

การย่อยร่วมแบบไม่ใช่ออกซิเจนของมูลสุกร ไบโพล์ม และขยะของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม
2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน



นางสาวอัญชลี แทนนิล

ศูนย์วิทยพัทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANAEROBIC CO-DIGESTION OF PIG MANURE, PALM LEAF AND MUNICIPAL SOLID
WASTE IN COMBINED TWO STAGE REACTOR AND IN MEMBRANE REACTOR



Miss Aunchalee Tannil

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกร ไบโพลัม
และขยะของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและ
ถังปฏิกรณ์เมมเบรน

โดย

นางสาวอัญชลี แทนนิล

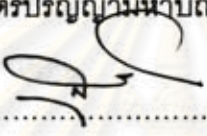
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

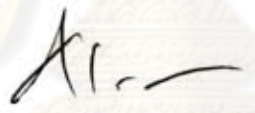
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

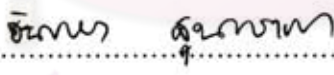
รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา

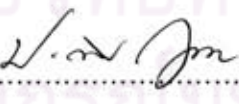
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

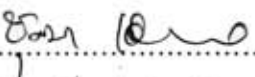

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คุณธรราร)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุติมา เอี่ยมไชติขวลิต)

อัญชลี แทนนิล : การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกร ใบปาล์ม และขยะ
ของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน (ANAEROBIC
CO-DIGESTION OF PIG MANURE, PALM LEAF AND MUNICIPAL SOLID WASTE
IN COMBINED TWO STAGE REACTOR AND IN MEMBRANE REACTOR)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. ชันทอง สุนทรภา , 143 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา อัตราการเกิดแก๊สมีเทนและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในระบบ
การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกรกับเศษอาหารและมูลสุกรกับใบปาล์มที่อัตราส่วน
100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 20
ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน พบว่าถังปฏิกรณ์เมมเบรนให้ประสิทธิภาพ
การบำบัดน้ำเสียสูงกว่าถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน แต่ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทน
การนำเศษอาหารมาย่อยสลายร่วมกับมูลสุกรที่สัดส่วนของเศษอาหาร และสัดส่วนปริมาณ
ของแข็งที่สูงขึ้นให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น โดยผลการใช้ปริมาณของแข็งร้อยละ 20 ที่
อัตราส่วน 70:30 ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนให้สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนร้อยละ 59.6 และ
ให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมากที่สุดเท่ากับ 1.57 ± 0.12 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัด
ซีไอดี, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย
ในน้ำทิ้งเท่ากับ $87.5 \pm 0.9\%$, $47.1 \pm 1.3\%$ และ $49.7 \pm 1.9\%$ ตามลำดับ เมื่อนำใบปาล์มเป็นโค
ซับสเตรตที่ปริมาณของแข็งร้อยละ 20 ที่อัตราส่วน 70:30 ในถังปฏิกรณ์เมมเบรน พบว่าให้
สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนร้อยละ 60.5 ในอัตรา 0.86 ± 0.09 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการ
กำจัดซีไอดี, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง
ระเหยง่ายในน้ำทิ้งเท่ากับ $91.7 \pm 0.7\%$, $52.2 \pm 2.7\%$ และ $43.2 \pm 1.3\%$ ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... *อัญชลี แทนนิล*.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *ชันทอง สุนทรภา*.....
ปีการศึกษา.....2553.....

5172551823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : ANAEROBIC CO-DIGESTION / COMBINED TWO STAGE REACTOR /
MEMBRANE REACTOR

AUNCHALEE TANNIL: ANAEROBIC CO-DIESTION OF PIG MANURE, PALM
LEAF AND MUNICIPAL SOLID WASTE IN COMBINED TWO STAGE REACTOR
AND IN MEMBRANE REACTOR. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. KHANTONG
SOONTARAPA, 143 pp.

This research investigated the methane production and wastewater treatment efficiencies in anaerobic co-digestion of pig manure and food waste as well as of pig manure and palm leaf. The studied ratios were varied at 100:0, 90:10, 80:20 and 70:30 with TS contents of 5%, 10% and 20% in combined two stage reactor and membrane reactor. It was found that the membrane reactor provided better treatment efficiencies than the combined two stage reactor but the difference in methane production was not significant. Increasing the food waste ratios and the total solid contents, the methane production was increased. The methane portion and methane production in membrane reactor at 70:30 ratio and 20%TS were 59.6% and 1.57 ± 0.12 L/d, respectively. The treatment efficiencies in term of COD, TS and VS removal were $87.5 \pm 0.9\%$, $47.1 \pm 1.3\%$ and $49.7 \pm 1.9\%$, respectively. Using palm leaf as co-substrate at 70:30 ratio and 20%TS, the obtained performances in membrane reactor were 60.5 %, 0.86 ± 0.09 L/d, $91.7 \pm 0.7\%$, $52.2 \pm 2.7\%$ and $43.2 \pm 1.3\%$, respectively.

Department : Chemical Technology
Field of Study : Chemical Technology
Academic Year : 2010

Student's Signature Aunchalee Tannil
Advisor's Signature Khantong Soontarapa

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถเป็นอย่างยิ่งจาก รศ.ดร.ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์ ผศ.ดร. ประพันธ์ คูชลธारा และ ดร. ชุตติมา เอี่ยมโชติชวลิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความแนะนำและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ตลอดจนข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิจัยปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

ขอขอบพระคุณ คุณสรพหล นิติกาญญา รองกรรมการผู้จัดการ บริษัท เอส พี เอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างมูลสุกร

ขอขอบพระคุณ คุณลือชา ชาวสวน ผู้จัดการส่วนวิศวกรรมบริการ บริษัท มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาเอื้อเฟื้อให้ความอนุเคราะห์ ในการเก็บเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น อำนวยความสะดวกการเข้าไปปฏิบัติงาน และให้ความรู้ทางด้านวิชาการตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวแทนนิตทุกคน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด ความดีและคุณประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แก๊สชีวภาพ.....	5
2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	6
2.2.1 ไฮโดรไลซิส.....	7
2.2.2 กระบวนการสร้างกรด.....	8
2.2.3 กระบวนการสร้างแก๊สมีเทน.....	11
2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	12
2.3.1 Fermentative bacteria.....	12
2.3.2 Acetogenic bacteria.....	12
2.3.3 Methanogenic bacteria.....	13
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	14
2.4.1 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม.....	14
2.4.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ.....	16
2.5 ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอน.....	19
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลาย.....	24
3.2 ชุดการทดลองที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลาย.....	24
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.3.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบถึงปฏิกรณ์ทดลองหลัก.....	27
3.3.2 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติสารอินทรีย์วัตถุประสงค์.....	28
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน.....	28
3.3.4 การทดสอบระบบถึงปฏิกรณ์.....	32
3.3.5 การเริ่มต้นและการเดินระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	33
3.3.6 การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำและอัตราการผลิตแก๊สมีเทน.....	34
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการทดลอง.....	35
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบถึงปฏิกรณ์ทดลองหลัก.....	36
4.2 ผลการศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	36
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรน.....	39
4.4 ผลการศึกษาความมีสัมฤทธิ์ผลของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของ ชุดการทดลอง.....	41
4.4.1 ค่าพีเอช.....	41
4.4.2 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid).....	44
4.4.3 สภาพความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity).....	47
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....	50
4.5.1 ผลของการใช้เศษอาหารเป็นโคซับสเตรท.....	50
4.5.2 ผลของการใช้ไบปาล์มเป็นโคซับสเตรท.....	53
4.5.3 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด.....	55
4.5.4 ผลของลักษณะถึงปฏิกรณ์.....	61
4.6 อัตราการเกิดแก๊สมีเทน.....	64
4.6.1 สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ.....	64
4.6.2 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด.....	65
4.6.3 ผลอัตราส่วนมูลสุกรกับเศษอาหารและมูลสุกรกับไบปาล์มในถึง ปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน.....	67

บทที่	หน้า
4.6.4 ผลของโคซึบสเตรต.....	69
4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่ออินทรีย์สารที่ถูกกำจัด.....	71
4.7.1 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด.....	71
4.7.2 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัด.....	74
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	84
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ.....	98
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง.....	104
ภาคผนวก ง วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง.....	34
4.1	สมบัติของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	37
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของไบโพลัม.....	37
4.3	สมบัติของเมมเบรน.....	39



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	6
2.2	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนHydrolysis และ Acidogenesis...	7
2.3	กระบวนการย่อยสลายกลูโคส.....	9
2.4	กระบวนการย่อยสลายกลูโคสโดยผ่าน Embden-Meyerh of pathway.....	10
3.1	ชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.2	ถังปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน.....	25
3.3	ถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	26
3.4	เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ติดตั้งในถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	26
3.5	ลักษณะชั้นที่ติดแผ่นเมมเบรนไคโตซาน.....	27
3.6	ชุดการทดลองหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างมีเทน.....	27
3.7	ชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ.....	30
3.8	เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K.....	32
3.9	ลักษณะและขนาดที่ใช้ทดสอบเมมเบรนแบบมีแผ่นรองรับ.....	32
4.1	ระยะเวลาของปฏิกิริยาการสร้างกรดและปฏิกิริยาการสร้างมีเทน.....	36
4.2	องค์ประกอบเคมีของพีช.....	38
4.3	ภาพภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.4	ค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	42
4.5	ค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม.....	43
4.6	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร....	45
4.7	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม.....	46
4.8	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	48
4.9	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม....	49
4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการย่อยร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร..	50
4.11	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการย่อยร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร..	51
4.12	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	52

4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม....	54
4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.	55
4.15	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	55
4.16	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	56
4.17	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	57
4.18	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	58
4.19	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	59
4.20	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	60
4.21	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	61
4.22	ผลของลักษณะถังปฏิกรณ์.....	63
4.23	องค์ประกอบแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน.....	65
4.24	องค์ประกอบแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	65
4.25	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดแก๊สมีเทนในระบบการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	66
4.26	ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดแก๊สมีเทนในระบบการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	67
4.27	ผลของอัตราส่วนมูลสุกรกับเศษอาหารในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	68
4.28	ผลของอัตราส่วนมูลสุกรกับไบโपाल์มในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	69
4.29	ผลของโคซบัสเตรตในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน.....	70
4.30	ผลของโคซบัสเตรตในถังปฏิกรณ์เมมเบรน.....	71
4.31	อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	72

4.32	อัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	73
4.33	อัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร.....	74
4.34	อัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม.....	75



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาประเทศและมีความสำคัญกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของทุกประเทศ ทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและมีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคต ปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกกำลังประสบปัญหาวิกฤตการณ์พลังงานอันเนื่องมาจากราคาน้ำมันดิบที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลาและมีปริมาณลดน้อยลง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแหล่งพลังงานอื่นๆ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดิบ เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากชีวมวล พลังงานจากแก๊สชีวภาพ เป็นต้น โดยที่พลังงานจากแก๊สชีวภาพได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเพราะการผลิตแก๊สชีวภาพ นอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดปริมาณขยะของเสียลงได้อีกด้วย

แก๊สชีวภาพได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) อาทิเช่น เปลือกถั่วเขียว เปลือกกล้วย เปลือกสับปะรด มูลวัว ขยะจากบ้านเรือน ผักผลไม้ และมูลสุกร เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลายขั้นตอน แต่ละขั้นตอนต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละพวกที่แตกต่างกันออกไป จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องคือ จุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทนและสร้างมีเทน โดยจุลินทรีย์ทั้งสองประเภทจะมีสภาพการดำรงชีวิตที่แตกต่างกันทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและอัตราการเจริญเติบโต ถ้าหากทำการย่อยสลายภายในถังเดียวกันย่อมเป็นการยากที่จะปรับสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ทั้ง 2 ประเภท ถ้าจุลินทรีย์ประเภทที่ไม่สร้างมีเทนมีการเจริญเติบโตและใช้สารอาหารเร็วกว่าจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน จะทำให้เกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณที่มาก จนจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ทัน ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าพีเอชจะต่ำลงทำให้สภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไปส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนทำให้ระบบล้มเหลวได้ [1]

เพื่อที่จะแก้ไขสภาวะดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้แยกขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทนออกจากกันแต่ให้อยู่ภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน เรียกว่าถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถใช้ซับสเตรตมากกว่า 1 ชนิดได้ เรียกว่า Co-digestion เพื่อปรับปรุงอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงมากๆ จุลินทรีย์สร้างมีเทนจะใช้ไนโตรเจนอย่างรวดเร็วเพื่อสร้างโปรตีนให้กับร่างกายตัวมันเองและจะไม่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มีอยู่ในซับสเตรตทำให้อัตราการผลิตแก๊สต่ำ แต่ถ้ามีค่าต่ำเกินไปไนโตรเจนจะถูกปลดปล่อยออกมาและสะสมอยู่ในรูปแอมโมเนีย เมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นค่าพีเอชจะมีค่าสูงขึ้น

ทำให้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน งานวิจัยนี้จึงสนใจการย่อยสลายมูลสุกรร่วมกับของเสียที่เกิดจากกิจกรรมอื่นๆ บริเวณฟาร์มสุกร ซึ่งได้แก่ เศษอาหารและใบปาล์ม

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีและปริมาณของแข็งสูง ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการมักไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง จึงต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นหลัง (Post treatment) เช่น บึงประดิษฐ์ (Oxidation Pond) หรือกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aeration tank) เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและเพิ่มเนื้อที่ในการบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้จึงนำเมมเบรนมาติดตั้งเพิ่มเติมอยู่ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน เรียกว่า ถังปฏิกรณ์เมมเบรน เพื่อลดภาระในกระบวนการบำบัดขั้นหลังหรือเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดและอัตราส่วนผสมของมูลสุกรกับใบปาล์มและมูลสุกรกับเศษอาหารต่อปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน
2. ศึกษาผลการใช้ถังปฏิกรณ์เมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้ง เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้เศษอาหารจากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์และคณะนิติศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นตัวแทนขยะชุมชน
2. ใช้ใบปาล์มและมูลสุกรจากฟาร์มกรณีศึกษา จังหวัดราชบุรี
3. ทดลองศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) โดยป้อนสารอินทรีย์วันละ 1 ครั้ง ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศ (25-38 องศาเซลเซียส)
4. อัตราส่วนผสมของมูลสุกรกับเศษใบปาล์มและมูลสุกรกับเศษอาหารที่ศึกษาคือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน คือ 5%, 10% และ 20% โดยน้ำหนัก
5. วิเคราะห์สมบัติของมูลสุกร ใบปาล์ม และเศษอาหาร ดังนี้
 - ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids)
 - ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Volatile solids)
 - ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)

- ค่าพีเอช
 - ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)
 - ปริมาณเจลดาทาร์ไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen)
 - อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
 - องค์ประกอบทางเคมีของไบโพลีเมอร์
6. วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน ดังนี้
- ค่าฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ (Pure water flux)
 - ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)
 - ลักษณะพื้นฐานวิทยา
 - Molecular Weight Cut-Off
7. วิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียเข้า-ออกจากระบบ ดังนี้
- ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids)
 - ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Volatile solids)
 - ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)
 - ค่าพีเอช
 - ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile acid)
 - ปริมาณเจลดาทาร์ไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl Nitrogen)
 - สภาพด่างทั้งหมด (Total alkalinity, TALK)
8. อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ
2. ศึกษาหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างมีเทน เพื่อนำไปออกแบบลักษณะถังปฏิกรณ์
3. สร้างถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน
4. วิเคราะห์สมบัติของมูลสุกร ไบโพลีเมอร์ เศษอาหาร และเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น
5. วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน

6. ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สมีเทน ดังนี้
 - ลักษณะถังปฏิกรณ์
 - ปริมาณของแข็งทั้งหมด
 - อัตราส่วนของมูลสุกรกับโคชั๊บสเตรต
 - ชนิดของโคชั๊บสเตรต
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์แต่ละชนิด
7. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ
2. สามารถกำจัดขยะของเสียในฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถหมุนเวียนน้ำทิ้งจากถังปฏิกรณ์กลับไปใช้ใหม่ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สชีวภาพ (Biogas)

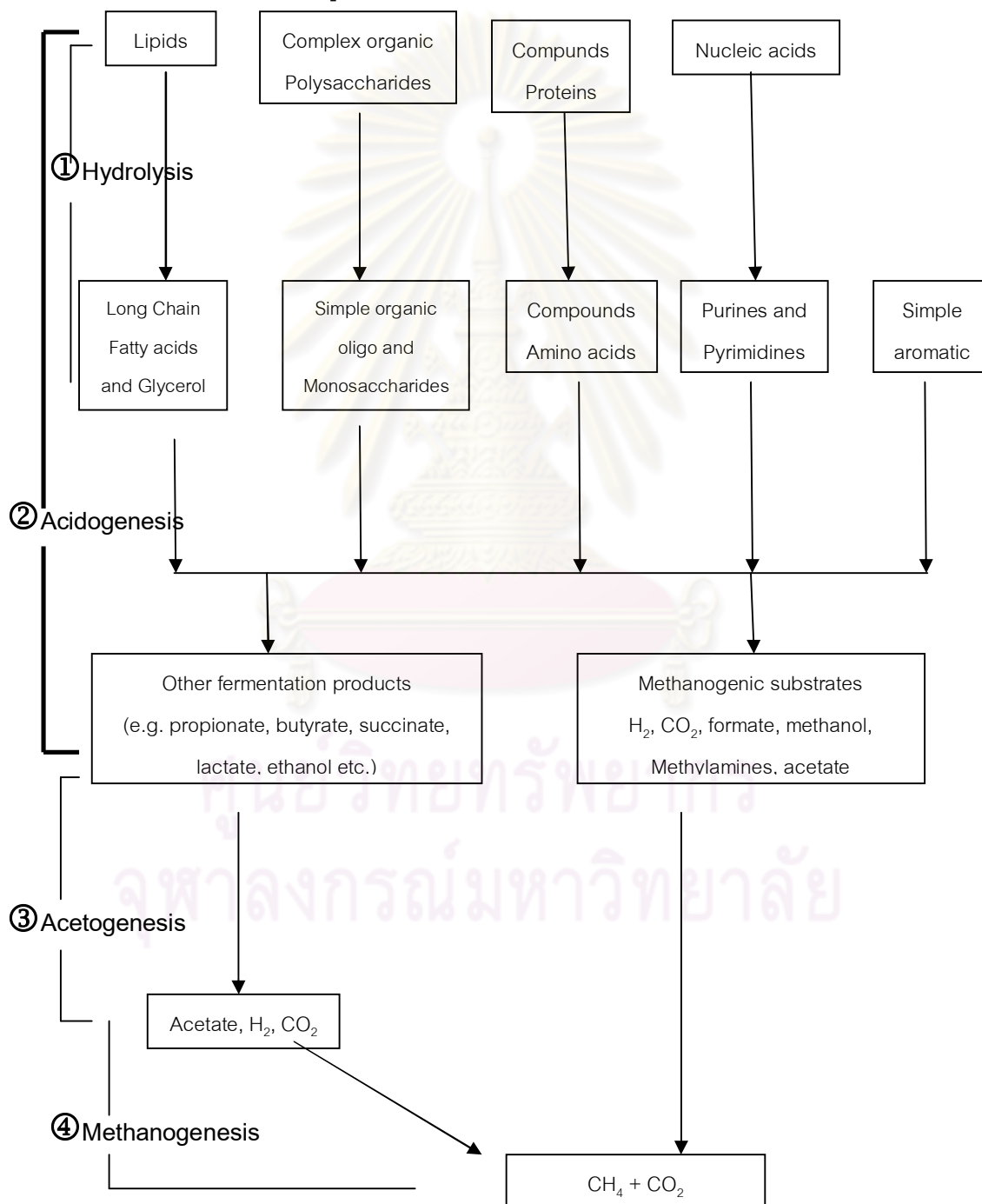
แก๊สชีวภาพ (Biogas) เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น จากคน สัตว์ ฟืช และอินทรีย์วัตถุทุกชนิดที่เน่าเปื่อยได้ โดยจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งที่มีชีวิตอยู่ได้โดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) ศักยภาพการเกิดแก๊สขึ้นอยู่กับชนิดของอินทรีย์วัตถุ ยกตัวอย่างเช่น ฟืชสด จะเกิดแก๊สยากกว่ามูลสัตว์ เนื่องจากมูลสัตว์จะถูกย่อยมาบางส่วนแล้วจากกระเพาะของสัตว์ทำให้ มีขนาดเล็กกลง จุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นการนำฟืชสดมาย่อยสลายจึงต้อง ผ่านการลดขนาดโดยการสับแล้วทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อลดปริมาณน้ำในฟืชลงเสียก่อน นอกจากมูลสัตว์แล้ว ของเสียหรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ ก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็น แก๊สชีวภาพได้ เช่น น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจาก โรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โรงงานผลิตเบียร์ เป็นต้น [1]

แก๊สชีวภาพ ประกอบด้วยแก๊สมีเทน (Methane) เป็นส่วนใหญ่ มีสมบัติติดไฟได้ ซึ่งมี ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ และสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ แก๊สมีเทนบริสุทธิ์ให้ ค่าความร้อนประมาณ $35,800 \text{ kJ/m}^3$ แก๊สชีวภาพที่มีสัดส่วนแก๊สมีเทน 65 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความร้อนประมาณ $22,400 \text{ kJ/m}^3$ ปริมาณความร้อนของแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO_2) หรือระดับความบริสุทธิ์ของแก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติที่มีส่วนผสมของแก๊สมีเทน โพรเพนและบิวเทน ให้ค่าความร้อนประมาณ $37,300 \text{ kJ/m}^3$ [2]

