของน้ำเสียภายในระบบบำบัดมีค่าเท่ากันทุกจุด

## 4) ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซแบบแทนทีน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในถึงหมักกรดและถึงหมักก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซโดยใช้หลักการแบบแทนทีน้ำ ประกอบด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter) ซึ่งทำจากวัสดุอะคลีริกใส มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในมีการติดตั้งระบบเซ็นเซอร์เพื่อตรวจนับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยตรวจวัดจากการนับจำนวนรอบการพลิกตัวของอุปกรณ์ที่ทราบปริมาตรก๊าซที่ถูกแทนทีน้ำอย่างแน่นอน โดยสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 3.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

#### 5) ถังพักน้ำเสีย

งานวิจัยนี้ใช้ถังพักน้ำเสียจำนวนทั้งหมด 3 ถัง ประกอบด้วยถังพักน้ำเสียเข้าระบบ ถังหมักกรดขนาด 1,500 มิลลิลิตร จำนวน 1 ถัง ถังพักน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด (ถังพักน้ำเสียเข้าระบบถังหมักก๊าซมีเทน) ขนาด 1,500 มิลลิลิตร จำนวน 1 ถัง และถังพักน้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนขนาด 1,500 มิลลิลิตร จำนวน 1 ถัง เพื่อทำหน้าที่เก็บพักน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบและออกจากระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

#### 3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากต้องมีการปรับสภาพน้ำเสียให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบบำบัดก่อนป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ จึงต้องมีการเติมธาตุอาหารและเติมสารค้ำให้กับน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีดังต่อไปนี้

- 1) โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- 2) ยูเรีย ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ )
- 3) เฟอร์รัสคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2$ ) โดยรายละเอียดแสดงดังหัวต่อไป

### 3.4 การเตรียมน้ำเสียและหัวเชื้อจุลินทรีย์

#### 3.4.1 การเตรียมน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ไขมันพืชกึ่งบริสุทธิ์ (RBD Palm Oil) เป็นวัตถุดิบในการผลิต และใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในขั้นตอนของการล้างทำความสะอาดไบโอดีเซลเพื่อให้เกิดความบริสุทธิ์ จะล้างเอาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออกไปด้วย ดังนั้นน้ำเสียไบโอดีเซลจึงประกอบไปด้วยมลสารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดจากปฏิกิริยา รวมถึงสารปนเปื้อนต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งมีความปนเปื้อนในปริมาณสูงมาก

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีการเติมด่างเพื่อช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและเพิ่มผลผลิตจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้ผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีโดยการปรับพีเอชให้เป็นกรด เพื่อแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสียบางส่วน ทำให้น้ำเสียไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นมีค่าพีเอชต่ำหรือมีความเป็นกรดอ่อน ส่งผลให้มีปริมาณน้ำมันและไขมันน้อยลง อย่างไรก็ตามน้ำเสียไบโอดีเซลยังมีองค์ประกอบของซีโอดี เมทานอล และกลีเซอรอลในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการทำปฏิกิริยาและเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่เกินพอในการทำปฏิกิริยา ซึ่งรายละเอียดของลักษณะสมบัติของน้ำเสียไบโอดีเซลแสดงในบทที่ 4

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมน้ำเสียโดยปรับสภาพน้ำเสียไบโอดีเซลให้มีความเหมาะสมก่อนทำการป้อนเข้าสู่ระบบ โดยนำน้ำเสียที่ได้จากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาเติมธาตุอาหารที่จำเป็นให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ โดยพิจารณาให้มีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 150 : 1.1 : 0.2 ซึ่งแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เลือกใช้ ได้แก่ ยูเรียและโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการเติมเฟอร์รัสคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2$ ) ปริมาณ 1 มก./ลิตร เพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ภายในระบบอีกด้วย และเนื่องจากน้ำเสียไบโอดีเซลมีความเป็นกรดสูงจึงต้องมีการเติมสารด่างได้แก่โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 7.2 เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์และช่วยรักษาสภาพค่าในระบบให้มีปริมาณเพียงพอที่จะไม่ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ จากนั้นทำการเจือจางน้ำเสียให้มีปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีตามที่ต้องการแล้วป้อนเข้าสู่ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนต่อไป

### 3.4.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้มาจากระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนเช่นเดียวกับระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยนำหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ได้มาเลี้ยงให้เกิดความคุ้นเคยกับน้ำเสียไบโอดีเซลในถังปฏิกรณ์แบบปิดขนาด 5 ลิตร ซึ่งทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียทุกๆ 5 วัน ก่อนทำการเริ่มต้นเดินระบบ และเมื่อจุลินทรีย์เกิดความคุ้นเคยกับน้ำเสียแล้ว ให้เติมหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ลงในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง และทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องตามแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งรายละเอียดของลักษณะสมบัติของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์แสดงในบทที่ 4

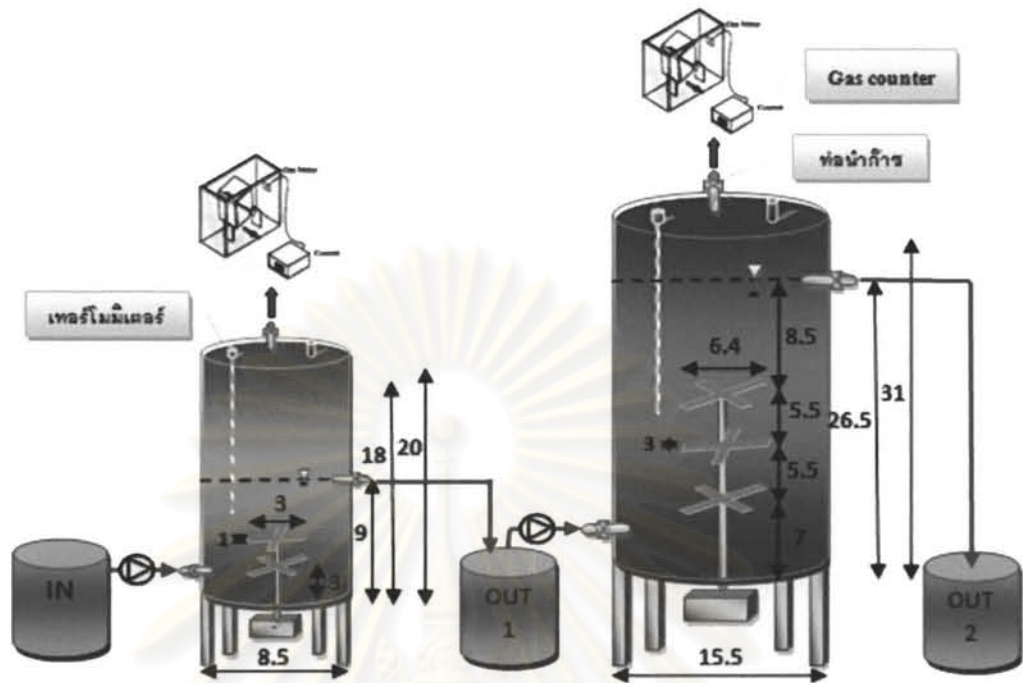
### 3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

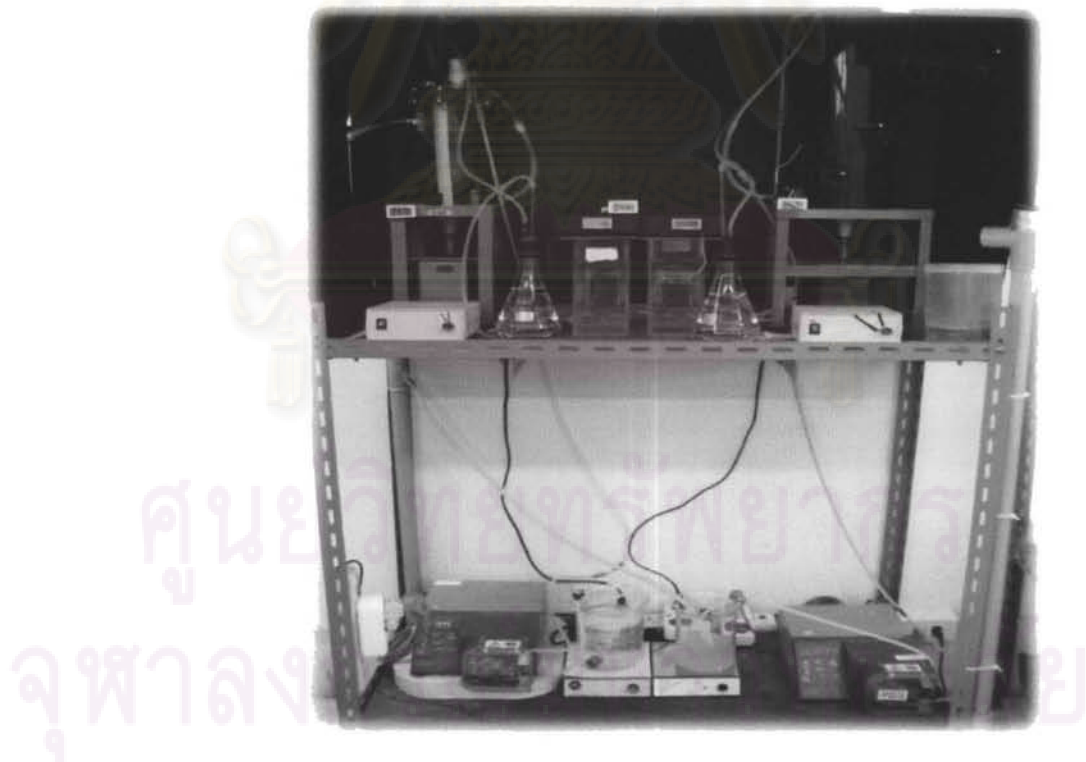
#### 3.5.1 การออกแบบและติดตั้งระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

การทดลองบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยหน่วยบำบัดย่อย 2 หน่วย ได้แก่ ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งต่ออนุกรมกัน โดยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะถูกเก็บในถังพักน้ำเสียเข้า จากนั้นจะถูกปั๊มเข้าสู่ระบบถังหมักกรดจากทางด้านล่างของถังด้วยเครื่องสูบน้ำชนิดสายรีดและไหลเข้าสู่ถังพักน้ำเสียออกถังที่ 1 น้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักกรดจะถูกปั๊มเข้าสู่ระบบถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งต่ออนุกรมกันด้วยอัตราการไหลลงที่อย่างต่อเนื่อง จากทางด้านล่างของถังด้วยเครื่องสูบน้ำแบบสายรีดเช่นเดียวกับระบบถังหมักกรด น้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนจะถูกเก็บในถังเก็บพักน้ำเสียออกถังที่ 2 โดยทิศทางการไหลของน้ำเสียเข้าสู่หน่วยบำบัดย่อยต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.7





ภาพที่ 3.7 ทิศทางการไหลของน้ำเสียในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



ภาพที่ 3.8 ชุดการทดลองระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ 2 ถัง ได้แก่ ถังหมักกรด 1 ถัง และถังหมักก๊าซมีเทน 1 ถัง ต่ออนุกรมกัน โดยติดตั้งชุดมอเตอร์สำหรับควบคุมใบพัดกวนภายในถังปฏิกริยาทั้งสองถัง น้ำเสียใบโอดีเซลที่เตรียมไว้จะถูกเก็บพักในถังพักน้ำเสียเข้าระบบถังหมักกรด ซึ่งถือบีกเกอร์ขนาด 1,500 มิลลิลิตร โดยได้ติดตั้งชุดเครื่องกวนผสมแบบแท่งแม่เหล็ก ภายในบีกเกอร์จะมีแท่งแม่เหล็กสำหรับกวนผสมน้ำเสียก่อนเข้าระบบ เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้มีความเข้มข้นเท่ากันทุกจุด โดยน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าระบบถังหมักกรดซึ่งอยู่ด้านบนด้วยเครื่องสูบน้ำแบบสายรัดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.50 ลิตรต่อวัน โดยติดตั้งเครื่องควบคุมเวลาคู่กับเครื่องสูบน้ำชนิดสายรัดเพื่อปรับปริมาณการป้อนน้ำเสียเข้าระบบให้เหมาะสมกับการทดลอง น้ำเสียจะไหลผ่านเข้าสู่ถังพักน้ำเสียออกและถูกป้อนเข้าระบบถังหมักก๊าซมีเทนด้วยเครื่องมือและชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งเช่นเดียวกับระบบถังหมักกรด และไหลเข้าสู่ถังพักน้ำออกของระบบถังหมักก๊าซมีเทน นอกจากนี้ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนยังได้มีการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพเพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในระบบอีกด้วย ดังภาพที่ 3.8

### 3.5.2 การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนสองแบบขั้นตอน แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเริ่มต้นเดินระบบ และช่วงที่สองเป็นการควบคุมและเดินระบบบำบัดน้ำเสีย รายละเอียดแสดงดังนี้

#### 1) การเริ่มต้นเดินระบบ (Start up)

ในระหว่างเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสียจะมีสภาวะการทำงานอยู่ 2 ระยะ ได้แก่

**ระยะที่ 1** สภาวะก่อนคงตัว คือเป็นช่วงเวลาที่มีการเลี้ยงจุลชีพให้มีปริมาณเพียงพอและคุ้นเคยกับน้ำเสีย โดยในระยะแรกนี้จุลชีพสามารถผลิตเอนไซม์ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แล้ว แต่ระบบยังไม่ได้รับน้ำเสียอย่างเต็มที่

**ระยะที่ 2** สภาวะคงตัว (Steady State) เป็นช่วงเวลาที่แบคทีเรียมีความแข็งแรงสมบูรณ์ในปริมาณที่สามารถบำบัดน้ำเสียทั้งหมดที่มีอยู่ได้ โดยน้ำเสียจะถูกบำบัดได้อย่างเต็มขีดความสามารถของระบบและระบบมีเสถียรภาพที่ดี ทำให้น้ำทิ้งสุดท้ายมีคุณภาพดีและไม่แปรปรวน โดยในการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสียจะแบ่งการเริ่มต้นเดินระบบออกเป็น 2 หน่วยบำบัด ได้แก่ ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทน รายละเอียดแสดงนี้

#### 1.1) การเริ่มต้นเดินระบบถังหมักกรด มีขั้นตอนดังนี้

- เติมหั่วเชื้อจุลชีพลงในถังหมักกรด ซึ่งเป็นหัวเชื้อจุลชีพที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน ประมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง

- เตรียมน้ำเสียไบโอดีเซลก่อนป้อนเข้าสู่ระบบถังหมักกรด โดยนำน้ำเสียไบโอดีเซล มาเติมธาตุอาหารที่จำเป็นและปรับพีเอชให้เป็นกลางโดยเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อรักษาสภาพต่างภายในระบบ จากนั้นเจือจางน้ำเสียไบโอดีเซลตามความเข้มข้นที่ต้องการ

- ป้อนน้ำเสียไบโอดีเซลเข้าสู่ถังหมักกรดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.50 ลิตรต่อวัน โดยในช่วงแรกของการเริ่มต้นเดินระบบให้ป้อนน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นซีไอดีต่ำ เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้จุลชีพภายในระบบสามารถปรับตัวได้ดี เมื่อจุลชีพสามารถปรับสภาพและคุ้นเคยกับน้ำเสียแล้ว จึงค่อยๆ เพิ่มค่าความเข้มข้นของซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบเริ่มจากค่าความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดจะถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนที่ต่ออนุกรมกันต่อไป

- กวนน้ำเสียภายในระบบ เพื่อให้ น้ำเสียและจุลชีพได้สัมผัสกันอย่างทั่วถึง และมีความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากันทุกจุดในถังปฏิกรณ์

- ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ซีไอดีละลาย กรดไขมัน ระยะเวลา และสภาพต่างเพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบบำบัด

### 1.2) การเริ่มต้นเดินระบบถังหมักก๊าซมีเทน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เติมหิวเชื้อจุลชีพลงในถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นหิวเชื้อจุลชีพที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน ประมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง เช่นเดียวกับระบบถังหมักกรด

- ป้อนน้ำเสียไบโอดีเซลที่ออกจากระบบถังหมักกรดเข้าสู่ระบบถังหมักก๊าซมีเทนอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.50 ลิตรต่อวัน เช่นเดียวกับระบบถังหมักกรด

- กวนน้ำเสียภายในระบบ เพื่อให้ น้ำเสียและจุลชีพได้สัมผัสกันอย่างทั่วถึง และมีความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากันทุกจุดในถังปฏิกรณ์

- ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ซีไอดีละลาย กรดไขมัน ระยะเวลา และสภาพต่างทั้งหมดเพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบบำบัด

### 3.5.3 การควบคุมและการเดินระบบ

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วให้ทำการเดินระบบโดยป้อนน้ำเสียเข้าระบบบำบัดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่ 0.50 ลิตร/วัน ที่ค่าความเข้มข้นซีไอดีต่างๆ จากนั้นตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากระบบการผลิตไบโอดีเซล และตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบบำบัด ดังภาพที่ 3.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

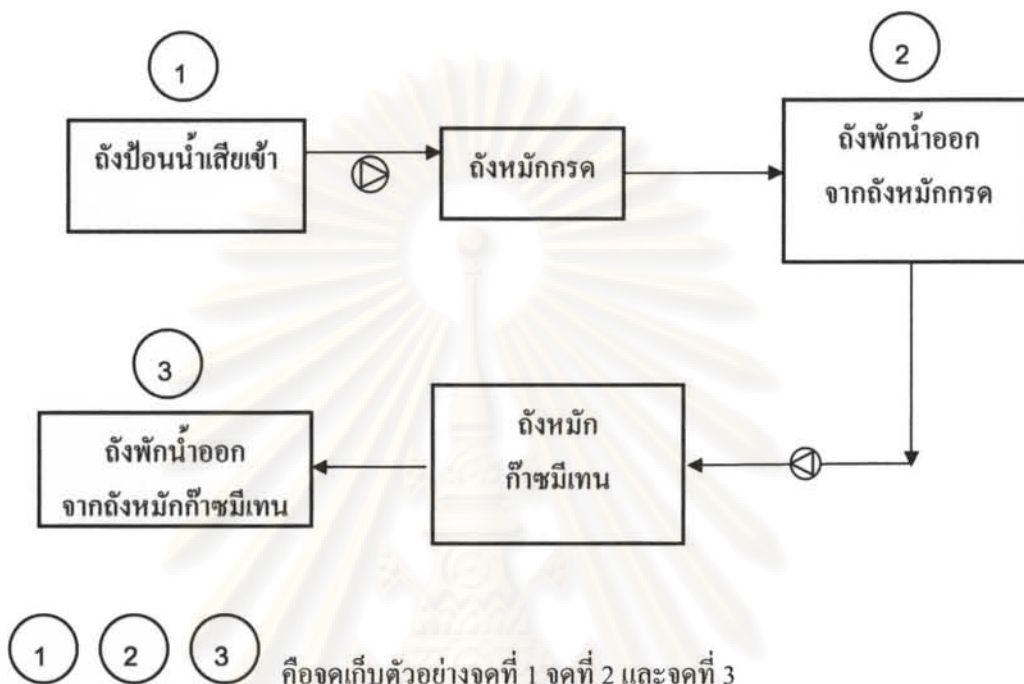




ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

### 3.6 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างแบบแยก (grab sample) โดยใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียในช่วงเวลาที่เก็บ ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้จากจุดเก็บตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

#### หมายเหตุ

จุดที่ 1 เป็นจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ที่ป้อนเข้าระบบถังหมักกรด (ดังหมายเลข 1)

จุดที่ 2 เป็นจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดก่อนถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทน (ดังหมายเลข 2)

จุดที่ 3 เป็นจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทน (ดังหมายเลข 3)

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไปโอติเซล โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ จากจุดเก็บตัวอย่างที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 แผนการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อระบบบำบัดน้ำเสีย ไบโอดีเซลเข้าสู่สภาวะคงตัว

พารามิเตอร์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่างของจุดเก็บตัวอย่าง			วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
	1	2	3	
1. ซีไอดีละลาย	xxx	xxx	xxx	วิธีฟลักซ์แบบปิด
2. เมทานอล	x	x	x	เครื่อง Gas Chromatography (GC)
3. กลีเซอรอล	x	x	x	เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)
4. สภาพค่างทั้งหมด	xxx	xxx	xxx	วิธีไตเตรต
5. กรดไขมันระเหย	xxx	xxx	xxx	วิธีไตเตรต
6. ฟิเอช/อุณหภูมิ	xxx	xxx	xxx	เครื่องวัดฟิเอช
7. ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	xx	xx	xx	เครื่องวัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ
8. ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน	x	x	x	เครื่อง Gas Chromatography (GC)

#### หมายเหตุ

- x คือ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 1 ครั้ง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
- xx คือ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกวัน
- xxx คือ ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 ครั้งต่อสัปดาห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียไบโอดีเซล

การทดลองนี้ได้เลือกใช้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้สารต่างเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน และใช้น้ำมันพืชกึ่งบริสุทธิ์ (RBD Palm Oil) เป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลหลังจากที่ได้นำวัตถุดิบได้แก่น้ำมันพืช กึ่งบริสุทธิ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาผสมจนทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ เมื่อส่วนผสมทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์แล้วจะเกิด สารสองชนิดขึ้นในส่วนผสม คือ น้ำมันไบโอดีเซลหรือที่เรียกว่าเอสเทอร์ และไขสบู่หรือ กลีเซอรอล ในขั้นตอนนี้จะตั้งพักทิ้งไว้เพื่อรอให้ส่วนผสมที่ทำปฏิกิริยาแล้วเกิดการแยกชั้นออก จากกัน โดยไบโอดีเซลจะลอยอยู่ด้านบน ส่วนกลีเซอรอลจะอยู่ด้านล่าง จากนั้นระบายกลีเซอรอลที่ อยู่ด้านล่างออกไปเก็บไว้ในถังพักกลีเซอรอล ให้เหลือเฉพาะไบโอดีเซล แม้ว่าในขั้นตอนนี้จะได้ ไบโอดีเซลออกมาแล้ว แต่ไบโอดีเซลที่ได้ยังไม่มีความบริสุทธิ์เพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นขั้นตอนสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลขั้นตอนหนึ่งก็คือขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เพื่อให้ ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น การล้างไบโอดีเซลเป็นการกำจัดสารเคมีที่เหลือจากการทำ ปฏิกิริยา เมทานอล กลีเซอรอล คราบไขสบู่ และสิ่งตกค้างต่างๆ ออกจากไบโอดีเซล โดยการล้างน้ำ ได้แบ่งออกเป็น 3 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้งจะล้างโดยใช้น้ำสะอาด ทำการกวนผสมให้ทั่วถึง แล้วปล่อยทิ้งไว้รอให้น้ำมันและน้ำล้างแยกออกจากกัน โดยไบโอดีเซลจะลอยอยู่ด้านบน ส่วนน้ำล้างจะอยู่ด้านล่าง จากนั้นให้ระบายน้ำล้างทิ้งออกสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วนำไบโอดีเซล ที่ได้ไปใช้งานต่อไป

โดยน้ำเสียที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วย น้ำสะอาดครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ผสมรวมกัน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งลักษณะสมบัติทาง กายภาพของน้ำเสียที่พบคือ น้ำเสียมีสถานะเป็นของเหลว มีสีเหลืองใส มีเศษตะกอนปะปนลอยอยู่ ด้านบนเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.1

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัย

เมื่อนำน้ำเสียไบโอดีเซลมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีพบว่าน้ำเสียไบโอดีเซลมีปริมาณความเข้มข้นซีไอดี ของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมัน เท่ากับ 315,700 560 และ 120 มก./ล. ตามลำดับ โดยพบว่าปริมาณความเข้มข้นของซีไอดีมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมมาก แม้ว่าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีการใช้สารต่างเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่เนื่องจากน้ำเสียไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางเคมีขั้นต้นด้วยการปรับพีเอชของน้ำเสียให้เป็นกรด โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกน้ำมันและไขมันบางส่วนที่ละลายอยู่ออกจากน้ำเสียได้ ดังนั้นน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยจึงมีพีเอชเท่ากับ 3.5 และมีปริมาณน้ำมันและไขมันน้อยมาก

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าน้ำเสียไบโอดีเซลมีค่าเมทานอลและกลีเซอรอลสูงมากเท่ากับ 32,582 และ 22,648 มก./ล. ตามลำดับ เนื่องจากในการผลิตไบโอดีเซลได้มีการเติมเมทานอลซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อเพิ่มสัดส่วนในการเกิดผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อล้างน้ำมันไบโอดีเซล น้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและกลีเซอรอลในปริมาณสูงมาก เนื่องจากการใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการทำสบู่ (Saponification) ได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งการเกิดสบู่จะทำให้แยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเทอร์ได้ยาก เนื่องจากสบู่ทำให้เมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเกิดเป็นอิมัลชัน จึงละลายอยู่ในชั้นอิมัลชันของสบู่ เมื่อแยกออกจากกันได้ไม่หมดจะถูกชะล้างออกมาอยู่ในน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียไบโอดีเซลมีปริมาณกลีเซอรอลสูงมาก

และเมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียไบโอดีเซล พบว่าน้ำเสียไบโอดีเซลมีปริมาณไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็นเพียง 14 มก./ล. และตรวจไม่พบฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสียไบโอดีเซลที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลหลังผ่านระบบบำบัดทางเคมีขั้นต้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียไบโอดีเซลที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าพารามิเตอร์ (ปริมาณ ความเข้มข้น)	น้ำเสีย ไบโอดีเซล	มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	วิธีวิเคราะห์
พีเอช	3.50	5.5-9.0	เครื่องวัดพีเอช
ซีไอดี (มก./ล.)	315,700	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่ เกิน 400 มก./ล.	วิธีฟลักซ์แบบปิด
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	560	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบ บำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	Gravimetric method <sup>1</sup>
น้ำมันและไขมัน (มก./ ล.)	120	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่ เกิน 15 มก./ล.	วิธีการสกัด ด้วยกรวยแยก
เมทานอล (มก./ล.)	32,582	-	เครื่อง GC <sup>2</sup>
กลีเซอรอล (มก./ล.)	22,648	-	เครื่อง HPLC <sup>3</sup>
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	14	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้ว แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่ เกิน 200 มก./ล.	วิธีแมคโครเจลดาร์ล
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.)	N.D.	-	วิธีแวนาโดโมลิบโด ฟอสฟอริกแอซิก



### หมายเหตุ

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

### หมายเหตุ

N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบ

\*1 วิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids Dried) อบแห้งที่ 103-105 °ซ

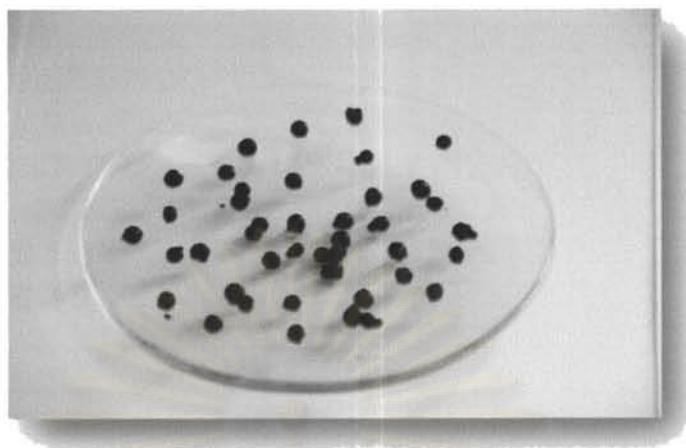
\*2 เครื่องยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-7AG ใช้คอลัมน์ คือ Porepak Q ยาว 2 ม. และใช้ตัวตรวจวัด (Detector) คือ FID ก๊าซตัวพา (Carrier gas) คือ ก๊าซไนโตรเจน

\*3 เครื่องยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LC-3A ใช้คอลัมน์ คือ Lichrocart-C<sub>18</sub> ขนาด 250\*4.0 มม. และใช้ตัวตรวจวัด คือ Refractive Index Detector ยี่ห้อ LDC รุ่น Refracto Monitor TV Mobile phase: 0.1% aq. Phosphoric acid (v/v)

#### 4.2 ลักษณะสมบัติของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ (Seed)

หัวเชื้อตะกอนจุลชีพ (Granulation seed) ที่ใช้ในการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ทั้งในการเดินระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทน ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัทเสริมสุข (ปทุมธานี) จำกัด โดยเป็นหัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่ได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลเป็นหลัก ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่พบ คือ มีรูปร่างกลม ลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.1 เซนติเมตรถึง 0.3 เซนติเมตร สีน้ำตาลเข้ม มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (MLVSS) ประมาณ 62,780 มก./ล. โดยลักษณะของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพแสดงดังภาพที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.2 ลักษณะของหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ