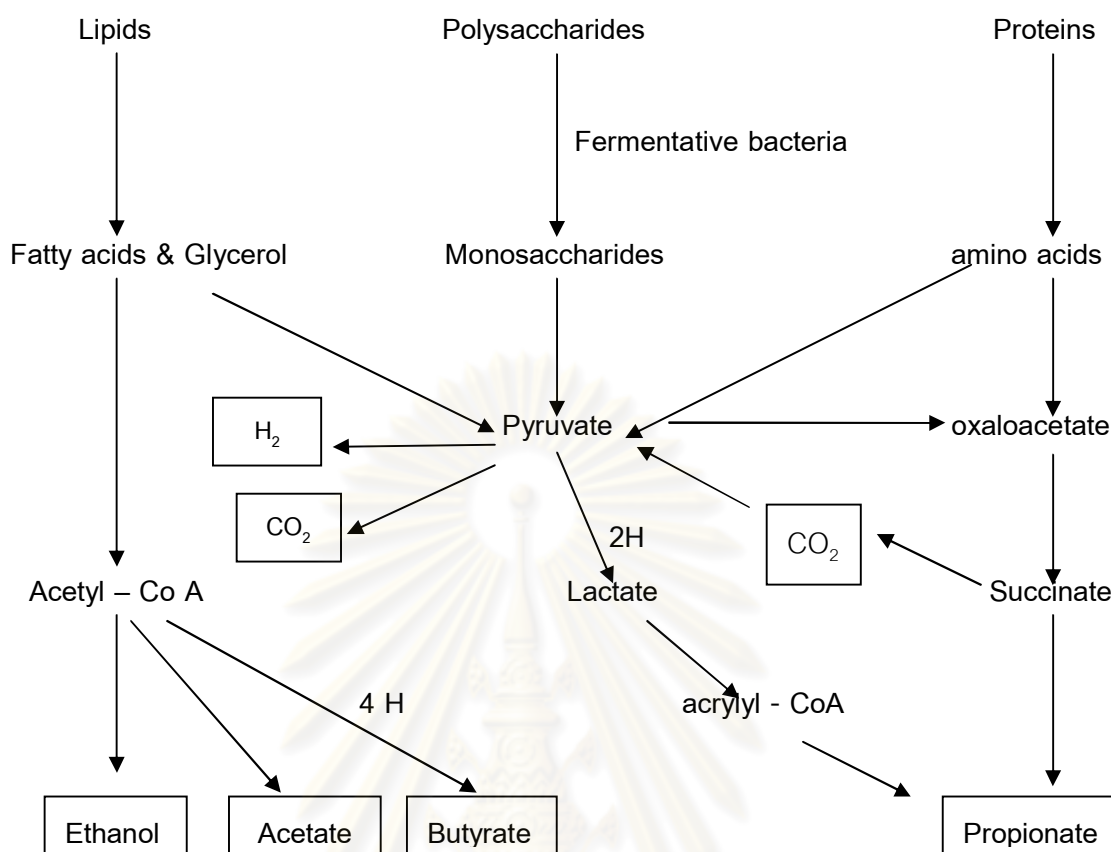
ถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digester) มีแก๊สเกิดขึ้นจำนวนมากขึ้นอยู่กับ ลักษณะตัวอย่างที่ป้อนเข้าระบบ ซึ่งผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-65% และ CO_2 ประมาณ 35-38% ส่วนที่เหลือประมาณ 2% จะเป็นแก๊สอื่นๆ ซึ่งได้แก่ NH_3 , CO , CS_2 , N_2 , N_2O , H_2 และ H_2S ซึ่งสัดส่วนของแก๊สขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ในขณะเดินระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ, องค์ประกอบของน้ำเสีย, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity), Hydraulic Retention Time (HRT), Solid Retention Time (SRT), สารพิษ, Nutrient & Trace Element [2, 3] ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะมีหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนการย่อยสลายและ ขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น

2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) [4-9]

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) ของสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จะถูกย่อยสลายจนให้ได้แก๊สผสมที่ประกอบด้วยแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน [10, 11]



รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis [12]

2.2.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ (polymer) ทั้งที่ละลายน้ำและไม่สามารละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกจากเซลล์ของจุลินทรีย์ (exenzyme) ในกลุ่มแบคทีเรีย hydrolytic และ fermentation ทำให้สารอินทรีย์แตกตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ สารอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตจะถูกย่อยสลายไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยว (monosaccharides) โปรตีนถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอะมิโน (amino acids) ไขมันถูกย่อยสลายไปเป็นกรดไขมัน (fatty acids) และกลีเซอรอล (glycerol) ส่วนกรดนิวคลีอิก (nucleic acids) ถูกย่อยสลายไปเป็น purines และ pyrimidines สารทั้งหมดเหล่านี้จะถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอินทรีย์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แอลกอฮอล์ และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 แต่กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสมีข้อจำกัดในการย่อยสลายของเสียในกลุ่มเซลล์ลูโลสที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ จะมีอัตราการย่อยสลายเซลล์ลูโลส, เฮมิเซลล์ลูโลส โปรตีน และไขมันเท่ากับ 0.04-0.13, 0.54, 0.02-0.03 และ 0.08-1.7 กิโลกรัมต่อวันตามลำดับ [13]

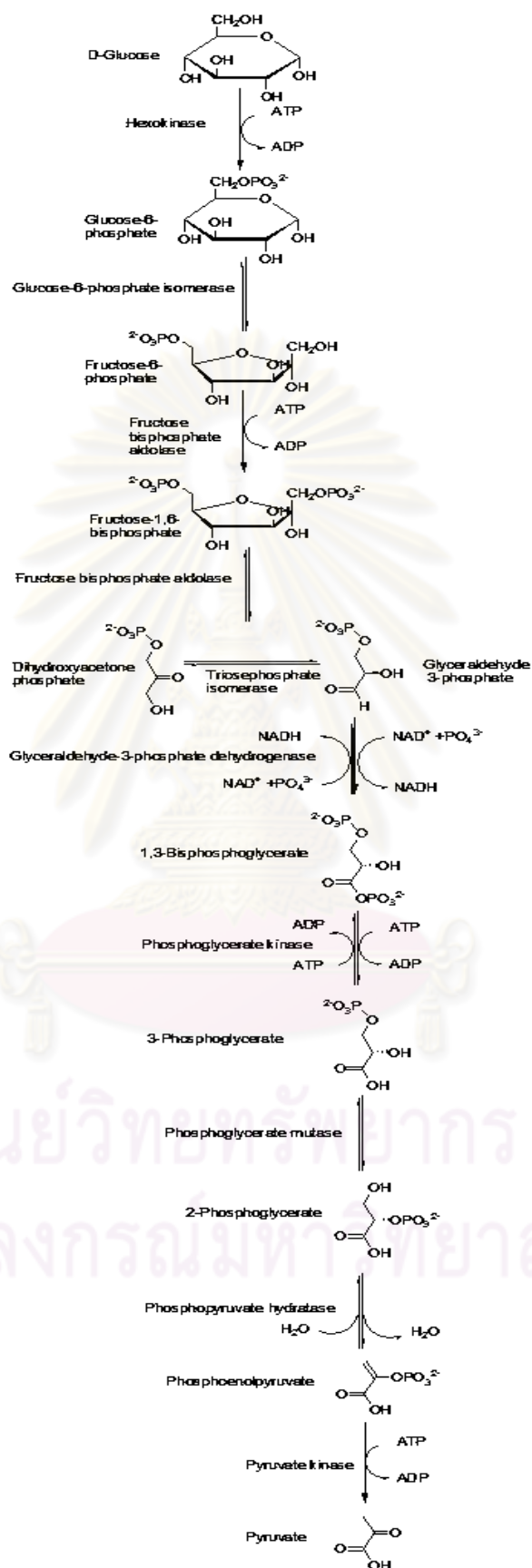
2.2.2 กระบวนการสร้างกรด (Fermentation and acidogenesis)

ขั้นตอนนี้สามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการคือ

2.2.2.1 กระบวนการแอซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

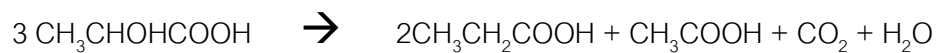
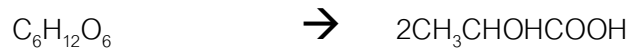
กระบวนการนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้จากขั้นตอนที่ 1 เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น กรดแอซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดแวลเลอิก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นจะมีกรดแอซิติกในปริมาณมากที่สุด มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน เนื่องจากกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนส่วนใหญ่ต้องการใช้กรดแอซิติกเป็นสารตั้งต้น แต่กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งจุลินทรีย์สร้างมีเทนบางชนิดไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตมีเทนได้ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ กรดบิวทิริก กรดโพรไพโอนิก เป็นต้น

วิธีการย่อยสลายกลูโคสโดยผ่าน glycolysis pathway ได้ไพรูเวทเป็นตัวกลางสำคัญและมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งไพรูเวทจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริกและกรดแลคติก นอกจากจุลินทรีย์กลุ่ม hydrolytic bacteria ยังมีจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ lactic acid, butyric acid, propionic acid, acetoclastic และ H₂-utilizing bacteria ซึ่งจะถูกควบคุมโดยปริมาณไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาการรับและให้อิเล็กตรอนของ Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD) ในการควบคุมสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเกิดสารตัวกลางหลักคือ กรดแอซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก กรดแลคติก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งกรดแลคติกจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอซิติกและกรดโพรไพโอนิกโดย Lactic acid bacteria กรดโพรไพโอนิกที่เกิดขึ้นเกิด decarboxylation เป็นกรดแอซิติกโดย propionic acid bacteria และกรดบิวทิริกเกิด β -oxidation เป็นกรดแอซิติกโดย butyric acid bacteria กรดแอซิติกจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดย acetoclastic bacteria

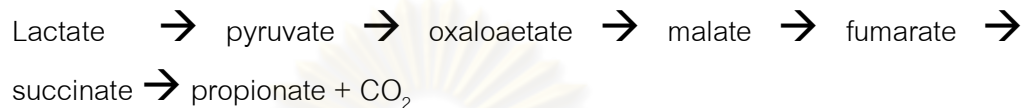


รูปที่ 2.3 กระบวนการย่อยสลายกลูโคส [11]

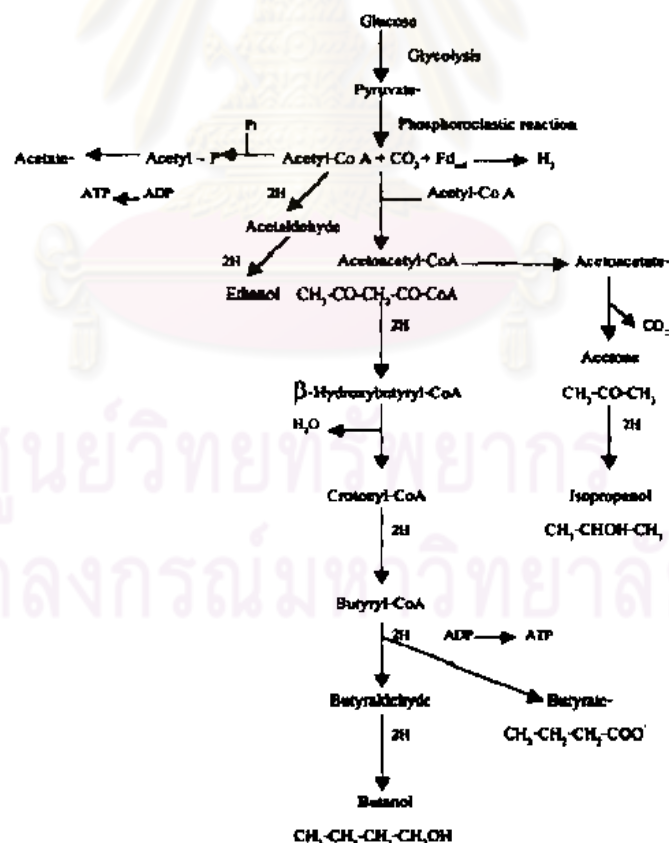
การผลิตกรดไพรูโพนิกโดยผ่านสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลายกลูโคส สามารถเกิดได้โดยผ่านการย่อยสลายกรดแลคติก ด้วยกระบวนการ Dehydration ดังสมการ



อีกปฏิกิริยาหนึ่งคือผ่านกรดแลคติกไปเป็นกรดซัสซินิกและเกิด Decarboxylation ของกรดซัสซินิกไปเป็นกรดไพรูโพนิกต่อไปนี้



การผลิตกรดบิวทิริกเป็นขั้นตอนทางชีวเคมีในการย่อยสลายน้ำตาลให้ได้กรดบิวทิริกและกรดบิวทานอล ดังรูปที่ 2.4 เริ่มจากกลูโคสเปลี่ยนเป็นไพรูเวทโดยผ่าน Embden-Meyerh of pathway และไพรูเวทเปลี่ยนเป็น Acetyl-CoA ในช่วงแรกกรดแอซิติกและกรดบิวทิริก เป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่เมื่อค่าพีเอชลดลงและมีการสะสมของแอซิโตนและบิวทานอล ผลิตภัณฑ์จากการหมักประกอบด้วยกรดบิวทิริก 3 ส่วน และกรดแอซิติก 1 ส่วน



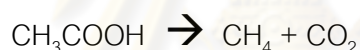
รูปที่ 2.4 กระบวนการย่อยสลายกลูโคสโดยผ่าน Embden-Meyerh of pathway [14]

2.2.2.2 กระบวนการแอซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นกระบวนการที่นำกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็กจากกระบวนการแอซิโตเจเนซิสเปลี่ยนเป็นกรดแอซิติก กรดฟอร์มิก แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สมีเทนโดยเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Homoacetogenic bacteria ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันยาวและย่อยสลายสารประกอบวงแหวนได้ และกระบวนการนี้ยังสามารถยับยั้งการสะสมของกรดอินทรีย์อย่างง่ายและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากจนลดกระบวนการสร้างแก๊สมีเทน

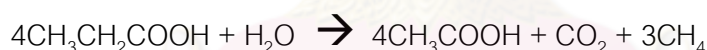
2.2.3 กระบวนการสร้างแก๊สมีเทน (methanogenesis)

เป็นขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทนด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogenic bacteria ย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้เป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยส่วนใหญ่แก๊สมีเทนจะเกิดจากกรดแอซิติก ซึ่งคิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ แต่กระบวนการสร้างแก๊สมีเทนสามารถแบ่งออกได้ 3 ปฏิกริยา คือ

2.2.3.1 ปฏิกริยา Decarboxylation ของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมดจะถูกย่อยสลายเป็นกรดแอซิติกก่อนมีการผลิตแก๊สมีเทน โดยมีกลไกการเกิดปฏิกริยา ดังนี้

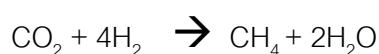


การย่อยสลายกรดแอซิติกนั้น ในส่วนของกลุ่มเมทิลจะต้องถูกรีดิวซ์ไปเป็นแก๊สมีเทนและกลุ่มคาร์บอกซิลจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



กรดไพรูโวนิกเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความสำคัญต่อระบบเนื่องจากมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogenic และ Fermentative bacteria ซึ่งขั้นตอนการย่อยสลายจะผ่านวิธี methylmalony CoA ซึ่งขั้นแรกที่สำคัญคือ กรดไพรูโวนิกเกิด transcarboxylation ไปยัง methylmalony CoA และเปลี่ยน oxaloacetate เป็น pyruvate ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่สามารถผันกลับได้และมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายกรดไพรูโวนิก ก่อนที่ methylmalony CoA จะถูก metabolized ได้กรดซัสซินิก ซึ่ง methylmalony CoA เป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการย่อยสลายกรดไพรูโวนิก

2.2.3.2 ปฏิกริยาการผลิตแก๊สมีเทนจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเป็น Intermediate producer ของการผลิตแก๊สมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ถูกรีดิวซ์โดยแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นแก๊สมีเทน



2.2.3.3 ปฏิกริยาการผลิตแก๊สมีเทนจากสารประกอบอินทรีย์เชิงเดี่ยว



จากสมการ นอกจากการผลิตจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายยังสามารถเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์อื่นได้ เช่น เมทานอล เป็นต้น

2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน [15-16]

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในแต่ละขั้นตอนต้องอาศัยการทำงานที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ

2.3.1 Fermentative bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรไลซิส และขั้นตอนการสร้างกรดจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์ออกมาออกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ๆ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.0 – 6.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูงโดยเฉลี่ยสามารถเพิ่มจำนวนได้เป็นสองเท่าได้ใน 4 ชั่วโมง อาจเป็นได้ทั้งพวก strictly anaerobe และ facultative anaerobe จุลินทรีย์เหล่านี้มีอยู่ประมาณ $3.9 \times 10^8 - 10^{10}$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร

2.3.2 Acetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการผลิตกรดแอสिटิก (acetogenesis) สามารถจำแนกจุลินทรีย์ได้ 2 กลุ่ม คือ

2.3.2.1 hydrogen producing acetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายกรดไขมันและสารประกอบที่เป็นกลางบางชนิดให้เป็นแอสिटेट แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแก๊สไฮโดรเจน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ เพราะ H^+ ทำให้ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์เป็นกรด นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนยังเป็นสารเริ่มต้นที่ใช้ในการสร้างแก๊สมีเทน โดยควบคุมอัตราการสร้างแก๊สมีเทนและกรดแอสिटิก จุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ ถ้ามีแก๊สไฮโดรเจนภายในถังปฏิกรณ์สะสมอยู่ในปริมาณสูง นั่นคือ แก๊สไฮโดรเจนจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์เนื่องจากเป็นกรดมาก แต่เมื่อมี methanogens อยู่ด้วยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้แก๊สไฮโดรเจนไปผลิตแก๊สมีเทน จึงทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์มีไม่มากนักถึงระดับที่เกิดพิษได้ จุลินทรีย์เหล่านี้มีอยู่ประมาณ 4×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในตะกอนของน้ำโสโครก

2.3.2.2 homoacetogenic bacteria จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะสร้างแอสिटेटจากสารประกอบที่มีคาร์บอนเพียงหนึ่งอะตอม เช่น แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือจากกรดฟอร์มิก และยังสามารถไฮโดรไลซ์สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น กรดแลคติก กรดไพรูวิก จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีจำนวนประมาณ 10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในตะกอนที่อุณหภูมิปานกลาง

2.3.3 Methanogenic bacteria จัดเป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง (strictly anaerobic bacteria) ออกซิเจนเป็นพิษต่อจุลินทรีย์หลายชนิดที่สร้างแก๊สมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มนี้เจริญได้ดีที่พีเอชเป็นกลาง ประมาณ 6.5–7.5 ซึ่งมีทั้งเป็น mesophile และ thermophile พวก mesophile เจริญได้ที่อุณหภูมิ 15–40 องศาเซลเซียส ในขณะที่ thermophile เจริญได้ที่อุณหภูมิ 50 – 65 องศาเซลเซียส methanogens มีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าจุลินทรีย์ acidogens และ acetogens เนื่องจาก methanogens มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อย จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้สามารถสร้างแก๊สมีเทนจากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างง่าย เช่น กรดอะซิติกและสารประกอบที่มีคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมทานอล ฟอร์เมท และเมทิลลามีน มีประมาณ $10^6 - 10^9$ เซลล์ต่อมิลลิลิตรในตะกอน นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์กลุ่มอื่นอีก เช่น sulphate bacteria ซึ่งเปลี่ยนอนุมูลซัลเฟตให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และ denitrifying bacteria ซึ่งเปลี่ยนอนุมูลไนเตรทกับไนไตรท์ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) โดยทั่วไปมูลสัตว์มีอนุมูลเหล่านี้ปนอยู่น้อย

เสถียรภาพของระบบการผลิตแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับสมดุลของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและสร้างแก๊สมีเทน จุลินทรีย์ที่สร้างแก๊สมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมากกว่าจุลินทรีย์ที่สร้างกรด ดังนั้น เสถียรภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่สร้างแก๊สมีเทน ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย อาจทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างแก๊สมีเทนชะงักการเจริญเติบโตได้ ในขณะที่จุลินทรีย์สร้างกรดยังคงเจริญได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชในระบบมีค่าลดต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่สร้างแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวในที่สุด

จุลินทรีย์กลุ่ม acidogens และ acetogens มีความสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กและอยู่ในรูปที่ methanogenic bacteria สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตแก๊สมีเทนได้แล้ว ยังมีความสำคัญในการช่วยปรับสภาวะแวดล้อมให้เป็นสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของ methanogens อีกด้วย จุลินทรีย์ที่สร้างกรดเป็นตัวช่วยลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบและอาจจะสร้างสภาวะที่เอื้ออำนวยจากการผลิตกรดอินทรีย์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สภาวะในระบบเป็นสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนมากขึ้น เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อ methanogens ซึ่งเป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจนในขณะเดียวกัน methanogenic bacteria ที่อยู่ในระบบมีความจำเป็นมากสำหรับพวก fermentative bacteria และ acetogens เพราะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรด จะส่งผลยับยั้งการทำงานและการเจริญของ acid forming bacteria และยังอาจทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้ตาย ดังนั้น methanogenic bacteria ที่มีอยู่ในระบบหมักจะทำหน้าที่เป็นตัวดึงไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไปใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน ทำให้ปริมาณไฮโดรเจน

ในระบบลดต่ำลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่สร้างกรด ดังนั้นจึงเป็นการควบคุมความเป็นกรดต่างหรือค่าพีเอชของระบบด้วย

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน [17]

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของระบบโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ

2.4.1 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม

2.4.1.1 ค่าพีเอช มีความสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากสามารถส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และการเจริญที่แตกต่างกันไป ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถเจริญได้ดีในช่วงพีเอชเท่ากับ 4.0-6.0 ส่วนเชื้อจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนจะเจริญได้ดีในช่วงพีเอช 6.7-7.4 ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทนจะมีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้

2.4.1.2 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก สามารถแบ่งช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) มีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส และช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) อุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนมี 2 ช่วง ได้แก่ 30-35 องศาเซลเซียส และ 50-65 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิช่วง 40-50 องศาเซลเซียส กลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตแก๊สมีเทนจะถูกยับยั้ง สำหรับช่วงที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส และ 50-60 องศาเซลเซียส เท่านั้น นอกจากนี้การย่อยสลายที่ Thermophilic จะดีกว่าในช่วง Mesophilic อยู่ 1.9 เท่า แม้ว่าช่วงดังกล่าวจะสามารถให้ปริมาณแก๊สได้มากขึ้นและสามารถทำลายเชื้อโรคได้ แต่ Thermophilic Bacteria มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม อีกทั้งต้องมีค่าใช้จ่ายในการทำความร้อน ดังนั้นช่วง Mesophilic จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมและไม่สิ้นเปลืองพลังงานการให้ความร้อนแก่ระบบด้วย

2.4.1.3 สารพิษและสารยับยั้ง สารที่เป็นพิษอาจอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ลงไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibit) การทำงานของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีสารเหล่านั้นก็อาจกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะ สารที่เป็นพิษหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่ม ดังนี้

1) ไอออนบวก ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^+) และแคลเซียม (Ca^+) ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ แต่ถ้ามีมากเกินไปเกินความจำเป็นจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

2) โลหะหนัก สำหรับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์ได้บ่อยและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้อากาศ ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โดยทองแดง (Cu^{2+}) จะมีผลต่อระบบมากที่สุด แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษ แต่โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์

2.4.1.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย การสร้างกรดอินทรีย์ระเหยในปริมาณที่มากเกินไปอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบในปริมาณที่มาก จุลินทรีย์สร้างกรดก็จะสร้างกรดอินทรีย์ระเหยออกมามาก หากว่าระบบมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชหรือมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้พีเอชของระบบลดลง เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน วิธีการแก้พิษของกรดอินทรีย์ระเหยทำได้โดยการเติมต่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพิ่มระยะเวลาการหมักหรือมีการหมุนเวียนน้ำออกกลับเข้ามาในระบบ

2.4.1.5 แอมโมเนีย (NH_3) แอมโมเนียเกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งได้แก่ โปรตีน และยูเรีย เป็นต้น โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.1.6 ซัลไฟด์ (S^{2-}) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ซัลไฟด์สามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของสารละลาย หรือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริกได้ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถอยู่ในสภาพที่มีซัลไฟด์ไม่เกิน 50-160 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นพิษของซัลไฟด์สามารถทำให้ลดลงได้โดยการทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน นอกจากนี้ อาจทำการเจือจางน้ำเสียหรือทำการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ

2.4.1.7 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีความสำคัญมากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพเพราะคาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์นำไปสร้างโปรโตพลาสซึมของเซลล์ใหม่และสร้างกำลังบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ ค่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 20-30 หากอัตราส่วน C/N มีค่าสูงมากเกินไปไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว มีไนโตรเจนไม่เพียงพอ อัตราการเกิดจุลินทรีย์จะลดลง ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ลดน้อยลง แต่หากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมีมากเกินไปจนจำเป็น จุลินทรีย์จะย่อยสลายให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบ

2.4.1.8 ลักษณะของของเสีย การผลิตแก๊สชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถใช้สารอินทรีย์เป็นซับสเตรท ได้หลายชนิดดังนี้

1) น้ำตาลที่มีโมเลกุลอย่างง่าย เช่น กลูโคส เป็นแหล่งอาหารของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายซึ่งน้ำตาลเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและในของเสียจากการเกษตร

2) ของเสียที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมีอยู่มากมายในพืชทั่วไป เช่น ของเสียจากโรงงานแปรรูปพืชผลทางการเกษตรจึงมักมีแป้งเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแป้งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญในการผลิตแก๊สมีเทน

3) ของเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในโครงสร้างของพืชมีปริมาณมากในของเสียจากการเกษตรและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตเยื่อกระดาษหรือกระดาษ รวมทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร

4) ของเสียและน้ำเสียจากพวกเศษอาหารมีคาร์โบไฮเดรตสูง โดยอยู่ในรูปน้ำตาลโมเลกุลอย่างง่าย แป้งและเซลลูโลส รวมทั้งมีไขมันและโปรตีนในปริมาณสูง จึงสามารถนำมาผลิตแก๊สมีเทนโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียคือของเสียมีความผันแปรของชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารอาหารที่เข้าระบบแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบต้องการสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยจะมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายเศษอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ค่าพีเอช เวลาพักน้ำ อัตราป้อนสารอินทรีย์ หรืออัตราส่วนการเจือจาง เป็นต้น โดยค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งค่าพีเอชเริ่มต้นในการเดินระบบและค่าพีเอชที่ควบคุมในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย เวลาพักน้ำที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการถูกล้างออกจากระบบ (Wash-out) ของจุลินทรีย์ ลดการสะสมของกรดไขมันระเหยที่มากเกินไปในระบบ และช่วยเพิ่มปริมาณมวลจุลินทรีย์ในระบบ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารจึงสามารถทำได้โดยการปรับสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับช่วงของการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิด

2.4.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ

2.4.2.1 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนและการเกิดแก๊สชีวภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากกว่าที่ออกแบบไว้ จะทำให้เกิดการล้นเหลวในการเดินระบบ ระบบมีกรดระเหยง่ายสูงส่งผลให้พีเอชต่ำ จุลินทรีย์สร้างมีเทนตายในที่สุดและหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป ทำให้

ความสามารถของถังปฏิกรณ์ใช้งานอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ อัตราการย่อยสลายอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ 2 แบบ คือ Dispersed-growth Digestion มีค่าที่เหมาะสมเท่ากับ $1-4 \text{ kg VS/m}^3 \cdot \text{d}$ และถังปฏิกรณ์แบบ Attached-growth Digestion เช่น Anaerobic Filter และ Up-flow Sludge Blanket Digestion มีค่าเหมาะสมเท่ากับ $1-15 \text{ kg VS/m}^3 \cdot \text{d}$ การเติมอย่างต่อเนื่องหรือเติมเป็นช่วงๆอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยให้เกิดเสถียรภาพของการย่อยสลายเพราะ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอาหาร การป้อนอินทรีย์อย่างสม่ำเสมอเป็นการลดปัญหาที่อาจเกิดจากการที่มีอาหารเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน (shock load) การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบบำบัดที่ออกแบบไว้ ได้แก่

1) การป้อนสารอินทรีย์ครั้งเดียว (Batch type feeding) เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เพียงครั้งเดียวลงถังปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดน้ำเสีย และปล่อยให้เกิดการย่อยสลายขึ้นเองด้วยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

2) การป้อนน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous type feeding) เป็นลักษณะการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดน้ำเสีย โดยจะมีการป้อนน้ำเสียเป็นช่วงๆ ซึ่งจะพิจารณาการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของโรงงานหรือลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงมีการถ่ายเทน้ำเสียที่บำบัดหรือกำจัดสารอินทรีย์แล้วออกจากระบบหรือถังปฏิกรณ์แล้วเติมน้ำเสียใหม่เข้าไป แล้วดำเนินการต่อไปตามกระบวนการข้างต้น

3) การป้อนน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous type feeding) เป็นลักษณะการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องตลอดเวลา คือจะมีน้ำเสียถูกป้อนเข้าออกจากถังปฏิกรณ์ตลอดเวลา เป็นแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งเหมาะสมสำหรับกรณีที่โรงงานมีการผลิตทั้งวันและมีน้ำเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา

2.4.2.2 ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT) เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในการควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลาย อัตราการย่อยสลายในกระบวนการจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์สารจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบ (washout) ในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบถังปฏิกรณ์ กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์สามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังปฏิกรณ์ด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงไปในแต่ละวัน

ปฏิกรณ์ต่อหน่วยเวลา ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (solid retention time, SRT) หมายถึงมวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังปฏิกรณ์แบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT=HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT>HRT)

$$HRT=SRT=\text{volume}/\text{flow rate} = V/Q$$

2.4.2.3 การกวนผสม (Agitation) เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดการกระจายการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และจุลินทรีย์มากขึ้น ทำให้ระบบเกิดภาวะเสถียรและทำให้ไม่เกิดฝ้า (Scum) ที่ระดับผิวช่วยให้อุณหภูมิภายในถังมีความสม่ำเสมอ การกระจายของสารพิษเบาบางลงและสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าที่ไม่มีการผสม ถ้ากวนผสมไม่เพียงพออาจมีการตกตะกอนบางส่วน ทำให้ปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์ลดลงและระยะเวลาเก็บกักลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบหากมีการกวนผสมมากเกินไปจะรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ การกวนต่อเนื่องตลอดเวลาอย่างช้าๆ จะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว การกวนผสมที่นิยมใช้กัน มีอยู่ 3 วิธีดังนี้ คือ

1) การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical mixing) ได้แก่ ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่จะเลือกใช้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ใบพัดแบบ paddle หรือ turbine เป็นต้น การกวนผสมให้น้ำเสียผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง หากถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่จะต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้เกิดการกวนอย่างสมบูรณ์

2) การกวนโดยการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater) เป็นวิธีการใช้พลังงานไม่สูงและประสิทธิภาพไม่สูงนัก โดยการติดตั้งเครื่องสูบน้ำภายในถังปฏิกรณ์ทางด้านล่างของถังและป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ทำให้เกิดการหมุนเวียนและกวนผสมของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์

3) การกวนผสมโดยการนำแก๊สที่เกิดขึ้นจากกบฏน้ำเสียมาใช้ในการกวนผสม (Mixing by producing gas) อาศัยแก๊สเป็นตัวช่วยให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์

2.4.2.4 จุลินทรีย์เริ่มต้น (Inoculum) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดในการเปลี่ยนจากสารอินทรีย์เป็นแก๊สมีเทน และต้องมีจุลินทรีย์ที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง การนำเชื้อผสม (Mixed culture) มาย่อยร่วมกับสารอินทรีย์ในตอนเริ่มต้น จะช่วยให้เชื้อมีการปรับตัวให้คุ้นเคยกับสารอินทรีย์และได้เชื้อจำพวกต่างๆ

ที่เหมาะสม ดังนั้น ถ้าต้องการย่อยสลายอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถนำของเหลวหรือกากตะกอนที่ผ่านการหมักมาผสมในตอนเริ่มต้นหมัก

2.5 ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอน [18]

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เกิดขึ้นเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม (optimum condition) กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พวกสร้างกรด และ จุลินทรีย์พวกสร้างแก๊สมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น จุลินทรีย์พวกสร้างกรดเจริญได้ดีที่พีเอชต่ำและระยะเวลาเก็บกักน้อย ซึ่งจะไปยังยังการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พวกสร้างแก๊สมีเทนทำให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวต่ำจึงได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกันและจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่ม เพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มนั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างเต็มที่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดีมากขึ้น ข้อดีและข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

2.5.1 ข้อดีของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

2.5.1.1 สามารถที่จะดำรงสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุด (optimum condition) สำหรับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มในถังหมักได้

2.5.1.2 สามารถลดขนาดของถังปฏิกรณ์ได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการดูแลควบคุมรักษา

2.5.1.3 จุลินทรีย์พวกสร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีผลไปรบกวนจุลินทรีย์พวกสร้างแก๊สมีเทน

2.5.1.4 มีอัตราการทำให้ของแข็งคงสภาพ (solids stabilization) สูงและอัตราของผลผลิตแก๊สชีวภาพขั้นสุดท้ายมีเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนสูง

2.5.1.5 ประสิทธิภาพการลดลงของของแข็งแขวนลอยสูง

2.5.1.6 เหมาะสำหรับการติดตั้งร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว

2.5.1.7 สารพิษที่มีผลต่อจุลินทรีย์พวกสร้างแก๊ส เช่น แอมโมเนีย กรดไขมัน สายยาวและซัลไฟด์ จะถูกกำจัดในขั้นตอนแรกโดยจุลินทรีย์สร้างกรด

2.5.1.8 ลดปัญหาการสูญเสียจุลินทรีย์พวกสร้างแก๊สลงซึ่งปัญหานี้มีผลมาจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของจุลินทรีย์สร้างกรด

2.5.2 ข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

2.5.2.1 ต้องมีการควบคุมโดยผู้ชำนาญ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบสูง

2.5.2.2 ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อใช้สำหรับติดตามตรวจสอบและควบคุมระบบ

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อวิสดา (2545) [19] ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเก็บกัก อัตราการป้อนอินทรีย์สารและความถี่ในการเติมของเหลวต่อประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์สารและปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยศึกษาการย่อยสลายของเศษอาหารที่มีปริมาณของแข็ง 4 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมักขนาดบรรจุ 9.63 ลิตร ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์สารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ HRT มากขึ้น (OLR น้อยลง) และความถี่ในการเติมของเหลวมากขึ้นที่ HRT 20 วัน (OLR 7.05 g COD/l.d) และมีความถี่ในการเติมของเหลว 1 วัน/ครั้ง มีปริมาณแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นเฉลี่ย 2.60 l/d โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน 60.56 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, TS, TVS และ VFA เท่ากับ 56.48, 52.39, 70.38 27.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อาริยา (2546) [20] ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งถึงทั้งสองปีนี้มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ดำเนินระบบด้วยสารละลายเศษอาหารที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 35 30 25 และ 20 วัน คิดเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 5.77 6.39 8.30 และ 10.27 กรัม ซีไอดี/ลิตร.วัน ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพที่ระยะเวลาเก็บกัก 35 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 5.77 กรัม ซีไอดี/ลิตร.วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุดเท่ากับ 90.13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น 31.19 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนเป็น 57.32 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.27 กรัม ซีไอดี/ลิตร.วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 82.11 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปริมาณแก๊สชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุด คือ 54.35 ลิตรต่อวัน และมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน เท่ากับ 61.26 เปอร์เซ็นต์

Cho และคณะ (1995) [21] เสนอระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแยก 2 ปฏิกรณ์ สำหรับขั้นตอนการสร้างกรดขนาด 1 ลิตร และสำหรับสร้างแก๊สมีเทนขนาด 8 ลิตร ทดลองกับขยะเศษอาหารในประเทศเกาหลีที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) 20% เนื่องจากการใช้ระบบถังปฏิกรณ์เดียวมีปัญหาเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยขึ้นในถังหมัก ทำให้ไปยับยั้งการสร้างมีเทน จากการศึกษาพบว่า ระบบถังปฏิกรณ์สองใบสามารถลดปริมาณ

ของแข็งทั้งหมดลงได้ 87-90% และประมาณ 90% ของของแข็งระเหยเปลี่ยนไปเป็นแก๊สชีวภาพ ระยะเวลาบำบัดเพื่อให้เกิดการย่อยสลายขยะเศษอาหารอย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของถังสร้างแก๊สมีเทน โดยได้แก๊สมีเทนสูงสุด 472 มล./กรัมของแข็งระเหย

Sosnowski และคณะ (2003) [22] ศึกษาผลของการเกิดแก๊สมีเทน ที่สภาวะ Mesophilic (36°C) และที่สภาวะ Thermophilic (56°C) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง คือ 1) ใช้ซับสเตรตที่เป็น Primary sludge ผสมกับ Thickened excess activated sludge อัตราส่วน 1:1 ที่สภาวะ Thermophilic ในถังปฏิกรณ์แบบ semi-UASB ขนาด 40 ลิตร เป็นเวลา 35 วัน 2) ใช้ซับสเตรตผสมของ Sewage sludge สัดส่วน 75% โดยปริมาตร และส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ของขยะเทศบาล (Organic fraction of municipal solid waste, OFMSW) สัดส่วน 25% โดยปริมาตร ในปฏิกรณ์เดียวกับชุดการทดลองที่หนึ่ง การทดลองชุดที่ 3-5 ใช้ระบบปฏิกรณ์สองถัง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 9 ลิตร ที่สภาวะ Thermophilic เพื่อปฏิกิริยาสร้างกรด และในถังปฏิกรณ์แบบ semi-UASB ขนาด 14 ลิตร ที่สภาวะ Mesophilic เพื่อปฏิกิริยาสร้างแก๊สมีเทน โดยชุดการทดลองที่ 3) ใช้ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ของขยะเทศบาลเพียงอย่างเดียว 4) ใช้ Sewage sludge จากบ่อบำบัดน้ำเสีย 5) ใช้ซับสเตรตผสมของ Sewage sludge กับส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ของขยะเทศบาล ได้สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพมากกว่า 60% ในทุกชุดการทดลอง และผลผลิตแก๊สชีวภาพ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 และ 0.6 ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ขึ้นอยู่กับชนิดของซับสเตรตที่ใช้

Elango และคณะ (2007) [23] ศึกษาผลผลิตแก๊สมีเทนจากขยะชุมชน (Municipal solid waste, MSW) โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 26-36 องศาเซลเซียส และระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.5, 1.0, 2.3, 2.9, 3.5 และ 4.3 กก.ของแข็งระเหย/ลบ.ม-วัน พบว่า อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 2.9 กก.ของแข็งระเหย/ลบ.ม-วัน ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพมากที่สุด คือ 0.36 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหย และมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน 68-72% ให้ค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 87.6% ของแข็งระเหย 88.1% และ COD 89.3%

Alvarez และคณะ (2008) [24] ศึกษาการย่อยสลายร่วมกันของของเสียจากโรงฆ่าสัตว์, มูลสัตว์ และขยะผักผลไม้ ณ อุณหภูมิ 35°C โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 2 ลิตร และมีการป้อนสารวันละครั้ง แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งศึกษาผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) จากสัดส่วนของซับสเตรตทั้ง 3 ชนิดในรูปของของแข็งระเหย (Volatile solid, VS) เท่า ๆ กัน พบว่า อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 0.3-1.3 กก.

ของแข็งระเหย/ลบ.ม-วัน ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.3 ลบ.ม/กก.ของแข็งระเหย โดยมีองค์ประกอบแก๊สมีเทน 54-56% อย่างไรก็ตามหากอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้นปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพและสัดส่วนของแก๊สมีเทนจะลดลง ในส่วนที่สอง ศึกษาผลการผสมซ้ำสเตรต 10 แบบ พบว่าการใช้ซ้ำสเตรตผสมในทุกกรณีให้ผลดีกว่าการใช้ซ้ำสเตรตชนิดเดียว ยกเว้นกรณีใช้ซ้ำสเตรตของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ผสมกับขยะผักผลไม้ในปริมาณของของแข็งระเหยเท่ากัน โดยพบว่าการใช้ซ้ำสเตรตผสมให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ภาวะคงที่ (Steady state) หลังจากการหมัก 60 วัน อยู่ในช่วง 1.1-1.6 ลิตร/วัน โดยมีองค์ประกอบแก๊สมีเทน 50-57% หรือคิดเป็น 0.27-0.35 ลบ.ม/กก.ของแข็งระเหย และสามารถลดปริมาณของแข็งระเหยลงได้ 50-67%

Forster-Carneiro และคณะ (2008) [25] ศึกษาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid) ที่ 20%, 25% และ 30% ของเศษอาหารจากโรงอาหารมหาวิทยาลัย และปริมาณของหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Inoculum) ที่ 20% และ 30% ที่สภาวะ Mesophilic (55°C) โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) ขนาด 1,100 มิลลิลิตร พบว่า สภาวะที่ให้แก๊สมีเทนมากที่สุดคือ ใช้ซ้ำสเตรตที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% และใช้ปริมาณของ Inoculum 30% สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.49 ลิตร CH_4 /กรัมของแข็งระเหย โดยเริ่มเกิดปฏิกิริยา Acidogenic/Acetogenic ระหว่างวันที่ 20-60 เมื่อทดลองกับถังปฏิกรณ์ใหญ่ขึ้นขนาด 5,000 มิลลิลิตร รูปแบบการย่อยสลายยังคงเป็นเช่นเดิมและให้ปริมาณแก๊สมีเทนสูง 0.22 ลิตร CH_4 /กรัมของแข็งระเหย

Macias-Corral และคณะ (2008) [26] ศึกษาความแตกต่างของผลผลิตแก๊สมีเทน เมื่อใช้ซ้ำสเตรตมูลโค ส่วนสารอินทรีย์ของขยะชุมชน และ Cotton gin waste ชนิดเดียวและผสมกัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแยกสองขั้นตอน พบว่า มูลโคผลิตแก๊สมีเทน 62 ลบ.ม./ตันมูลโคแห้ง ส่วนสารอินทรีย์ของขยะชุมชนผลิตแก๊สมีเทนได้ 37 ลบ.ม./ตันขยะแห้ง เมื่อนำมาย่อยสลายร่วมกันระหว่างมูลโคกับส่วนสารอินทรีย์ของขยะชุมชน สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 172 ลบ.ม./ตันขยะแห้ง และการย่อยสลายร่วมระหว่างมูลโคและ Cotton gin waste สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 87 ลบ.ม./ตันขยะแห้ง

Bouallagui และคณะ (2009) [27] ศึกษาผลของการใช้เศษปลา ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ และตะกอนน้ำเสีย เป็นซ้ำสเตรตร่วมกับขยะผักและผลไม้ในสัดส่วนของแข็งระเหย 90% ย่อยสลายในถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) ขนาด 2 ลิตร จำนวน 4 ถัง ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.46-2.51 กรัมของแข็งระเหย/ลบ.ม-วัน มีระยะเวลาในการหมัก 10 วัน พบว่า การใช้ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์และตะกอนน้ำเสียในสัดส่วนของแข็งระเหย 10% ทำให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพเป็น 51.5% และ 43.3% และสามารถลดปริมาณของแข็งระเหยลงได้ 10% และ 11.7% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้เศษปลาเป็นซ้ำสเตรตร่วมทำให้ระบบมี

เสถียรภาพมากขึ้น โดยดูจากการมีค่าอัตราส่วนของกรดระเหยง่ายต่อสภาพต่าง (VFA/alkalinity ratio) ต่ำเท่ากับ 0.28 ทำให้ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีต่าง ถึงแม้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ลดลงจาก 34.2 เหลือ 27.6 แต่ยังสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงขึ้น 8.1% เมื่อเทียบกับการย่อยสลายขยะผักผลไม้เพียงอย่างเดียว และพบว่าได้ผลการย่อยสลายขยะผักผลไม้ที่ดีเมื่อผสมกับขี้สเตรตอื่นให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในช่วง 22-25



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลาย

1) มูลสุกรและไบโพลัม นำมาจากฟาร์มกรณีศึกษาที่จังหวัดราชบุรี โดยเก็บมูลสุกรในถังพลาสติก ส่วนไบโพลัมจะนำไปลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบและบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น (Blender) เก็บรักษาวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี

2) เศษอาหาร จากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์และคณะนิติศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยข้าว เนื้อสัตว์ และพืชผักต่างๆ นำไปบดละเอียดร่วมกับน้ำด้วยเครื่องปั่น (Blender) ใส่ในถุงพลาสติกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี

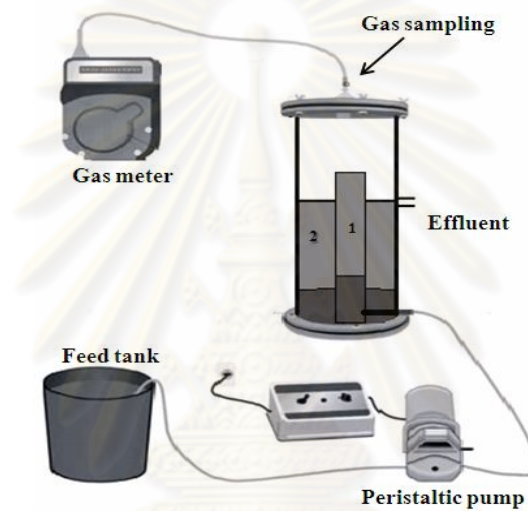
3) เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Inoculum) นำมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียโรงงานมาลี อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม เนื่องจากใช้กระบวนการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจนแบบแยก 2 ขั้นตอน

3.2 ชุดการทดลองที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลาย

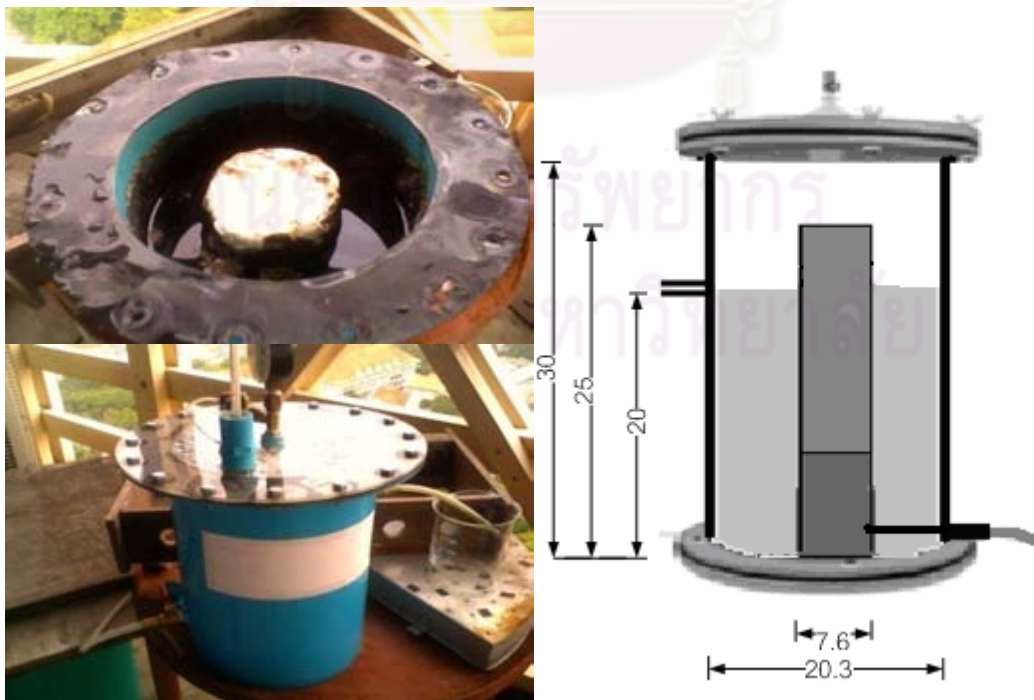
ชุดการทดลองในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ บั๊มเพื่อป้อนน้ำเสียดิบ และเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส ถังปฏิกรณ์ในระบบถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นท่อ PVC 2 ท่อน สวมซ้อนร่วมแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยท่อ PVC ด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร (3 นิ้ว) สูง 25 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน 1.14 ลิตร เพื่อให้มีระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส, ปฏิกิริยาสร้างกรดและปฏิกิริยาสร้างกรดแอสติกจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเท่ากับ 2 วัน ท่อ PVC ด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.3 เซนติเมตร (8 นิ้ว) สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน 5.34 ลิตร เพื่อให้มีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสร้างแก๊สมีเทนเท่ากับ 9 วัน ให้ท่อน้ำทิ้ง (Effluent) เชื่อมต่อกับท่อ PVC ด้านนอกอยู่ที่ระดับ 20 เซนติเมตร จากพื้นถังปฏิกรณ์ ท่อน้ำป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อยู่สูงจากพื้นถัง 5 เซนติเมตรและเชื่อมต่อกับท่อ PVC ด้านใน

ระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนใช้ถังปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 เซนติเมตร (6 นิ้ว) สูง 20 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน 3.86 ลิตร เจาะช่องขนาด 11×7 ตารางเซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง สวมเพิ่มอยู่ระหว่างกลางของท่อ PVC ที่ใช้ในระบบถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและติดแผ่นเมมเบรนไว้ทางด้านในดังรูปที่ 3.3 แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 2 แบบ คือแผ่นเมมเบรนโคโตซานคอมพอสิต (Composite membrane) และแผ่นเมมเบรนโคโตซานสมมาตร (Symmetric membrane) เมมเบรนโคโตซานคอมพอสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

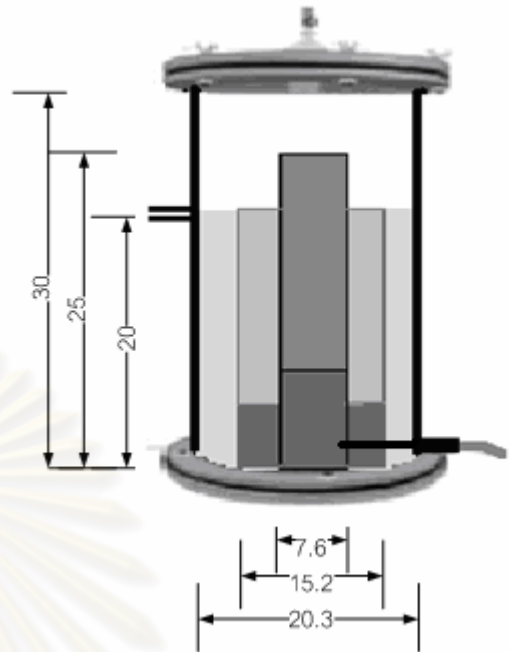
มี 2 แบบ ดังรูปที่ 3.4 โดยเมมเบรนรูปที่ 3.4 (ก) มีลักษณะแผ่นเป็นเมมเบรนไคโตซานเคลือบบนผ้าสปันปอนด์เสริมด้วยมุ้งตาข่าย รูปที่ 3.4 (ข) เป็นแผ่นเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตเคลือบบนผ้าสปันปอนด์ทั้ง 2 ด้าน และรูปที่ 3.4 (ค) เป็นแผ่นเมมเบรนไคโตซานสมมาตร แผ่นเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์และมีมุ้งตาข่าย จะติดอยู่ที่ส่วนล่างและแผ่นเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์ 2 หน้าจะติดอยู่ที่ส่วนบนของชั้นที่ติดเมมเบรนของถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) ในตอนท้ายของการศึกษาสมรรถนะของถังปฏิกรณ์เมมเบรนในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เมมเบรนไคโตซานสมมาตรแทนเมมเบรนคอมพอสิต ดังแสดงในรูป 3.5 (ค) ทั้งส่วนบนและส่วนล่าง



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน



รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์เมมเบรน



(ก)



(ข)



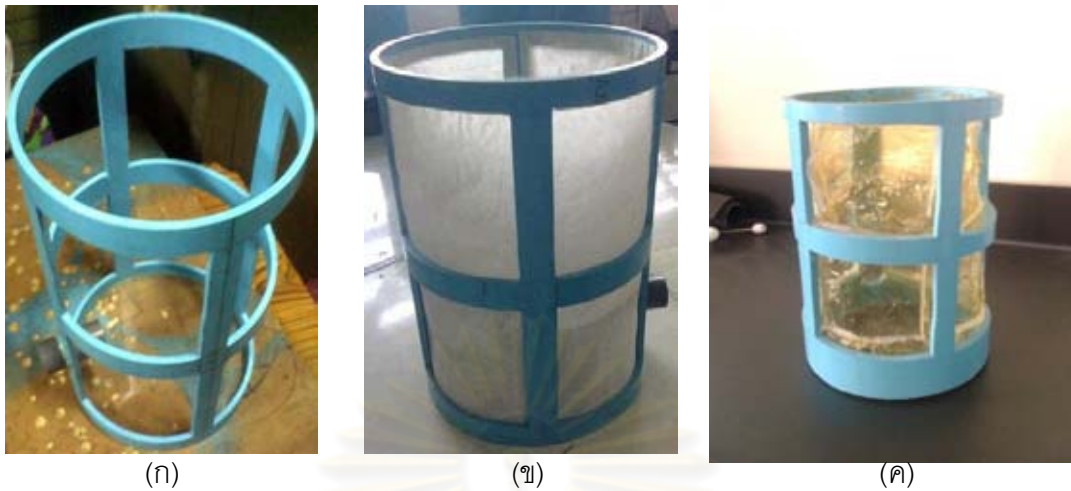
(ค)

รูปที่ 3.4 เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ติดตั้งในถังปฏิกรณ์เมมเบรน

(ก) แผ่นเมมเบรนคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์และมีมุ้งตาข่าย

(ข) แผ่นเมมเบรนคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์ 2 หน้า

(ค) แผ่นเมมเบรนสมมาตร



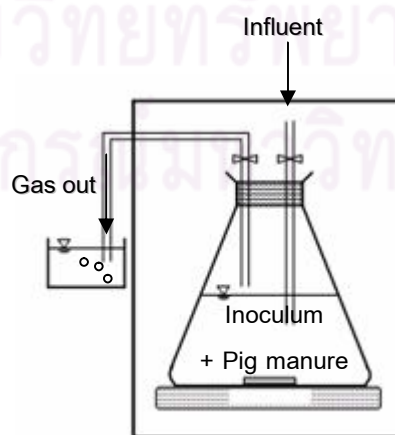
รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นที่ติดแผ่นเมมเบรนไดโตซาน

- (ก) ยังไม่ได้ติดแผ่นเมมเบรน
- (ข) ติดแผ่นเมมเบรนคอมพอสิต
- (ค) ติดแผ่นเมมเบรนสมมาตร

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบถังปฏิกรณ์ทดลองหลัก

ในการหาระยะเวลา (Retention time) ของปฏิกิริยาการสร้างกรดและปฏิกิริยาการสร้างมีเทนเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ ใช้ชุดการทดลองดังรูปที่ 3.6 และดำเนินการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างมีเทน

นำมูลสุกรและเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร โดยเติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (เก็บจากบ่อบำบัดของฟาร์มสุกรกรณีศึกษา) 300 มิลลิลิตร (30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถังปฏิกรณ์) และมูลสุกรซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 0.2-0.3 เปอร์เซ็นต์หรือ 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 600 มิลลิลิตร จากนั้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชทุกๆ 6-12 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการสร้างกรดจากค่าพีเอชที่เกิดขึ้น สังเกตระดับน้ำและฟองอากาศที่เกิดขึ้นเพื่อศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการสร้างมีเทน

3.3.2 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติสารอินทรีย์วัตถุดิบ

ก่อนป้อนสารอินทรีย์สู่ถังปฏิกรณ์จะผสมมูลสุกรกับโคชบัสเตอร์ให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข และวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้นของสารอินทรีย์ตามภาคผนวก ก ดังนี้

- 1) ค่าพีเอช
- 2) ค่าซีไอดี (COD)
- 3) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)
- 4) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)
- 5) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid)
- 6) สภาพความเป็นด่างทั้งหมด (Total alkalinity)
- 7) ปริมาณเจลดาร์ห์ลไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen)
- 8) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)
- 9) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C: N)
- 10) องค์ประกอบเคมีของไบปาล์ม

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้ในการศึกษานี้ซื้อจาก บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ซึ่งนำมาทดสอบสมบัติ ดังต่อไปนี้

ก) การทดสอบค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (Pure water flux)

ดำเนินการทดสอบดังนี้

- 1) ตัดเมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร วางบนหน้าแปลนของชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบในรูปที่ 3.7
- 2) ป้อนน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที (อัตราการไหลสูงสุดของปั๊มความดันสูงในงานวิจัยนี้) เข้าไปใน Membrane cell
- 3) ควบคุมแรงดันทางด้านสารป้อนที่ระดับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ขณะที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับความดันบรรยากาศ
- 4) รอจนได้ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่ (Steady state)
- 5) จับเวลาวัดปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรน คำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.1)
- 6) เปลี่ยนเมมเบรนแผ่นใหม่และควบคุมค่าแรงดันด้านสารป้อนเป็น 200 และ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จับเวลาวัดปริมาณน้ำเพอร์มิเอตที่แต่ละแรงดัน เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.1)

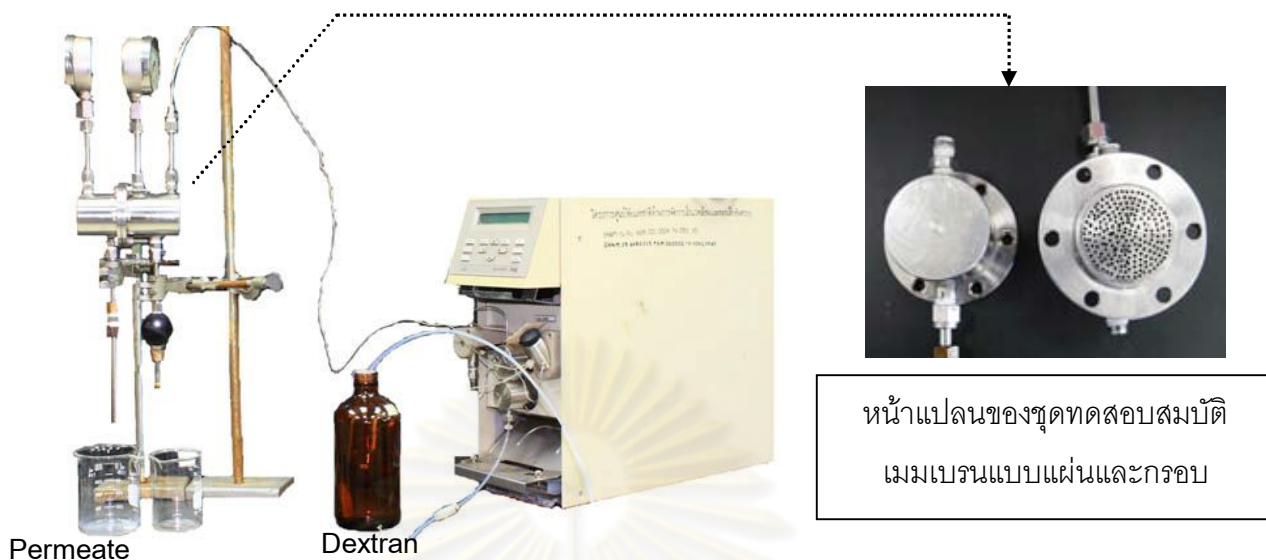
$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (3.1)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร/ชั่วโมง)

Q = ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (ลิตร)

A = พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ตารางเมตร)

Δt = เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต (ชั่วโมง)



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ

ข) การวิเคราะห์ค่า Molecular weight cut off (MWCO)

ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบค่าร้อยละการกักกันของสารละลาย Dextran ด้วยชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ ตามรูปที่ 3.7 เพื่อวิเคราะห์หาค่า MWCO ของเมมเบรน ดังนี้

- 1) เตรียมสารละลาย Dextran ในน้ำให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลาย Dextran ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน คือ 40,000, 70,000 และ 100,000 ดอลตัน (Da) ดังตัวอย่างแสดงการเตรียมสารละลาย Dextran ในภาคผนวก ข
- 2) วิเคราะห์ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัม/ลิตรของสารละลายป้อน จากค่าซีไอดี
- 3) ควบคุมค่าแรงดันด้านสารป้อนเป็น 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 4) รอจนได้ปริมาณเพอร์มิเอตที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่
- 5) นำตัวอย่างเพอร์มิเอตปริมาตร 5 มิลลิลิตร วิเคราะห์ความเข้มข้น ด้วยการวิเคราะห์หาค่าซีไอดี
- 6) คำนวณค่าร้อยละการกักกันสาร (%R) ตามสมการที่ (3.2)
- 7) เปลี่ยนสารละลาย Dextran ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอื่นต่อไป และดำเนินตามขั้นตอนที่ 2) ถึง 6) ข้างต้น

- 8) พลีสือค่าร้อยละการกักกันสารที่แต่ละน้ำหนักโมเลกุล ค่า MWCO ของเมมเบรน คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกกักกันได้ร้อยละ 90-95

$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอร์มิเอต (พีพีเอ็ม)

C_f = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารป้อน (พีพีเอ็ม)

ค) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

เมมเบรนไคโตซานสมมาตรรทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 และเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังนี้

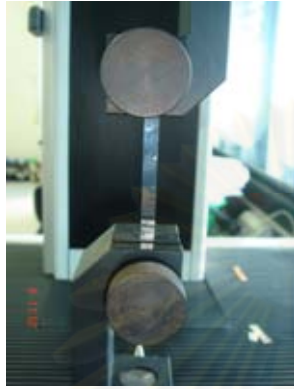
การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D882

- 1) ตัดเมมเบรนไคโตซานสมมาตริให้มีขนาด 5×150 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก)
- 2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
- 3) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ในรูปที่ 3.8 (ข) ที่สภาวะในการทดสอบ ดังนี้
 - ก) ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที
 - ข) ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร
 - ค) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน

การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D638

- 1) ตัดเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตให้มีลักษณะและขนาด ดังรูปที่ 3.9
- 2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
- 3) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ที่สภาวะในการทดสอบ ดังนี้
 - ก) ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

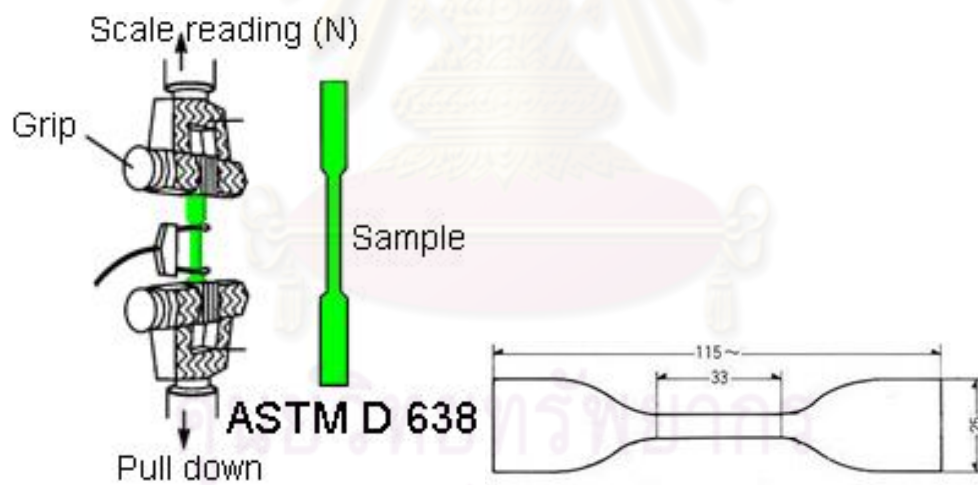
- ข) ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- ค) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน



(ก) แผ่นเมมเบรนที่นำมาทดสอบ

(ข) เครื่อง Universal testing machine

รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K



รูปที่ 3.9 ลักษณะและขนาดที่ใช้ทดสอบเมมเบรนแบบมีชั้นรองรับ

3.3.4 การทดสอบระบบถังปฏิกรณ์

การตรวจสอบรอยรั่วเป็นสิ่งจำเป็นมากในระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากระบบนี้ต้องเป็นระบบปิดอย่างแท้จริง มิฉะนั้นจะระงับกระบวนการชีวเคมีของจุลินทรีย์สร้างมีเทน การทดสอบสามารถทำได้โดยการเติมน้ำเข้าไปในถังปฏิกรณ์ให้ระดับน้ำสูงกว่ารอยต่อต่างๆ แล้วสังเกตการรั่วซึมของน้ำ สำหรับการรั่วซึมของแก๊สชีวภาพจะใช้น้ำสบู่ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ แล้วเป่าลมเข้าถังปฏิกรณ์ ถ้าสังเกตพบรอยรั่วจะอุดด้วยกาวซิลิโคน

3.3.5 การเริ่มต้นและการเดินระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Start-up and operating anaerobic digestion system)

การเริ่มต้นระบบทำโดยเติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Inoculum) ของแต่ละปฏิกิริยาลงในแต่ละส่วนของถังปฏิกรณ์ โดยชั้นในจะเป็นชั้นของการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ชั้นนอกเป็นชั้นของการผลิตแก๊สมีเทน เติมเชื้อจุลินทรีย์ขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน ชนิดละ 40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ในส่วนชั้นตอนที่ 1 และ 2 ตามวิธีการทดลองของ Hobson and Wheatly [30] ซึ่งได้แนะนำว่าควรวใส่ในปริมาณที่ไม่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรการย่อยสลาย ซึ่งเท่ากับ 0.46 ลิตรสำหรับขั้นตอนการสร้างกรด และ 1.54 ลิตร สำหรับขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทน การใช้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นปริมาณมาก จะทำให้การเริ่มต้นระบบสมบูรณ์ภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 วัน ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปอาจทำให้ต้องใช้เวลามากกว่า 180 วัน [31] หลังจากนั้นจะบ้อนสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดและอัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่ทำการศึกษา ปริมาณ 400 มิลลิลิตร เข้าไปในชั้นการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จนสารละลายไหลล้น (Overflow) ออกมาในส่วนของการผลิตแก๊สมีเทน แล้วทำการปิดระบบถังปฏิกรณ์เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปในถังปฏิกรณ์ หลังจากนั้นจะบ้อนสารอินทรีย์ทุกๆวันแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) คือมีการเติมของเหลวใหม่ลงไป เมื่อมีของเหลวเก่าออกจากถังปฏิกรณ์ โดยที่ปริมาตรของเหลวใหม่ที่เติมเข้าไปมีปริมาณเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่ออกจากถังปฏิกรณ์เพื่อเป็นการรักษาระดับปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์ให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง และมีความถี่ในการบ้อนสารอินทรีย์วันละ 1 ครั้ง