#### 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ระยะ ระยะแรกเป็นการเริ่มต้นเดินระบบ โดยเป็นช่วงเริ่มต้นในการเลี้ยงหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ ให้มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียไบโอดีเซล ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำการเดินระบบ โดยค่อยๆ ป้อนน้ำเสียไบโอดีเซลที่มีค่าความเข้มข้นต่ำไปยังความเข้มข้นสูง เริ่มจากค่าซีโอดีเท่ากับ 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.09 0.18 และ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แผนการเดินระบบในระยะเริ่มต้นการเดินระบบ

การทดลอง	อัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ (ล./วัน)	ซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบ (มก./ล.)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ระยะเวลาพักทางศาสตร์ (วัน)
1	0.50	1,000	0.09	11
2	0.50	2,000	0.18	11
3	0.50	3,000	0.27	11

เมื่อจุลชีพมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียไบโอดีเซลแล้ว จึงเริ่มเดินระบบในระยะที่สองตามแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ โดยทดลองแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบที่

5,000 7,500 12,000 และ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แผนการเดินระบบในระยะเดินระบบตามแผนการทดลอง

การทดลอง	อัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ (ล./วัน)	ความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบ (มก./ล.)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ (วัน)
4	0.5	5,000	0.46	11
5	0.5	7,500	0.64	11
6	0.5	12,000	1.10	11
7	0.5	16,500	1.50	11

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเปรียบเทียบแนวโน้มน้ำของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์แตกต่างกัน เพื่อสรุปประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซล โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล ได้แก่ ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลาย เมทานอล กลีเซอรอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

ส่วนที่ 2 แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซล ได้แก่ ผลการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทน และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

ส่วนที่ 3 แสดงสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลตลอดการทดลอง ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยค่างทั้งหมดที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

ส่วนที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ในภาพรวม และสรุปอัตราภาระสารอินทรีย์ และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลและการผลิต



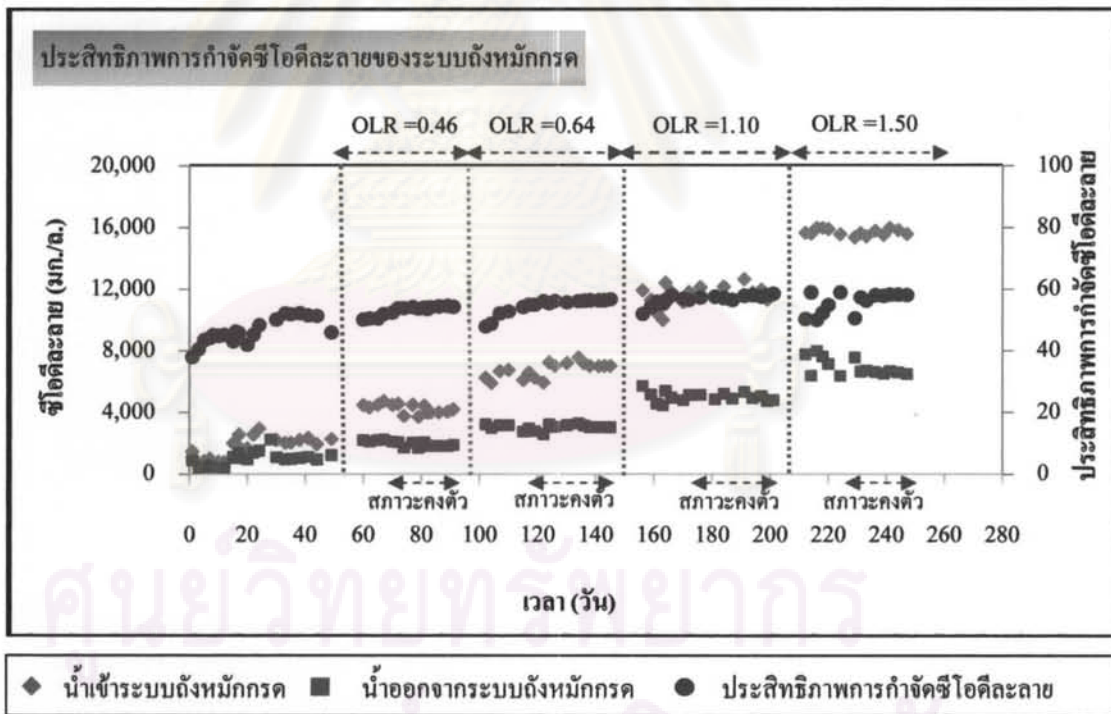
ก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซล รวมทั้งเปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียไบโอดีเซลกับน้ำเสียประเภทต่างๆ

โดยผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังนี้

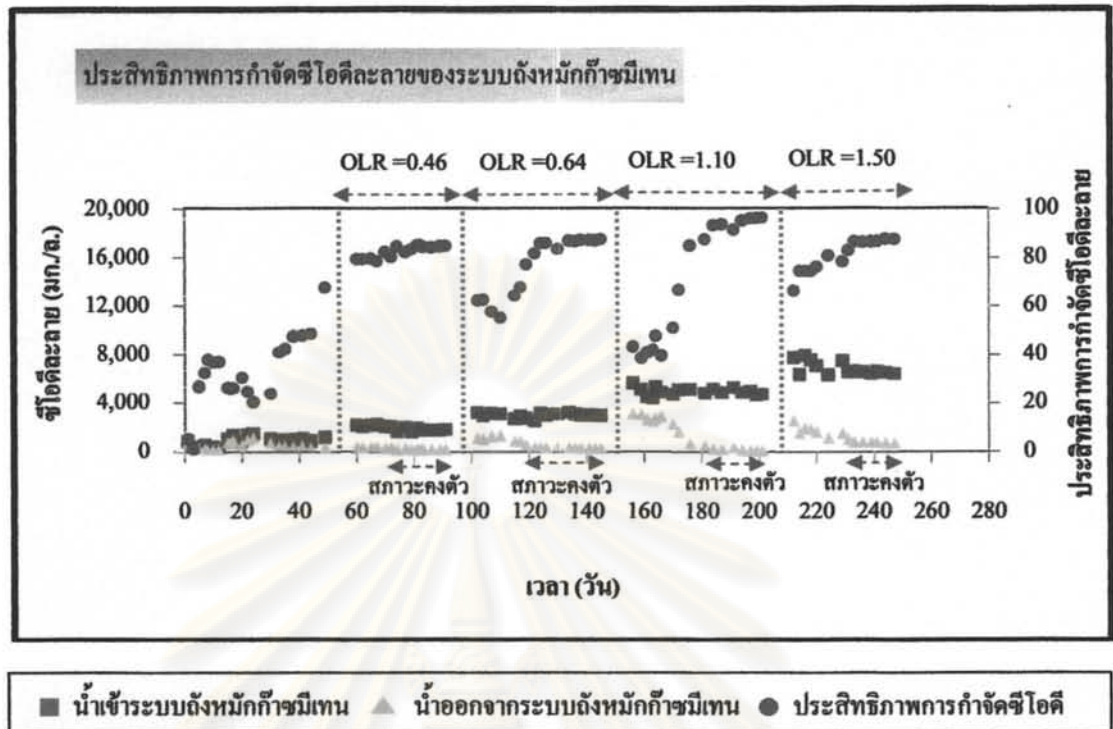
**4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล**

**1) ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดซีไอดีละลาย**

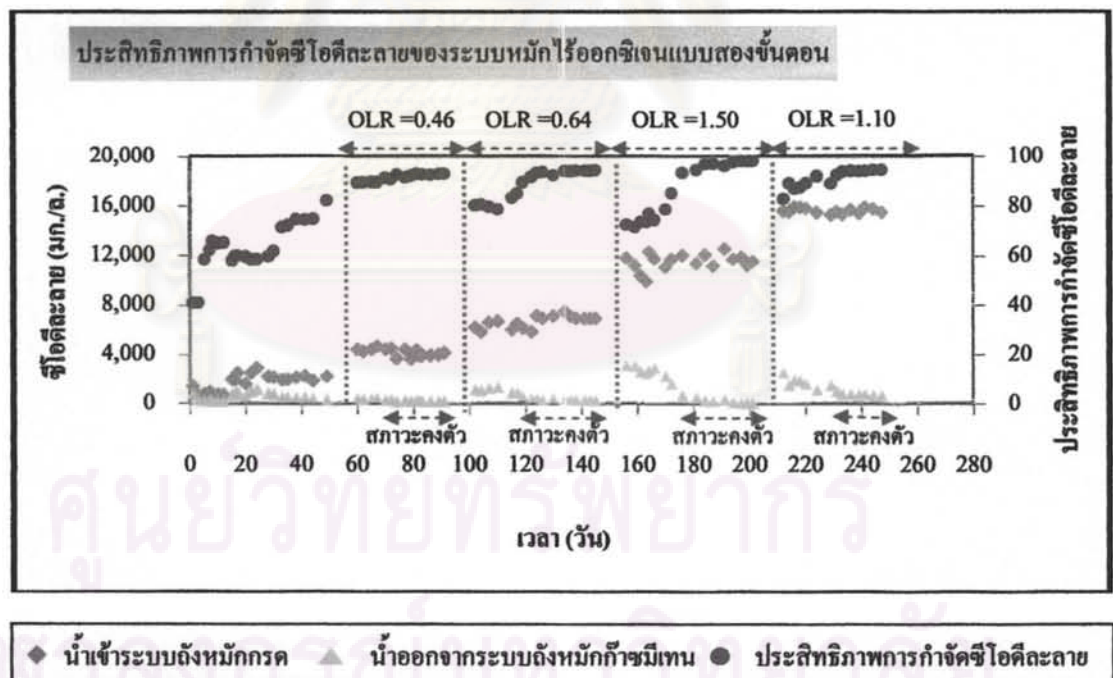
ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลของระบบ โดยค่าซีไอดีสามารถใช้บ่งชี้ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียและภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบทางชีววิทยาได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้คำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป (อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, 2545) โดยผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลายที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดจนการทดลองนี้ ดังภาพที่ 4.3 4.4 และ 4.5



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีละลายของระบบถังหมักกรด



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักก๊าซมีเทน



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.3 4.4 และ 4.5 สรุปได้ว่าตลอดการดำเนินงานวิจัยได้ทดลองแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบทั้งหมดรวม 7 ชุดการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเริ่มต้นเดินระบบ ประกอบไปด้วย 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ การทดลองแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบที่ 1,000 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 0.09 0.18 และ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. ตามลำดับ และช่วงที่สองเป็นการเดินระบบตามแผนการวิจัยที่ได้กำหนด โดยมีทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ การทดลองแปรผันค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบที่ 5,000 7,500 12,000 และ 16,500 มิลลิกรัม/ลิตร หรือที่อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยภาพรวมของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงมาก ซึ่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงกว่าร้อยละ 93.30 ในทุกชุดการทดลอง ยกเว้นในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงกว่าร้อยละ 60.44 โดยพบว่าการเดินระบบที่อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 98.04 และเมื่อเพิ่มอัตราการสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบลดลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.69

ในช่วงแรกของการทดลองพบว่าการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการทดลองช่วงที่สอง เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้นเดินระบบได้ทดลองป้อนน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นซีโอดีต่ำเริ่มต้นที่ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีที่ป้อนเข้าระบบให้สูงขึ้นเป็น 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้กับจุลชีพที่อยู่ภายในระบบ ทำให้จุลชีพสามารถปรับตัวต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) โดยในช่วงของการเลี้ยงจุลชีพ ได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราการสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบอย่างรวดเร็ว ทำให้ระยะเวลาที่กักพักทางจุลชีววิทยาของน้ำเสียในระบบของแต่ละอัตราการสารอินทรีย์น้อยลง ระบบจึงยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบจึงมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ยังมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งมากกว่าร้อยละ 60.44 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนโดยทั่วไป เมื่อจุลชีพสามารถปรับสภาพและคุ้นเคยกับน้ำเสียแล้ว ได้เดินระบบตามแผนงานวิจัยที่ออกแบบไว้ คือเดินระบบที่อัตราการสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ จนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว



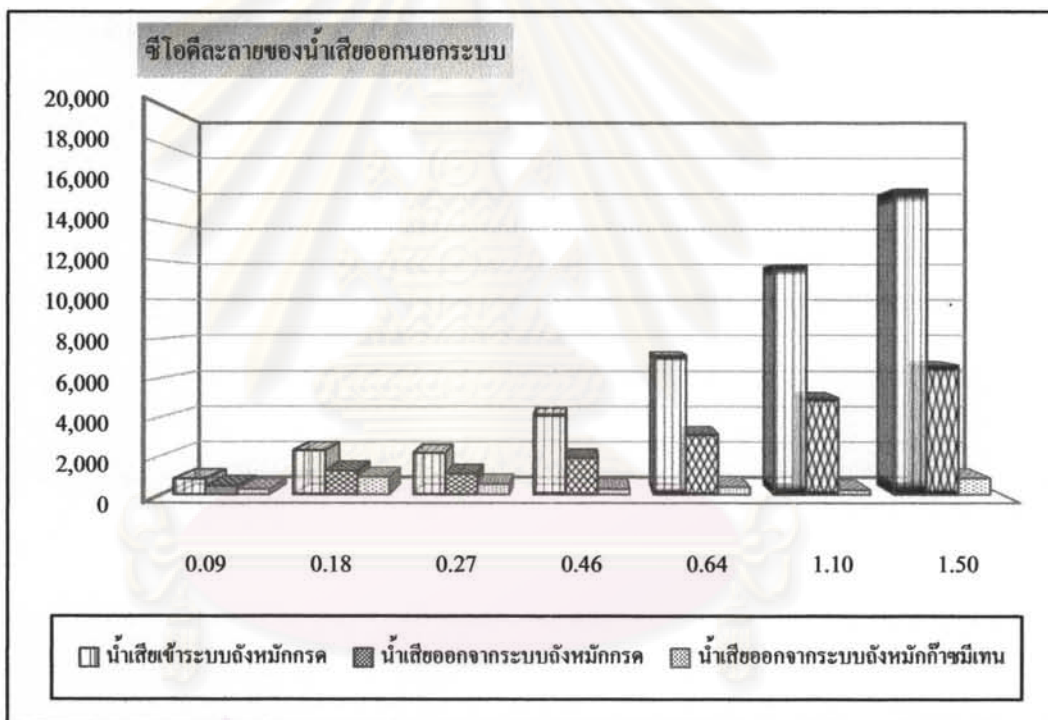
จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบ แสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไปโอดีเซลได้ดี โดยสามารถรับภาระสารอินทรีย์ในอัตราที่สูงได้ตามทฤษฎีของการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนที่สภาวะคงตัวมีค่ามากกว่าร้อยละ 54.23 และร้อยละ 85.36 ตามลำดับ ในทุกชุดของการทดลอง ยกเว้นช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าช่วงอื่น คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนที่สภาวะคงตัวมากกว่าร้อยละ 45.06 และร้อยละ 26.48 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากเหตุผลตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากกราฟพบว่าปริมาณซีโอดีละลายที่ออกจากระบบถังหมักกรดในแต่ละอัตราภาระสารอินทรีย์ มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายมีแนวโน้มใกล้เคียงกันด้วย ซึ่งตรงกับงานวิจัยของฤทธิ์ชัย รัตนมุกดา (2552) ที่ทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเอทานอล โดยระบบยูเอเอสบีสองขั้นตอน ซึ่งใช้ถังสร้างกรดชนิดกวนผสมสมบูรณ์ขนาด 1.70 ลิตร มีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 0.50 วัน ต่ออนุกรมกับถังสร้างก๊าซมีเทนชนิดยูเอเอสบีขนาด 10 ลิตร มีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 2.80 วัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการแปรผันอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 3.80 7.00 10.00 11.70 และ 13.00 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ระบบถังหมักกรดสามารถบำบัดซีโอดีละลายได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 12.00 21.80 21.70 และ 21.40 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าระบบถังหมักกรดของการบำบัดน้ำเสียไปโอดีเซลในงานวิจัยนี้ โดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงมาก แม้ว่าจะมีระยะเวลาพักทางชลศาสตร์เพียง 1 วัน ก็สามารถกำจัดซีโอดีละลายได้มากกว่าร้อยละ 50 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายที่สภาวะคงตัวใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 54.23 ถึง 57.84

โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากระบบถังหมักกรด ไม่สามารถควบคุมให้จุลชีพชนิดสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนแยกชนิดออกจากกันได้อย่างเด็ดขาด จึงทำให้ในระบบถังหมักกรด มีจุลชีพที่สร้างมีเทนบางชนิดอาศัยรวมอยู่ด้วย เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างจุลชีพทั้งสองชนิด โดยจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดไขมันระเหยบางส่วน ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากจุลชีพกลุ่มสร้างกรดให้กลายเป็นก๊าซมีเทน สอดคล้องกับผลการทดลองของร้อยละปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนภายในระบบถังหมักกรดที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 56 ในทุกชุดการทดลอง จึงส่งผลให้ปริมาณซีโอดีละลายภายในระบบลดลงด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการแยกขั้นตอนไม่ได้หมายถึงการแยกกันอย่างเด็ดขาดของ

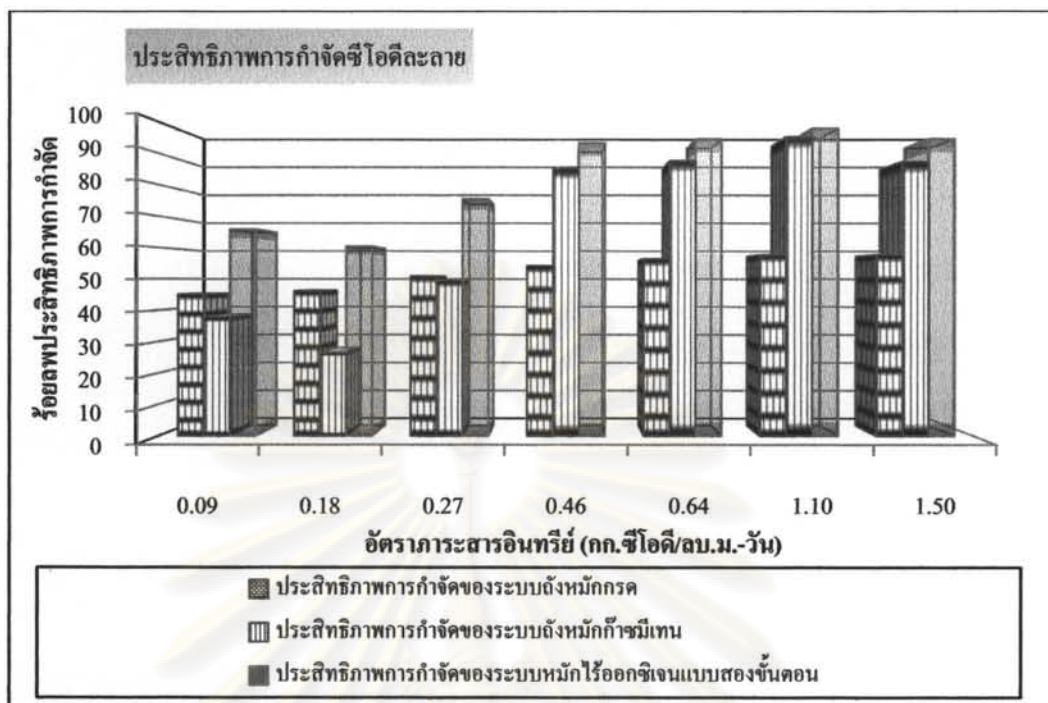
สายพันธุ์ (species) ของจุลชีพสร้างมีเทนทั้งหมดออกจากถังหมักกรด และในทางกลับกันการแยกอย่างสมบูรณ์อาจจะเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น

และเนื่องจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนจะรับน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักกรด ซึ่งสาเหตุที่ถังหมักก๊าซมีเทนสามารถรับอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นได้ เป็นผลมาจากโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่เป็นอันตรายต่อระบบถังสร้างก๊าซมีเทนน้อยลง อีกทั้งน้ำเสียยังถูกย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย เช่น พวกรีดไขมันระเหยโมเลกุลเล็ก ภายในระบบถังหมักกรด ซึ่งสามารถย่อยสลายต่อไปได้อย่างรวดเร็วภายในระบบถังหมักก๊าซมีเทน (Bull และคณะ, 1984 อ้างถึงในฤทธิชัยรัตนมุกดา, 2552) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสรุปค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลาย โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่จุลชีพมีความแข็งแรงสมบูรณ์ สามารถบำบัดน้ำเสียทั้งหมดที่มีอยู่ได้ โดยน้ำเสียจะถูกบำบัดได้อย่างเต็มขีดความสามารถของระบบ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี ส่งผลให้น้ำทิ้งสุดท้ายมีคุณภาพดีและไม่แปรปรวน จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่อัตราการสารอินทรีย์ 0.09 0.18 0.27 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน น้ำเสียเข้าระบบมีปริมาณซีโอดีละลายเท่ากับ 807 2,281 2,150 4,126 7,140 11,776 และ 15,696 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรดมีปริมาณซีโอดีละลายเท่ากับ 444 1,228 1,056 1,888 3,111 4,971 และ 6,617 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาณซีโอดีละลายเท่ากับ 276 902 525 276 385 233 และ 833 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักกรดเท่ากับร้อยละ 45.06 46.19 50.93 54.23 56.43 57.78 และ 57.84 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบถังหมักก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 37.88 26.48 49.60 85.36 87.63 95.36 และ 87.40 ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของทั้งระบบพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 65.87 60.44 75.46 93.30 94.61 98.04 และ 94.69 ตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลาย



ของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราการระสาดอินทรีย์ต่างๆ ดังภาพที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลาย โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราการระสาดอินทรีย์ต่างๆ

ซีโอดีละลายที่จุดเก็บ ตัวอย่างต่างๆ (มก./ล.)	อัตราการระสาดอินทรีย์ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)							
	0.09	0.18	0.27	0.46	0.64	1.10	1.50	0.46-1.50
น้ำเสียเข้าระบบ	807	2,281	2,150	4,126	7,140	11,776	15,696	4,126-15,696
น้ำเสียออกจากระบบ ถึงหมักกรด	444	1,228	1,056	1,888	3,111	4,971	6,617	1,888-6,617
น้ำเสียออกจากระบบ ถึงหมักก๊าซมีเทน	276	902	525	276	385	233	833	276-833
ร้อยละการกำจัดซีโอดี ของระบบถึงหมักกรด	45.06	46.19	50.93	54.23	56.43	57.78	57.84	54.23-57.84
ร้อยละการกำจัดซีโอดีของ ระบบถึงหมักก๊าซมีเทน	37.88	26.48	49.60	85.36	87.63	95.36	87.40	85.36-95.36
ร้อยละการกำจัดซีโอดีของ ระบบหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน	65.87	60.44	75.46	93.30	94.61	98.04	94.69	93.30-98.04

จากภาพที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายที่สภาวะคงตัวของอัตราการระสาดอินทรีย์ต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการระสาดอินทรีย์ 0.09-1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน หากเพิ่มอัตราการระสาดอินทรีย์เข้าสู่ระบบ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มอัตราการระสาดอินทรีย์เข้าระบบเป็นการเพิ่มซับสเตรทให้กับระบบ ซึ่งซับสเตรทดังกล่าวจะเป็นสารอาหารที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของซับสเตรทที่เข้าสู่ระบบจะช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบให้สูงขึ้นด้วย ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถ นำซับสเตรทไปใช้เพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซมีเทน อันเป็นผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนได้มากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายจึงมีค่าสูงขึ้นด้วย ยกเว้นที่

อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลาย ลดลงตามสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนสามารถบำบัด น้ำเสียไบโอดีเซลได้ดีที่สุดที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมี ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลายสูงถึงร้อยละ 98.04 เนื่องมาจากมีหลายปัจจัยที่ช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในน้ำเสีย ได้แก่ ปัจจัยในการเลือกระบบบำบัด โดยระบบหมัก ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนสามารถรับน้ำเสียที่มีอัตราภาระสารอินทรีย์สูงได้ นอกจากนี้การแบ่ง ระบบออกเป็นสองขั้นตอน ยังเป็นการแยกการทำงานของจุลชีพภายในระบบ ทำให้จุลชีพสามารถ ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังได้เลือกใช้ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์เป็น ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถบำบัดซีไอดีละลายได้สูง แม้กระทั่งน้ำเสียที่มีสารพิษ ปนอยู่ (Toxic Wastewater) ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีการกวนอยู่ตลอดเวลา ทำให้เมื่อสารพิษถูก ป้อนเข้าระบบจะถูกเจือจางทันที จึงไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อจุลชีพเหมือนระบบอื่นๆ นอกจากนี้ องค์ประกอบของน้ำเสียที่เข้าระบบก็เป็นสิ่งสำคัญ และเนื่องจากน้ำเสียไบโอดีเซลมีเมทานอลเป็น องค์ประกอบในปริมาณสูง ซึ่งเมทานอลเป็นยับยั้งที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้ง่าย เนื่องจาก เป็นสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ประกอบไปด้วยคาร์บอนเพียง 1 อะตอม อีกทั้งยังเป็นสารอาหารที่จุลชีพ ในกลุ่มสร้างมีเทนบางชนิดสามารถนำไปใช้โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้โดยตรง ทำให้ระบบ สามารถย่อยสลายเมทานอลให้เป็นก๊าซมีเทนได้ดี ระบบจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลายสูง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลายของระบบลดลง เนื่องจากการให้ความเข้มข้นของยับยั้งสารพิษ เข้าระบบมากเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมของกรดโวลาทิล ทำให้จุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนนำ กรดระเหยดังกล่าวไปใช้ไม่ทัน ส่งผลให้ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพที่สร้างก๊าซมีเทนได้ จุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจึงไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้หมด ประสิทธิภาพใน การกำจัดซีไอดีละลายของระบบจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเมทานอลและกลีเซอรอลที่เข้า ระบบมีค่าสูงมากขึ้นจนอาจทำให้ระบบเกิดความเป็นพิษสะสมเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของ น้ำเสียเข้าระบบ ส่งผลให้ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน และอาจเป็น สาเหตุทำให้เกิดการตายของจุลชีพได้

อย่างไรก็ตามแม้ว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีละลายของระบบลดลง แต่สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพใน การกำจัดซีไอดีละลายของระบบถังหมักกรดยังมีค่าใกล้เคียงกับการเดินระบบที่อัตราภาระ สารอินทรีย์ 1.10 กก. ซีไอดี /ลบ.ม.-วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อดีของการเลือกใช้ระบบหมักแบบ ไร้ออกซิเจนที่แยกจุลชีพกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนออกจากกัน โดยจุลชีพกลุ่มสร้าง



กรณีมีความแข็งแรง สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อสภาพความเป็นพิษภายในระบบได้ดีอีกด้วย

## 2) ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอล

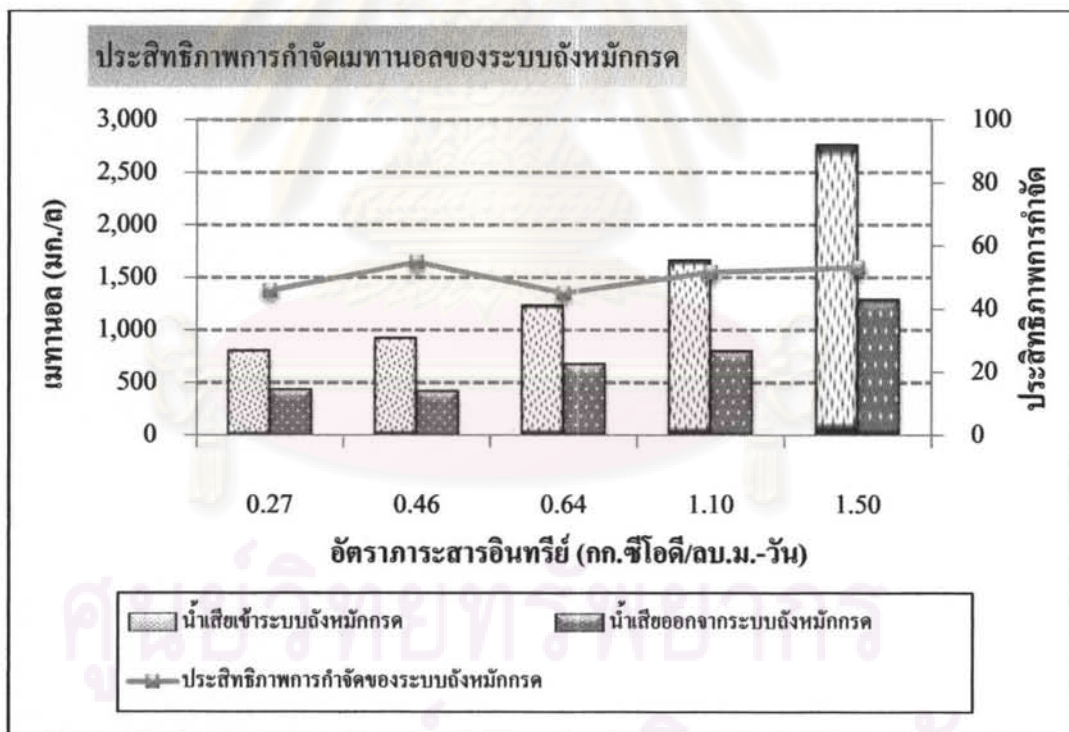
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าค่าเมทานอลของน้ำเสียเข้าระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 809 930 1,240 1,667 และ 2,767 มก./ล. ตามลำดับ ค่าเมทานอลของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักกรดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 438 420 682 806 และ 1,298 มก./ล. ตามลำดับ และค่าเมทานอลของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27 0.46 และ 0.64 พบว่าไม่มีปริมาณเมทานอลเหลืออยู่ในน้ำเสีย ส่วนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ปริมาณเมทานอลของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 80.80 และ 332 มก./ล. ตามลำดับ