การวัดอัตราการไหลของแก๊ส จะใช้ Gas flow meter ของบริษัท Altech รุ่น Digital Flow Check-HR™ สามารถวัดอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพที่ออกจากถังปฏิกรณ์ให้อยู่ในรูปของแก๊สมีเทนโดยจะวัดอัตราการไหลของแก๊สมีเทนก่อนการบ้อนสารอินทรีย์ทุกวัน เพื่อศึกษาอัตราการเกิดแก๊สมีเทนและควบคุมสภาวะของระบบภายในถังปฏิกรณ์

3.3.6 การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำและอัตราการผลิตแก๊สมีเทน

น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady state) โดยพิจารณาจากปริมาณการเกิดแก๊สมีเทนในแต่ละวันเริ่มมีปริมาณคงที่หรือใกล้เคียงกัน วิเคราะห์คุณภาพน้ำออกจากระบบตามตารางที่ 3.1 เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ

การบันทึกปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของปริมาณแก๊สมีเทน นำข้อมูลที่ได้หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลมาคำนวณ และหาความสัมพันธ์ของแก๊สมีเทนต่อมวลสารอินทรีย์ ดังแสดงในภาคผนวก ข และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง	ความถี่	วิธีการวิเคราะห์	มาตรฐาน
pH	น้ำเข้า-ออก	ทุกวัน	pH meter	
COD	น้ำเข้า-ออก	ทุก 2 วัน	Closed reflux method	APHA 5220, 1995
TS	น้ำเข้า-ออก	ทุกวัน	Gravimetric method	APHA 2540, 1995
VS	น้ำเข้า-ออก	ทุกวัน	Gravimetric method	APHA 2540, 1995
VFA	น้ำเข้า-ออก	2ครั้ง/สัปดาห์	Titration method	APHA 2310, 1995
TKN	น้ำเข้า-ออก	2ครั้ง/สัปดาห์	Kjeldahl method	APHA 2310, 1995
ปริมาณแก๊สมีเทน	แก๊สชีวภาพ	ทุกวัน	Gas flow meter	
องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ	แก๊สชีวภาพ	ทุกวัน	Gas chromatography	

บทที่ 4

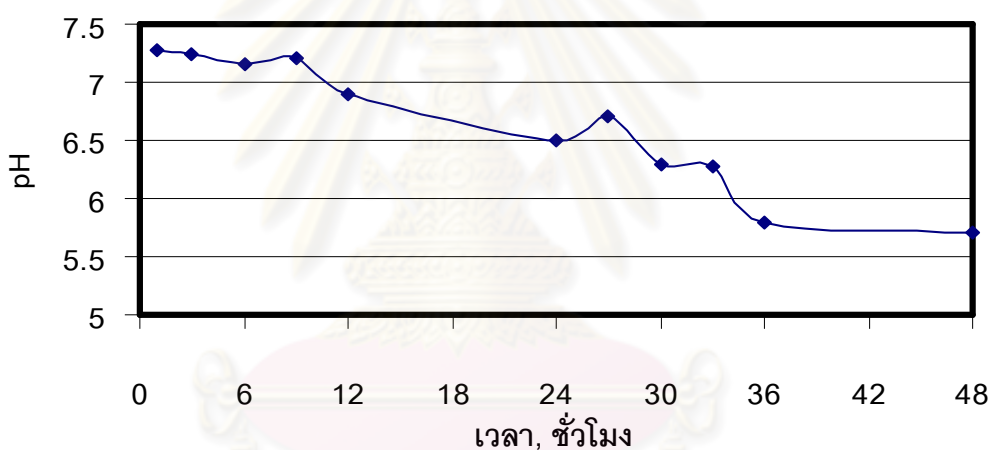
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกร, เศษอาหาร และไบโพลัม ที่มีความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ 5%, 10% และ 20% ในอัตราส่วนของมูลสุกรกับเศษอาหารและมูลสุกรกับไบโพลัม ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 มีความถี่ในการป้อนสารอินทรีย์ 1 วันต่อครั้ง ปริมาตร 400 มิลลิลิตร เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) โดยพิจารณาจากปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกัน จะเริ่มทำการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ดังกล่าวดังตาราง 3.1 เป็นระยะเวลา 15 วัน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละพารามิเตอร์ มีหัวข้อผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบถังปฏิกรณ์ทดลองหลัก
- 4.2 ผลการศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- 4.3 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรน
- 4.4 ผลการศึกษาความมีสัมฤทธิ์ผลของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของชุดการทดลอง
- 4.5 ผลการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย
- 4.6 ผลการศึกษาการเกิดแก๊สมีเทนและองค์ประกอบแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ
- 4.7 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่ออินทรีย์สารที่ถูกกำจัด

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบถังปฏิกรณ์ทดลองหลัก

การหาระยะเวลา (Retention time) ของปฏิกริยาการสร้างกรดและปฏิกริยาการสร้างมีเทนเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 4.1 พบว่า มีการลดลงของค่าพีเอชต่ำกว่า 7 เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง และลดลงต่ำกว่า 6 เมื่อเวลาผ่านไป 36 ชั่วโมงเนื่องจากเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และพบว่าในช่วงเวลา 36-48 ชั่วโมง ค่าพีเอชเริ่มคงที่ แสดงว่าปฏิกริยาการสร้างกรดเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 36 ชั่วโมงจากการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าฟองอากาศจากชุดการทดลองจะเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 9 วัน จึงออกแบบให้ถังปฏิกรณ์ของงานวิจัยนี้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำในขั้นตอนการสร้างกรด 2 วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำในขั้นตอนการสร้างมีเทน 9 วัน เป็นที่มาของขนาดมิติของชุดการทดลองในหัวข้อ 3.2



รูปที่ 4.1 ระยะเวลาของปฏิกริยาการสร้างกรดและปฏิกริยาการสร้างมีเทน

4.2 ผลการศึกษาสมบัติของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

จากการวิเคราะห์สมบัติของมูลสุกร, เศษอาหาร และไบโพลัม พบว่า เศษอาหารมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายมากที่สุด คือ 724.1 ± 5.7 กรัมต่อลิตร ไบโพลัมและมูลสุกรมีค่าเท่ากับ 447 ± 9.2 และ 0.4 ± 0.1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มูลสุกรที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมูลสุกรเหลว คือ มูลผสมปัสสาวะ น้ำล้างคอก และน้ำล้างตัวสุกร มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 18.4:1 แต่ค่าที่เหมาะสมกับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 20-30:1 [17] นอกจากนี้ยังมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่ำ ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายต่ำ ดังนั้น การใช้เศษอาหารหรือไบโพลัมในอัตราส่วนที่เหมาะสมเป็นโคซับสเตรตน่าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสูงขึ้นได้

ตารางที่ 4.1 สมบัติของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

	มูลสุกร	เศษอาหาร	ใบปาล์ม	เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น
TS (g/L)	7.4±3.6	847±4.5	952±10.1	36.0±3.2
VS (g/L)	0.4±0.1	724.1±5.7	447±9.2	24.5±3.6
COD (g/L)	5.7±10.3	47.2±6.4	1.24±2.5	21.4±4.2
pH	7.4 ± 0.3	6.2 ± 0.3	7.28 ± 0.3	7.2 ± 0.3
TKN (g/L)	18.4±3.6	13.5±6.9	17.6±10.3	23.8±5.4
TOC (g/L)	339.1±12.5	499.5± 15.8	11387.2± 295.3	380.8±14.3
C:N	18.4±1.4	37.0±2.2	64.7±5.9	16.0±1.8

ในพืชทั่วไป จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินโดยที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกันจะเรียกว่า ไฮโดรเซลลูโลส สำหรับเฮมิเซลลูโลส สามารถวิเคราะห์ในรูปของเพนโตแซนซึ่งจะบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำตาลไซโลส (xylose) เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ เช่นเดียวกับเซลลูโลส ประกอบด้วย 2 กลุ่ม คือน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคส โดยจะมีน้ำตาลไซโลสเป็นส่วนใหญ่ ($C_5H_{10}O_5$) มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.2 (ก) ประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเล็กจำนวน 200 โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะอย่างง่ายจึงสามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลสที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.2 (ข) เกิดจาก Glycosidic linkage ระหว่าง 1 และ 4 คาร์บอนของเบต้ากลูโคส เซลลูโลสถูกไฮโดรไลซิสได้ไม่ถ่วงน้ำหนักเพราะถูกจัดวางติดกันแน่นจนโมเลกุลของน้ำผ่านเข้าถึงได้ยาก และจากการศึกษาของเถลิงเดช [30] พบว่า ลิกนินที่มีปริมาณมาก จะส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ลดลงถึง 30% เนื่องจากโครงสร้างของลิกนิน มีลักษณะที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 4.2 (ค) ทำหน้าที่เป็นท่อส่งน้ำให้พืชซึ่งเป็น Polyphenolic material ที่ยากต่อการย่อยสลาย

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของใบปาล์ม

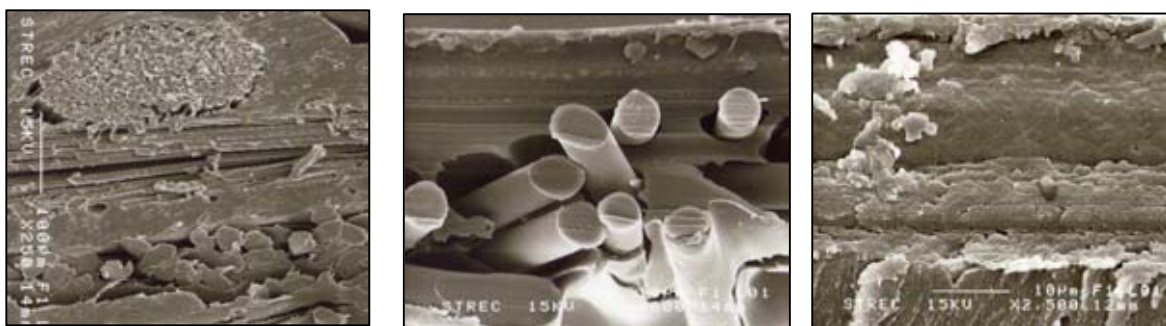
องค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ
ไฮโดรเซลลูโลส (Holo cellulose)	60.25± 3.8
ลิกนิน (Lignin)	11.17± 2.6
เถ้า (Ash)	1.85 ± 0.77
เพนโตแซน (Pentosan)	22.53 ± 3.28
แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose)	52.28 ± 4.79
สารแทรกที่ละลายในเอทานอล+เบนซีน	6.22 ± 2.38

4.3 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรน

แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 2 แบบ คือแผ่นเมมเบรนโคโตซานคอมพอสิต (Composite membrane) และแผ่นเมมเบรนโคโตซานสมมาตร (Symmetric membrane) เมมเบรนโคโตซานคอมพอสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 แบบ คือ แบบ (ก) เป็นเมมเบรนโคโตซานเคลือบบนผ้าสปีนปอนด์เสริมด้วยมุ้งตาข่าย และแบบ (ข) เป็นเมมเบรนโคโตซานเคลือบบนผ้าสปีนปอนด์ทั้ง 2 ด้าน

ตารางที่ 4.3 สมบัติของเมมเบรน

เมมเบรน	ความหนา (mm.)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (ลิตร/ตร.ม.-ชม.) (ที่ความดัน 0 psi)	ค่า Molecular weight cutoff (MWCO) (Da)
		D638	D882		
คอมพอสิต (ก)	0.49 ±0.01	478.7±13.3	62.8±3.5	173.6±3.2 ที่ความดัน 0 psi	100,000
คอมพอสิต (ข)	0.16 ±0.01	75.3±6.8	37.9±4.8	9.3±0.3 ที่ความดัน 100 psi	100,000
สมมาตร	0.08 ±0.01	40.8±7.8	29.6±2.3	1.5±0.1 ที่ความดัน 100 psi 2.6±0.1 ที่ความดัน 200 psi 3.3±0.1 ที่ความดัน 300 psi	89,000



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.3 ภาพภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในการทดลอง

- (ก) เมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตเคลือบบนผ้าสปันปอนด์เสริมด้วยมุ้งตาข่าย
- (ข) เมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตเคลือบบนผ้าสปันปอนด์ทั้ง 2 ด้าน
- (ค) เมมเบรนไคโตซานสมมาตร

การทดสอบความทนต่อแรงดึงเมมเบรน โดยปกติใช้วิธีการตาม ASTM D882 ซึ่งพบว่าใช้ไม่ได้กับเมมเบรนคอมพอสิต เนื่องจากได้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำเกินไปไม่ได้ จึงใช้วิธีการตาม ASTM D638 ซึ่งใช้กับการทดสอบพลาสติก (Standard test method for tensile properties of plastics) พบว่าได้ค่าที่สมเหตุสมผลกว่า โดยค่าความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนสมมาตรด้วยวิธีการทั้ง 2 มาตรฐานได้ค่าไม่ต่างกันมากนัก จึงสรุปว่าควรใช้มาตรฐาน ASTM D638 ทดสอบความทนต่อแรงดึงกับเมมเบรนคอมพอสิตและใช้มาตรฐาน ASTM D882 กับเมมเบรนสมมาตร ได้ค่าความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนคอมพอสิตแบบ (ก), แบบ (ข) และของเมมเบรนสมมาตร เท่ากับ 478.7 ± 13.3 , 75.3 ± 6.8 และ 29.6 ± 2.3 ตามลำดับ ตามตารางที่ 4.3 ดังนั้นในการประกอบแผ่นเมมเบรนในถังปฏิกรณ์เมมเบรน จึงนำเมมเบรนคอมพอสิตแบบ (ก) ซึ่งมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 478.7 ± 13.3 MPa ขณะที่ให้ฟลักซ์น้ำสูงสุดเท่ากับ 173.6 ± 3.2 ลิตร/ตร.ม.-ชม. โดยไม่ต้องใช้แรงดัน ใช้ติดตั้งไว้ที่ส่วนครึ่งล่างของชั้นที่ติดแผ่นเมมเบรนในถังปฏิกรณ์เมมเบรนและใช้เมมเบรนคอมพอสิตแบบ (ข) ติดอยู่ส่วนครึ่งบนโดยเมมเบรนคอมพอสิตทั้ง 2 แบบ มีสมบัติการกักกันสารจากค่า MWCO เท่ากันเท่ากับ 100,000 Da

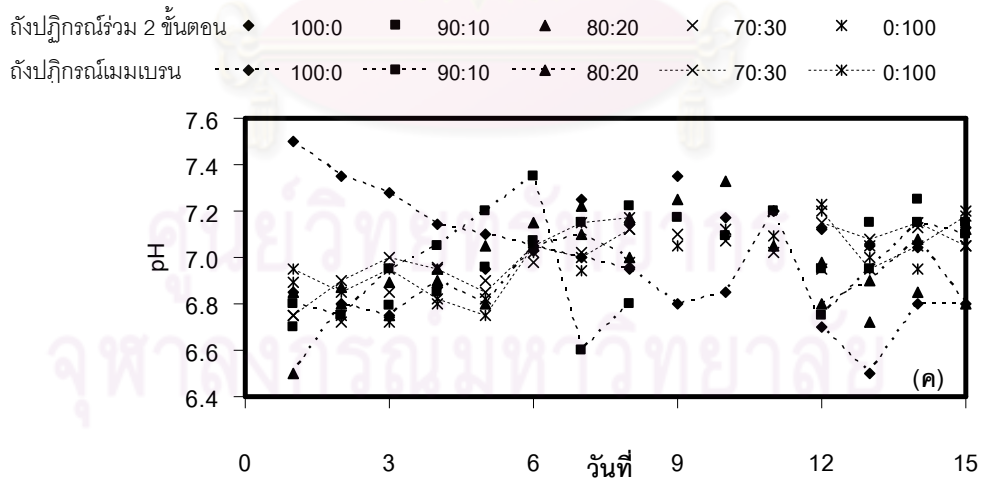
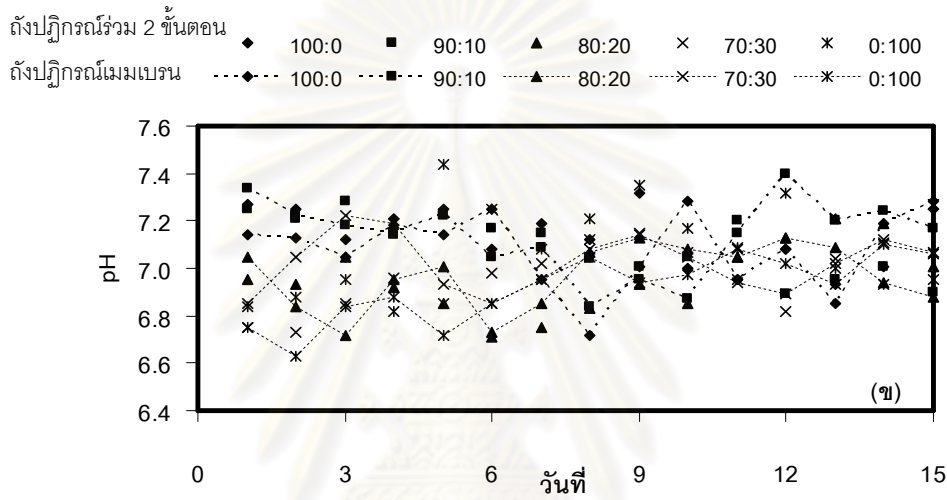
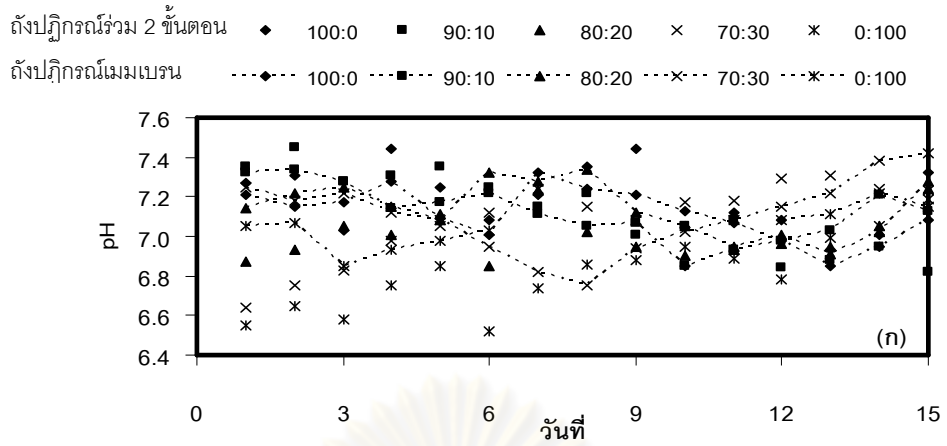
จากภาพ SEM ในรูปที่ 4.3 ของเมมเบรนทั้ง 3 แบบ ไม่เห็นรูพรุนในเมมเบรนแต่มีค่า MWCO สูงเทียบเท่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน อาจเนื่องจากการบวมตัวของเมมเบรนไคโตซาน เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีน้ำซึ่งใช้เป็นตัวทำลายสาร Dextran ความสามารถในการซึมผ่านน้ำ (Water permeability) ของเมมเบรนสมมาตร ซึ่งได้จากค่าความชันของกราฟพล็อตระหว่างค่าฟลักซ์น้ำและความดันมีค่าเท่ากับ 0.0094 ลิตร/ตร.ม.-ชม-พีเอสไอ และการมี

สมบัติการกักกันสารจากค่า MWCO ต่ำกว่าเมมเบรนคอมพอสิตทั้ง 2 แบบ แสดงให้เห็นความสามารถของถังปฏิกรณ์เมมเบรนที่ใช้เมมเบรนสมมาตร น่าจะสูงกว่าการใช้เมมเบรนคอมพอสิตซึ่งจะทดลองศึกษาให้เห็นประจักษ์ในหัวข้อ 4.5.4 ต่อไป

4.4 ผลการศึกษาความมีสัมฤทธิ์ผลของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของชุดการทดลอง

4.4.1 ค่าพีเอช

รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงค่า pH ในน้ำเสียขาออกจากถังปฏิกรณ์เก็บข้อมูล เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เป็นเวลา 15 วัน โดยรูปที่ 4.4 แสดงการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหาร และรูปที่ 4.5 แสดงการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบโพลัม พบว่า ค่า pH ที่ทำการวิเคราะห์ได้นั้น อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนและเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน นั่นคือช่วง 6.6-7.6 [17] การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของแต่ละวันมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพและสังเกตเห็นว่าการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารมีการกระจายตัวของค่าพีเอชมากกว่าการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบโพลัม ทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ เนื่องจากเศษอาหารมีกระบวนการทางชีวเคมีมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถควบคุมสภาวะของถังปฏิกรณ์ได้เป็นอย่างดี

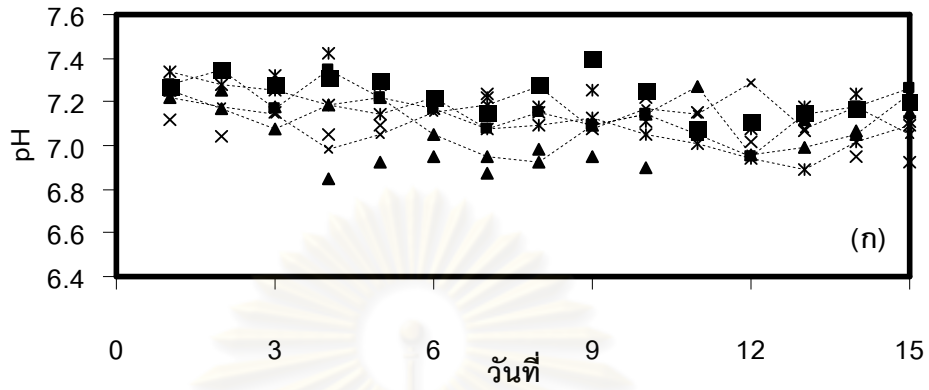


รูปที่ 4.4 ค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด

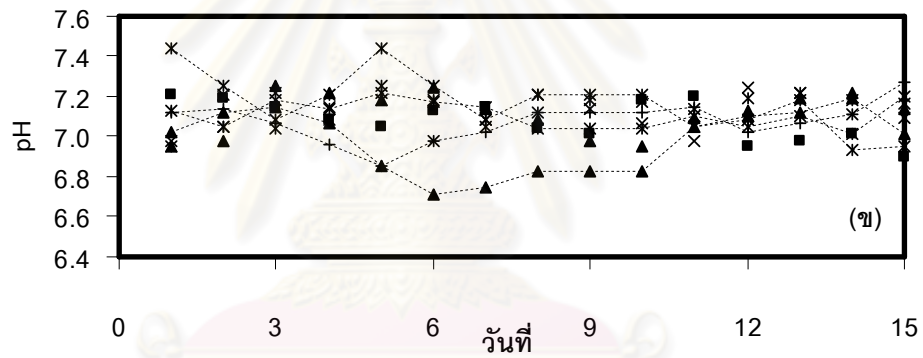
เท่ากับ

(ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%

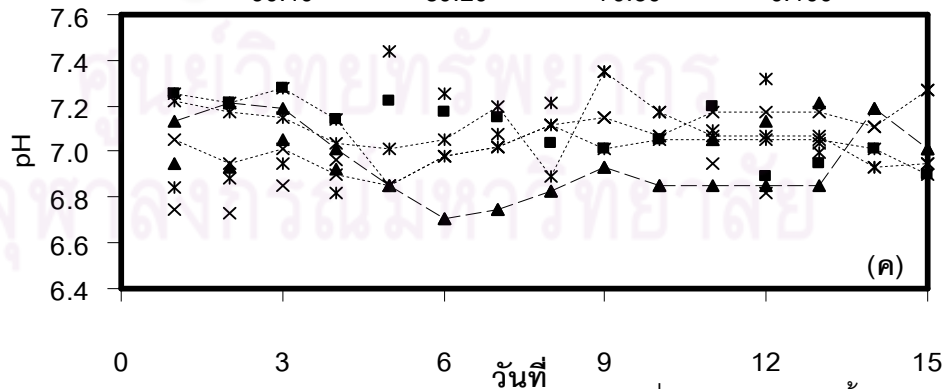
ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ■ 90:10 ▲ 80:20 × 70:30 * 0:100
 ถังปฏิกรณ์เมมเบรน■..... 90:10▲..... 80:20×..... 70:30*..... 0:100



ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ■ 90:10 ▲ 80:20 × 70:30 * 0:100
 ถังปฏิกรณ์เมมเบรน*..... 90:10▲..... 80:20+..... 70:30*..... 0:100



ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ■ 90:10 ▲ 80:20 × 70:30 * 0:100
 ถังปฏิกรณ์เมมเบรน*..... 90:10▲..... 80:20×..... 70:30*..... 0:100

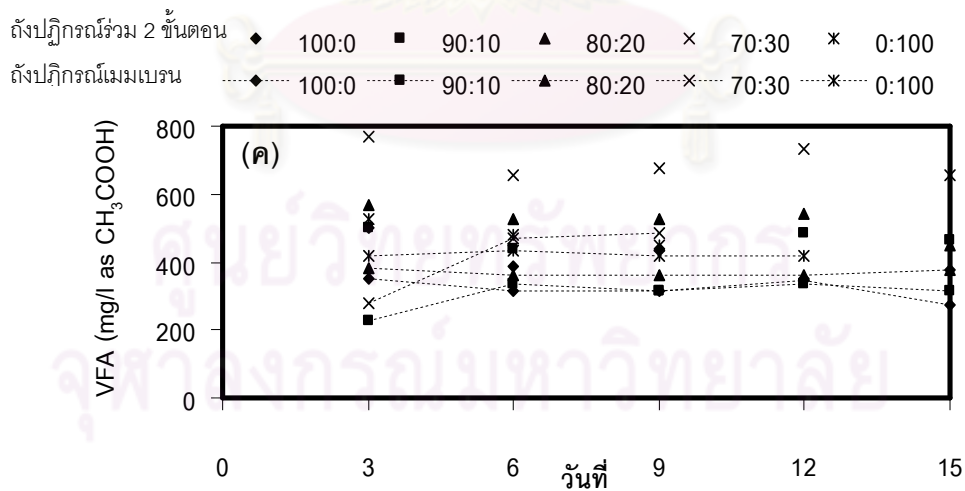
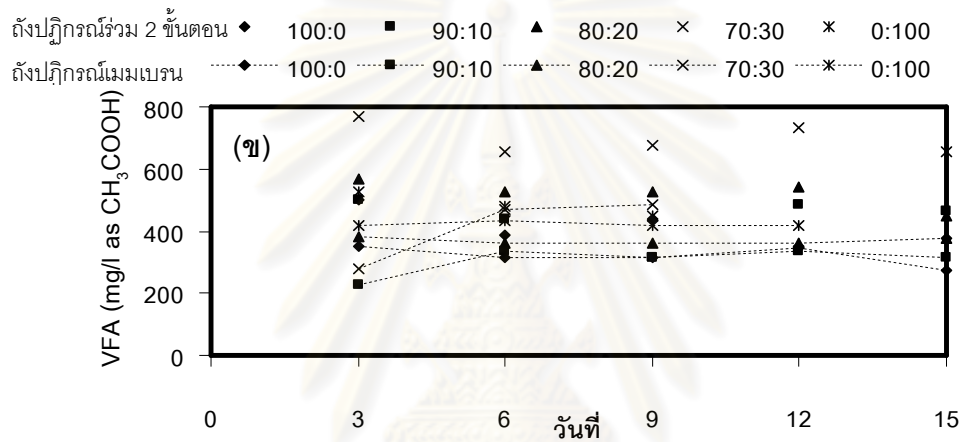
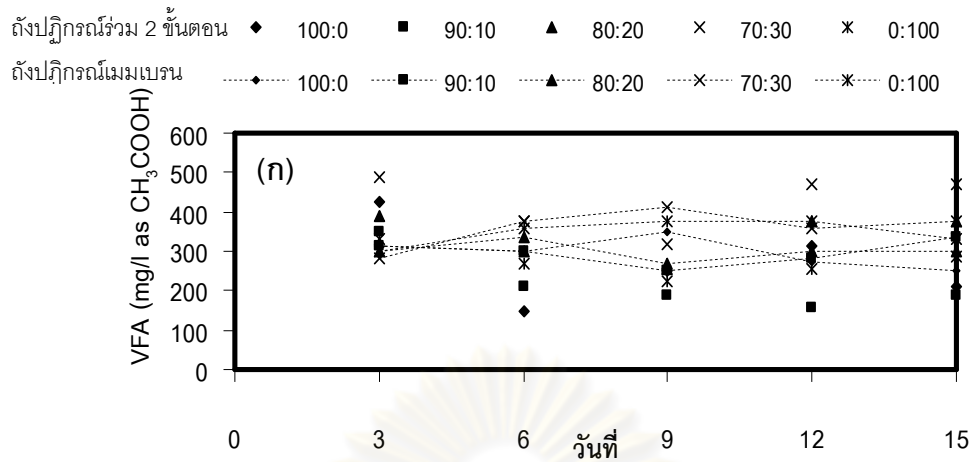


รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโอดีปที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ

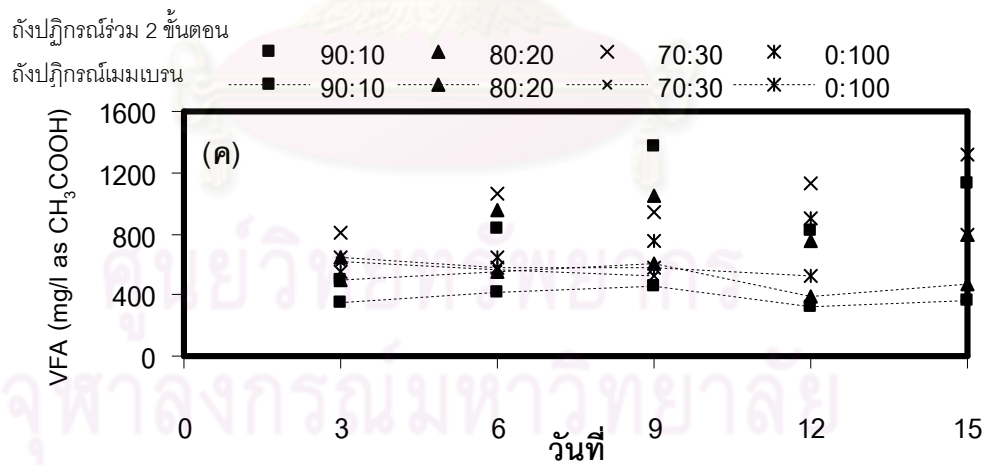
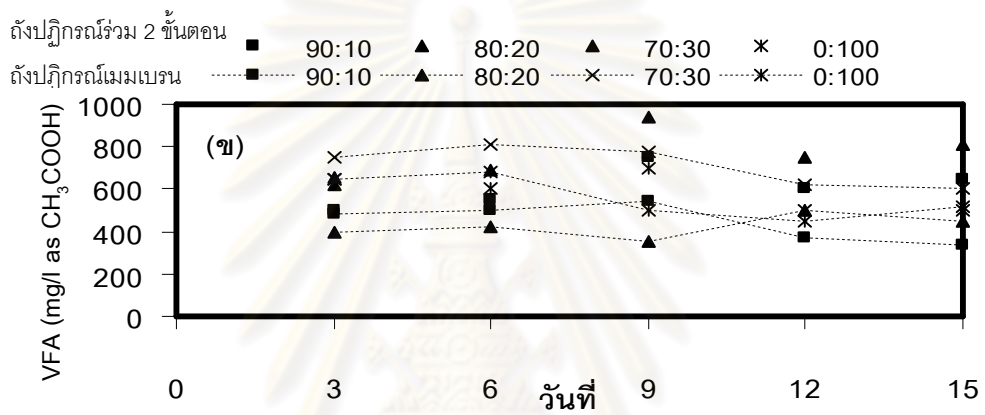
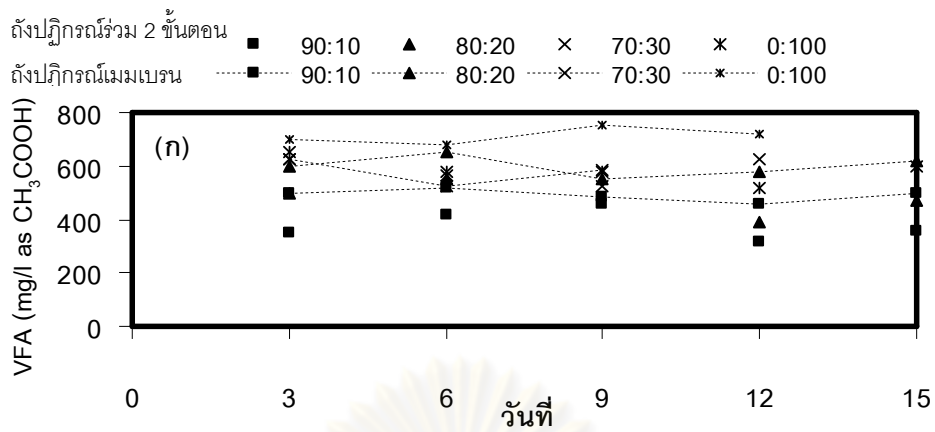
(ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%

4.4.2 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid) เป็นกรดที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว ที่สำคัญคือ กรดแอสिटิก ซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์สร้างมีเทน การเปลี่ยนแปลงค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย จะบ่งบอกถึงสภาวะการทำงานของระบบ ถ้าค่านี้มีค่าสูงอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีการยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนแสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอ แต่ถ้ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างกะทันหันแสดงว่ามีจุลินทรีย์กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งถูกยับยั้งการทำงาน ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ทำให้ระบบเสียสมดุลจนล้มเหลวในที่สุด โดยปกติกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในขั้นตอนเดียว จะมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยประมาณ 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดแอสिटิก หากมีมากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจจะทำให้ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง [17] ปริมาณกรดอินทรีย์ของงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า ค่ากรดอินทรีย์ระเหยในรูปกรดแอสिटิก (CH_3COOH) มีค่าอยู่ในช่วง 200-700 มิลลิกรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกันจึงกล่าวได้ว่าระบบมีเสถียรภาพและกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอ



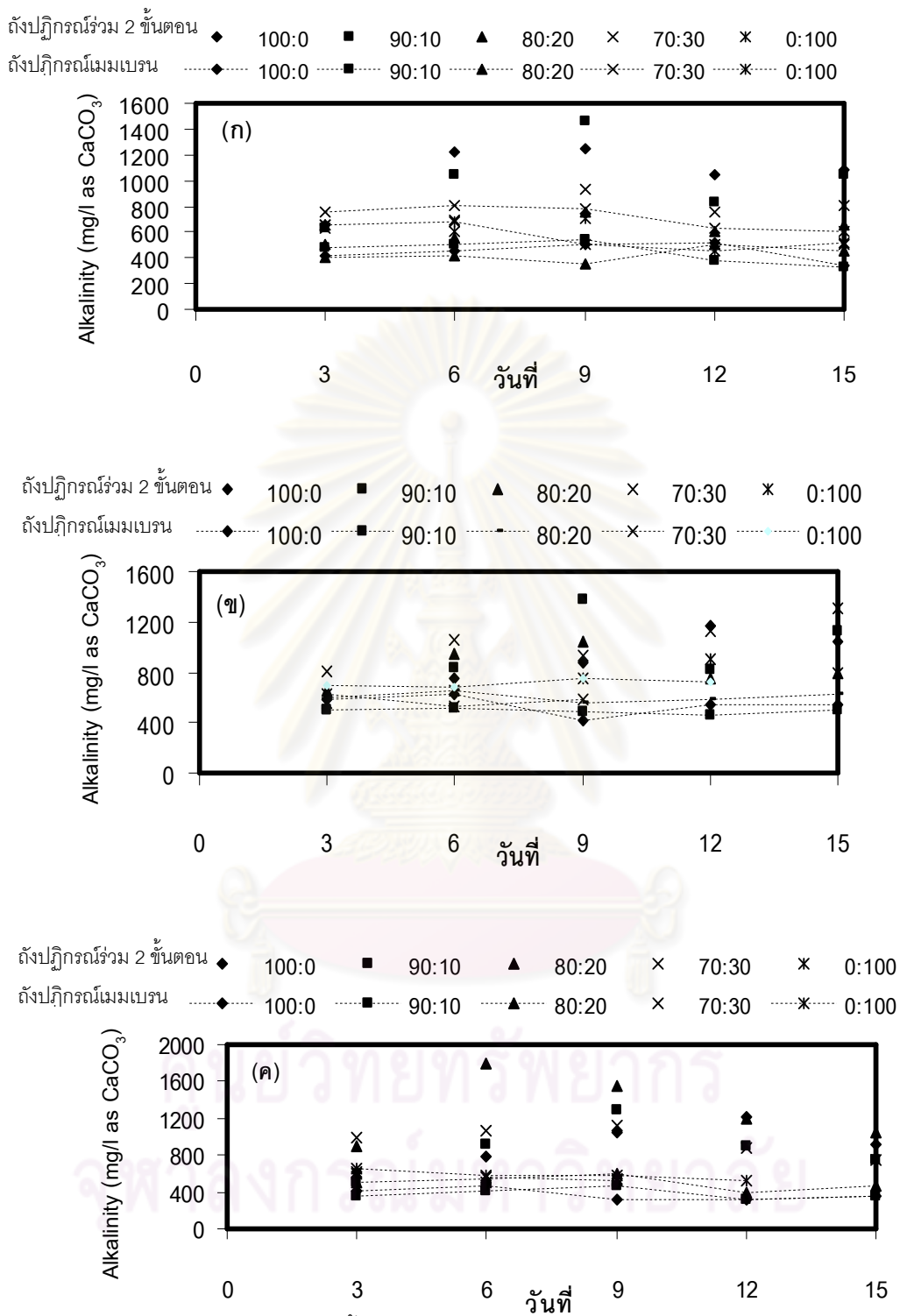
รูปที่ 4.6 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารที่
 ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ
 (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%



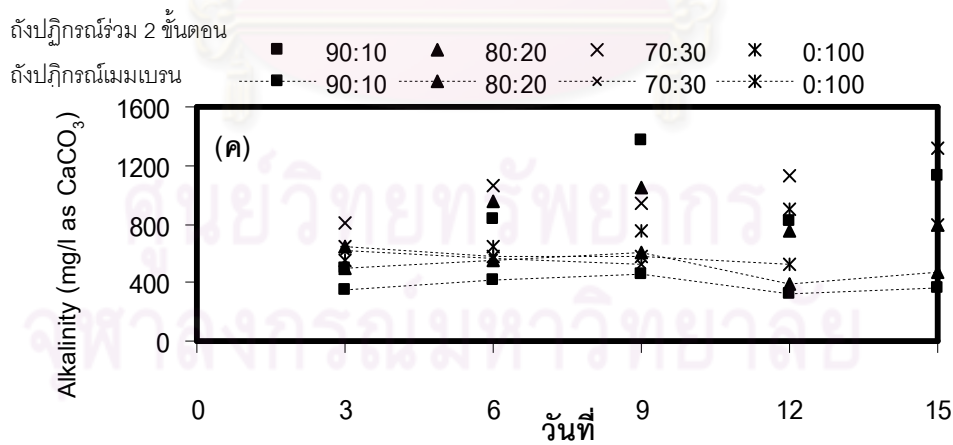
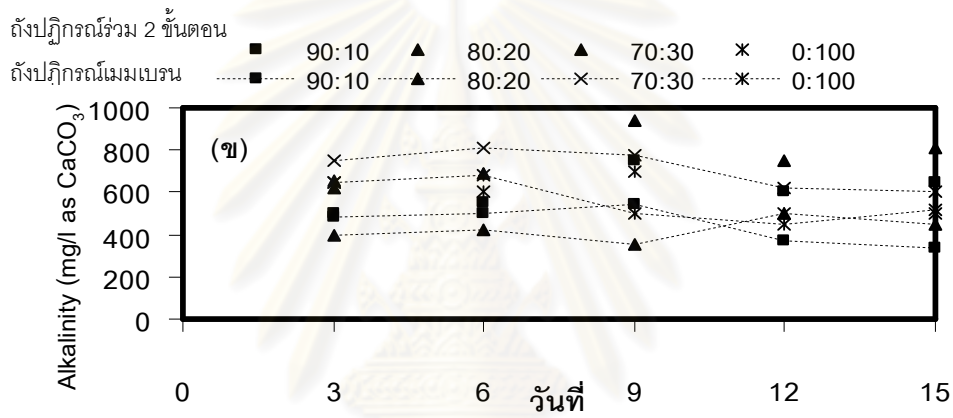
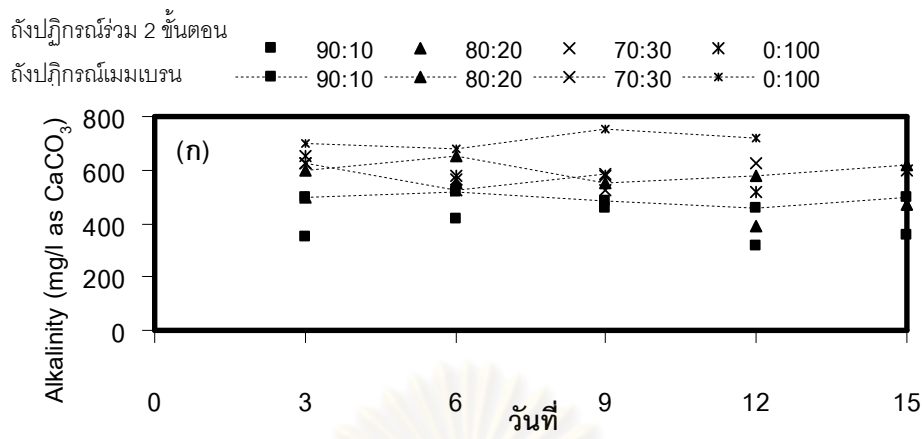
รูปที่ 4.7 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบการย่อยมูลสุกรกับไบโพลีเมอร์
 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ
 (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%

4.4.3 สภาพความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity)

ค่านี้จะแสดงถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) สูง สามารถรักษาค่าพีเอชให้คงตัวอยู่ได้นานต่อการเพิ่มของปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ แต่ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่า มีการสะสมของกรดอินทรีย์สูงในระบบ ค่าความเป็นด่างทั้งหมดที่เหมาะสมของกระบวนการย่อยสลายจะอยู่ในช่วง 1,000 - 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามีค่ามากกว่านี้อาจส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ได้ [17] งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพความเป็นด่างทั้งหมดในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ตามรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่า ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงกล่าวได้ว่าระบบมีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.8 สภาพความเป็นต่างทั้งหมดของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%



รูปที่ 4.9 สภาพความเป็นต่างทั้งหมดของระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลีเมอร์ปริมาณ
 ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ
 (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20%

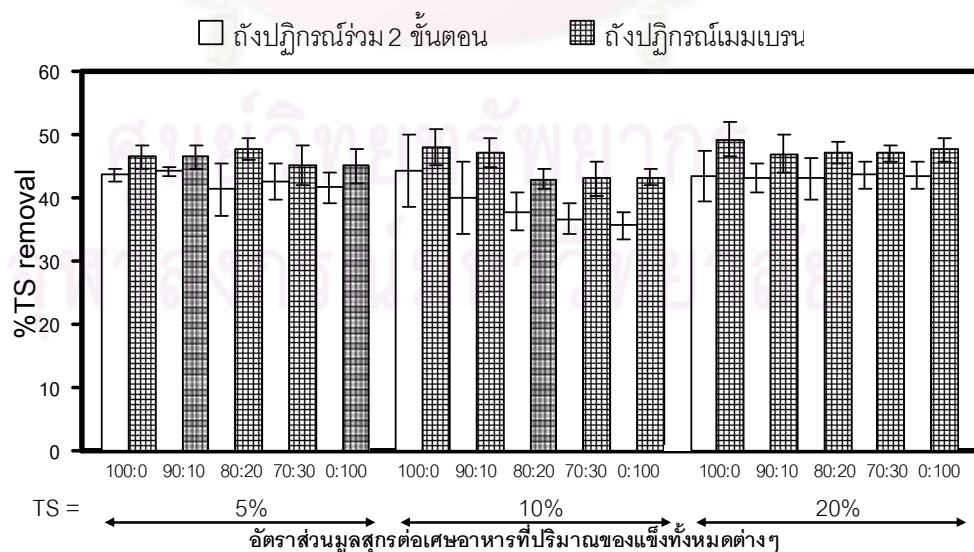
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (Total solid removal), ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Volatile solid removal) และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (COD removal)