โดยพบว่าระบบถึงหมักกรดมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เท่ากับร้อยละ 45.94 54.84 45.03 51.68 และ 53.10 ตามลำดับ และที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27 0.46 และ 0.64 พบว่าระบบถึงหมักก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลได้ทั้งหมด ส่วนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลลดลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 89.97 และ 74.43 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลโดยภาพรวมของทั้งระบบ พบว่าระบบถึงหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลได้สูงมาก ซึ่งที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27 0.46 และ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลได้ทั้งหมด ส่วนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลลดลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.15 และ 88.00 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลได้มากกว่าร้อยละ 88.00

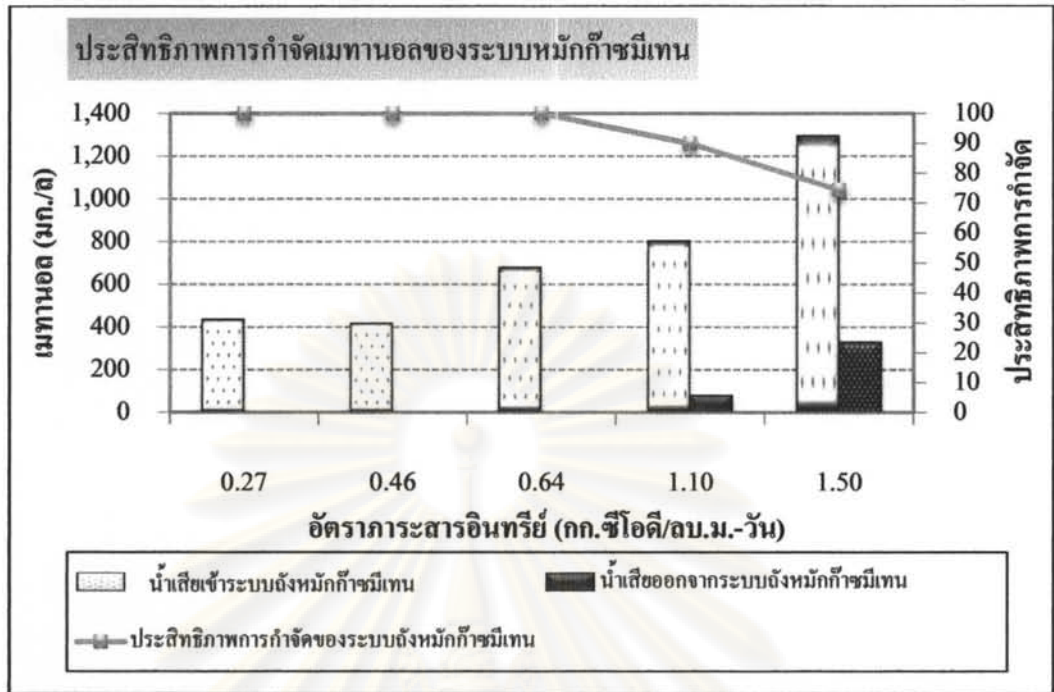


ตารางที่ 4.5 เมทานอลในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตรา  
การสารอินทรีย์ต่างๆ

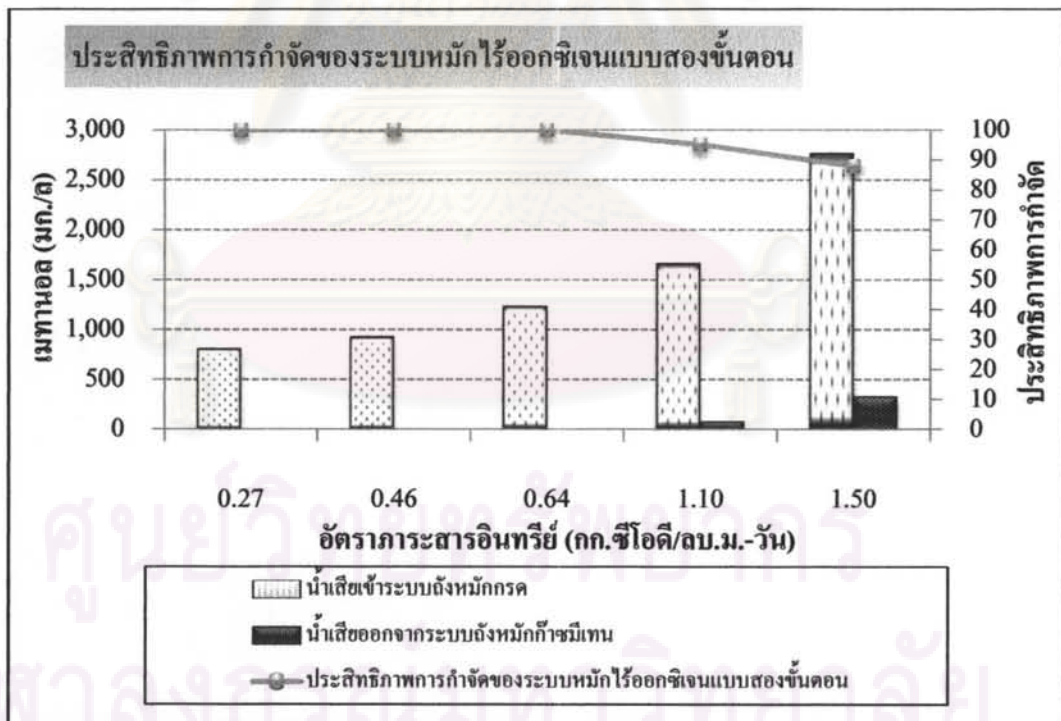
เมทานอลที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (มก./ล.)	อัตราสารอินทรีย์ (กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)				
	0.27	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียเข้าระบบ	809	930	1,240	1,667	2,767
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	438	420	682	806	1,298
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	0	0	0	80.80	332
ร้อยละการกำจัดเมทานอลของระบบถังหมักกรด	45.94	54.84	45.03	51.68	53.10
ร้อยละการกำจัดเมทานอลของระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน	100	100	100	89.97	74.43
ร้อยละการกำจัดเมทานอลของระบบหมัก ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน	100	100	100	95.15	88.00



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบถังหมักกรด

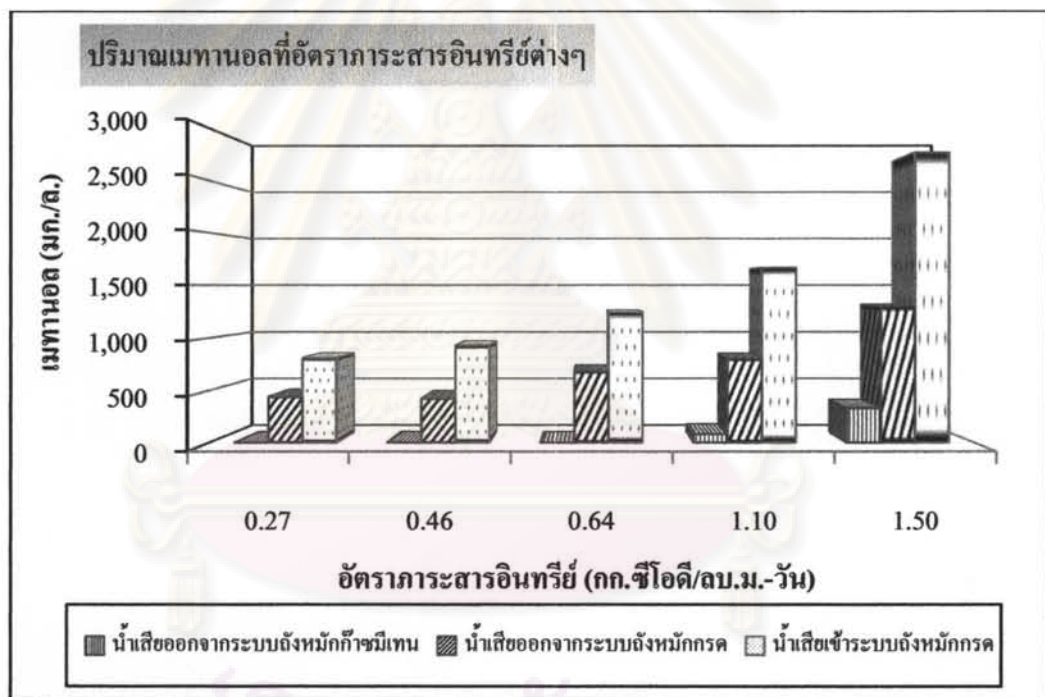


ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบหมักก๊าซมีเทน



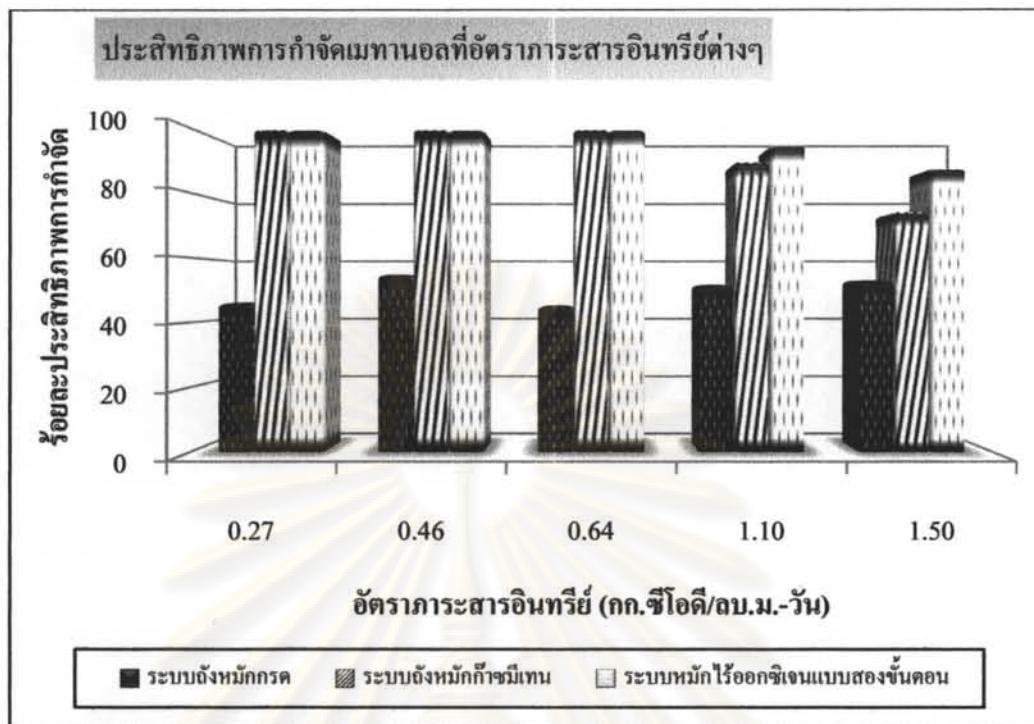
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.8 4.9 และ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลเพิ่มขึ้น ดังสาเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลาย เนื่องจากเมทานอลเป็นสารอาหารที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นสารอาหารที่จุลชีพในกลุ่มที่สร้างมีเทนบางชนิดสามารถนำไปใช้โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้โดยตรง ทำให้ระบบสามารถย่อยสลายเมทานอลให้เป็นก๊าซมีเทนได้ดี ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลสูงมาก โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27 0.46 และ 0.64 พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลได้ทั้งหมด โดยไม่พบปริมาณเมทานอลคงเหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากระบบ ส่วนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของเมทานอลในอัตราภาระสารอินทรีย์ดังกล่าวอยู่ในระดับที่สูงจนอาจส่งผลให้จุลชีพสร้างมีเทนภายในระบบถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้บางส่วน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)



ภาพที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน





ภาพที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดเมทานอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน

### 3) ประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอล

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถกำจัดกลีเซอรอลให้ออกไปจากระบบได้ทั้งหมด

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าค่ากลีเซอรอลของน้ำเสียเข้าระบบที่อัตราสารอินทรีย์ 0.27 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 134 181 578 1,125 และ 2,028 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งที่อัตราสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27 และ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบถังหมักกรด และระบบถังหมักก๊าซมีเทนสามารถกำจัดกลีเซอรอลได้ทั้งหมด และที่อัตราสารอินทรีย์ 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน กลีเซอรอลที่ออกจากระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 84, 669 และ 1,089 มก./ล. ตามลำดับ ของระบบถังหมักกรด และเท่ากับ 48.00 51.00 และ 669 มก./ล. ของระบบถังหมักก๊าซมีเทน

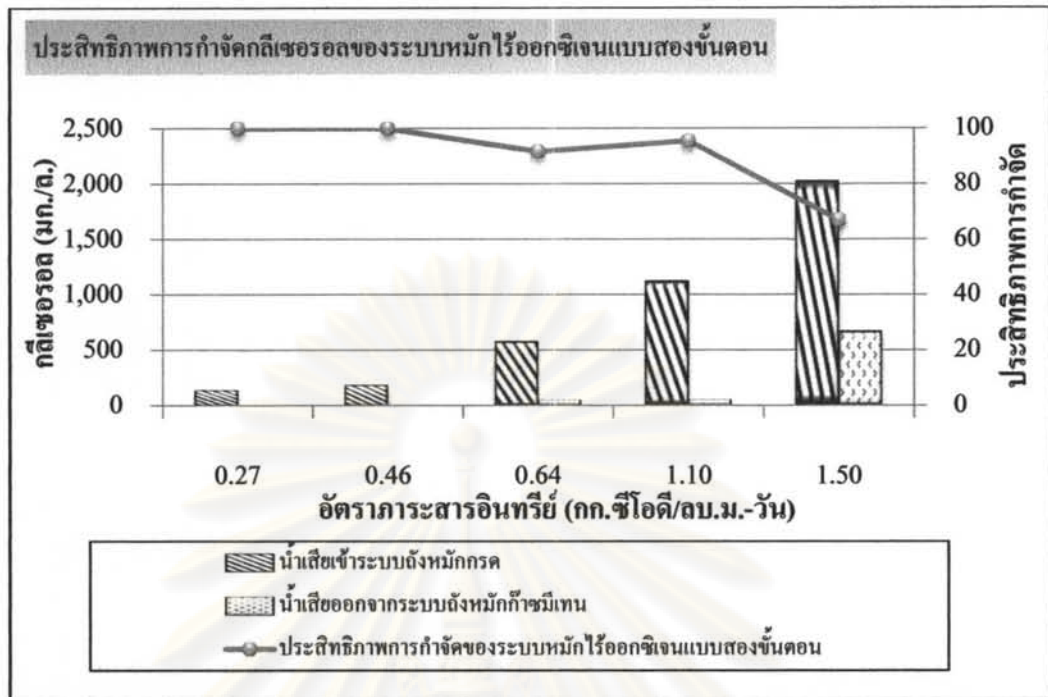
โดยพบว่าถังหมักกรดมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลสูงมาก โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 และ 0.46 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบสามารถกำจัดกลีเซอรอลออกจากน้ำเสียได้ทั้งหมด ส่งผลให้ระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย และที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลเท่ากับร้อยละ 85.46 40.49 และ 46.30 ตามลำดับของระบบถังหมักกรด และเท่ากับร้อยละ 42.98 92.36 และ 38.54 ของระบบถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลสูง โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 และ 0.46 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบสามารถกำจัดเมทานอลออกจากน้ำเสียได้ทั้งหมด แต่ที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลของระบบจะลดลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 91.71 95.45 และ 66.99 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 กลีเซอรอลในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

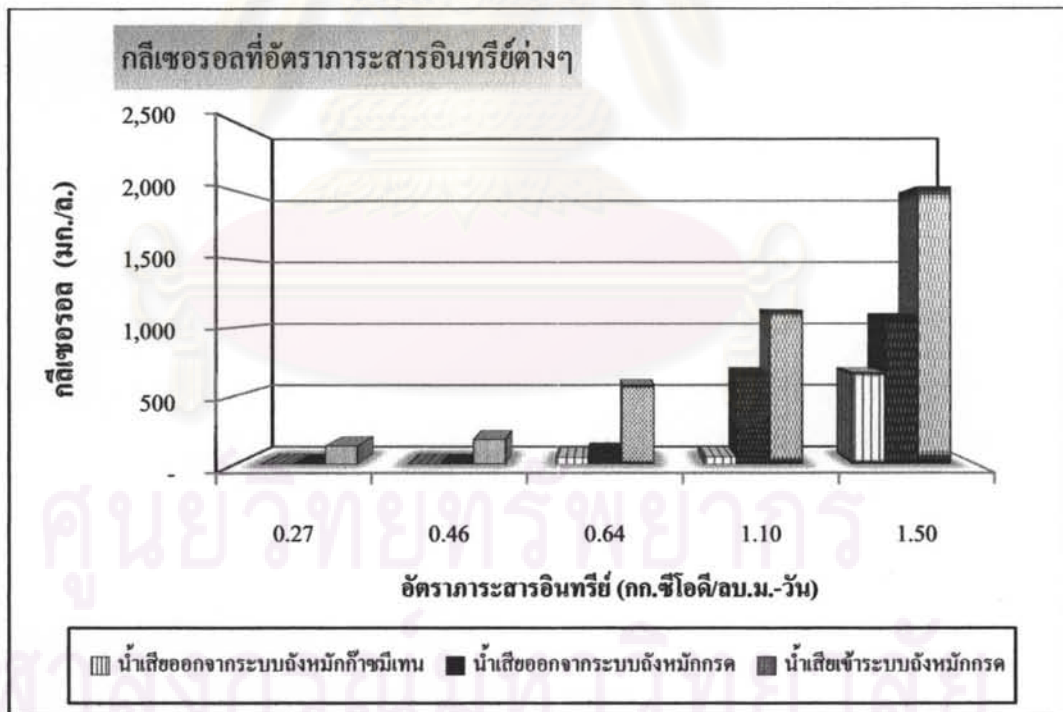
กลีเซอรอลที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (มก./ล.)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)				
	0.27	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียเข้าระบบ	134	181	578	1,125	2,028
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	0	0	84	669	1,089
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	0	0	48	51	669
ร้อยละการกำจัดกลีเซอรอลของระบบถังหมักกรด	100	100	85.46	40.49	46.30
ร้อยละการกำจัดกลีเซอรอลของระบบถังหมักก๊าซมีเทน	-	-	42.98	92.36	38.54
ร้อยละการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน	100	100	91.71	95.45	66.99



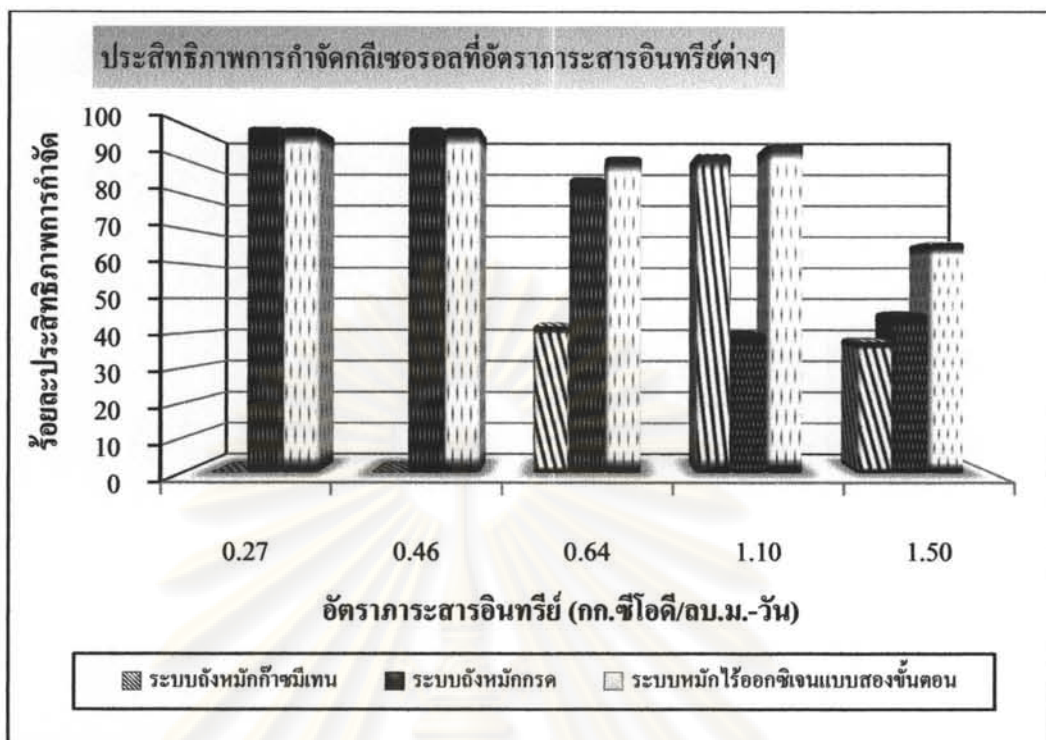




ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



ภาพที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



ภาพที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.17 พบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.27-1.10 เมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบให้สูงขึ้น ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27 และ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลได้ทั้งหมด โดยไม่พบปริมาณกลีเซอรอลคงเหลืออยู่ในน้ำออกจากระบบ และเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์สูงขึ้นเท่ากับ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดกลีเซอรอลมีแนวโน้มลดต่ำลง

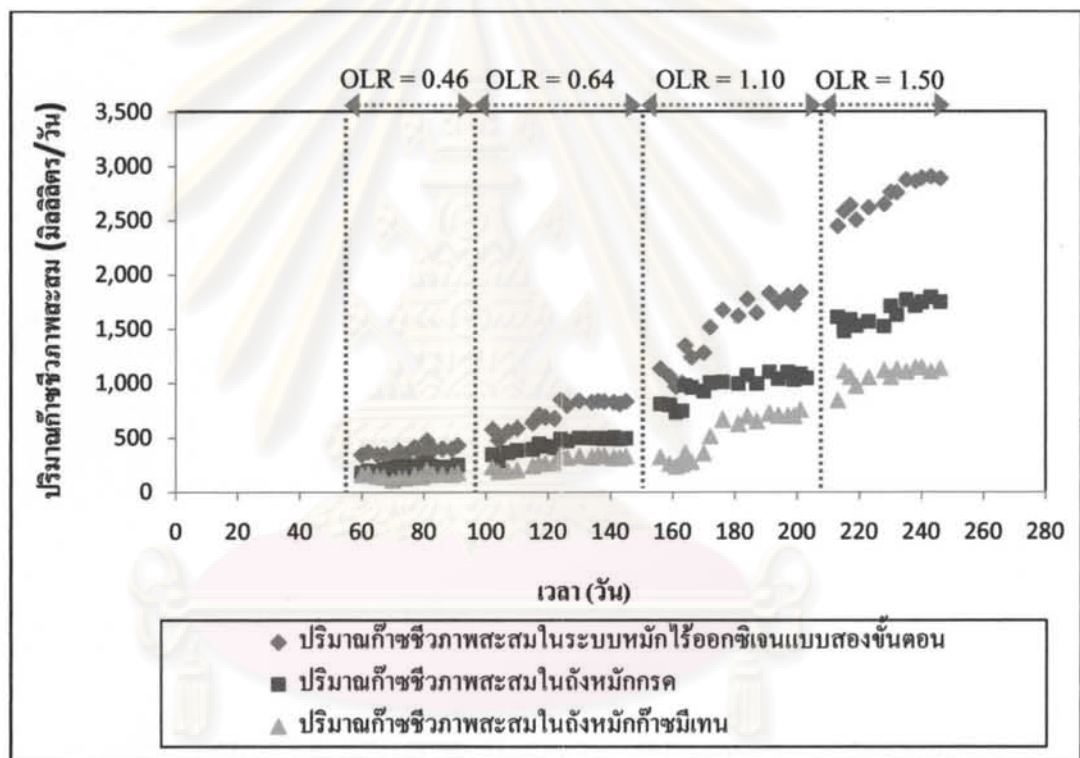
โดยผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ito และคณะ (2005) ซึ่งได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและเอทานอลจากกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่าผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและเอทานอลจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนและเอทานอลระหว่างกรณีที่ใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นเกรดทางการค้า และกรณีที่ใช้กลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนในกรณีที่ใช้กลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะต่ำกว่าในกรณีที่ใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งได้มีการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลขั้นต้นโดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับกลีเซอรอลในระดับหนึ่ง

ดังนั้นที่ความเข้มข้นไม่สูงจุลชีพจึงเกิดการย่อยสลายกลีเซอรอลได้ดีมาก เนื่องจากกลีเซอรอลในน้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนที่จุลชีพสามารถนำไปใช้สร้างพลังงานและเจริญเติบโตได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลให้สูงขึ้นที่อัตราการระเหยอินทรีย์เท่ากับ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วันพบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายกลีเซอรอลลดลงต่ำสุด เนื่องจากความเป็นพิษของกลีเซอรอลไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ

#### 4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไปโอดีเซล

ประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไปโอดีเซลพบว่ามีความโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการระเหยอินทรีย์ ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

โดยพบว่าที่อัตราการระเหยอินทรีย์เท่ากับ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 0.40 0.80 1.74 และ 2.82 ล./วัน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 66 69 64 และ 63 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นตามอัตราการระเหยอินทรีย์เท่ากับ 0.243



0.499 1.081 และ 1.743 ล./วัน โดยสามารถคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 0.209 0.245 0.303 0.385 และ 0.138 0.168 0.195 และ 0.244 ล./ก.ชีโอดีที่ถูกกำจัดตามลำดับ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราการระสาดอินทรีย์ต่างๆ

อัตราการระสาดอินทรีย์ (กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	อัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	ร้อยละปริมาณ ก๊าซมีเทน	ปริมาณก๊าซชีวภาพ ต่อชีโอดีที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)	ปริมาณก๊าซมีเทน ต่อชีโอดีที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)
0.46	0.40	65.88	0.21	0.14
0.64	0.80	68.58	0.25	0.17
1.10	1.74	64.32	0.30	0.20
1.50	2.82	63.32	0.39	0.24

จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการระสาดอินทรีย์เพิ่มขึ้น อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน หากกระบวนการย่อยสลายซับซ้อนเกินไปจนสิ้นสุดกระบวนการแล้ว ซับสเตรดที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน โดยจุลินทรีย์จะนำเอาสารอาหารที่ได้จากซับสเตรดมาใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการระสาดอินทรีย์ จะทำให้ปริมาณซับสเตรดที่เข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ แต่เนื่องจากการวัดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเป็นเพียงการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบในแต่ละวัน โดยมิได้คำนึงถึงปริมาณซับสเตรดในระบบที่ถูกใช้ไป ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าแท้จริงแล้วซับสเตรดได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพในปริมาณที่มากหรือน้อยเพียงใด

ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยเกี่ยวกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบบำบัดไร้ออกซิเจนของน้ำเสียชนิดอื่นๆ อีกหลายชนิด เช่น การบำบัดน้ำเสียในโตรเบนซิน น้ำเสียจากการผลิตยาแผนจีน น้ำเสียพาราโนโตรฟินอล น้ำเสียซูโครส เป็นต้น ซึ่งต่างพบว่าเมื่ออัตราการระสาดอินทรีย์หรือความเข้มข้นของซับสเตรดเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น (Kuscu และ Sponza, 2006; Kuscu และ Sponza, 2009; Liu และคณะ, 2009)

### 4.3.3 สภาพะการทำงานจากระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพที่อาศัยปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน เป็นระบบที่ต้องการการติดตามดูแลอย่างใกล้ชิดมากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้ ออกซิเจน ลักษณะทางจุลชีววิทยาของระบบย่อยไร้ออกซิเจน ทำให้ระบบมีเสถียรภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่อาจทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ ด้วยเหตุนี้การควบคุมระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน จึงต้องมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นสัญญาณเตือนเหตุล้มเหลวต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) พีเอช

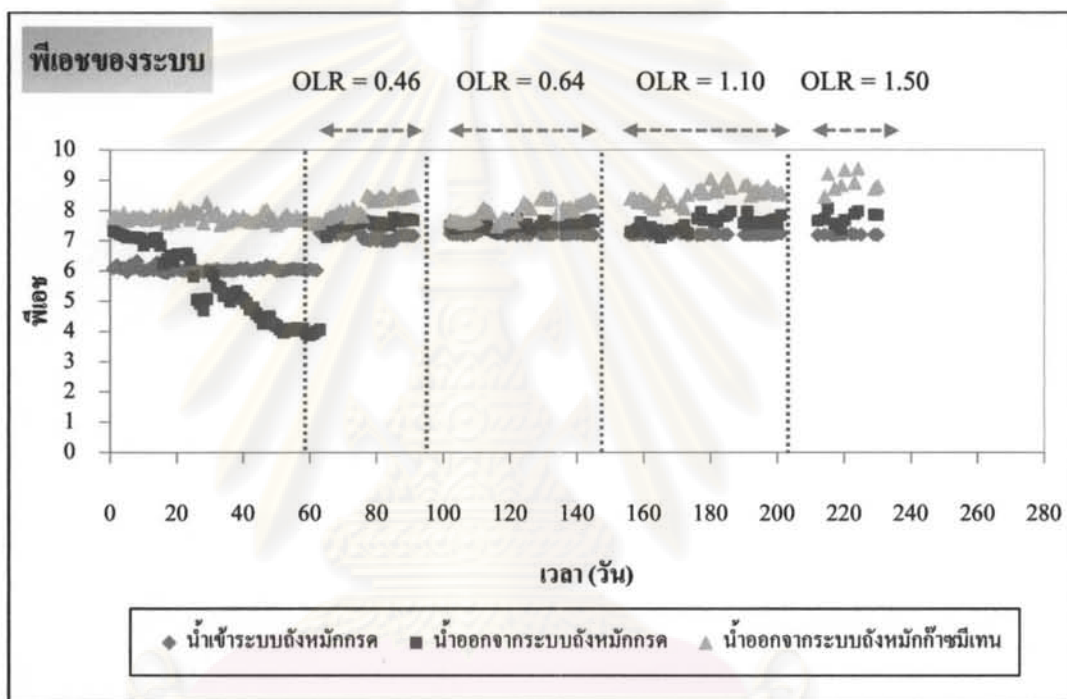
พีเอชเป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถบ่งชี้สภาพของกระบวนการการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนได้ แต่การเปลี่ยนแปลงพีเอช เนื่องจากการเพิ่มของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Acids) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชซ้ำ ดังนั้นค่าพีเอชจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ช้า สำหรับการแก้ไขสถานะในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของกรดไขมันระเหยง่าย อย่างไรก็ตามพีเอชยังเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการควบคุมระบบ ดังนั้นในการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนจึงต้องมีการควบคุมให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงของการทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยพีเอชในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สถานะคงตัวของอัตราสารอินทรีย์ต่างๆ

พีเอชที่จุดเก็บตัวอย่างต่าง ๆ	อัตราสารอินทรีย์ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียเข้าระบบ	7.18	7.22	7.23	7.21
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	7.69	7.61	7.69	7.74
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	8.46	8.17	8.74	8.75

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบที่อัตราสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.18 7.22 7.23 และ 7.21 ตามลำดับ ค่าพีเอชของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรดในแต่ละชุดการทดลอง

มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 7.69 7.61 7.69 และ 7.74 ตามลำดับ และค่าพีเอชของน้ำเสีย ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นเท่ากับ 8.46 8.17 8.74 และ 8.75 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 8.17-8.75 ตลอดการทดลอง ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน โดยทั่วไปจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ดีที่ค่าพีเอช 6.80-9.20 (จิรวรรณ ออคยะกุล, 2549) โดยแนวโน้มของค่าพีเอชในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลด้วยระบบ หมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดการทดลอง ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 พีเอชของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากการทดลองเนื่องจากน้ำเสียดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีค่าพีเอชเป็นกรด ประมาณ 3.56 ดังนั้นหลังจากเจือจางน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบจะต้องปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่า เป็นกลาง จากภาพที่ 4.19 จะเห็นว่าในช่วง 60 วันแรกของการทดลองเริ่มต้นเดินระบบได้กำหนดให้ พีเอชของน้ำเสียเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 6 และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบ ค่าพีเอช ของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดมีแนวโน้มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนมีพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 ส่วนค่า พีเอชของน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซมีเทนพบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 7.00 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วน ระหว่างค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมดในระบบถังหมักก๊าซมีเทนหลังวันที่

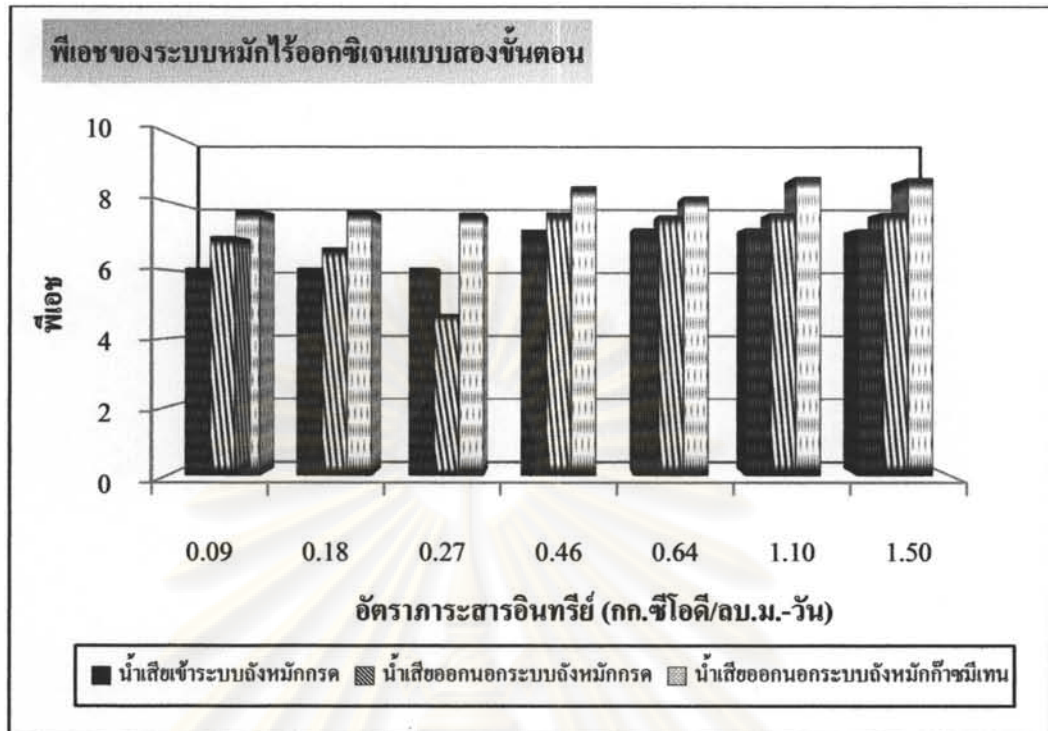


60 ของการเดินระบบพบว่ามีความโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.50 ซึ่งอาจทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะล้มเหลวได้ ดังที่กล่าวในหัวข้ออัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค้างทั้งหมด ดังนั้นหลังจากเดินระบบประมาณ 60 วัน จึงได้ปรับเพิ่มค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 7.20 ตลอดจนการทดลองโดยเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้เกินพิกัดระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบให้อยู่ประมาณ 7.20 ตลอดจนการทดลองพบว่าพีเอชของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักกรดมีแนวโน้มอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 7.61-7.74 แม้ว่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบถึงหมักกรดจะมีค่าเป็นกลาง แต่จากผลการทดลองพบว่าระบบถึงหมักกรดสามารถสร้างกรดไขมันระเหยได้ดี ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อกรดไขมันระเหย โดยพบว่ากรดไขมันระเหยมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าในระบบถึงหมักกรดมีการแยกการทำงานของจุลชีพที่สร้างกรดอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตาม วิธีการแยกขั้นตอนไม่ได้หมายถึงการแยกกันอย่างเด็ดขาดของสายพันธุ์ (Species) ของจุลชีพสร้างมีเทนทั้งหมดออกจากถึงหมักกรด ในทางกลับกันการแยกอย่างสมบูรณ์อาจเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น (สมชาย เขียวศรีสกุล, 2530) อย่างไรก็ตามค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถึงหมักกรดมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างกรด เนื่องจากจุลชีพกลุ่มสร้างกรด (Acidogens) สามารถทำงานได้ดีที่พีเอชอยู่ในช่วง 5.00-8.00

นอกจากนี้ยังพบว่าแม้กรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่ออกจากระบบถึงกรดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับระบบทำให้สภาพค้างทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อสภาพค้างทั้งหมด ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้พีเอชของน้ำเสียออกนอกระบบถึงหมักกรดสูงขึ้นตามไปด้วย โดยได้เปรียบเทียบค่าพีเอชในการบำบัดน้ำเสียไปโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ดังภาพที่ 4.20

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยพีเอชของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดและน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนที่สภาวะคงตัว พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน มีค่าสูงกว่าระบบถังหมักกรดในทุกชุดการทดลอง เนื่องจากน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงเป็นกลางและมีกำลังบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ ซึ่งนับว่าเป็นการปรับสภาพน้ำเสียให้มีความเหมาะสมต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนที่อยู่ภายในระบบถังหมักก๊าซมีเทน เนื่องจากจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนสามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ดีที่ค่าพีเอช 6.80-9.20 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ด้วยเหตุนี้ น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนจึงมีค่าพีเอชสูงกว่าพีเอชของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด โดยเห็นได้จากสภาพความเป็นต่างของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดซึ่งมีสภาวะที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการทำงานของจุลชีพในระบบถังหมักก๊าซมีเทนจนระบบเกิดความสมดุล ทำให้สภาพต่างของระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงตามไปด้วย ส่งผลพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงกว่าระบบถังหมักกรด

แม้ว่าพีเอชจะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถแสดงถึงการทำงานที่ล้มเหลวได้ทันทีแต่อย่างไรก็ตาม ค่าพีเอชยังคงมีความสำคัญ เช่น เมื่อเกิดการเสียสมดุลระหว่างจุลชีพที่ผลิตกรดกับจุลชีพที่ผลิตมีเทนและระบบเริ่มล้มเหลวหรือด้อยประสิทธิภาพ ค่าพีเอชจะลดต่ำลงมาก การแก้ไข

ให้ระบบพื้นตัวต้องควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมด้วย ดังนั้นค่าพีเอชยังคงใช้ในการควบคุมการทำงานและการตรวจสอบระบบร่วมกับพารามิเตอร์อื่นๆ

## 2) คุณภูมิของระบบ

คุณภูมิของระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญซึ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมภายในระบบ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพเป็นอย่างมาก สำหรับประเทศไทยคุณภูมิของน้ำเสียส่วนมากอยู่ในช่วง 28-33 องศาเซลเซียส และในถึงปฏิบัติการคุณภูมิจะสูงขึ้นอีกประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส

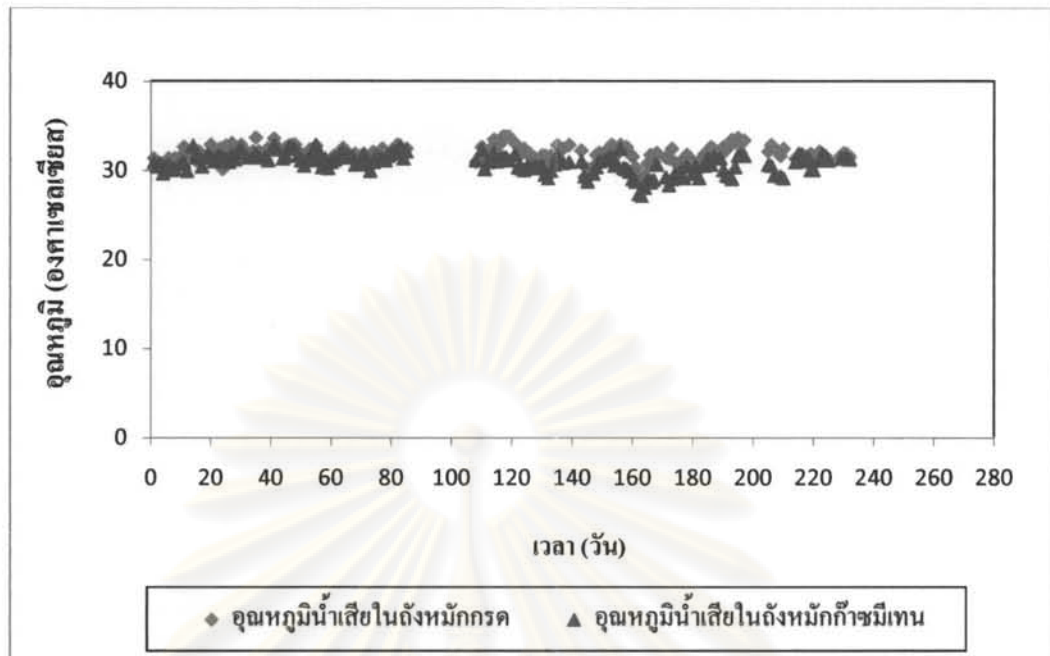
**ตารางที่ 4.9** ค่าเฉลี่ยคุณภูมิในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราการสลายสารอินทรีย์ต่างๆ

คุณภูมิที่จุดเก็บตัวอย่าง (องศาเซลเซียส)	อัตราการสลายสารอินทรีย์ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	0.46	0.64	1.10	1.50
คุณภูมิน้ำเข้าระบบ	28.45	28.00	27.98	28.20
ภายในระบบถึงหมักกรด	31.68	31.68	32.06	31.61
ภายในระบบถึงหมักก๊าซมีเทน	30.50	30.50	29.86	31.16

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าคุณภูมิในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราการสลายสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าคุณภูมิของน้ำเสียเข้าระบบที่อัตราการสลายสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.45 28.00 27.98 และ 28.20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าคุณภูมิของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักกรดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.68 31.68 32.06 และ 31.61 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าคุณภูมิของน้ำเสียออกจากระบบถึงหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.50 30.50 29.86 และ 31.16 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยแสดงค่าคุณภูมิในระบบถึงหมักกรดและระบบถึงหมักก๊าซมีเทน ดังภาพที่ 4.21

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 4.21 อุณหภูมิของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าอุณหภูมิกายในระบบถังหมักกรดและภายในระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิกายในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิกายในถังสร้างกรดเล็กน้อย ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องในขณะที่ทำการเดินระบบ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิจึงของน้ำเสียดังกล่าวในถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าไม่ได้มีผลมากนักต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ เนื่องจากระบบยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูง จึงไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ และอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน โดยมีอุณหภูมิจึงในช่วงมีโซฟิลิก คือ ช่วงที่มีอุณหภูมิจึงประมาณ 25-40 องศาเซลเซียส (Ahring และคณะ, 2003)

### 3) กรดไขมันระเหย

ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีความสำคัญมาก เพราะกรดไขมันระเหยเป็นสับสเตรทหลักของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน อีกทั้งยังเป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่สามารถบ่งชี้สภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียได้ ถ้าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าต่ำแสดงว่าระบบมีความสมดุลและสามารถทำงานได้ดี ดังนั้นในการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนจึงต้องมีการควบคุมให้ค่ากรดไขมันระเหยอยู่ในช่วงของการทำงานที่เหมาะสม เพื่อรักษาประสิทธิภาพของระบบให้สามารถทำการบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

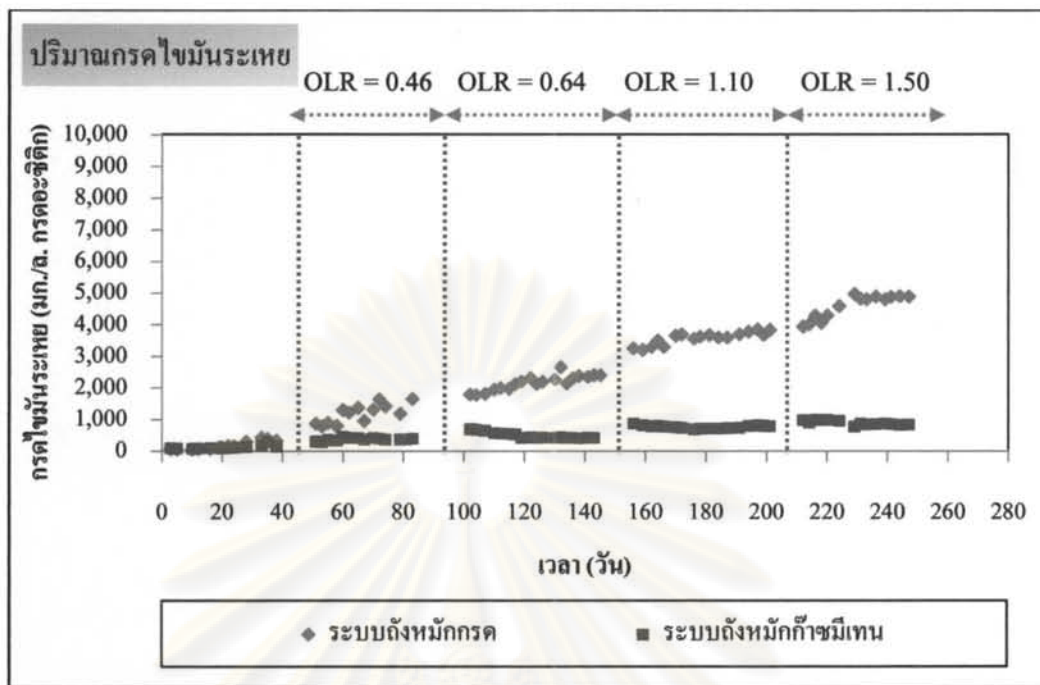
จากตารางที่ 4.10 พบว่ากรดไขมันระเหยของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรดใน แต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,418 2,378 3,332 และ 4,978 มก./ล. กรดอะซิติก ตามลำดับ และกรดไขมันระเหยของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 379 414 798 และ 784 มก./ล. กรดอะซิติก ตามลำดับ

โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนควรมีปริมาณกรดไขมันระเหยในรูป ของกรดอะซิติกประมาณ 50-500 มก./ล. หากมีค่ามากกว่า 2,000 มก./ล. จะทำให้อัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพลดลงและถ้ามีค่าตั้งแต่ 8,000-10,000 มก./ล. ขึ้นไป จะเป็นพิษต่อจุลชีพโดยตรง ทำให้ พีเอชมีค่าต่ำและยับยั้งการทำงานของจุลชีพสร้างมีเทน ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหย ของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าไม่สูงมากนัก แม้จะไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด แต่ระบบยังคงสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งดูได้จากประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดีละลายที่สูงถึงร้อยละ 98.04 ในชุดการทดลองที่ได้กำหนดไว้ โดยแสดงแนวโน้ม ของกรดไขมันระเหยในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราการระเหยสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ดังภาพที่ 4.22

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของ อัตราการระเหยสารอินทรีย์ต่างๆ

กรดไขมันระเหยที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (มก./ล. กรดอะซิติก)	อัตราการระเหยสารอินทรีย์ต่างๆ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	1,418	2,378	3,332	4,978
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	379	414	798	784

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



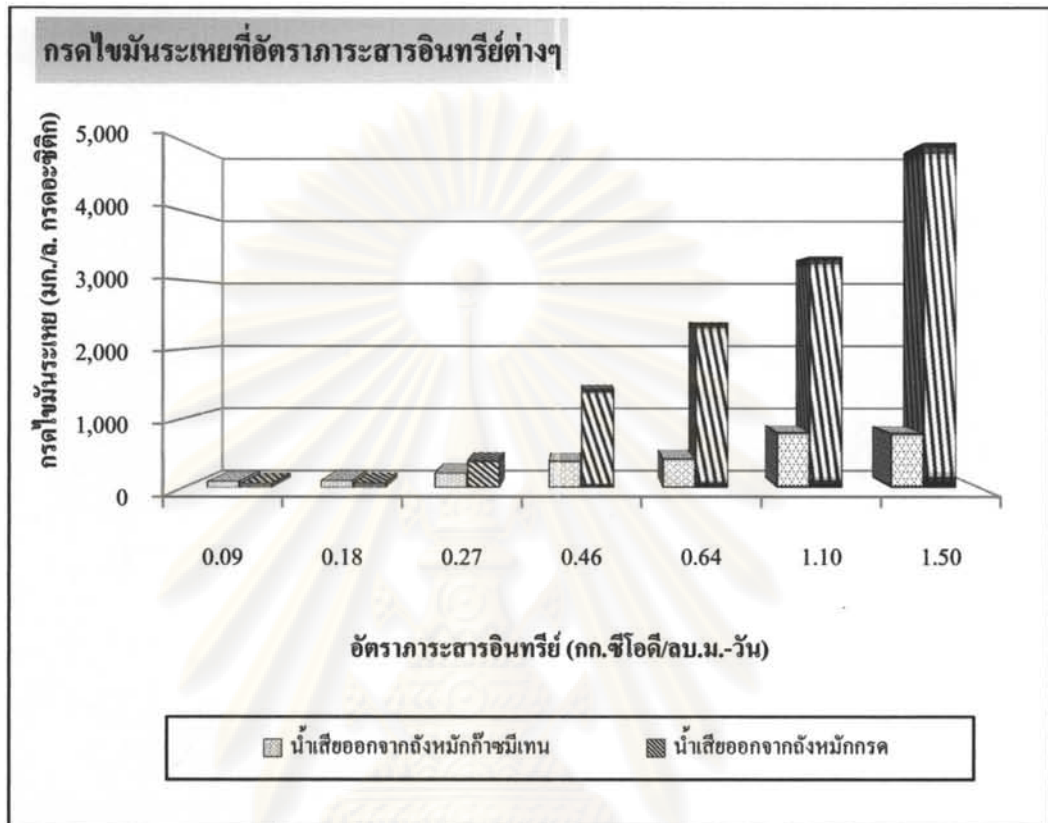
ภาพที่ 4.22 กรดไขมันระเหยของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.22 พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง ขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในระบบถังหมักกรดมีการควบคุมสภาวะการทำงานให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างกรด ซึ่งในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกลไกการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในระบบถังหมักกรด จุลชีพชนิดสร้างกรดจะผลิตกรดไขมันระเหยขึ้น โดยดูดซึมผลผลิตที่ได้จากขั้นตอนการไฮโดรไลซิสเข้าไปภายในเซลล์เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย ทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักกรดเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย ปริมาณของกรดไขมันระเหยจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกอัตราภาระสารอินทรีย์

นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลงในทุกอัตราภาระสารอินทรีย์ เนื่องจากในถังหมักก๊าซมีเทนมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน โดยจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจะย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้กรดไขมันระเหยที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรด เป็นสารอาหารหลักและผลิตเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนต่อไป ส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลง โดยเปรียบเทียบ



กรดไขมันระเหยในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

#### 4) สภาพด่างทั้งหมด

ค่าสภาพด่างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้กำลังบัฟเฟอร์ (buffering capacity) ของระบบ ซึ่งสภาพด่างทั้งหมดในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต โดยจะทำหน้าที่ในการสะเทินคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดไขมันระเหยเพื่อให้พีเอชเป็นกลาง สภาพด่างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์สำคัญ ที่ใช้บ่งชี้สภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย ถ้าปริมาณสภาพด่างทั้งหมดมีค่ามากเพียงพอต่อปริมาณการเกิดกรดไขมันระเหย จะทำให้ระบบเกิดความสมดุลและสามารถทำงานได้ดี ดังนั้นในการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน จึงต้องมีการควบคุมให้ค่ากรดไขมันระเหยอยู่ในช่วงของการทำงานที่เหมาะสม เพื่อรักษาประสิทธิภาพของระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

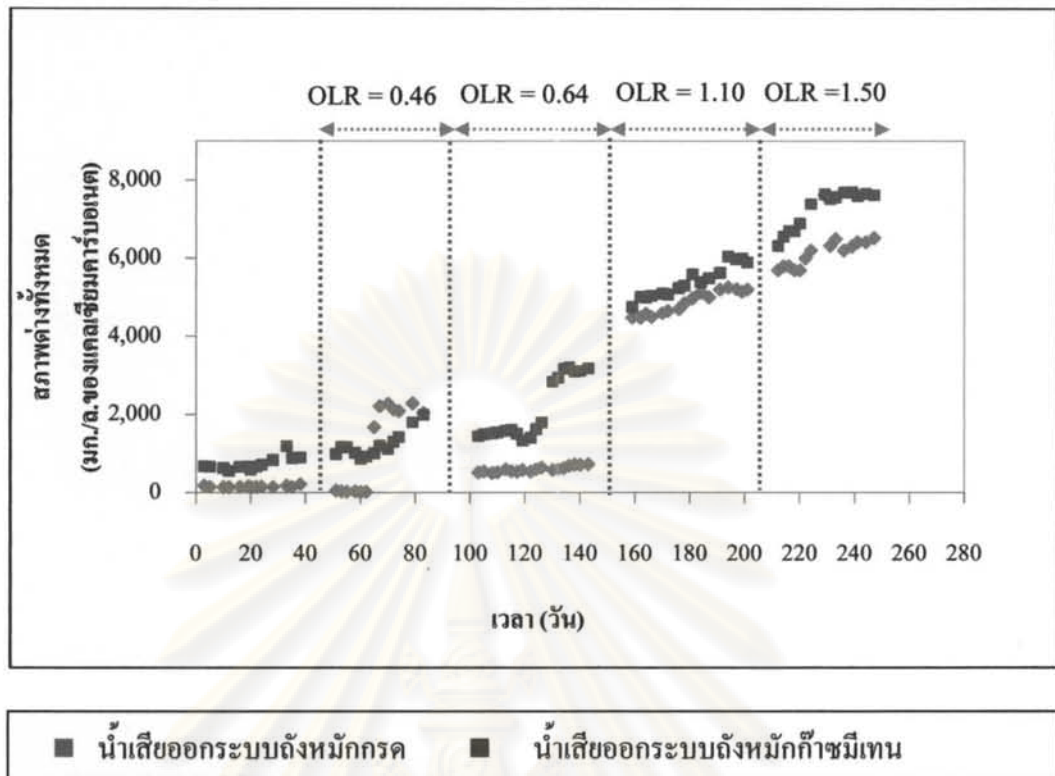
ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยสภาพค่างทั้งหมดในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่สภาวะคงตัวของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)	อัตราภาระสารอินทรีย์ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	2,143	719	5,188	6,380
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	1,745	3,137	5,958	7,643

จากตารางที่ 4.11 พบว่าสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,143 719 5,188 และ 6,380 มก./ล. (ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนต) และค่าสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,745 3,137 5,958 และ 7,643 มก./ล. (ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนต) โดยจะเห็นว่าค่าสภาพค่างทั้งหมดของน้ำทิ้งออกนอกระบบมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนทั่วๆ ไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 2,000-4,000 มก./ล. (ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนต) (Metcalf และ Eddy, 2003) อย่างไรก็ตามแม้ค่าสภาพค่างทั้งหมดของระบบจะสูงเกินกว่าช่วงที่กำหนด แต่ระบบก็ยังสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยดูจากประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายและร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน

ปริมาณสภาพค่างเท่าไรที่ทำให้ระบบมีกำลังบำบัดเหมาะสมนั้นกำหนดให้ตายตัวได้ยาก เพราะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสที่จะผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก เป็นผลให้ความต้องการสภาพค่างทั้งหมดของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นได้ (มันสิน ดัชนีกุลเวศม์, 2542) โดยแนวโน้มของค่าสภาพค่างทั้งหมดในการบำบัดน้ำเสียไป โอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ดังภาพที่ 4.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



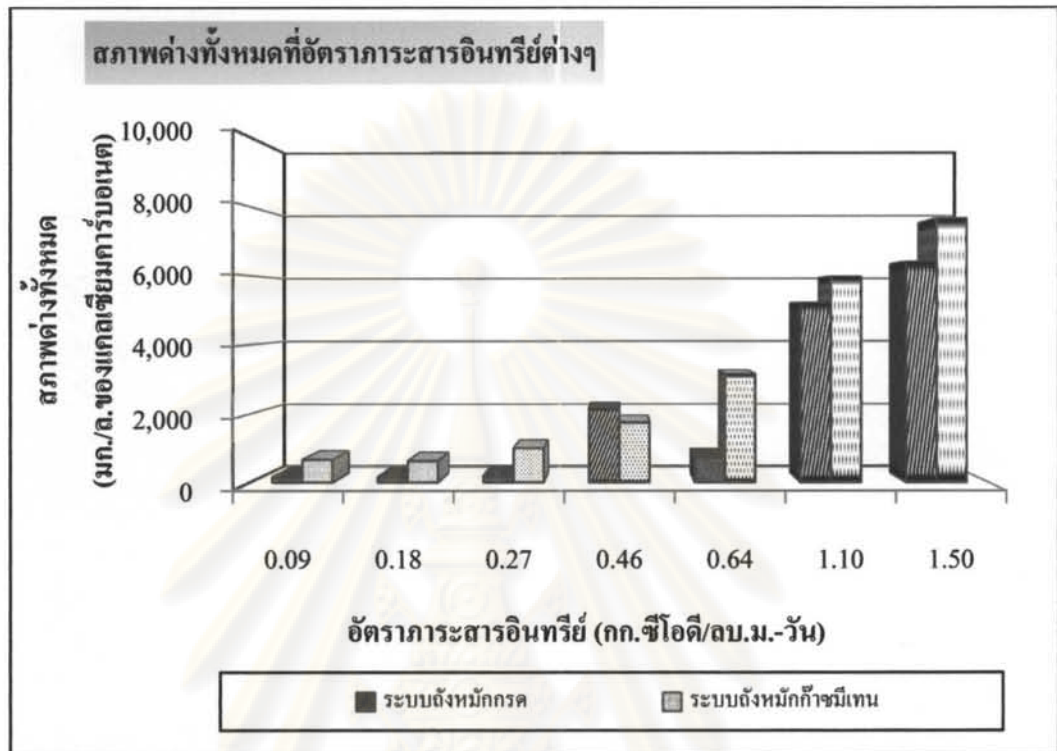
ภาพที่ 4.24 สภาพค่างทั้งหมดในระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.24 พบว่าปริมาณสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียออกระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกชุดการทดลองตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองป้อนน้ำเสียเข้าระบบ โดยค่อยๆ เพิ่มค่าความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 60 พบว่าสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียที่ออกระบบถังหมักกรดและระบบถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลงมาก จนส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดมีค่าเกินกว่า 0.5 ซึ่งหากมีสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังเข้าสู่สภาวะล้มเหลว ดังนั้นหลังจากวันที่ 60 จึงได้เติมบัฟเฟอร์ซึ่งได้แก่โซเดียมไบคาร์บอเนตในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อปรับสภาพน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบ โดยให้พีเอชของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.2 เพื่อรักษาสภาพค่างของระบบให้มีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้ระบบเกิดความสมดุล สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ถ้าหากกำลังบัฟเฟอร์ในระบบต่ำ ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงได้มากและรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีสภาพค่างสูงพอ ระบบจะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดโวลาทิลได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อพีเอชมากนัก (มันสิน ดันจุลเวศม์, 2542) โดยได้เปรียบเทียบสภาพค่างทั้งหมด



ในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราการระสาดอินทรีย์ต่างๆ ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยสภาพต่างทั้งหมดของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.25 พบว่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นซีไอดีของน้ำเสียที่เข้าระบบ เนื่องจากการเติมบัพเฟอร์ให้กับน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบทำให้สภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากถังหมักกรดและน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการระสาดอินทรีย์ด้วยเช่นเดียวกัน

โดยสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซมีเทน มีค่าสูงกว่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากถังหมักกรด เนื่องจากกรดไขมันระเหยซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากระบบถังหมักกรดได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนเมื่อผ่านระบบถังหมักก๊าซมีเทน ทำให้สภาพต่างที่ถูกนำไปใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยลดลง นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากน้ำเสียไบโอดีเซลที่ป้อนเข้าระบบมีสบู่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสารนี้จัดเป็นสารที่เมื่อเกิดการเมทาบอลิซึมแล้ว จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสภาพต่างทั้งหมดในระบบได้ (Speece, 1996) ซึ่งค่าสภาพต่างทั้งหมดจะช่วยด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ดังนั้นจึงต้องมีเพียงพอเพื่อรักษาพีเอชในระบบ

### 5) อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด

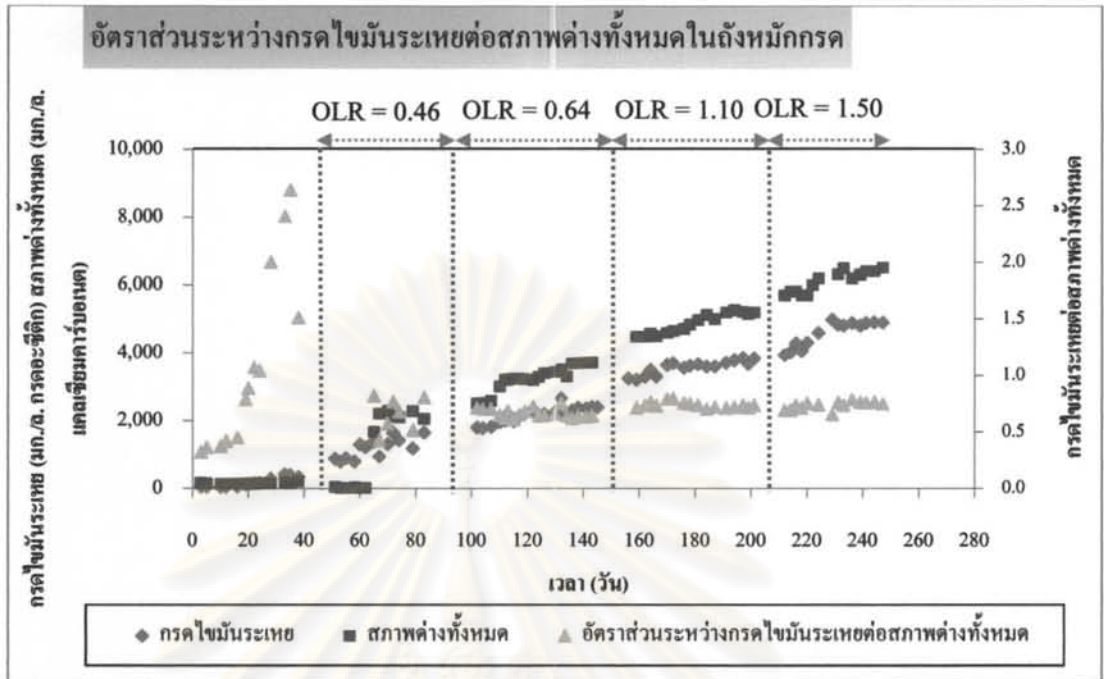
อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดเป็นค่าที่แสดงถึงความสมดุลและเสถียรภาพของระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งหากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัพเฟอร์สูง แสดงว่าระบบสามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง แต่หากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดมีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบขาดความเสถียรภาพ จนเข้าสู่สภาวะล้มเหลวได้ (Metcalf และ Eddy, 2003)

ตารางที่ 4.12 อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

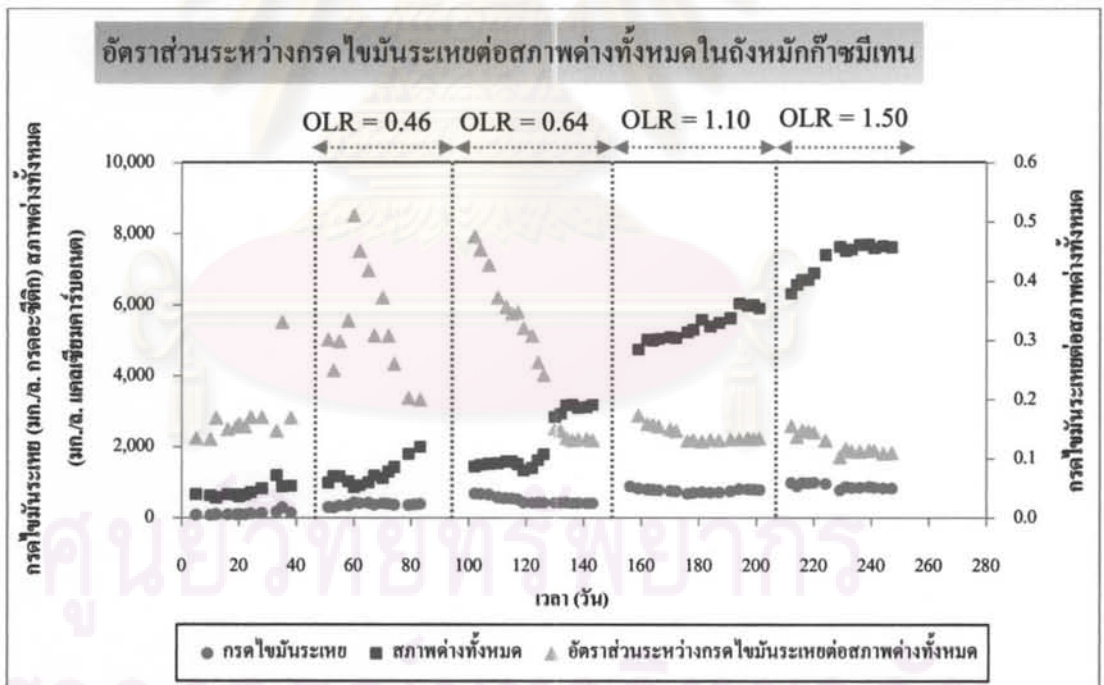
กรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด	อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	0.46	0.64	1.10	1.50
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด	0.66	0.66	0.64	0.76
น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน	0.21	0.13	0.13	0.11

จากตารางที่ 4.12 สรุปได้ว่าในทุกอัตราภาระสารอินทรีย์ อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน มีค่าต่ำกว่า 0.8 โดยอยู่ในช่วง 0.13-0.21 แสดงว่าระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง

โดยพบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 0.64 1.10 และ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.66 0.66 0.64 และ 0.76 ตามลำดับ และอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของน้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.21 0.13 0.13 และ 0.11 ตามลำดับ โดยแนวโน้มของอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมด ในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ดังภาพที่ 4.26 และ 4.27



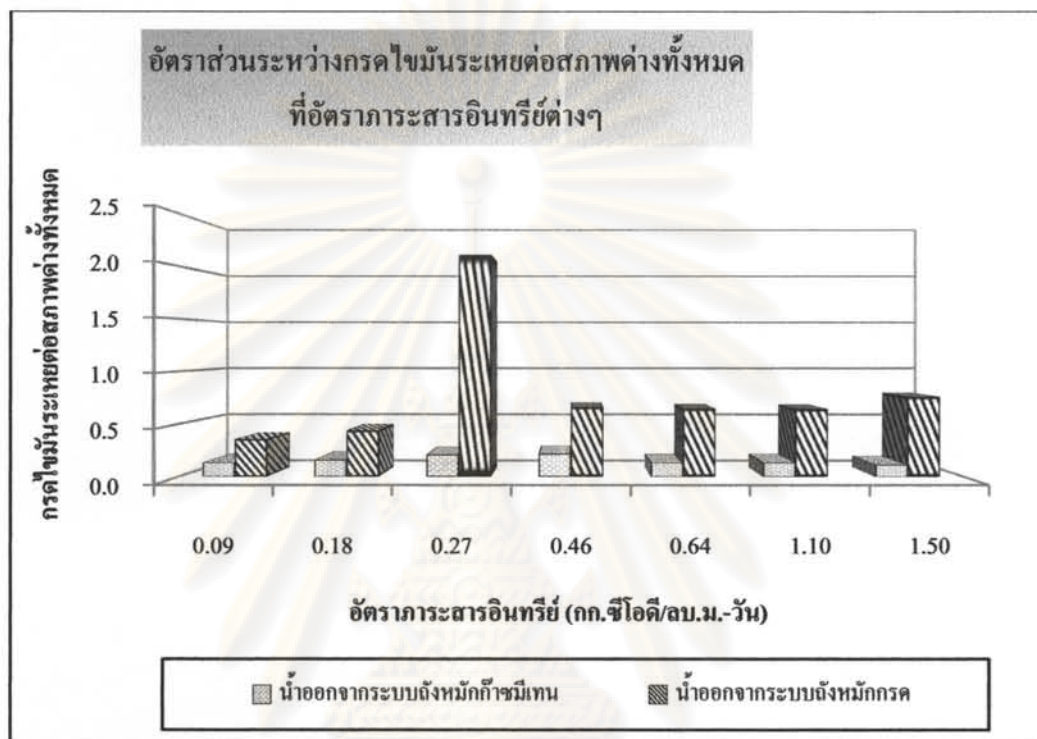
ภาพที่ 4.26 อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของระบบถังหมักกรด



ภาพที่ 4.27 อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของระบบถังหมักก๊าซมีเทน



นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังหมักกรดมีค่าสูงมาก เนื่องจากระบบถังหมักกรดเป็นระบบที่สร้างกรดไขมันระเหย จึงมีการสะสมของกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดมีค่าสูงตามไปด้วย



ภาพที่ 4.28 อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด  
ของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากภาพที่ 4.28 เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่สภาวะคงตัวของอัตราการสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดในระบบถังหมักกรดมีค่าสูงมากกว่า 0.4 เนื่องจากได้มีการแบ่งระบบบำบัดออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการสร้างกรดไขมันระเหยจากจุลชีพกลุ่มสร้างกรดที่อยู่ภายในถังหมักกรด ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการสร้างก๊าซมีเทนจากจุลชีพกลุ่มที่สร้างมีเทน ทำให้ในถังหมักกรดเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย โดยไม่มีการนำไปของจุลชีพสร้างมีเทน ทำให้กรดไขมันระเหยมีค่าสูงมากกว่าสภาพต่างทั้งหมด อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดจึงมีค่าสูงมาก

ส่วนค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดของน้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.4 เนื่องจากค่ากรดไขมันระเหยที่เกิดสะสมอยู่ในระบบถังหมักกรด ถูกนำไปใช้โดยจุลชีพสร้างมีเทนที่อยู่ถังสร้างก๊าซมีเทนอย่างสมดุล จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูง จากผลการทดลองแสดงว่าระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน จึงทำให้ระบบเกิดความสมดุลและสามารถทำงานได้ดี ดังนั้นในการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนจึงต้องมีการควบคุมให้อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดอยู่ในช่วงของการทำงานที่เหมาะสม เพื่อรักษาประสิทธิภาพของระบบให้สามารถทำการบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียประเภทต่างๆ (Cavaleiro และคณะ, 2008)

ประเภทน้ำเสีย	ประเภทระบบ	เวลากักพัก ชลศาสตร์ (วัน)	อัตราภาระ สารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ปริมาณก๊าซมีเทน ต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด (ล./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด)	อ้างอิง
น้ำเสียไอศกรีม	UASB	1.6	2.2	0.19	Hawkes และคณะ (1995)
น้ำเสียน้ำมันปาล์ม	MABR	3-10	1.6-5.3	0.32-0.42	Faisal และ Unno (2001)
น้ำเสียน้ำมันจาก เมล็ดทานตะวัน	UASB	2-2.8	1.6-7.8	0.16-0.35	Saatci และคณะ (2001)
น้ำเสียฟาร์มปศุสัตว์	UASB	0.3-0.1	13-30	0.20-0.28	Torkian และคณะ (2003)
น้ำเสียไบโอดีเซล	ABR	10	0.5-3.0	0.12-0.28	คารินทร์ ภูกิจงาม (2551)
น้ำเสียไบโอดีเซล	2-Stage	11	0.46-1.50	0.14-0.24	งานวิจัยนี้

จากตารางที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบสัณยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของระบบหมัก  
ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนแบบอื่นพบว่าระบบมี  
สัณยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ โดยมี  
ความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.14-0.24 ล./ก. ซี ไอดีที่ถูกลำจัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ประกอบไปด้วยระบบถังหมักกรดต่ออนุกรมกับระบบถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งมีระยะเวลาพักพักทางชีวศาสตร์ของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนเท่ากับ 1 วัน และ 10 วัน ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1) ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลสูง โดยเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.46 ถึง 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 93.30-98.04 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอลและกลีเซอรอลเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 88-100 และ 67-100

2) ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูง โดยพบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด และปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.21-0.39 และ 0.14-0.25 ล./ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ โดยมีก๊าซมีเทนเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 63.32-68.88

3) อัตราภาระสารอินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยพบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46-1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของระบบลดลงเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.46-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และร้อยละปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน

4) ที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 98 โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงสุดเท่ากับ 0.30 และ 0.20 ล./ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงถึงร้อยละ 64.32

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลต้องมีการเติมสารต่าง เพื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่เพียงพอให้แก่ระบบ เพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด จึงควรรักษาผลของการหมุนเวียนน้ำเสียภายในระบบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี

2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซล โดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ควรมีการศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการเดินระบบเพิ่มเติม เช่น ศึกษาชนิดของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นภายในระบบ ศึกษาผลของเวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบเพื่อหาระยะเวลาที่กักพักทางจุลชีวศาสตร์ที่เหมาะสม ที่สามารถกำจัดมลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอาจลดระยะเวลาที่กักพักทางจุลชีวศาสตร์ของระบบซึ่งส่งผลให้สามารถลดขนาดของถังปฏิกรณ์ และสามารถลดค่าใช้จ่าย ลดพื้นที่ในการก่อสร้างระบบได้

3) ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพและพัฒนาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพ ควบคุมดูแลง่าย และมีราคาถูกในระดับชุมชนและในระดับอุตสาหกรรมที่กำลังจะขยายตัวในอนาคตต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกียรติพงษ์ เจริญสุข. 2546. การกำจัดน้ำมันสำหรับน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย. เล่ม 4. (ม.ป.ท.).
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2547. การออกแบบโรงบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. นนทบุรี: เอส. อาร์. พรินติ้งแมสโปรดักส์.
- คณะกรรมการพลังงาน. 2545. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล. กรุงเทพมหานคร: แปลนพริ้นท์ติ้ง.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2537. คู่มือเล่มที่ 2 สำหรับผู้ออกแบบและผู้ผลิตระบบบำบัดน้ำเสียแบบอยู่กับที่. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2545. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2552. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว. แหล่งที่มา: [www.pcd.go.th](http://www.pcd.go.th) [15 กรกฎาคม 2552].
- จิรวรรณ ออดยะกุล. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คารินทร์ ภู่งงาม. 2551. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บริษัทบีเอ็นบี อินเตอร์กรุ๊ป จำกัด. 2550. ไบโอดีเซล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [www.bnbintergroup.co.th](http://www.bnbintergroup.co.th) [15 มีนาคม 2552].
- ปิ่นภัทร เจริญสาคร. 2549. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2549. โครงการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลใน กทม. และเชียงใหม่ (เฟส 2) (ที่ปรึกษาเพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียพร้อมอุปกรณ์ประกอบ). กรุงเทพมหานคร: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์.

มันติน ดันทุลเวสม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: แชน. อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์.

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

ฤทธิชัย รัตนมุกดา. 2552. การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเอทานอลโดยระบบยูเอสบีสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์. 2550. ไบโอดีเซลและพลังงานทางเลือก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทมิตรภาพการพิมพ์และสตีลดีโอ จำกัด.

สมชาย เจียรธีรสกุล. 2530. การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. การลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีกับ โพลีเมอร์ลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัญชลี ศรีรังสรรค์. 2551. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรทัย ชวลาภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฑทอง.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาษาอังกฤษ

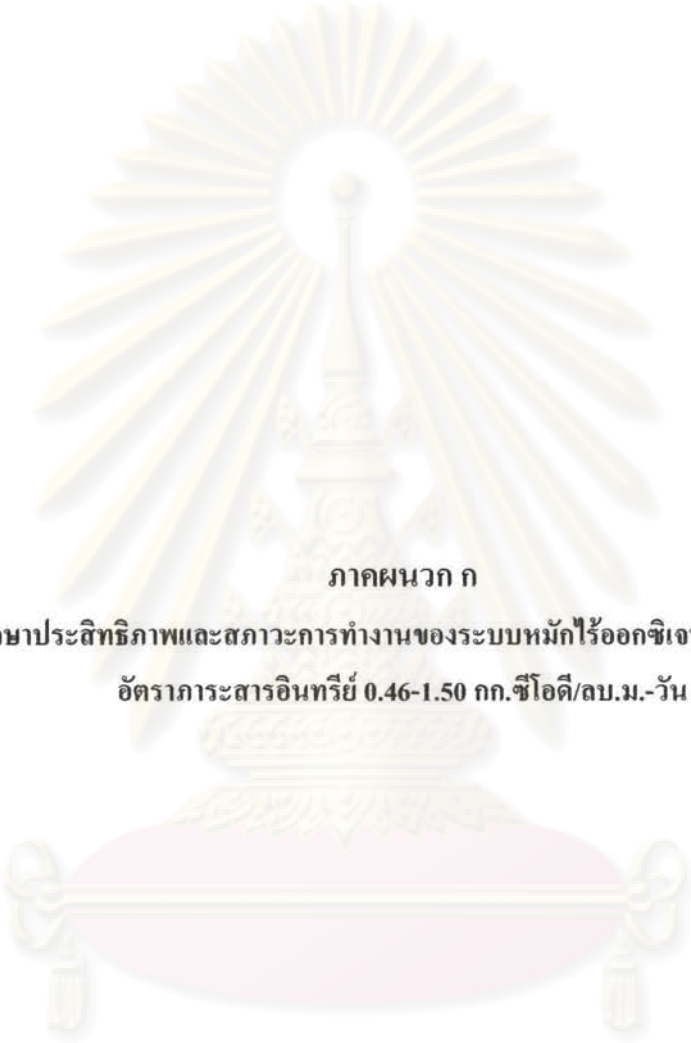
- Ahring, B.K. 2003. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology 81 Biomethanation I. Berlin: Springer.
- Ahring, B.K. 2003. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology 82 Biomethanation II. Berlin: Springer.
- Al-Widyan, M.I. and Al-Shyoukh, A.O. 2002. Experimental evaluation of tranesterification of waste palm oil into biodiesel. Bioresource Technology 85: 253-256.
- Al-Shamrania, A.A., Jamesa, A. and Xiaob, H. 2002. Destabilisation of Oil–Water Emulsions and Separation by Dissolved Air Flotation. Water Research 36: 1503–1512.
- Cavaleiro, A.J., Pereira, M.A. and Alves, M. 2008. Enhancement of methane production from long chain fatty acid based effluents. Bioresource Technology 99: 4086-4095.
- Chu, C. F., Li, Y. Y., Xu, K. Q., Ebie, Y., Inamori, Y. and Kong, H. N. 2008. A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. Int. J. Hydrogen Energy 33: 4739–4746.
- Eckenfelder, W.W. 2000. Industral water pollution control, 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Faisal, M. and Unno, H. 2001. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. Biochemical Engineering Journal 9: 25-31.
- Gerardi, M. H. 2003. The microbiology of anaerobic digesters. New Jersey: John Wiley & Son.
- Hawkes, F., Donnelly, T. and Anderson, G. 1995. Comparative performance of anaerobic digesters operating on ice-cream wastewater. Water Res 2: 525-533.
- Ito, T., Nakashimada, Y., Senba, K., Matsui, T., and Nishio, N. 2005. Hydrogen and Ethanol production from glycerol-containing waste discharged after biodiesel manufacturing process. Journal of Bioscience and Bioengineering 100: 260-265.
- Kuscu, O. S. and Sponza, D. T. 2006. Treatment efficiencies of a sequential anaerobic baffled reactor (ABR)/completely stirred tank reactor (CSTR) system at increasing *p*-nitrophenol and COD loading rates. Process Biochemistry 41: 1484-1492.
- Kuscu, O. S. and Sponza, D. T. 2009. Effect of nitrobenzene concentration and hydraulic retention time on the treatment of nitrobenzene in sequential anaerobic baffled reactor (ABR)/continuously stirred tank reactor (CSTR) system. Bioresource Technology 100: 2162-2170.

- Lee, D.Y., Ebie, Y., Xu, K.Q., Li, Y. Y. and Inamori, Y. 2009. Continuous H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production from high-solid food waste in the two-stage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. Bioresource Technology 101: 42-47.
- Liu, D., Liu, D.P., Zeng, R.J. and Angelidaki, I. 2006. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. Water Res 40: 2230-2236.
- Liu, X., Ren, N., and Yuan, Y. 2009. Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on Chinese traditional medicine industrial wastewater. Bioresource Technology 100: 104-110.
- Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. Boston: McGraw-Hill.
- Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Mohan, S.V., Mohanakrishna, G., Goud, R.K. and Sarma, P.N. 2009. Acidogenic fermentation of vegetable based market waste to harness biohydrogen with simultaneous stabilization. Bioresource Technology 100: 3061-3068.
- Reynolds, T. D. and Richards, P. A. 1996. Unit operations and processes in environmental engineering. Boston: PWS.
- Saatci, Y., Hasar, H. and Cici, M. 2001. Treatability of vegetable oil industry effluents through physical-chemical methods. Fresenius Environmental Bulletin 10: 854-858.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for industrial wastewaters. Nashville, Tennessee: Archae Press.
- Suchara, K., Kawamoto, Y., Fujii, E.; Kohda, J., Nakano, Y. and Yano, T. 2005. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. Journal of Bioscience and Bioengineering 100: 437-442.
- Torkian, A., Egbali, A. and Hashemian, S.J. 2003. The effect of organic loading rate on the performance of UASB reactor treating slaughterhouse effluent. Resources, Conservation and Recycling 40: 1-11.
- Vieira, D.S, Servulo, E.F. and Cammarota, M.C. 2005. Degradation potential and growth of anaerobic bacteria in produced water. Environmental Technology 26(8): 915-922.