4.5.1 ผลของการใช้เศษอาหารเป็นโคซับสเตรท

รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ที่ปริมาณของแข็ง 5%, 10% และ 20% พบว่าความสามารถการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 40-50% โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนดีกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด จากการใช้โปรแกรม SPSS ด้วยวิธี ANOVA วิเคราะห์ข้อมูลยืนยันนัยสำคัญในความแตกต่างของประสิทธิภาพดังกล่าวระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 แบบ แต่ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดและในถังปฏิกรณ์ประเภทเดียวกัน อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด

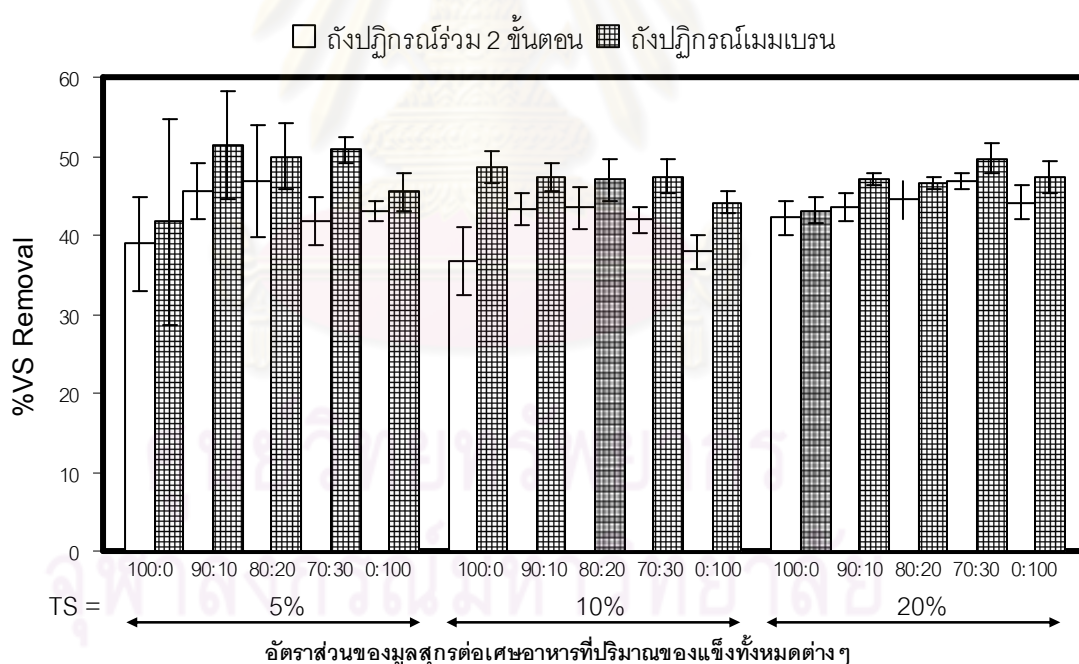
ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าอยู่ระหว่าง 32.4-48.0 % และ 40.2-50.7% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 30.2-52.2% และ 40.1-51.6% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.2-52.6% และ 41.3-53.9% ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่ปริมาณของแข็ง 5%, 10% และ 20% พบว่าความสามารถการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วง 35-50% โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายจากถังปฏิกรณ์หมกเบรนดีกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด แต่จากการใช้โปรแกรม SPSS ด้วยวิธี ANOVA วิเคราะห์ข้อมูล พบว่าที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% และ 20% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของประสิทธิภาพดังกล่าวระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 แบบ และพบว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% ในถังปฏิกรณ์หมกเบรนอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย

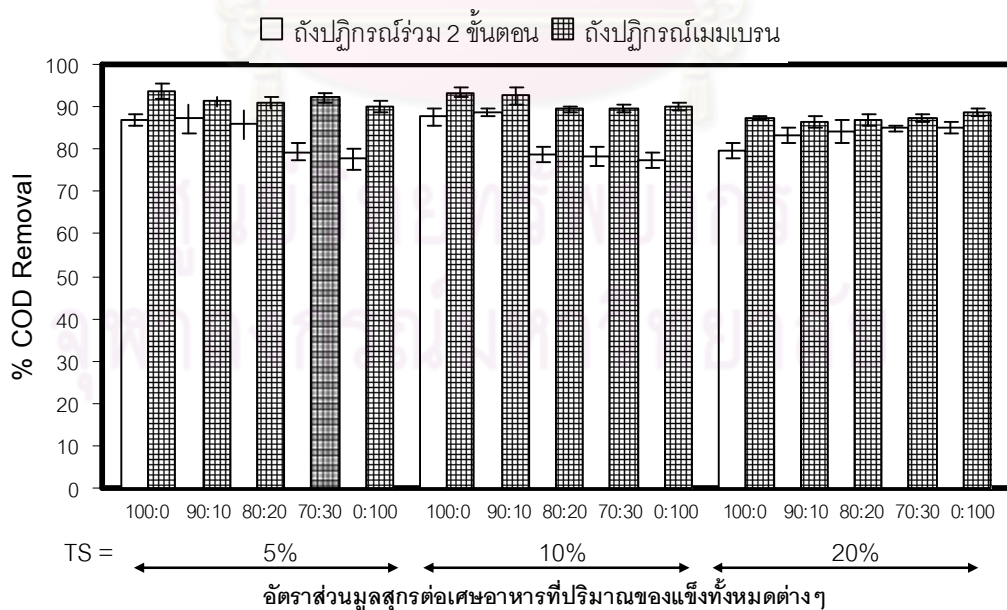
ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและจากถังปฏิกรณ์หมกเบรนมีค่าอยู่ระหว่าง 27.0-58.5% และ 15.9-65.1% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 27.5-48.9% และ 40.8-51.6%ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.4-50.3% และ 41.0-52.6% ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการย่อยสลายร่วม
มูลสุกรกับเศษอาหาร

รูปที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีที่ปริมาณของแข็ง 5%, 10% และ 20% พบว่าความสามารถการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วง 80-94% โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนดีกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด จากการใช้โปรแกรม SPSS ด้วยวิธี ANOVA วิเคราะห์ข้อมูลยืนยันนัยสำคัญในความแตกต่างของประสิทธิภาพดังกล่าว ระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 แบบ แต่ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดและในถังปฏิกรณ์ประเภทเดียวกัน อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าอยู่ระหว่าง 72.9-91.5% และ 87.6-96.8% ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 169-600 และ 113-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าอยู่ระหว่าง 75.0-90.9% และ 87.7-95.2% ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีระหว่าง 256-650 และ 140-525 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าอยู่ระหว่าง 76.8-88.0% และ 84.4-89.8% ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 500-995 และ 350-800 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

4.5.2 ผลของการใช้ใบปาล์มเป็นโคซับสเตรท

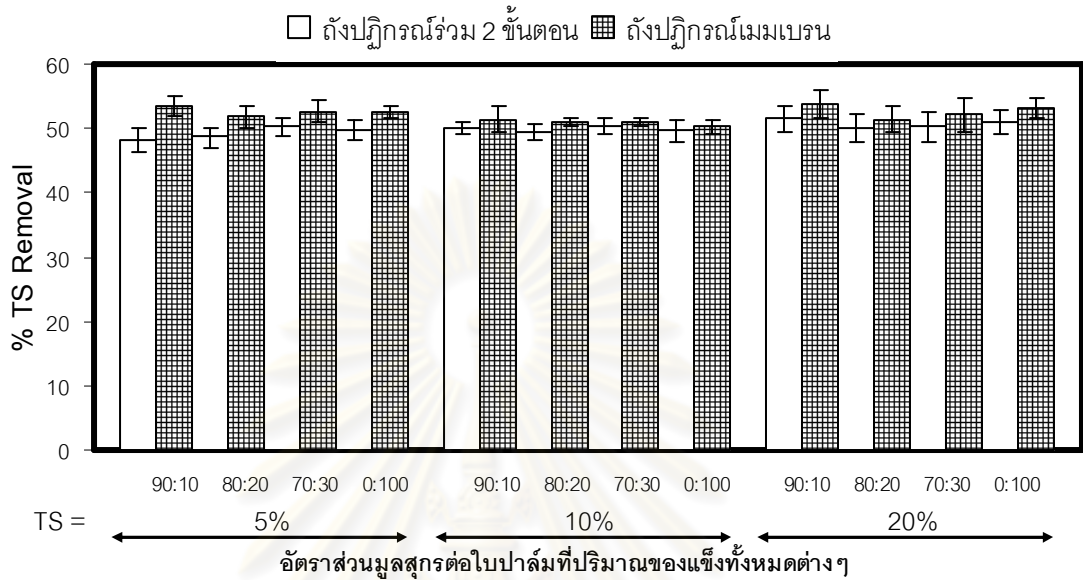
รูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ตามลำดับ ที่ปริมาณของแข็ง 5%, 10% และ 20% จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน พบว่าไม่มีความแตกต่างในประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่ทุกสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สัดส่วนปริมาณของแข็งเท่ากับ 20% แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สัดส่วนปริมาณของแข็งเท่ากับ 5% และ 10%

ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน พบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% เท่านั้น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ โดยในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5%, 10% และ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 45.4-52.1%, 45.8-53.9% และ 44.6-56.8% ตามลำดับ และในถังปฏิกรณ์เมมเบรนที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5%, 10% และ 20% ให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 47.8-56.2%, 47.9-53.6% และ 48.2-57.6% ตามลำดับ

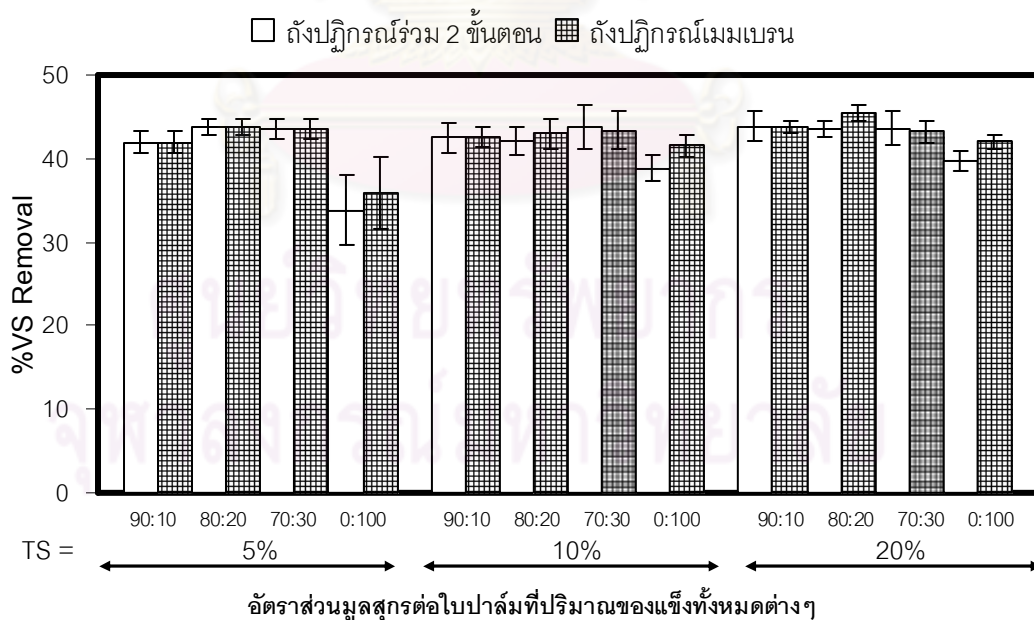
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมต่างๆ กัน ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 29.5-45.7 แต่ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% และ 20% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 36.2-48.1% และ 38.1-49.8% ตามลำดับ ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 29.6-45.7%, 38.7-47.2% และ 39.5-47.9% ตามลำดับ

ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด โดยที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5%, 10% และ 20% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 83.3-90.2%, 83.1-91.6% และ 84.1-91.1% ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 160-515, 200-476 และ 250-725 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5%, 10% และ 20% มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 85.4-93.8%, 89.2-95.0% และ

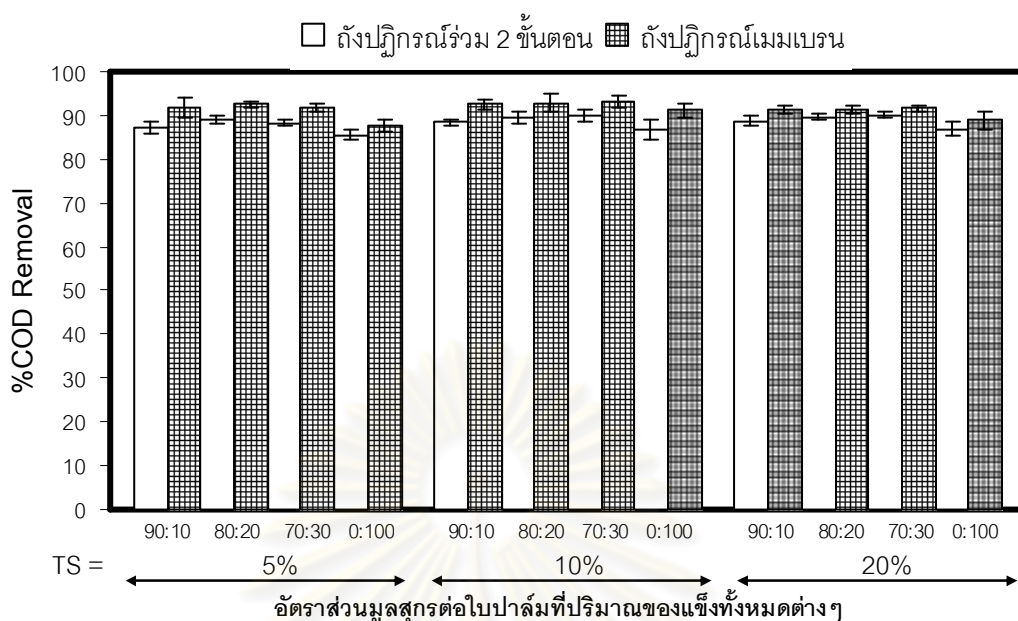
85.4-92.9% ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 113-240, 125-200 และ 200-425 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการย่อยสลายร่วมมวลสุกรกับไบโปาล์ม



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการย่อยสลายร่วมมวลสุกรกับไบโปาล์ม



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม

4.5.3 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด

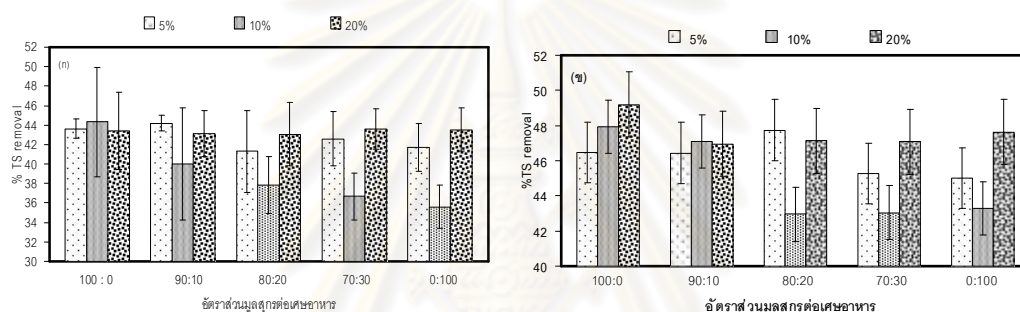
4.5.3.1 การย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% และ 20% อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ

ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 41.2-45.0%, 42.8-45.9%, 32.3-48.0%, 36.6-46.6% และ 37.7-45.9% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 32.5-52.2%, 30.9-49.5%, 33.6-43.1%, 30.2-39.2% และ 31.2-40.7% ตามลำดับ และที่

สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 39.5-52.6%, 40.1-49.7%, 38.6-51.2%, 40.3-47.0% และ 38.2-48.1% ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 44.2-49.7%, 42.8-49.5%, 41.9-49.9%, 41.0-50.7% และ 40.2-49.2% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 43.3-51.6%, 43.7-50.7%, 40.4-45.7%, 40.1-47.9% และ 45.6-40.7% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 43.8-53.9%, 41.3-51.3%, 44.9-49.7%, 43.7-50.9% ตามลำดับ



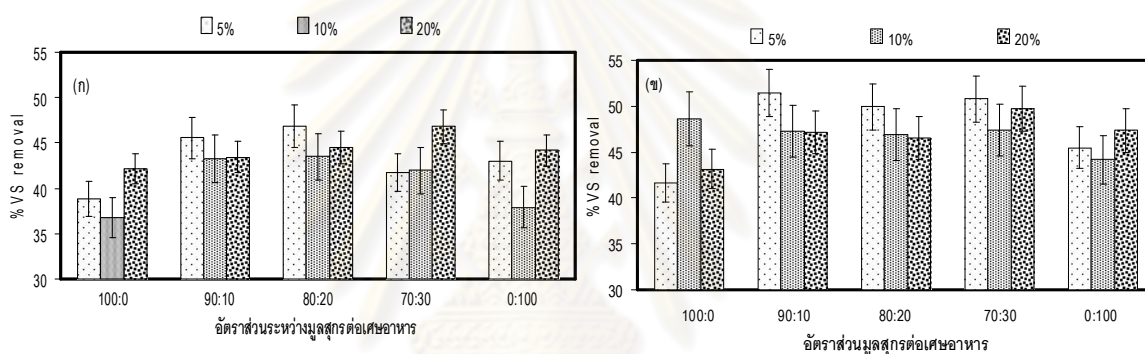
รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน จากการศึกษาวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญในถึงปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ และพบว่าอัตราการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรนเท่านั้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 27.0-46.9%, 38.1-49.9%, 34.2-58.5%, 38.2-47.3% และ 40.5-45.9% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 27.5-43.8%, 40.1-46.8%, 39.9-48.9%, 38.6-44.1% และ 33.9-41.2% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมด

เท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.4-45.0%, 40.5-47.0%, 40.9-50.3%, 44.9-48.6% และ 40.9-48.1% ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 15.9-65.1%, 37.9-62.6%, 42.3-57.7%, 47.4-53.2% และ 40.9-49.2% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 44.7-51.6%, 44.5-50.2%, 43.2-51.5%, 44.2-50.6% และ 40.8-45.9% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 41.0-45.9%, 46.0-49.0%, 44.9-47.6%, 46.1-52.6% และ 45.1-51.4% ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

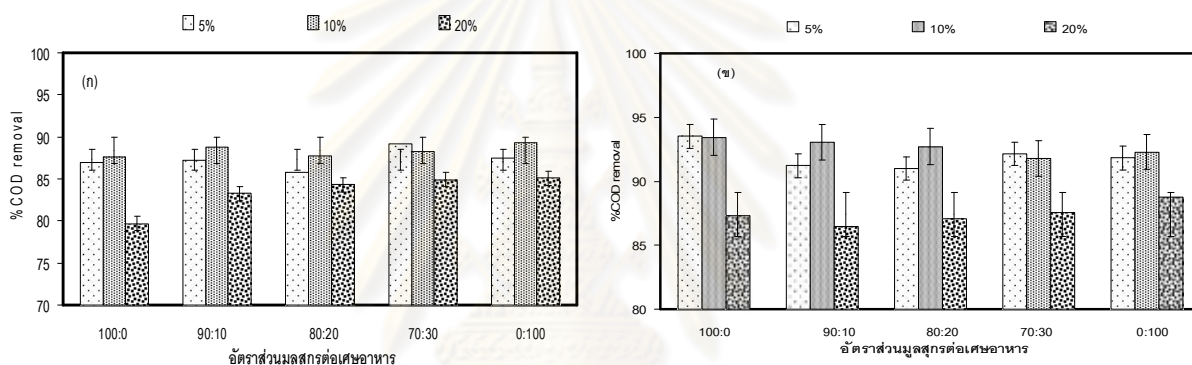
(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีอย่างมีนัยสำคัญในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน และพบว่าอัตราการย่อยสลายร่วมที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีอย่างมีนัยสำคัญทั้งในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

ในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 84.8-89.6%, 80.1-91.5%, 80.1-89.7%, 74.6-81.2% และ 72.9-80.8% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 80.5-90.9%, 87.7-90.2%, 76.1-81.3%, 73.9-81.2%, และ 75.0-81.0 ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็ง

ทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 76.8-83.2%, 80.8-85.5%, 80.3-87.9%, 83.9-85.9% และ 83.1-87.5 ตามลำดับ

ในถังปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 90.2-96.8%, 89.1-92.9%, 89.5-93.3%, 90.6-94.4% และ 87.6-92.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 91.7-95.2%, 87.7-94.5%, 88.2-93.4%, 89.1-91.4% และ 92.4-95.2% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 86.4-88.2%, 84.4-88.1%, 84.9-89.2%, 86.3-88.9% และ 86.4-89.8% ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการย่อย

สลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

(ก) ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถังปฏิกรณ์เมมเบรน

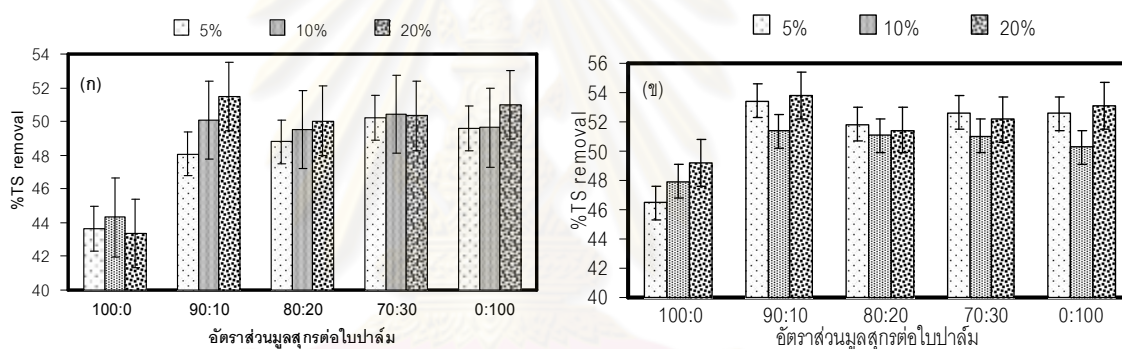
4.5.3.2 การย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนปริมาณของแข็งเท่ากับ 10% เท่านั้น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทั้งในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและในถังปฏิกรณ์เมมเบรน

ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัมเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 41.2-45.0%, 45.7-52.1%, 45.4-50.6%, 48.3-

52.1% และ 47.0-52.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 32.5-52.2%, 47.7-51.9%, 46.7-50.9%, 48.3-53.9% และ 45.8-51.7% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 39.5-82.6%, 48.0-56.8%, 44.6-54.0%, 47.9-55.5% และ 49.5-55.2% ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัมเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 44.2-49.7%, 49.1-56.0%, 47.8-55.0%, 49.5-56.2% และ 51.3-54.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 43.3-51.6%, 48.2-53.6%, 49.9-51.9%, 50.1-51.9% และ 47.9-51.9% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 43.8-53.9%, 50.2-57.6%, 48.2-55.4%, 48.4-56.2% และ 49.8-55.0% ตามลำดับ



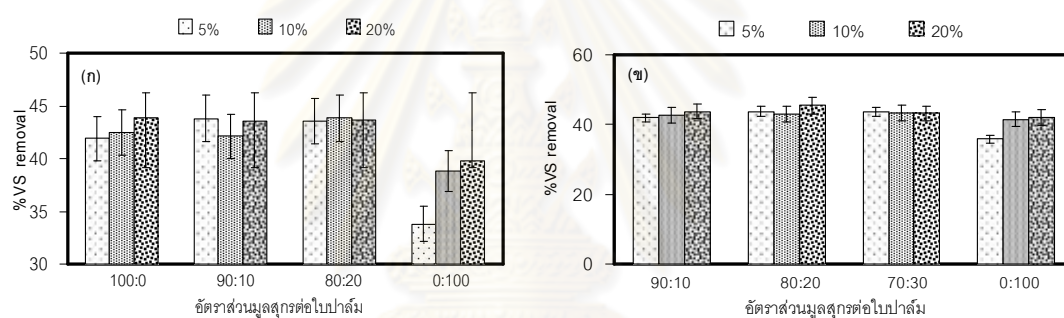
รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัม

(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และถึงปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอย่างมีนัยสำคัญ ในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และในถึงปฏิกรณ์เมมเบรนที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% เท่านั้นโดยถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโพลัมเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีค่าอยู่ระหว่าง 27.0-46.9%, 40.0-44.4%, 42.1-45.7%, 40.9-45.5% และ 29.5-40.3% ตามลำดับ ที่สัดส่วน

ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 27.5-43.8%, 38.6-44.7%, 38.1-44.6%, 39.9-48.1% และ 36.2-41.3% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.4-45.0%, 41.4-46.1%, 41.0-44.7%, 41.1-49.8% และ 38.1-41.9% ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์มเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัด ของแข็งระเหยง่ายที่ สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 15.9-65.1%, 40.0-44.4%, 42.1-45.7%, 40.1-45.5% และ 29.6-42.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 44.7-51.6%, 41.4-44.7%, 40.0-47.0%, 38.7-47.2% และ 39.3-44.3% ตามลำดับ และที่ สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 41.0-45.9%, 42.1-45.1%, 44.2-47.9%, 39.5-45.5% และ 41.1-43.6% ตามลำดับ



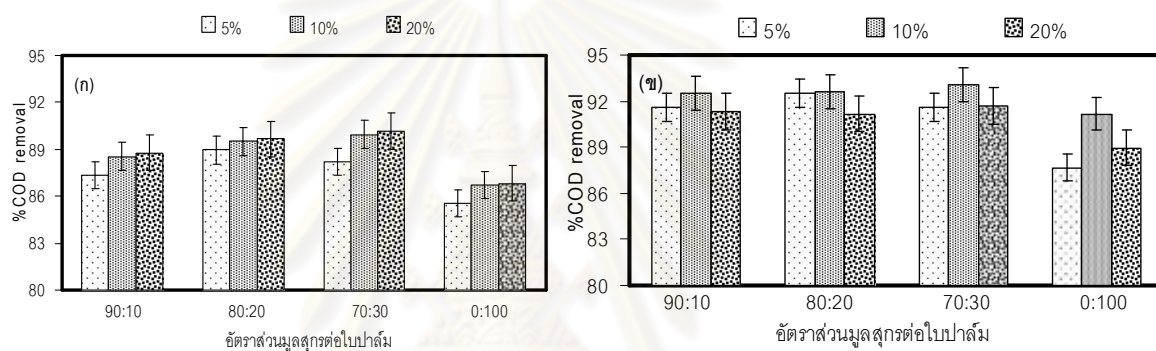
รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม
(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและปริมาณของแข็งทั้งหมดในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถึงปฏิกรณ์เมมเบรนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีอย่างมีนัยสำคัญ

ในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์มเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 84.8-89.6%, 84.9-89.3%, 87.5-90.1%, 87.3-89.3% และ 83.3-86.7% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 80.5-90.9%, 87.4-89.3%, 88.6-90.2%, 88.1-91.6% และ 83.1-89.7% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็ง

ทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 76.8-83.2%, 86.8-90.2%, 89.2-90.7%, 89.2-91.1% และ 84.1-88.8% ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่าง 90.2-96.8%, 87.0-93.8%, 91.3-93.7%, 90.2-92.9% และ 85.4-90.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 91.7-95.2%, 90.9-94.2%, 91.4-93.4%, 91.1-94.9% และ 89.2-93.8% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 86.4-88.2%, 90.2-92.9%, 90.4-92.4%, 90.8-92.7% และ 85.4-91.0% ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์ม
(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

4.5.4 ผลของลักษณะถึงปฏิกรณ์

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรนในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารและมูลสุกรกับไบปาล์ม พบว่าค่าซีโอดีจากระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารมีค่ามากกว่าจากระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มที่ทุกสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด ในส่วนนี้จึงสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร ได้ผลดังรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย และประสิทธิภาพการกำจัดของค่าซีโอดี จากถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน, ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิตและถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร ในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วน 0:100, 80:20 และ 100:0 ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งเท่ากับ 5%, 10% และ 20% พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

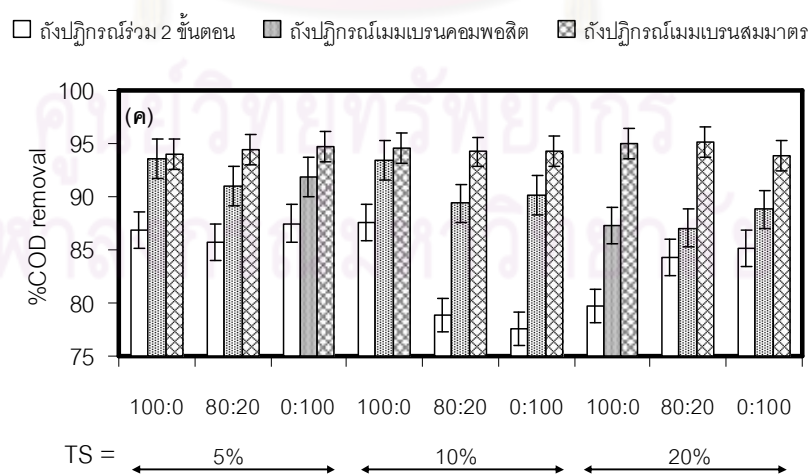
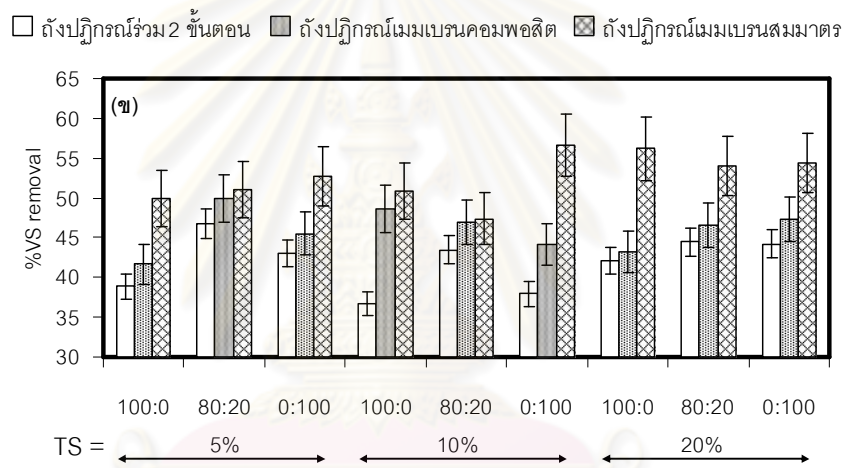
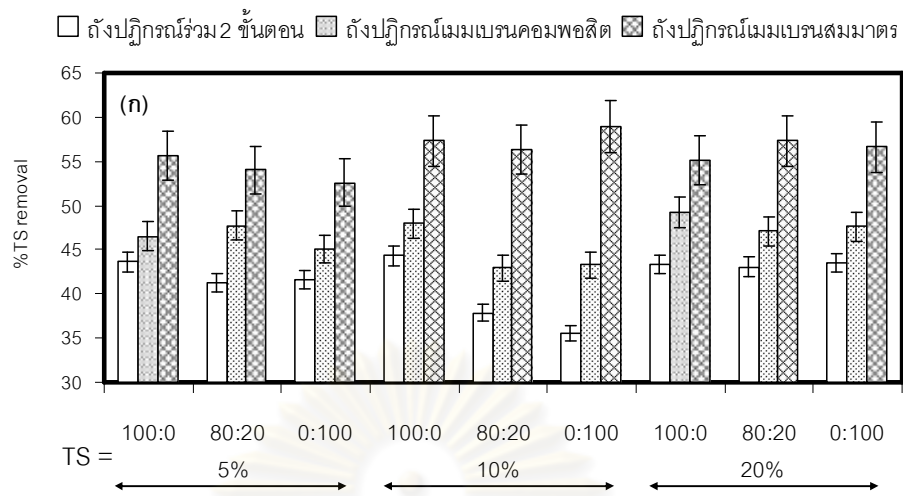
จากถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตรให้ผลดีกว่าถึงปฏิกรณ์อีก 2 ประเภทอย่างชัดเจน ที่ทุกอัตราส่วน การย่อยสลายร่วมและที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด ดังนี้

รูปที่ 4.22 (ก) แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน, ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิต และถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร พบว่าที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 32.4-48.0 %, 40.2-49.8% และ 49.5-58.0% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 31.2-52.2%, 40.4-51.6% และ 50.0-67.0% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.2-52.6%, 43.7-53.9% และ 50.5-62.4% ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 (ข) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน, ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิต และถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร พบว่าที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 32.4-42.0 %, 40.2-42.8% และ 35.1-44.8% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 30.2-38.9%, 40.1-42.6% และ 39.3-42.4% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 38.2-41.7%, 41.3-43.9% และ 40.1-46.3% ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 (ค) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน, ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิต และถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร พบว่าที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% มีค่าอยู่ระหว่าง 72.9-88.4 %, 87.6-94.8% และ 92.3-93.8% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 75.0-90.9%, 87.7-93.2% และ 93.5-95.3% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 76.8-88.0%, 84.4-89.8% และ 93.7-96.0% ตามลำดับ

ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตรให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด, ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงกว่าผลที่ได้จากถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิต ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วน ปริมาณของแข็ง เนื่องจากแผ่นเมมเบรนสมมาตรมีสมบัติการกักกันสารจากค่า MWCO ต่ำกว่า เมมเบรนคอมพอสิตทั้ง 2 แบบ จึงทำให้ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตรให้ผลที่ดีกว่า



รูปที่ 4.22 ผลของลักษณะถังปฏิกรณ์

(ก) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย

(ค) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี

4.6 อัตราการเกิดแก๊สมีเทน

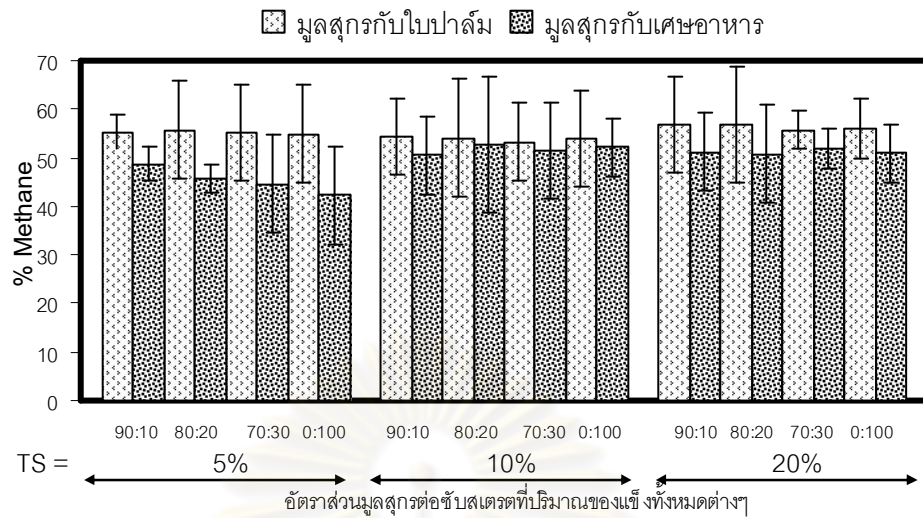
4.6.1 สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ

รูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน ตามลำดับ พบว่าสัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพอยู่ในช่วง 40-60% โดยระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มให้สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนสูงกว่าจากระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วม และทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงปฏิกรณ์ประเภทเดียวกัน ปริมาณของแข็งทั้งหมดและอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า การใช้ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนหรือถังปฏิกรณ์เมมเบรนไม่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

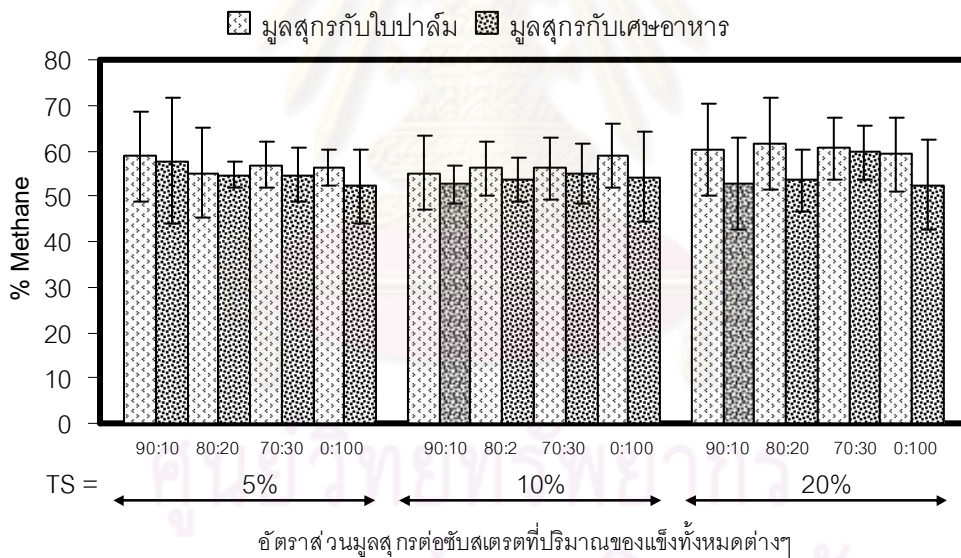
สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร และระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มมีค่าอยู่ระหว่าง 35.8-53.7% และ 45.3-67.5% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 42.2-67.5% และ 47.8-68.9% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 40.1-69.8% และ 50.8-69.7% ตามลำดับ

สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร และระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มมีค่าอยู่ระหว่าง 42.2-71.4% และ 49.3-69.7% ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 45.4-64.7% และ 49.8-67.8% ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 43.8-66.7% และ 50.7-72.8% ตามลำดับ

สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพจากระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มสูงกว่าระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร คาดว่าเนื่องจากคาร์บอนใน TOC ของไบปาล์มสูงกว่าเศษอาหาร (11387.2 ± 295.3 และ 499.5 ± 15.8 ตามลำดับ) เมื่อเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีโดยจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มกลายเป็นมีเทนจึงทำให้ได้สัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สมีเทนสูงกว่า



รูปที่ 4.23 องค์ประกอบแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน



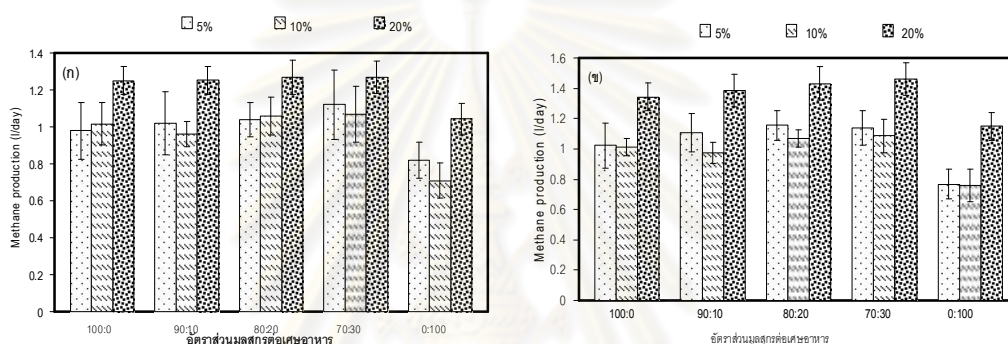
รูปที่ 4.24 องค์ประกอบแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์เมมเบรน

4.6.2 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด

รูปที่ 4.25 แสดงผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนในระบบย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าที่แต่ละสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีความแตกต่างในอัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญระหว่างถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ แต่ในถังปฏิกรณ์แต่ละแบบ ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ ที่สัดส่วนของปริมาณ

ของแข็งเท่ากับ 5% และ 10% ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในอัตราการเกิดแก๊สมีเทน แต่ที่สัดส่วนของปริมาณของแข็งเท่ากับ 5% และ 20% กับสัดส่วนของปริมาณของแข็งเท่ากับ 10% และ 20% มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อ อัตราการเกิดแก๊สมีเทน

ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าระหว่าง 0.53-1.17 และ 0.58-1.28 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.81-1.17 และ 0.53-1.23 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.77-1.37 และ 1.01-1.57 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ



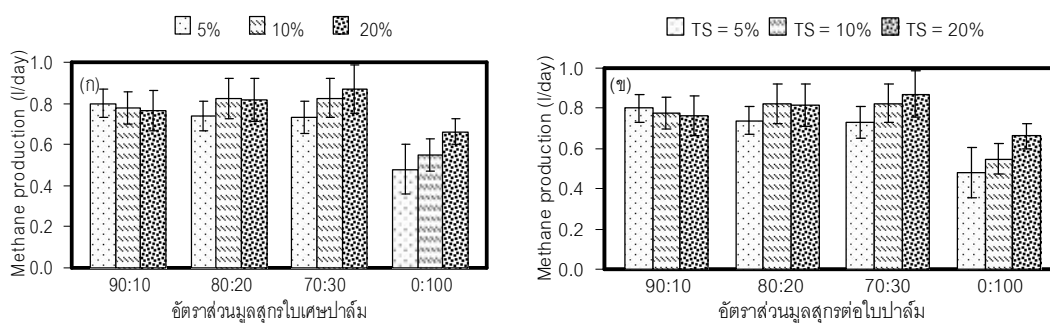
รูปที่ 4.25 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดแก๊สมีเทนในระบบการย่อย

สลายร่วมของมูลสุกกับเศษอาหาร

(ก) ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน (ข) ถังปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.26 แสดงผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนในระบบย่อยสลายร่วมของมูลสุกกับไบโพลีเมอร์ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าที่แต่ละสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีความแตกต่างในอัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญระหว่างถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ และในถังปฏิกรณ์แต่ละแบบ ปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าระหว่าง 0.23-1.21 และ 0.39-1.38 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.40-1.21 และ 0.46-1.14 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.58-1.31 และ 0.58-1.37 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดแก๊สมีเทนในระบบการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับใบปาล์ม
(ก) ถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน (ข) ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

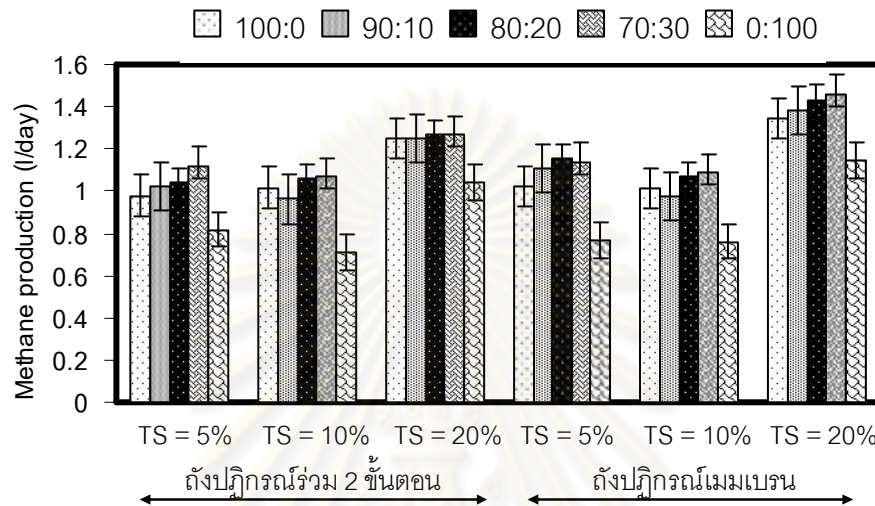
4.6.3 ผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารและการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับใบปาล์มในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.27 แสดงผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% และ 20% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนพบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% เท่านั้นที่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ

ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.75-1.21, 0.71-1.37, 0.91-1.24, 0.73-1.35 และ 0.53-0.94 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.81-1.21, 1.08-1.34