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก  
ผลการศึกษาประสิทธิภาพและสถานะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่  
อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09 0.18 และ 0.27 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ชีโอดีละลาย

วันที่	ว/ค/ป	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน		
		ชีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ชีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ชีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด
		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ	
1	12/5/52	1,483	919	38.02	919	869	5.49	1,483	869	41.42
3	14/5/52	820	487	40.65	487	479	1.55	820	479	41.57
5	16/5/52	853	482	43.55	482	350	27.28	853	350	58.95
7	18/5/52	1,005	560	44.28	560	375	33.06	1,005	375	62.70
8	19/5/52	812	446	45.11	446	274	38.50	812	274	66.24
10	21/5/52	820	452	44.88	452	282	37.52	820	282	65.56
12	23/5/52	790	432	45.27	432	270	37.63	790	270	65.86
15	26/5/52	2,025	1,149	43.25	1,149	839	26.97	2,025	839	58.56
16	27/5/52	2,081	1,115	46.43	1,115	822	26.23	2,081	822	60.48
17	28/5/52	2,062	1,115	45.95	1,115	817	26.73	2,062	817	60.40
20	31/5/52	2,344	1,359	42.04	1,359	936	31.07	2,344	936	60.05
22	2/6/52	2,578	1,408	45.38	1,408	1,055	25.05	2,578	1,055	59.06
24	4/6/52	2,586	1,331	48.52	1,331	1,056	20.68	2,586	1,056	59.17
26	6/6/52	2,326	1,198	48.50	1,198	929	22.42	2,326	929	60.05
28	8/6/52	2,268	1,171	48.38	1,171	902	22.98	2,268	902	60.24
30	10/6/52	2,230	1,110	50.23	1,110	841	24.21	2,230	841	62.28
33	13/6/52	2,225	1,064	52.18	1,064	623	41.49	2,225	623	72.02
35	15/6/52	2,257	1,082	52.04	1,082	619	42.85	2,257	619	72.59
38	18/6/52	2,226	1,062	52.28	1,062	553	47.90	2,226	553	75.14
41	21/6/52	2,348	1,135	51.64	1,135	588	48.22	2,348	588	74.96
44	24/6/52	2,248	1,091	51.45	1,091	556	49.02	2,248	556	75.25
46	26/6/52	2,285	1,113	51.30	1,113	435	60.95	2,285	435	80.98
49	29/6/52	2,298	1,118	51.35	1,118	357	68.09	2,298	357	84.48



ตารางที่ ก-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีโอดีละลาย

วันที่	ว/ค/ป	ระบบอึ่งหมักกรด			ระบบอึ่งหมักก๊าซมีเทน			ระบบถังหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน		
		ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพ การกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพ การกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพ การกำจัด
		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ	
60	15/7/52	4,486	2,233	50.22	2,233	449	79.87	4,486	449	89.98
62	17/7/52	4,327	2,136	50.64	2,136	429	79.90	4,327	429	90.08
65	20/7/52	4,502	2,229	50.49	2,229	443	80.13	4,502	443	90.16
67	22/7/52	4,741	2,275	52.00	2,275	473	79.21	4,741	473	90.02
70	25/7/52	4,488	2,134	52.44	2,134	366	82.86	4,488	366	91.85
72	27/7/52	4,565	2,101	53.98	2,101	401	80.90	4,565	401	91.21
74	29/7/52	4,178	1,911	54.27	1,911	282	85.22	4,178	282	93.24
77	1/8/52	4,562	2,087	54.25	2,087	358	82.86	4,562	358	92.16
79	3/8/52	4,232	1,956	53.78	1,956	310	84.16	4,232	310	92.68
81	5/8/52	4,452	2,046	54.05	2,046	294	85.64	4,452	294	93.40
82	6/8/52	4,205	1,948	53.68	1,948	274	85.92	4,205	274	93.48
83	7/8/52	4,213	1,926	54.28	1,926	286	85.13	4,213	286	93.20
86	10/8/52	4,221	1,924	54.42	1,924	293	84.75	4,221	293	93.05
89	13/8/52	4,258	1,933	54.60	1,933	286	85.20	4,258	286	93.28
91	15/8/52	4,205	1,907	54.65	1,907	276	85.54	4,205	276	93.44

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีโอดีละลาย

วันที่	ว/ค/ป	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน		
		ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด
		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ	
102	22/9/52	6,258	3,254	48.00	3,254	1,209	62.85	6,258	1,209	80.68
104	24/9/52	6,107	3,126	48.81	3,126	1,156	63.02	6,107	1,156	81.07
107	27/9/52	6,680	3,193	52.20	3,193	1,333	58.26	6,680	1,333	80.05
110	30/9/52	6,775	3,190	52.92	3,190	1,416	55.61	6,775	1,416	79.10
113	3/10/52	6,872	3,198	53.46	3,198	1,151	64.02	6,872	1,151	83.25
115	5/10/52	6,889	3,151	54.26	3,151	1,109	64.80	6,889	1,109	83.90
117	7/10/52	6,615	2,975	55.02	2,975	945	68.24	6,615	945	85.72
119	9/10/52	6,844	3,074	55.08	3,074	682	77.83	6,844	682	90.04
122	12/10/52	6,937	3,034	56.26	3,034	540	82.21	6,937	540	92.22
124	14/10/52	7,251	3,228	55.48	3,228	436	86.50	7,251	436	93.99
126	16/10/52	7,012	3,069	56.23	3,069	410	86.66	7,012	410	94.16
128	18/10/52	7,284	3,177	56.38	3,177	439	86.18	7,284	439	93.97
130	20/10/52	7,210	3,183	55.85	3,183	503	84.19	7,210	503	93.02
132	22/10/52	7,361	3,209	56.40	3,209	405	87.38	7,361	405	94.50
134	24/10/52	7,577	3,314	56.26	3,314	416	87.45	7,577	416	94.51

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีโอดีละลาย

วันที่	ว/ค/ป	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน		
		ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด
		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ	
156	17/11/52	11,927	5,725	52.00	5,725	3,214	43.85	11,927	3,214	73.05
159	20/11/52	11,318	5,181	54.22	5,181	3,158	39.06	11,318	3,158	72.10
161	22/11/52	11,455	5,034	56.05	5,034	2,955	41.30	11,455	2,955	74.20
163	24/11/52	12,408	5,548	55.29	5,548	3,199	42.34	12,408	3,199	74.22
164	25/11/52	12,415	5,405	56.46	5,405	2,804	48.12	12,415	2,804	77.41
166	27/11/52	11,820	4,956	58.07	4,956	2,970	40.07	11,820	2,970	74.87
168	29/11/52	11,905	5,122	56.98	5,122	2,527	50.66	11,905	2,527	78.77
170	1/12/52	11,169	4,801	57.02	4,801	2,333	51.40	11,169	2,333	79.11
172	3/12/52	11,806	5,129	56.56	5,129	1,692	67.01	11,806	1,692	85.67
174	5/12/52	12,205	5,286	56.69	5,286	920	82.59	12,205	920	92.46
176	7/12/52	12,125	5,163	57.42	5,163	758	85.32	12,125	758	93.75
178	9/12/52	12,385	5,390	56.48	5,390	639	88.14	12,385	639	94.84
181	12/12/52	12,472	5,291	57.58	5,291	634	88.02	12,472	634	94.92
184	15/12/52	12,164	5,221	57.08	5,221	320	93.87	12,164	320	97.37
187	18/12/52	11,275	4,905	56.50	4,905	286	94.16	11,275	286	97.46

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ซีโอดีละลาย

วันที่	ว/ค/ป	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน		
		ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการกำจัด
		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ		น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ	
212	5/2/53	15,670	7,790	50.29	7,790	2,598	66.65	15,670	2,598	83.42
214	7/2/53	15,613	6,405	58.97	6,405	1,601	75.00	15,613	1,601	89.74
216	9/2/53	16,108	8,054	50.00	8,054	2,014	75.00	16,108	2,014	87.50
218	11/2/53	15,980	7,632	52.24	7,632	1,921	74.83	15,980	1,921	87.98
220	13/2/53	15,904	7,160	54.98	7,160	1,665	76.74	15,904	1,665	89.53
222	15/2/53	15,938	7,113	55.37	7,113	1,388	80.48	15,938	1,388	91.29
224	17/2/53	15,553	6,381	58.97	6,381	1,196	81.25	15,553	1,196	92.31
226	19/2/53	15,610	6,455	58.65	6,455	1,188	81.59	15,610	1,188	92.39
229	22/2/53	15,357	7,577	50.66	7,577	1,595	78.95	15,357	1,595	89.61
231	24/2/53	15,640	6,658	57.43	6,658	1,098	83.51	15,640	1,098	92.98
233	26/2/53	15,425	6,733	56.35	6,733	872	87.06	15,425	872	94.35
236	1/3/53	15,803	6,631	58.04	6,631	861	87.01	15,803	861	94.55
239	4/3/53	15,516	6,534	57.89	6,534	841	87.13	15,516	841	94.58
241	6/3/53	16,014	6,684	58.26	6,684	855	87.21	16,014	855	94.66
244	9/3/53	15,842	6,609	58.28	6,609	789	88.06	15,842	789	95.02

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์เมทานอล

ว/ค/ป	อัตราภาระ สารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ ลบ.ม.-วัน)	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน		
		เมทานอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด	เมทานอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด	เมทานอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด
		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ	
29/6/52	0.27	809	438	45.94	438	N.D.	100	809	N.D.	100
15/8/52	0.46	930	420	54.84	420	N.D.	100	930	N.D.	100
24/10/52	0.64	1,240	682	45.03	682	N.D.	100	1,240	N.D.	100
18/12/52	1.10	1,667	805	51.68	805	80.80	89.97	1,667	80.80	95.15
9/3/53	1.50	2,767	1,298	53.10	1,298	332	74.43	2,767	332	88.01

หมายเหตุ : N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กลีเซอรอล

ว/ค/ป	อัตราภาระ สารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ ลบ.ม.-วัน)	ระบบถังหมักกรด			ระบบถังหมักก๊าซมีเทน			ระบบหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน		
		กลีเซอรอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด	กลีเซอรอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด	กลีเซอรอล (มก./ล.)		ประสิทธิ ภาพ การกำจัด
		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ		น้ำเข้า ระบบ	น้ำออก ระบบ	
29/6/52	0.27	134	N.D.	100	N.D.	N.D.	100	134	N.D.	100
15/8/52	0.46	181	N.D.	100	N.D.	N.D.	100	181	N.D.	100
24/10/52	0.64	578	84.06	85.46	84.06	47.93	42.98	578	47.93	91.71
18/12/52	1.10	1,125	669	40.49	669	51.16	92.36	1,125	51.16	95.45
9/3/53	1.50	2,028	1,089	46.30	1,089	669	38.54	2,028	669	66.99

หมายเหตุ : N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-8 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

วันที่	ว/ค/ป	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล./วัน)		
		ระบบอ้งหมักกรด	ระบบอ้งหมักก๊าซมีเทน	ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน
60	15/7/52	180	163	343
62	17/7/52	197	173	370
65	20/7/52	193	152	345
67	22/7/52	210	143	352
70	25/7/52	224	110	334
72	27/7/52	244	135	379
74	29/7/52	214	134	349
77	1/8/52	249	166	415
79	3/8/52	213	142	355
81	5/8/52	271	207	478
82	6/8/52	249	162	412
83	7/8/52	229	168	396
86	10/8/52	233	169	402
89	13/8/52	235	164	399
91	15/8/52	251	181	432
102	22/9/52	345	235	581
104	24/9/52	288	191	479
107	27/9/52	366	195	561
110	30/9/52	385	204	589
115	5/10/52	396	242	639
117	7/10/52	446	263	709
119	9/10/52	423	266	689
122	12/10/52	409	270	679
124	14/10/52	493	352	845
126	16/10/52	473	319	792
130	20/10/52	503	335	838

ตารางที่ ก-8 ผลการศึกษาสภาพะการทำงานจากระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล./วัน)		
		ระบบอึ่งหมักกรด	ระบบอึ่งหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบหมักไร้ออกซิเจน แบบสองขั้นตอน
134	24/10/52	501	323	824
136	26/10/52	498	334	833
138	28/10/52	494	335	830
141	31/10/52	504	319	823
143	2/11/52	491	316	807
145	4/11/52	500	332	832
156	17/11/52	806	326	1,133
159	20/11/52	798	263	1,061
161	22/11/52	733	237	970
163	24/11/52	746	256	1,002
164	25/11/52	981	364	1,345
166	27/11/52	961	278	1,239
170	1/12/52	923	358	1,281
172	3/12/52	1,002	516	1,517
176	7/12/52	1,010	667	1,677
181	12/12/52	994	628	1,623
184	15/12/52	1,076	700	1,777
187	18/12/52	994	655	1,648
191	22/12/52	1,107	722	1,829
194	25/12/52	1,037	706	1,743

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-8 ผลการศึกษาภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46-1.50 ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ต่อ)

วันที่	ว/ด/ป	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล./วัน)		
		ระบบถังหมักกรด	ระบบถังหมักก๊าซมีเทน	ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน
197	28/12/52	1,103	703	1,806
199	30/12/52	1,029	702	1,731
201	1/1/53	1,083	755	1,838
213	6/2/53	1,610	840	2,450
215	8/2/53	1,480	1,110	2,590
217	10/2/53	1,586	1,057	2,643
219	12/2/53	1,530	976	2,506
223	16/2/53	1,568	1,052	2,620
228	21/2/53	1,529	1,120	2,649
230	23/2/53	1,711	1,052	2,763
232	25/2/53	1,630	1,128	2,758
235	28/2/53	1,770	1,106	2,876
238	3/3/53	1,716	1,146	2,862
240	5/3/53	1,748	1,145	2,894
243	8/3/53	1,796	1,109	2,905
246	11/3/53	1,750	1,136	2,886

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
1	12/5/52	6.12	7.34	7.80
2	13/5/52	6.21	7.30	7.82
3	14/5/52	6.09	7.23	7.75
4	15/5/52	6.12	7.19	7.92
5	16/5/52	5.98	7.13	7.68
6	17/5/52	6.21	7.14	7.74
7	18/5/52	6.12	7.12	7.80
8	19/5/52	6.34	7.12	7.76
9	20/5/52	6.05	7.10	7.80
10	21/5/52	6.03	6.87	7.76
11	22/5/52	6.04	7.02	7.70
12	23/5/52	6.14	6.98	7.73
13	24/5/52	6.04	7.06	7.85
14	25/5/52	6.29	7.11	7.84
15	26/5/52	6.02	6.85	7.75
16	27/5/52	5.97	6.27	7.83
17	28/5/52	5.95	6.40	7.58
18	29/5/52	6.02	6.53	7.88
19	30/5/52	6.03	6.34	7.67
20	31/5/52	6.11	6.58	7.83
21	1/6/52	6.04	6.55	8.11
22	2/6/52	6.01	6.56	7.95
23	3/6/52	6.04	6.60	7.92

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถึงหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถึงหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถึงหมักก๊าซมีเทน
24	4/6/52	6.02	6.40	7.71
25	5/6/52	6.12	5.82	8.00
26	6/6/52	6.01	5.06	7.95
27	7/6/52	6.01	4.93	7.89
28	8/6/52	5.99	4.71	7.59
29	9/6/52	6.06	5.08	8.27
30	10/6/52	6.05	5.99	8.02
31	11/6/52	6.04	5.84	7.84
32	12/6/52	6.09	5.51	7.94
33	13/6/52	6.04	5.45	7.53
34	14/6/52	6.02	5.18	7.72
35	15/6/52	6.04	5.27	7.60
36	16/6/52	6.03	5.01	7.68
37	17/6/52	6.01	5.21	7.83
38	18/6/52	6.05	5.34	7.74
39	19/6/52	6.10	5.15	7.69
40	20/6/52	6.07	5.08	7.80
41	21/6/52	6.12	4.95	7.70
42	22/6/52	6.02	4.74	7.65
43	23/6/52	6.05	4.80	7.62
44	24/6/52	6.07	4.60	7.69
45	25/6/52	6.12	4.49	7.72
46	26/6/52	6.05	4.27	7.97

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
47	27/6/52	6.20	4.38	8.03
48	28/6/52	6.13	4.51	7.67
49	29/6/52	6.15	4.26	7.73
50	30/6/52	6.01	4.20	7.53
51	1/7/52	6.02	4.09	7.62
52	2/7/52	6.02	3.97	7.75
53	3/7/52	6.05	4.02	7.87
54	4/7/52	6.07	4.09	7.74
55	5/7/52	6.09	4.05	7.69
56	6/7/52	6.07	4.11	7.80
57	7/7/52	6.08	4.04	7.70
58	8/7/52	6.05	4.09	7.72
59	9/7/52	6.02	3.93	7.68
60	15/7/52	6.09	3.89	7.56
61	16/7/52	6.05	3.94	7.61
62	17/7/52	6.04	4.02	7.60
63	18/7/52	7.28	4.07	7.59
64	19/7/52	7.25	7.08	7.64
65	20/7/52	7.32	7.14	7.73
66	21/7/52	7.24	7.28	7.79
67	22/7/52	7.25	7.52	7.82
68	23/7/52	7.20	7.47	7.88
69	24/7/52	7.28	7.61	8.00



ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
70	25/7/52	7.20	7.60	7.89
71	26/7/52	7.24	7.50	7.99
72	27/7/52	7.48	7.64	7.79
73	28/7/52	7.69	7.59	8.11
74	29/7/52	7.38	7.68	7.88
75	30/7/52	7.29	7.65	7.94
76	31/7/52	7.07	7.69	7.82
77	1/8/52	7.05	7.62	8.52
78	2/8/52	7.02	7.65	8.45
79	3/8/52	7.15	7.55	8.32
80	4/8/52	7.02	7.58	8.32
81	5/8/52	7.35	7.62	8.47
82	6/8/52	7.05	7.54	8.42
83	7/8/52	7.02	7.58	8.34
84	8/8/52	7.01	7.52	8.40
85	9/8/52	7.01	7.78	8.58
86	10/8/52	7.15	7.72	8.43
87	11/8/52	7.20	7.65	8.40
88	12/8/52	7.19	7.67	8.42
89	13/8/52	7.20	7.73	8.48
90	14/8/52	7.18	7.72	8.50
91	15/8/52	7.18	7.69	8.52
102	22/9/52	7.25	7.53	7.69

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ด/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
103	23/9/52	7.23	7.42	7.65
104	24/9/52	7.22	7.43	7.66
105	25/9/52	7.24	7.50	7.63
106	26/9/52	7.20	7.48	7.58
107	27/9/52	7.21	7.51	7.59
108	28/9/52	7.31	7.50	7.64
109	29/9/52	7.21	7.51	7.68
110	30/9/52	7.40	7.50	7.73
111	1/10/52	7.34	7.47	7.95
112	2/10/52	7.46	7.54	8.09
113	3/10/52	7.46	7.54	8.02
114	4/10/52	7.35	7.38	7.93
115	5/10/52	7.22	7.36	7.62
116	6/10/52	7.24	7.28	7.49
117	7/10/52	7.25	7.36	7.59
118	8/10/52	7.27	7.31	7.76
119	9/10/52	7.20	7.40	7.74
120	10/10/52	7.22	7.43	7.66
121	11/10/52	7.25	7.58	7.65
122	12/10/52	7.20	7.75	7.88
123	13/10/52	7.22	7.52	7.89
124	14/10/52	7.21	7.49	8.28
125	15/10/52	7.23	7.56	8.20

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
126	16/10/52	7.21	7.39	8.07
127	17/10/52	7.21	7.48	8.05
128	18/10/52	7.20	7.52	8.12
129	19/10/52	7.23	7.51	8.38
130	20/10/52	7.22	7.68	8.45
131	21/10/52	7.22	7.60	8.40
132	22/10/52	7.21	7.62	8.45
133	23/10/52	7.22	7.65	8.36
134	24/10/52	7.30	7.60	7.89
135	25/10/52	7.23	7.56	7.95
136	26/10/52	7.21	7.58	8.10
137	27/10/52	7.22	7.60	8.06
138	28/10/52	7.23	7.62	8.12
139	29/10/52	7.26	7.58	7.98
140	30/10/52	7.23	7.62	8.18
141	31/10/52	7.25	7.59	8.20
142	1/11/52	7.21	7.60	8.25
143	2/11/52	7.22	7.65	8.30
144	3/11/52	7.21	7.70	8.38
145	4/11/52	7.20	7.64	8.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ด/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
156	17/11/52	7.21	7.30	8.40
157	18/11/52	7.20	7.32	8.42
158	19/11/52	7.23	7.39	8.28
159	20/11/52	7.23	7.62	8.40
160	21/11/52	7.22	7.38	8.30
161	22/11/52	7.27	7.32	8.26
162	23/11/52	7.20	7.46	8.14
163	24/11/52	7.25	7.29	8.04
164	25/11/52	7.20	7.37	8.24
165	26/11/52	7.21	7.12	8.52
166	27/11/52	7.22	7.26	8.69
167	28/11/52	7.23	7.32	8.62
168	29/11/52	7.21	7.35	8.30
169	30/11/52	7.20	7.40	8.25
170	1/12/52	7.21	7.42	8.22
171	2/12/52	7.25	7.41	8.18
172	3/12/52	7.33	7.53	8.08
173	4/12/52	7.20	7.27	8.53
174	5/12/52	7.22	7.52	8.42
175	6/12/52	7.22	7.70	8.48
176	7/12/52	7.20	7.75	8.65
177	8/12/52	7.21	7.96	8.71
178	9/12/52	7.21	7.70	8.57

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ด/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
179	10/12/52	7.22	7.72	8.60
180	11/12/52	7.25	7.71	9.05
181	12/12/52	7.21	7.67	8.67
182	13/12/52	7.25	7.64	8.63
183	14/12/52	7.20	7.78	8.84
184	15/12/52	7.21	7.82	8.90
185	16/12/52	7.22	7.87	9.06
186	17/12/52	7.22	7.98	8.76
187	18/12/52	7.21	7.84	8.73
188	19/12/52	7.22	7.80	8.75
189	20/12/52	7.20	7.74	8.80
190	21/12/52	7.21	7.60	8.83
191	22/12/52	7.21	7.97	8.86
192	23/12/52	7.21	7.57	8.50
193	24/12/52	7.22	7.60	8.63
194	25/12/52	7.21	7.62	8.65
195	26/12/52	7.23	7.59	8.56
196	27/12/52	7.20	7.60	8.67
197	28/12/52	7.22	7.63	8.81
198	29/12/52	7.20	7.68	8.65
199	30/12/52	7.23	7.72	8.62
200	31/12/52	7.28	7.58	8.53
201	1/1/53	7.24	7.86	8.60

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ด/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
212	5/2/53	7.20	7.68	8.54
213	6/2/53	7.21	7.70	8.60
214	7/2/53	7.21	7.73	8.46
215	8/2/53	7.22	7.68	8.21
216	9/2/53	7.20	7.68	8.30
217	10/2/53	7.20	7.58	8.58
218	11/2/53	7.22	7.62	8.62
219	12/2/53	7.23	7.40	8.84
220	13/2/53	7.22	7.70	8.34
221	14/2/53	7.20	7.72	8.58
222	15/2/53	7.23	7.81	8.75
223	16/2/53	7.22	7.82	8.92
224	17/2/53	7.20	7.82	8.38
225	18/2/53	7.21	7.82	8.49
226	19/2/53	7.20	7.86	8.58
227	20/2/53	7.21	7.81	8.64
228	21/2/53	7.22	7.79	8.70
229	22/2/53	7.21	7.78	8.72
230	23/2/53	7.20	7.80	8.81
231	24/2/53	7.21	7.82	8.72
232	25/2/53	7.22	7.78	8.71
233	26/2/53	7.20	7.81	8.64
234	27/2/53	7.21	7.79	8.66



ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์พีเอช (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	พีเอช		
		น้ำเข้าระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักกรด	น้ำออกจากระบบ ถังหมักก๊าซมีเทน
235	28/2/53	7.20	7.78	8.70
236	1/3/53	7.21	7.80	8.61
237	2/3/53	7.23	7.80	8.75
238	3/3/53	7.20	7.78	8.62
239	4/3/53	7.20	7.82	8.60
240	5/3/53	7.22	7.80	8.66

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิต

วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)		วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)	
		ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน			ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน
		1	12/5/52			31.40	31.00
2	13/5/52	30.60	30.50	22	2/6/52	32.20	31.50
3	14/5/52	30.20	30.90	23	3/6/52	32.50	31.70
4	15/5/52	29.90	29.70	24	4/6/52	30.20	31.40
5	16/5/52	30.90	30.40	25	5/6/52	32.80	31.40
6	17/5/52	31.40	30.70	26	6/6/52	32.30	31.00
7	18/5/52	30.90	30.10	27	7/6/52	33.10	31.70
8	19/5/52	31.40	30.20	28	8/6/52	32.20	31.30
9	20/5/52	31.50	30.60	29	9/6/52	32.00	32.00
10	21/5/52	31.60	30.80	30	10/6/52	32.90	32.50
11	22/5/52	32.70	31.00	31	11/6/52	32.50	32.00
12	23/5/52	31.90	30.00	32	12/6/52	32.00	31.50
13	24/5/52	32.00	31.60	33	13/6/52	32.40	31.20
14	25/5/52	32.30	32.80	34	14/6/52	32.20	31.50
15	26/5/52	31.20	31.50	35	15/6/52	33.70	31.90
16	27/5/52	32.20	31.70	36	16/6/52	32.20	31.50
17	28/5/52	31.00	30.50	37	17/6/52	32.10	31.40
18	29/5/52	31.50	31.20	38	18/6/52	32.10	31.50
19	30/5/52	31.70	31.80	39	19/6/52	32.50	31.20
20	31/5/52	32.90	31.50	40	20/6/52	32.60	32.00

ตารางที่ ก-10 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิต่อ

วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)		วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)	
		ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน			ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน
41	21/6/52	33.60	32.90	61	16/7/52	31.70	31.30
42	22/6/52	32.70	32.40	62	17/7/52	31.30	31.50
43	23/6/52	32.20	31.80	63	18/7/52	31.20	31.90
44	24/6/52	32.00	31.40	64	19/7/52	32.60	32.10
45	25/6/52	32.60	31.70	65	20/7/52	32.00	31.50
46	26/6/52	32.80	32.70	66	21/7/52	31.60	31.70
47	27/6/52	32.90	32.50	67	22/7/52	31.40	31.70
48	28/6/52	32.90	32.50	68	23/7/52	31.90	30.70
49	29/6/52	32.20	31.70	69	24/7/52	31.50	30.50
50	30/6/52	31.30	31.20	70	25/7/52	31.70	30.70
51	1/7/52	31.20	30.60	71	26/7/52	31.50	31.90
52	2/7/52	31.10	31.30	72	27/7/52	31.40	31.10
53	3/7/52	32.40	31.40	73	28/7/52	31.00	30.00
54	4/7/52	32.20	31.20	74	29/7/52	32.10	31.00
55	5/7/52	32.80	32.90	75	30/7/52	31.90	31.60
56	6/7/52	32.30	31.90	76	31/7/52	31.60	31.40
57	7/7/52	31.20	30.40	77	1/8/52	32.50	31.30
58	8/7/52	31.20	31.40	78	2/8/52	32.10	31.20
59	9/7/52	31.00	30.30	79	3/8/52	31.50	31.70
60	15/7/52	31.20	31.00	80	4/8/52	32.30	31.90



ตารางที่ ก-10 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิต่อ

วันที่	ว/ด/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)		วันที่	ว/ด/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)	
		ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน			ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน
81	5/8/52	32.50	32.30	122	12/10/52	34.90	30.40
82	6/8/52	32.90	32.10	123	13/10/52	35.90	30.30
83	7/8/52	32.10	32.80	124	14/10/52	32.50	30.10
84	8/8/52	32.00	31.40	125	15/10/52	31.90	30.50
85	9/8/52	32.50	32.20	126	16/10/52	31.90	30.30
108	28/9/52	31.00	31.20	127	17/10/52	31.40	30.40
109	29/9/52	31.50	31.00	128	18/10/52	31.00	30.50
110	30/9/52	32.70	32.40	129	19/10/52	31.30	30.30
111	1/10/52	31.40	30.20	130	20/10/52	31.70	30.60
112	2/10/52	31.30	31.00	131	21/10/52	31.70	29.60
113	3/10/52	32.50	31.40	132	22/10/52	30.70	29.20
114	4/10/52	33.50	32.00	133	23/10/52	31.70	30.00
115	5/10/52	33.00	31.10	134	24/10/52	31.00	30.70
116	6/10/52	33.00	31.50	135	25/10/52	32.90	31.80
117	7/10/52	33.90	31.50	136	26/10/52	32.60	31.40
118	8/10/52	33.90	31.50	137	27/10/52	32.50	30.90
119	9/10/52	33.90	31.20	138	28/10/52	32.40	30.90
120	10/10/52	33.40	31.60	139	29/10/52	32.90	31.00
121	11/10/52	33.10	31.80	140	30/10/52	32.60	30.80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิต่อ

วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)		วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)	
		ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน			ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน
143	2/11/52	32.30	31.10	162	23/11/52	29.10	27.40
144	3/11/52	29.30	29.40	163	24/11/52	29.20	27.20
145	4/11/52	30.20	28.80	164	25/11/52	29.50	28.10
146	5/11/52	30.20	29.00	165	26/11/52	30.80	28.90
147	6/11/52	30.40	29.70	166	27/11/52	31.80	28.70
148	7/11/52	31.80	30.40	167	28/11/52	31.00	29.00
149	8/11/52	32.00	31.10	168	29/11/52	32.00	30.70
150	9/11/52	32.20	31.00	169	30/11/52	32.10	30.80
151	10/11/52	32.10	31.20	170	1/12/52	31.40	30.90
152	11/11/52	32.50	31.40	171	2/12/52	31.50	29.30
153	12/11/52	32.90	31.60	172	3/12/52	31.40	28.40
154	13/11/52	32.00	30.60	173	4/12/52	32.50	29.10
155	14/11/52	32.20	32.60	174	5/12/52	31.00	29.70
156	17/11/52	34.90	32.50	175	6/12/52	30.90	29.30
157	18/11/52	34.70	30.30	176	7/12/52	30.70	29.90
158	19/11/52	34.70	30.20	177	8/12/52	31.40	29.20
159	20/11/52	32.00	29.90	178	9/12/52	31.80	30.50
160	21/11/52	31.60	29.10	179	10/12/52	31.50	30.20
161	22/11/52	30.30	28.80	180	11/12/52	31.10	29.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน  
ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-1.50 กก.ซีไอ/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์อุณหภูมิ (ต่อ)

วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)		วันที่	ว/ค/ป	อุณหภูมิน้ำเสีย (องศาเซลเซียส)	
		ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน			ระบบถังหมัก กรด	ระบบถังหมัก ก๊าซมีเทน
183	14/12/52	31.20	29.80	208	8/1/53	32.20	29.30
184	15/12/52	31.90	30.60	209	9/1/53	31.70	29.40
185	16/12/52	32.30	31.40	210	10/1/53	32.50	29.20
186	17/12/52	32.70	30.70	214	7/2/53	31.40	31.00
187	18/12/52	32.40	31.60	215	8/2/53	31.00	31.90
188	19/12/52	32.20	31.40	216	9/2/53	31.90	31.70
189	20/12/52	31.70	31.40	217	10/2/53	31.00	31.20
190	21/12/52	32.70	30.10	218	11/2/53	31.50	31.60
191	22/12/52	32.40	29.50	219	12/2/53	31.90	30.10
192	23/12/52	32.90	29.40	220	13/2/53	31.50	30.10
193	24/12/52	33.50	29.10	221	14/2/53	31.70	30.50
194	25/12/52	33.20	30.40	222	15/2/53	32.20	31.20
195	26/12/52	33.70	31.70	223	16/2/53	31.50	31.90
196	27/12/52	33.10	31.80	224	17/2/53	31.50	31.70
197	28/12/52	33.40	31.70	225	18/2/53	31.30	31.20
206	6/1/53	32.90	30.60	229	22/2/53	31.70	31.40
207	7/1/53	32.60	29.50	230	23/2/53	32.00	31.40

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-11 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.09-0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพต่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพต่างทั้งหมด

วันที่	ว/ด/ป	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ของกรดอะซิติก)		สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. ของ แคลเซียมคาร์บอเนต)		กรดไขมันระเหย ต่อสภาพต่างทั้งหมด	
		ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน	ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน	ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน
3	14/5/52	57.50	88.75	178	671	0.32	0.13
6	17/5/52	53.75	90.00	146	670	0.37	0.13
10	21/5/52	52.50	84.25	140	635	0.38	0.13
14	25/5/52	60.00	95.50	142	565	0.42	0.17
16	27/5/52	68.00	102	150	669	0.45	0.15
19	30/5/52	120	102	152	664	0.79	0.15
20	31/5/52	132	95.00	148	600	0.89	0.16
22	2/6/52	155	102	144	664	1.07	0.15
24	4/6/52	163	123	156	720	1.04	0.17
28	8/6/52	293	142	146	834	2.00	0.17
33	13/6/52	422	176	175	1,196	2.41	0.15
35	15/6/52	388	292	147	881	2.64	0.33
37	17/6/52	333	152	220	898	1.51	0.17
51	1/7/52	881	304	52.50	994	16.79	0.31
53	3/7/52	790	294	28.75	1,181	27.47	0.25
55	5/7/52	896	347	20.00	1,161	44.79	0.30
58	8/7/52	800	342	29.50	1,027	27.11	0.33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-12 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด

วันที่	ว/ด/ป	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ของกรดอะซิติก)		สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล. ของ แคลเซียมคาร์บอเนต)		กรดไขมันระเหย ต่อสภาพค่างทั้งหมด	
		ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน	ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน	ระบบ อังกฤษกรด	ระบบ อังกฤษ ก๊าซมีเทน
60	15/7/52	1,306	443	12.00	866	108.8	0.51
63	18/7/52	1,223	415	25.00	920	48.92	0.45
65	20/7/52	1,378	420	1,678	1,004	0.82	0.42
67	22/7/52	949	370	2,215	1,212	0.43	0.31
70	25/7/52	1,313	418	2,281	1,123	0.58	0.37
72	27/7/52	1,641	400	2,138	1,300	0.77	0.31
74	29/7/52	1,421	371	2,094	1,428	0.68	0.26
79	3/8/52	1,181	366	2,288	1,806	0.52	0.20
83	7/8/52	1,650	409	2,050	2,016	0.80	0.20
60	15/7/52	1,306	443	12.00	866	108.8	0.51
63	18/7/52	1,223	415	25.00	920	48.92	0.45
65	20/7/52	1,378	420	1,678	1,004	0.82	0.42
67	22/7/52	949	370	2,215	1,212	0.43	0.31
70	25/7/52	1,313	418	2,281	1,123	0.58	0.37
72	27/7/52	1,641	400	2,138	1,300	0.77	0.31
74	29/7/52	1,421	371	2,094	1,428	0.68	0.26
79	3/8/52	1,181	366	2,288	1,806	0.52	0.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-13 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด

วันที่	ว/ด/ป	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ของกรดอะซิติก)		สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล. ของ แคลเซียมคาร์บอเนต)		กรดไขมันระเหย ต่อสภาพค่างทั้งหมด	
		ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน
103	23/9/52	1,802	690	520	1,450	3.47	0.48
105	25/9/52	1,780	685	540	1,502	3.30	0.46
108	28/9/52	1,820	650	505	1,520	3.60	0.43
110	30/9/52	1,950	574	520	1,540	3.75	0.37
113	3/10/52	2,204	563	612	1,580	3.60	0.36
115	5/10/52	1,980	553	550	1,603	3.60	0.35
117	7/10/52	2,124	527	531	1,513	4.00	0.35
119	9/10/52	2,210	428	580	1,334	3.81	0.32
122	12/10/52	2,325	431	542	1,400	4.29	0.31
124	14/10/52	2,133	428	612	1,625	3.48	0.26
126	16/10/52	2,206	435	640	1,810	3.45	0.24
130	20/10/52	2,265	430	582	2,848	3.89	0.15
132	22/10/52	2,659	431	606	2,944	4.39	0.15
134	24/10/52	2,138	428	629	3,181	3.40	0.13
136	26/10/52	2,302	418	690	3,204	3.34	0.13
138	28/10/52	2,380	410	720	3,116	3.31	0.13
140	30/10/52	2,355	415	712	3,120	3.31	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-14 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพต่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพต่างทั้งหมด

วันที่	ว/ด/ป	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ของกรดอะซิติก)		สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. ของ แคลเซียมคาร์บอเนต)		กรดไขมันระเหย ต่อสภาพต่างทั้งหมด	
		ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน
159	20/11/52	3,212	820	4,482	4,750	0.72	0.17
162	23/11/52	3,305	795	4,487	5,020	0.74	0.16
164	25/11/52	3,508	788	4,579	5,015	0.77	0.16
166	27/11/52	3,318	780	4,506	5,050	0.74	0.15
170	1/12/52	3,651	765	4,614	5,106	0.79	0.15
172	3/12/52	3,694	744	4,650	5,075	0.79	0.15
176	7/12/52	3,563	681	4,708	5,238	0.76	0.13
178	9/12/52	3,628	700	4,843	5,304	0.75	0.13
181	12/12/52	3,672	718	4,975	5,588	0.74	0.13
184	15/12/52	3,598	713	5,125	5,400	0.70	0.13
187	18/12/52	3,595	720	5,016	5,505	0.72	0.13
191	22/12/52	3,705	744	5,221	5,625	0.71	0.13
194	25/12/52	3,783	803	5,255	6,050	0.72	0.13
197	28/12/52	3,847	806	5,213	5,975	0.74	0.13
199	30/12/52	3,680	798	5,150	6,016	0.71	0.13
201	1/1/53	3,835	790	5,206	5,902	0.74	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-15 ผลการศึกษาสภาวะการทำงานของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แสดงพารามิเตอร์กรดไขมันระเหย สภาพค่างทั้งหมด อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยและสภาพค่างทั้งหมด

วันที่	ว/ด/ป	กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. ของกรดอะซิติก)		สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล. ของ แคลเซียมคาร์บอเนต)		กรดไขมันระเหย ต่อสภาพค่างทั้งหมด	
		ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ ถังหมักกรด	ระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน
212	5/2/53	3,940	982	5,702	6,320	0.69	0.16
214	7/2/53	4,020	894	5,800	6,563	0.69	0.14
216	9/2/53	4,285	993	5,814	6,715	0.74	0.15
218	11/2/53	4,055	978	5,710	6,710	0.71	0.15
220	13/2/53	4,298	996	5,718	6,921	0.75	0.14
224	17/2/53	4,592	964	6,206	7,408	0.74	0.13
229	22/2/53	4,978	784	6,613	7,643	0.75	0.10
231	24/2/53	4,825	875	6,320	7,520	0.76	0.12
233	26/2/53	4,802	852	6,506	7,564	0.74	0.11
236	1/3/53	4,886	859	6,214	7,695	0.79	0.11
239	4/3/53	4,802	875	6,318	7,689	0.76	0.11
241	6/3/53	4,881	859	6,412	7,602	0.76	0.11
244	9/3/53	4,902	828	6,410	7,659	0.76	0.11
247	12/3/53	4,895	834	6,520	7,622	0.75	0.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์เมทานอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์เมทานอล ที่อัตราสารอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีโอดี-ลบ.ม.-วัน

อัตราสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	วันที่	เมทานอล น้ำเข้า ระบบถัง หมักกรด (มก./ล.)	พื้นที่ ได้กราฟ	เมทานอล น้ำออกจาก ระบบถัง หมักกรด (มก./ล.)	พื้นที่	เมทานอล น้ำออกจากระบบ ถังหมัก ก๊าซมีเทน (มก./ล.)	พื้นที่ ได้กราฟ	สมการ
0.27	29/6/52	809	30,775	438	14,101	N.D.	-	$y=0.223x+123.18$
0.46	15/8/52	930	36,162	420	13,300	N.D.	-	$y=0.0223x+123.18$
0.64	24/10/52	1,240	57,036	682	29,854	N.D.	-	$y=48677x-3323$
1.10	18/12/52	1,667	77,824	805	35,886	80.8	610	$y=48677x-3323$
1.50	9/3/53	2,767	131,367	1,298	59,860	332	12,837	$y=48677x-3323$

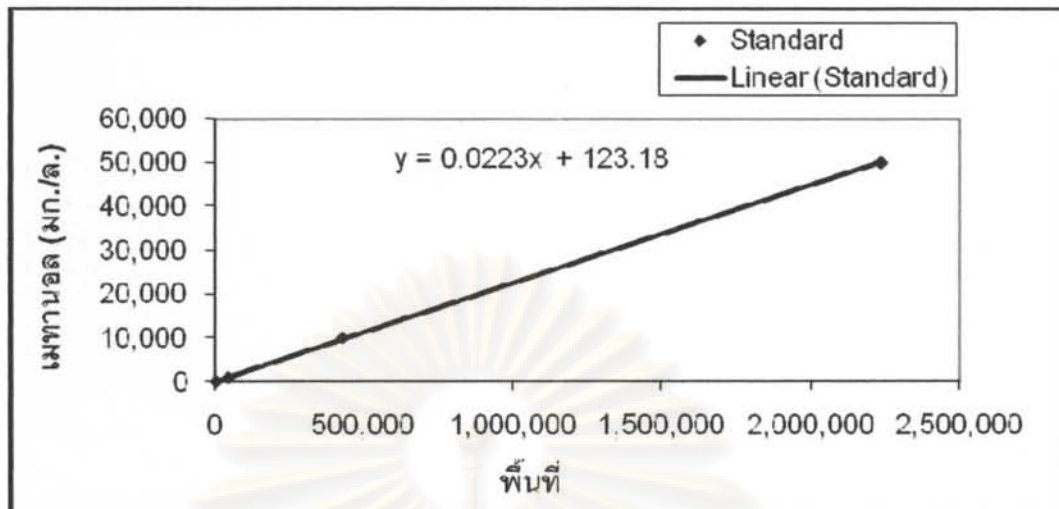
หมายเหตุ : N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบค่า

**ตัวอย่างการคำนวณเมทานอล**

ตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบถังหมักกรดที่อัตราสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จากกราฟมาตรฐานเมทานอลแสดงดังภาพที่ ข-1 จะได้สมการ  $y = 0.0223x + 123.18$  โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นเมทานอล มีหน่วยเป็น มก./ล. และ  $x$  คือ พื้นที่ จากสมการ  $y = 0.0223x + 123.18$  มีพื้นที่ของตัวอย่างน้ำเสียเท่ากับ 30,775 (ภาพที่ ข-12) ความเข้มข้นของเมทานอล =  $(30,775 \times 0.0223) + 123.18 = 809$

ดังนั้น เมทานอลของน้ำเสียเข้าระบบถังหมักกรด เท่ากับ 809 มิลลิกรัม/ลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข-1 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1

TIME	AREA	HEIGHT	MR	DNR	CONC	NAME
0.377	3664	510			48	
0.721	3891	708			52	
TOTAL	7555	1218			100	

ภาพที่ ข-2 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 3,891)

CH	TIME	AREA	HEIGHT	MR	DNR	CONC	NAME
1	0.375	3146	486			6	
3	0.724	45031	7458			92	
11	3.369	965	16			2	
TOTAL		49142	7985			100	

ภาพที่ ข-3 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 45,031)

omy

0.704

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	ML	LNNO	CONC	NAME
1	2	0.492	2055	331			0	
	3	0.704	429597	65081			100	
		TOTL	431652	65412			100	

ภาพที่ ข-4 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 429,597)

ny

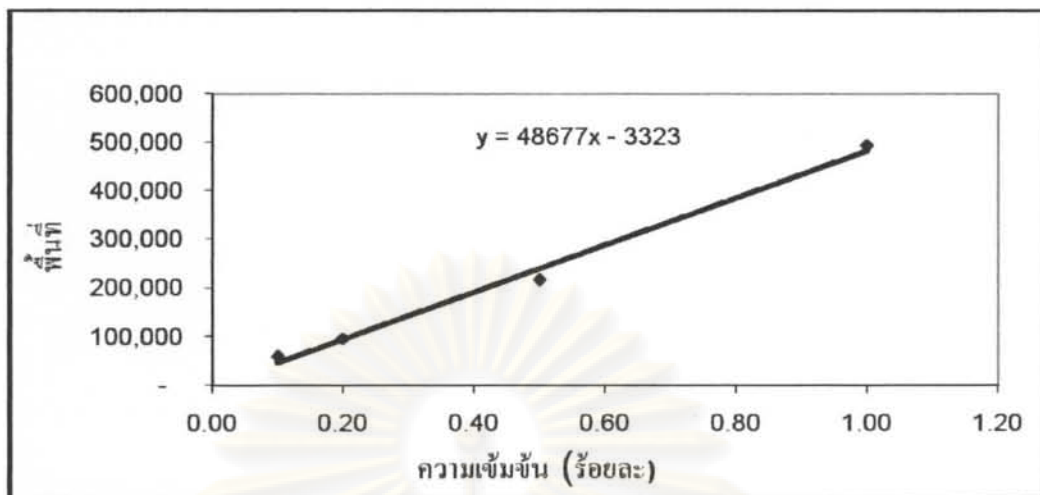
\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	ML	LNNO	CONC	NAME
1	2	0.378	3527	679			0	
	3	0.701	2237670	396939			100	
		TOTL	2241197	397609			100	

ภาพที่ ข-5 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (พื้นที่เท่ากับ 2,237,670)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ ข-6 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2

0.443 0.722

พื้นที่

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
	2	0.443	1389	138	V		2.3365	
	3	0.722	58064	5221	V		97.6635	
TOTAL			59453	5359			100	

ภาพที่ ข-7 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 (พื้นที่เท่ากับ 58,064)

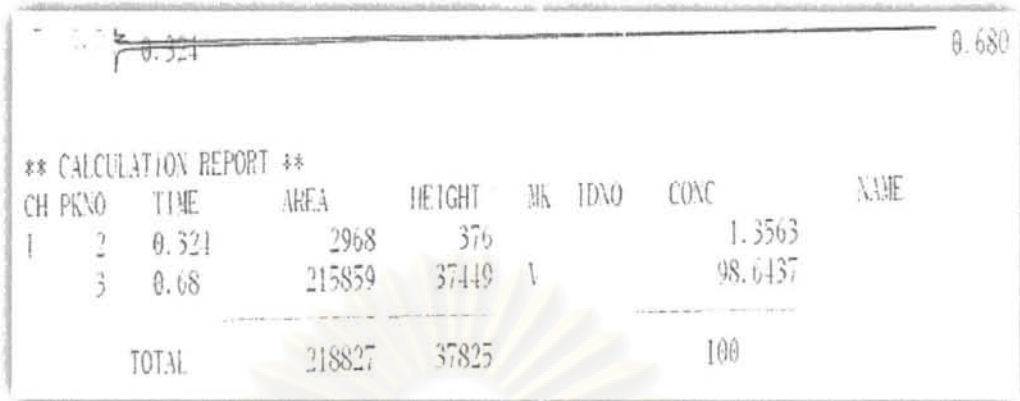
0.456 0.727

พื้นที่

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
I	2	0.456	1194	119	V		1.2433	
	3	0.727	94863	7427	SV		98.7567	
TOTAL			96057	7547			100	

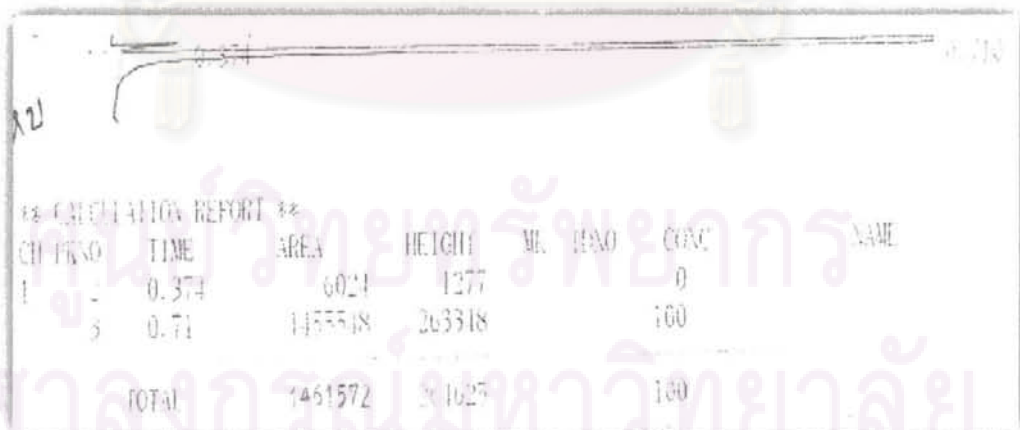
ภาพที่ ข-8 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (พื้นที่เท่ากับ 94,863)



ภาพที่ ข-9 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 (พื้นที่เท่ากับ 215,859)

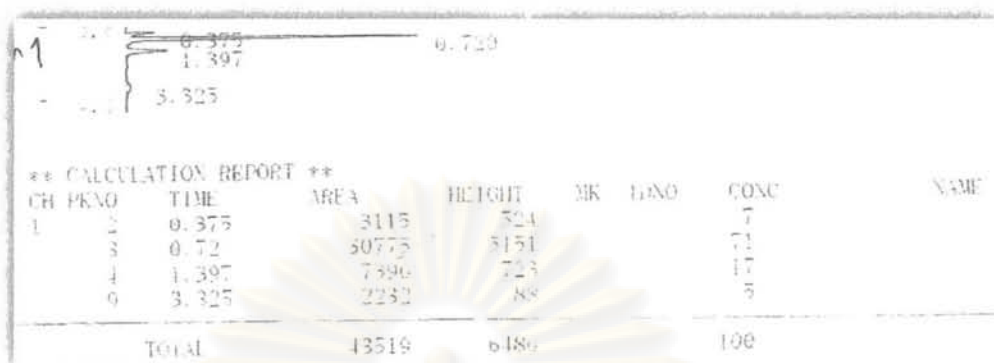


ภาพที่ ข-10 มาตรฐานเมทานอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.00 (พื้นที่เท่ากับ 494,119)

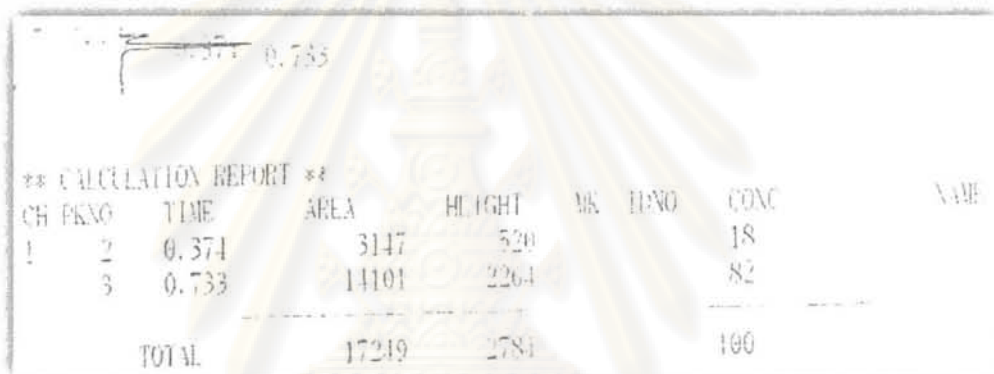


ภาพที่ ข-11 น้ำเสียไบโอดีเซล (น้ำเสียจริง) มีพื้นที่เท่ากับ 1,455,548 มาตรฐานที่สมการ  $y=0.223x+123.18$

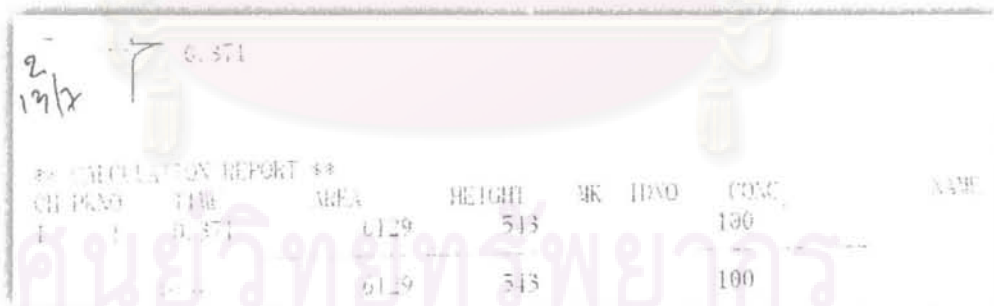
## น้ำเข้าระบบดั่งหมักกรด



## น้ำออกจากระบบดั่งหมักกรด



## น้ำออกจากระบบดั่งหมักก๊าซมีเทน



ภาพที่ ข-12 ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาวะสารอินทรีย์ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



## น้ำเข้าระบบดั่งหมักกรด

1.499 0.372 0.729

2/6

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH PRNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK	HN0	CONC	NAME
1	1	0.372	7881	1614		15	
	2	0.729		5587		75	
	3	1.109	1015	80		8	
TOTAL			48091	7588		100	

## น้ำออกจากระบบดั่งหมักกรด

0.389 0.738 1.415 3.324

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH PRNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK	HN0	CONC	NAME
1	2	0.389	4080	693		21	
	3	0.738	13300	2164		68	
	4	1.415	1033	102		5	
	10	3.324	1289	80		7	
TOTAL			19701	3039		100	

## น้ำออกจากระบบดั่งหมักก๊าซมีเทน

0.383 3.707

2/6

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH PRNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK	HN0	CONC	NAME
1	1	0.383	3536	541		55	
	9	3.707	2837	58		45	
TOTAL			6373	599		100	

ภาพที่ ข-13 ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.46 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

## น้ำเข้าระบบถังหมักกรด

0.375 0.701

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

16-1

in

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MR	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.375	2793	332			4.6086	
	3	0.701	57036	8822	V		95.3314	
TOTAL			59830	9161			100	

## น้ำออกจากระบบถังหมักกรด

0.458 0.728

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MR	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.458	1544	145			4.9161	
	3	0.728	29854	2159	V		95.0839	
TOTAL			31397	2603			100	

## น้ำออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน

2

18

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพและนิเวศวิทยา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ ข-14 ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

## น้ำเข้าระบบถังหมักกรด

0.324 0.692

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MF	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.321	2817	390			3.1934	
	3	0.692	77824	12996	V		96.5066	
TOTAL			80641	13386			100	

## น้ำออกจากระบบถังหมักกรด

0.356 0.696

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MF	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.356	14669	1233			29.0152	
	2	0.696	35886	4229	V		70.9847	
TOTAL			50555	5462			100	

## น้ำออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน

0.321 0.689

3/12

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MF	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.321	3516	496			85.2056	
	2	0.689	610	108	V		14.7943	
TOTAL			4126	604			100	

ภาพที่ ข-15 ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 1.10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน



## น้ำชำระบบดงหมักกรด

0.398 0.725

8

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.372	2772	564			6	
	3	0.725	131367	4303			52	
	4	1.398	20896	1289			42	
TOTAL			49264	6157			100	

## น้ำออกจากระบบดงหมักกรด

0.379 0.725

3.300

1 6/8

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.379	3620	724			19	
	3	0.725	59860	1146			33	
	9	3.3	9415	343			48	
TOTAL			19450	2213			100	

## น้ำออกจากระบบดงหมักก๊าซมีเทน

0.311 0.681

2.167

(1)

\*\* CALCULATION REPORT \*\*

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.311	3647	493			27.6693	
	2	0.681	12837	1389	V		67.5318	
	3	2.167	633	28			4.7988	
TOTAL			13180	1910			100	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
ภาพที่ ข-16 ผลการวิเคราะห์เมทานอลที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค  
ผลการวิเคราะห์ทฤษฎีเชอรอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์กาลีเซอรอล ที่อัตราการระเหยอินทรีย์ 0.27-1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

อัตราการระเหยอินทรีย์ (กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)	วันที่	กาลีเซอรอล น้ำเข้าระบบ ถึงหมักกรด (มก./ล.)	พื้นที่	กาลีเซอรอล น้ำออกจาก ระบบถึงหมัก กรด (มก./ล.)	พื้นที่	กาลีเซอรอล น้ำออกจาก ระบบถึง หมักก๊าซ มีเทน (มก./ล.)	พื้นที่	สมการ
0.27	29/6/52	134	32,209	N.D.	8,429	N.D.	8,990	$y = 0.0058x - 52.874$
0.46	15/8/52	181	40,388	N.D.	5,158	N.D.	9,194	$y = 0.0058x - 52.874$
0.64	24/10/52	578	77,292	84.06	28,208	47.93	24,617	$y = 99382x + 19854$
1.10	18/12/52	1125	131,621	669	86,363	51.16	17,937	$y = 99382x + 19854$
1.50	9/3/53	2028	221,360	1,089	128,064	669	86,363	$y = 99382x + 19854$

หมายเหตุ : N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบค่า

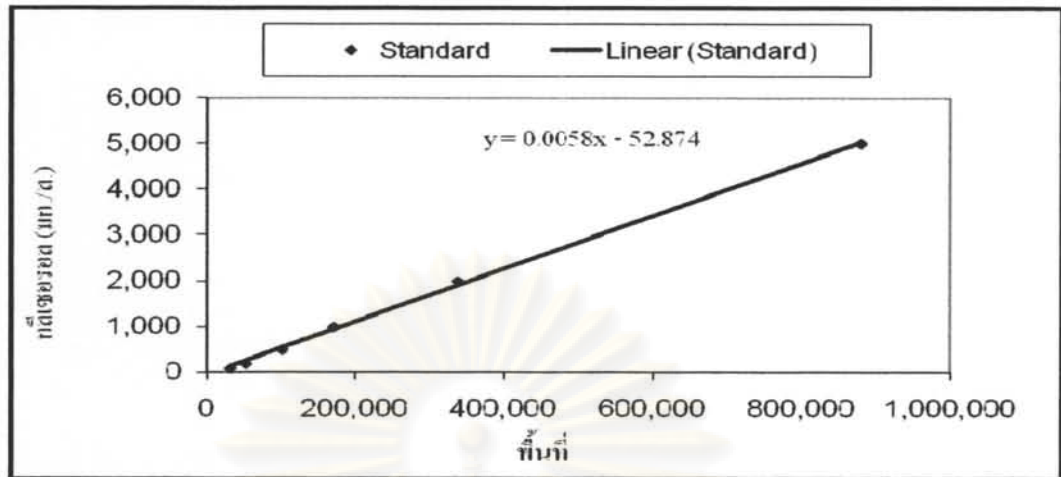
#### ตัวอย่างการคำนวณกาลีเซอรอล

ตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบถึงหมักกรดที่อัตราการระเหยอินทรีย์ เท่ากับ 0.27 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน จากกราฟมาตรฐานกาลีเซอรอล แสดงดังภาพที่ ค-1 จะได้สมการ  $y = 0.0058x - 52.874$  โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นกาลีเซอรอล มีหน่วยเป็น มก./ล. และ  $x$  คือ พื้นที่ จากสมการ  $y = 0.0058x - 52.874$  มีพื้นที่ของตัวอย่างน้ำเสียเท่ากับ 32,209 (ภาพที่ ค-13) ความเข้มข้นของกาลีเซอรอล  $= (32,209 \times 0.0058) - 52.874 = 134$

ดังนั้น กาลีเซอรอลของน้ำเสียเข้าระบบถึงหมักกรด เท่ากับ 134 มิลลิกรัม/ลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ ก-1 มาตรฐานกึ่งเซอร์อดครั้งที่ 1

```
START 17.08.11.39.
  1
  2.54
  3.28
  STOP

C-R1A
SMPL # 00
FILE # 2
REPT # 8
METHOD 41
```

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.54	14.3541		5334
0		3.28	85.6458		31831
TOTAL			100		37165

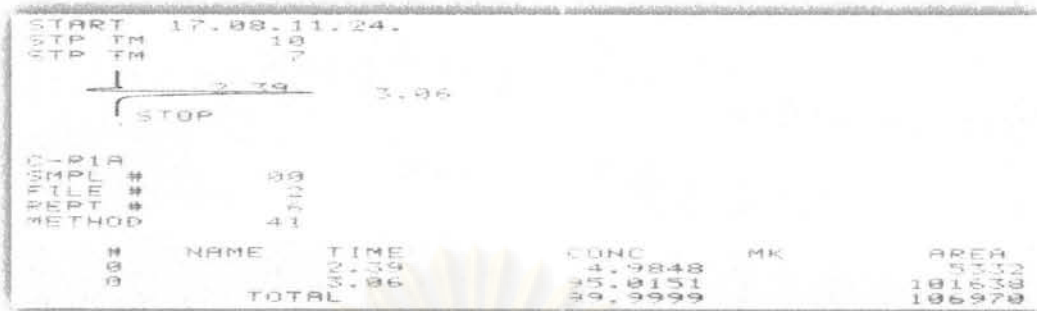
ภาพที่ ก-2 มาตรฐานกึ่งเซอร์อดครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 31,831)

```
START 17.08.11.32.
  1
  2.29
  2.92
  STOP

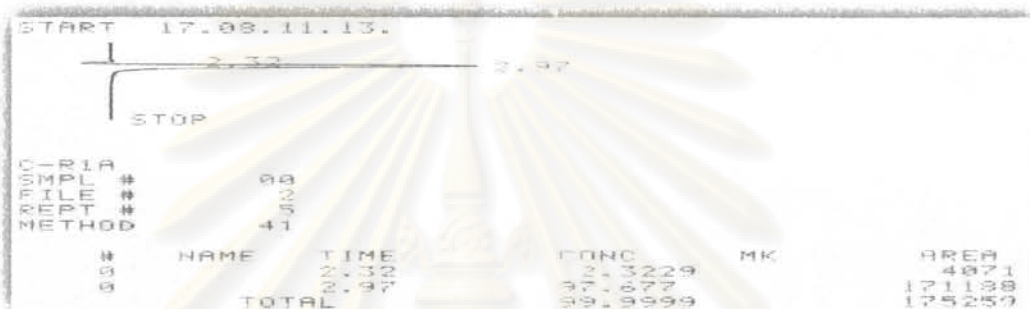
C-R1A
SMPL # 00
FILE # 2
REPT # 7
METHOD 41
```

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.29	9.5847		5567
0		2.92	90.4151		52521
TOTAL			99.9999		58089

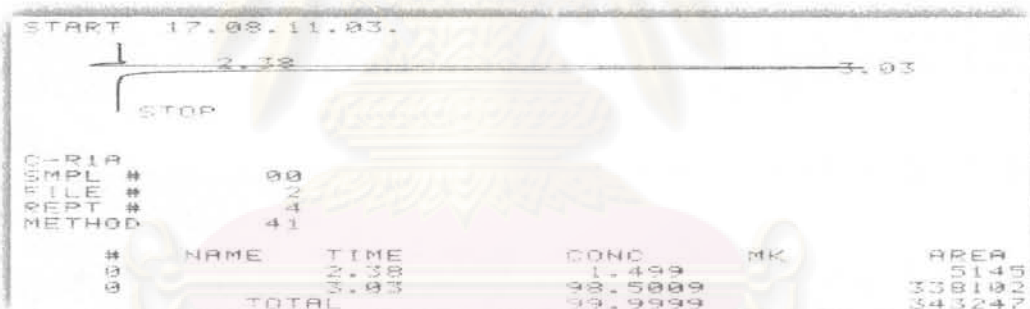
ภาพที่ ก-3 มาตรฐานกึ่งเซอร์อดครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.2 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 52,521)



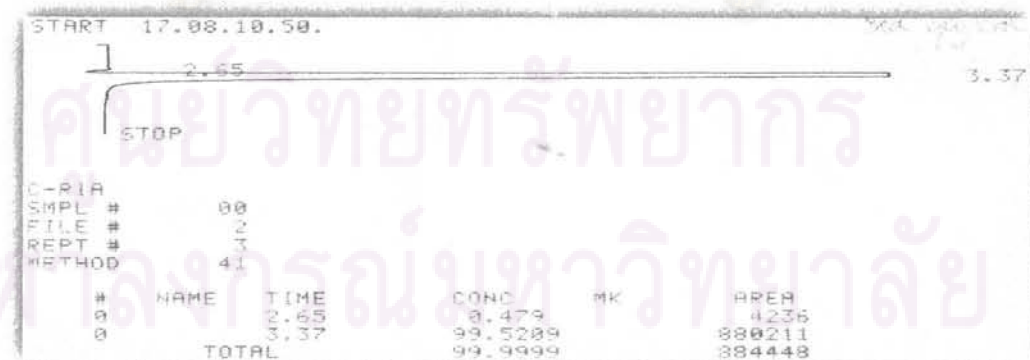
ภาพที่ ก-4 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 101,638)



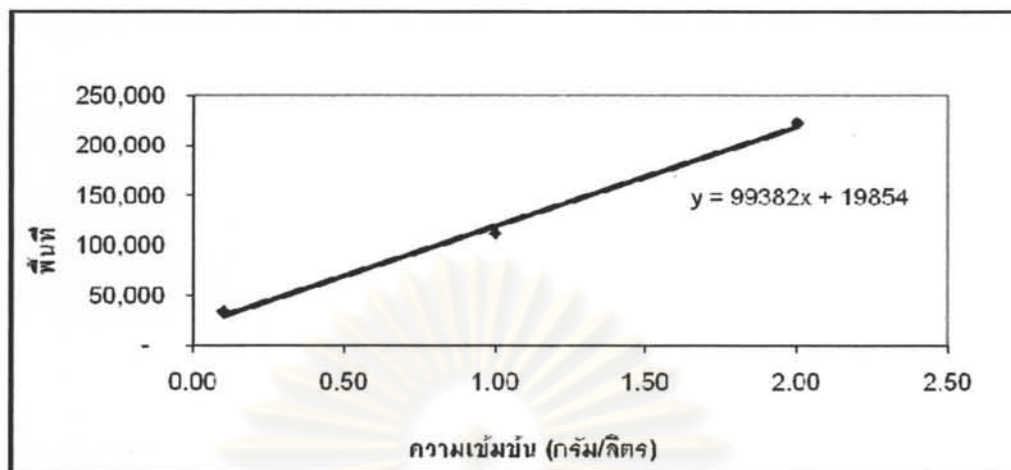
ภาพที่ ก-5 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 1.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 171,138)



ภาพที่ ก-6 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 2.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 338,102)



ภาพที่ ก-7 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้น 5.0 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 880,211)



ภาพที่ ก-8 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2

```

START 27.01.11.56.
LOCK 2.7
2.92 57
STOP 5.3
C-R1A
SMPL # 00
FILE # 2
REPT # 16
METHOD 41
# NAME TIME CONC MK AREA
0 2.92 14.5203 6954
0 3.57 70.0245 33539
0 5.3 15.4551 7402
TOTAL 99.9999 47896

```

ภาพที่ ก-9 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 33,539)

```

START 27.01.12.09.
3.55
STOP
C-R1A
SMPL # 00
FILE # 2
REPT # 18
METHOD 41
# NAME TIME CONC MK AREA
0 3.55 99.9999 112118
TOTAL 99.9999 112118

```

ภาพที่ ก-10 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2.0 ที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 112,118)



START 27.01.10.20.  
LOCK- 2.5

2.66 3.53  
STOP 5:45

C-R1A  
SMPL # 00  
FILE # 2  
REPT # 2  
METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		3.53	99.9374		221991
0		5.45	0.0625	T	138
TOTAL			99.9999		222130

ภาพที่ ก-11 มาตรฐานกลีเซอรอลครั้งที่ 2 ที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร (พื้นที่เท่ากับ 221,991 )

2.83 3.35  
STOP

C-R1A  
SMPL # 00  
FILE # 2  
REPT # 20  
METHOD 41

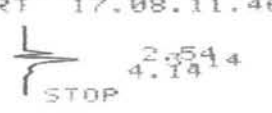
#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.83	18.5779		91177
0		3.35	81.422	V	399604 ✓
TOTAL			99.9999		490781

ภาพที่ ก-12 น้ำเสียไบโอดีเซล (น้ำเสียจริง) มีพื้นที่เท่ากับ 399,604 ใช้สมการ  $y = 0.0058x - 52.874$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### นำเสียเข้าระบบดังหมักกรด

START 17.08.11.46. KW 11

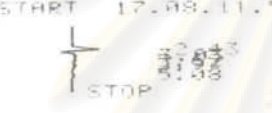


C-R1A  
 SMPL # 00  
 FILE # 2  
 REPT # 9  
 METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.54	19.5246		9461
0		3.14	66.47		32209
0		4.14	14.0053	V	6786
TOTAL			99.9999		48457

### นำเสียออกจากระบบดังหมักกรด

START 17.08.11.54. KW 05 1 24

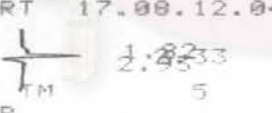


C-R1A  
 SMPL # 00  
 FILE # 2  
 REPT # 10  
 METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.43	29.1825		11240
0		3.03	21.8846		8429
0		3.63	10.6854	V	4115
0		4.92	24.9142	V	9596
0		5.08	13.3333	V	5135
TOTAL			99.9999		38519

### นำเสียออกจากระบบดังหมักก๊าซมีเทน

START 17.08.12.04. KW 05 1 24



C-R1A  
 SMPL # 00  
 FILE # 2  
 REPT # 11  
 METHOD 41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		1.82	17.8252		6317
0		2.33	56.8896	V	20134
0		2.93	25.385		8990
TOTAL			99.9999		35442

ภาพที่ ก-13 ผลการวิเคราะห์ก๊าสเซอร์ดที่อัตราภาวะสารอินทรีย์ 0.27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

### นำเสียบออกจากระบบถังหมักกรด

START 17.08.12.17.      3.217986

STOP 3.217986

C-P1A  
 SMPL #        00  
 FILE #        2  
 REPT #        13  
 METHOD        41

#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		3.56	54.8842		10877
0		3.25	26.0287		5158
0		3.77	19.0887	M	3782
TOTAL			99.9999		19818

### นำเสียบออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน

START 17.08.13.14.      3.4679

STOP 3.4679

C-R1A  
 SMPL #        00  
 FILE #        2  
 REPT #        16  
 METHOD        41

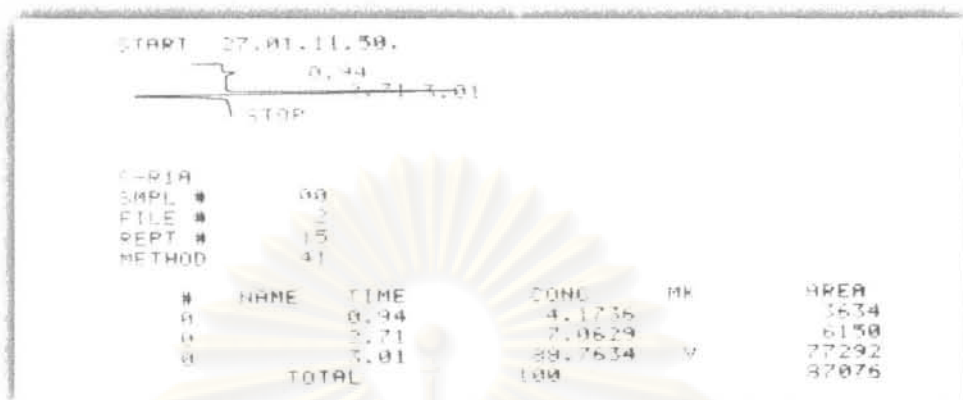
#	NAME	TIME	CONC	MK	AREA
0		2.79	66.438		18201
0		3.48	33.5619		9194
TOTAL			99.9999		27396

ภาพที่ ก-14 ผลการวิเคราะห์หัดชีเชอรอลที่อัตราภาวะสารอินทรีย์ 0.46กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

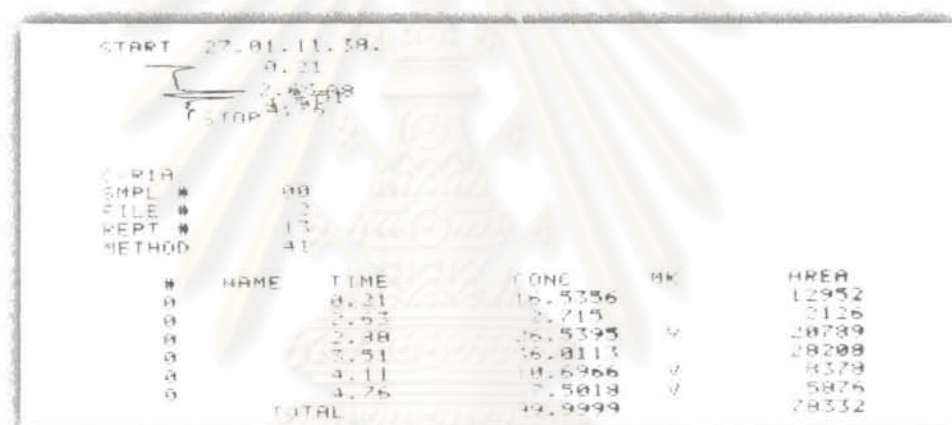
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### น้ำเสียเข้าระบบถังหมักกรด



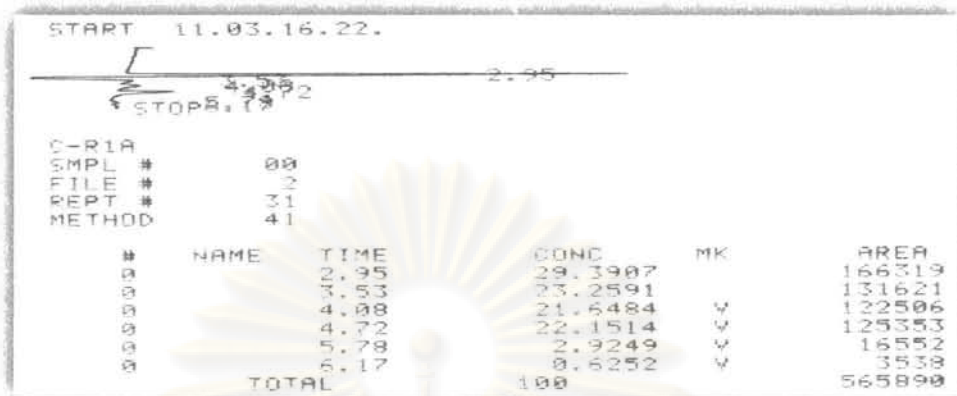
### น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด



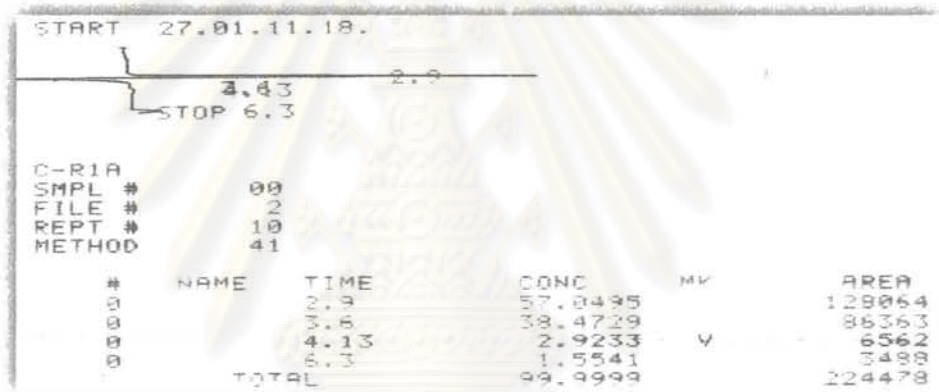
ภาพที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์ก๊าสเซอร์อดที่อัตราภาวะสารอินทรีย์ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

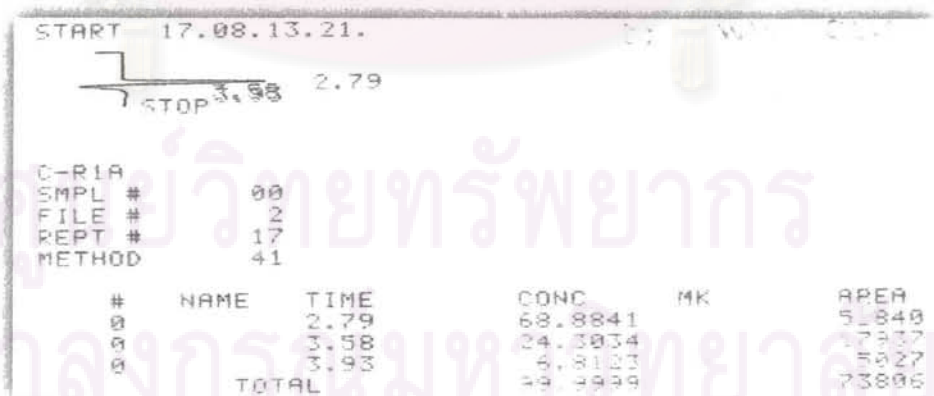
### น้ำเสียเข้ระบบถังหมักกรด



### น้ำเสียออกจากระบบถังหมักกรด

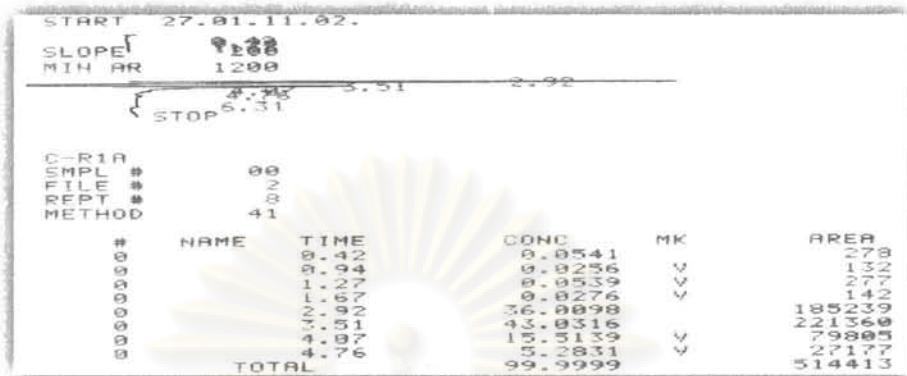


### น้ำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน

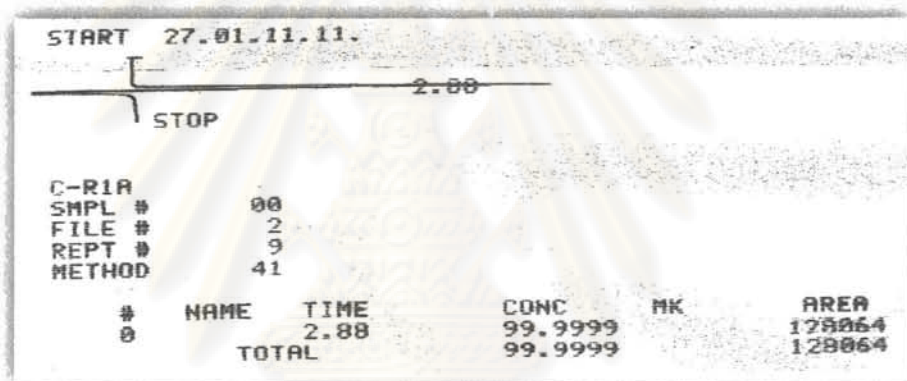


ภาพที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์ก๊าศที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

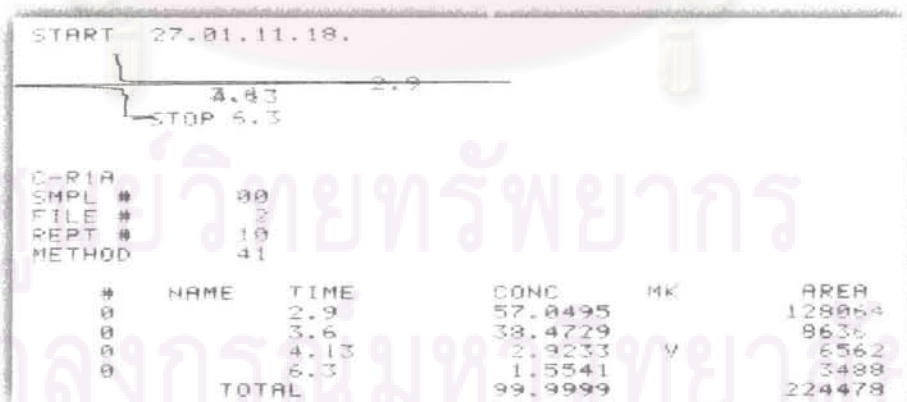
นำเสียเข้าระบบถังหมักกรด



นำเสียออกจากระบบถังหมักกรด



นำเสียออกจากระบบถังหมักก๊าซมีเทน



ภาพที่ ก-17 ผลการวิเคราะห์ก๊าสโครดที่อัตราภาวะสารอินทรีย์ 1.50 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน





ภาคผนวก ง  
ผลการวิเคราะห์ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรด

อัตราการระชีไอคี่ (กก.ชีไอคี่/ลบ.ม.-วัน)	อัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	ร้อยละปริมาณ ก๊าซมีเทน	ปริมาณก๊าซชีวภาพ ต่อชีไอคี่ที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีไอคี่ที่ถูกกำจัด)	ปริมาณก๊าซมีเทน ต่อชีไอคี่ที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีไอคี่ที่ถูกกำจัด)
0.46	0.239	56.23	0.214	0.120
0.64	0.481	57.68	0.246	0.142
1.10	1.048	60.30	0.308	0.186
1.50	1.706	60.48	0.383	0.232

ตารางที่ ง-2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ของระบบถังหมักก๊าซมีเทน

อัตราการระชีไอคี่ (กก.ชีไอคี่/ลบ.ม.-วัน)	อัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	ร้อยละปริมาณ ก๊าซมีเทน	ปริมาณก๊าซชีวภาพ ต่อชีไอคี่ที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีไอคี่ที่ถูกกำจัด)	ปริมาณก๊าซมีเทน ต่อชีไอคี่ที่ถูกกำจัด (ล./กก.ชีไอคี่ที่ถูกกำจัด)
0.46	0.166	66.84	0.208	0.139
0.64	0.329	69.67	0.242	0.169
1.10	0.706	64.72	0.297	0.192
1.50	1.128	63.60	0.390	0.248

ตารางที่ ง-3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบ  
สองขั้นตอน

อัตราการสารอินทรีย์ (กก.ชีไอคี่/ลบ.ม.-วัน)	วันที่	ตัวอย่าง	พื้นที่ทั้งหมด	ร้อยละการผลิต ก๊าซมีเทน
0.46	15/8/52	Standard	11,653,879	99.95
		ระบบถังหมักกรด	6,556,254	56.23
		ระบบถังหมักก๊าซมีเทน	7,793,349	66.84
0.64	24/10/52	Standard	7,568,316	99.95
		ระบบถังหมักกรด	4,367,588	57.68
		ระบบถังหมักก๊าซมีเทน	5,275,483	69.67
1.10	21/01/53	ระบบถังหมักกรด	-	60.30
		ระบบถังหมักก๊าซมีเทน	-	64.70
1.50	15/03/53	ระบบถังหมักกรด	-	60.50
		ระบบถังหมักก๊าซมีเทน	-	63.60

## มาตรฐานก๊าซมีเทน

** CALCULATION REPORT **							
CH PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK IDNO	CONC	NAME	
1	2	0.657	11653879	E	100		
TOTAL			11653879	1387129	100		

## ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรด

** CALCULATION REPORT **							
CH PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK IDNO	CONC	NAME	
1	3	0.639	6556254	E	100		
TOTAL			6556254	1387652	100		

## ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักก๊าซมีเทน

** CALCULATION REPORT **							
CH PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	PK IDNO	CONC	NAME	
1	2	0.639	7793349	E	100		
TOTAL			7793349	1387685	100		

ภาพที่ ง-1 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.46 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

มาตรฐานก๊าซมีเทนพื้นที่ 11,653,879 มีร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 99.95

ระบบถังหมักกรดมีพื้นที่ 6,556,254 มีร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน

เท่ากับ  $(6,556,254 \times 99.95) / 11,653,879 = 56.23$

ดังนั้นระบบถังหมักกรดมีร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับร้อยละ 56.23



## มาตรฐานก๊าซมีเทน

0.0 | 0.558

**\*\* CALCULATION REPORT \*\***

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.558	7568316	1387799	E		100	
TOTAL			7568316	1387799			100	

## ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรด

0.0 | 0.542

**\*\* CALCULATION REPORT \*\***

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.542	4367588	1387850	SVE		100	
TOTAL			4367588	1387850			100	

## ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักก๊าซมีเทน

0.0 | 0.558

**\*\* CALCULATION REPORT \*\***

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.558	5275483	1387823	E		100	
TOTAL			5275483	1387823			100	

ภาพที่ ง-2 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

FM

ภาควิชาเคมีอินทรีย์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: SeFM-CT-06-002-A	เลข 0-2218-7623-6
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	โทรสาร 0-2255-6837
		ลำดับเลขที่ 0
		หน้า 1

วันที่ 21 มกราคม 2553

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการทดสอบทางเคมีประกอบในตัวอย่าง GAS

ผู้ส่งตัวอย่าง : นางสาวณิชากร มหัทธนะ โมเดลยานยนต์ CT072/S3  
 หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ  
 ชนิดตัวอย่าง : Gas  
 วันที่รับตัวอย่าง : 12 มกราคม 2553 วันที่ตรวจวิเคราะห์ : 12 มกราคม 2553

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNIGAN

ผลการวิเคราะห์ :


Carrier gas : Helium flow rate: 26 ml/min  
 Injector Temperature : 120 °C  
 Column : MOLECUCLA BIEVE, Temperature program set at 40 °C for 10 min  
 Detector : TCD at 150 °C  
 Injection Volume : 1 ml


มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ :

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Methane
1.	Sample 1 (ACID : ฝัก 1)	60.9
2.	Sample 2 (CH <sub>4</sub> : ฝัก 2)	64.7

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

  
 (นางสาวณิชากร อารีโยภาส)  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 21 มกราคม 2553

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เข็มเมืองนิคม)  
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research  
 วันที่ 21 มกราคม 2553

- ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้สำหรับอ้างอิงเท่านั้น
- บริษัทฯ อนุญาตให้นำรายงานฉบับนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

เลขที่	ผู้รับ	วิธีการรับ	สถานที่รับ	ระยะเวลา	ผู้รับผิดชอบ	วันที่รับ	ผู้รับ
SeFM-CT-06-002-A	นางสาวณิชากร	ส่งมอบ	สำนักงานวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์	1 ปี	ดร.น.	21	นางสาวณิชากร

ภาพที่ 3-3 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบดั่งหมักกรดและระบบดั่งหมักก๊าซมีเทน  
 ที่อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กก.ซีโอดีบ.ม.-วัน

FM

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7523-5 โทรสาร 0-2255-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการแก้ไข 0 หน้าที่ 1

วันที่ 15 มีนาคม 2553

**รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ**

เรื่อง รายงานผลการทดสอบหาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ผู้ส่งตัวอย่าง : นางสาวธันยพร นงศ์นวล โบนเสนอราคาเลขที่ CT105/53  
 หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ  
 ชนิดตัวอย่าง : Gas  
 วันที่รับตัวอย่าง : 12 มีนาคม 2553 วันที่วิเคราะห์ : 12 มีนาคม 2553

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ซีรี่ส์ THERMO FINNIGAN

สภาวะการวิเคราะห์ :


Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min  
 Injector Temperature : 120 °C  
 Column : MOLECULA SIEVE, Temperature program set at 40 °C for 10 min  
 Detector : TCD at 150 °C  
 Injection Volume : 1 ml


มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ :

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Methane
1.	Sample 1 (ACID : ดึง 1)	60.5
2.	Sample 2 (CH <sub>4</sub> : ดึง 2)	63.6

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

  
 (นางสาววันวิสา อาศอญาคติ)  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 15 มีนาคม 2553

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เว็ทน้อยเจริญ)  
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research  
 วันที่ 15 มีนาคม 2553

- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
 2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพื่อบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

เอกสาร	ผู้จัดเก็บ	วิธีการจัดเก็บ	สถานที่เก็บเงินเก็บ	ระยะเวลาที่เก็บ	ผู้ปฏิบัติหน้าที่	วิธีการทำลาย	ผู้มีหน้าที่ทำลาย
ScFM-CT-06-002-A	เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์	เข้าลิ้น	คลังเอกสารวิชาการของ เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์	1 ปี	คน	ทิ้ง	เจ้าหน้าที่ผู้วิเคราะห์

ภาพที่ ง-4 ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนของระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน  
 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปนัดดา นิลอาญา เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2525 สถานที่เกิดจังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย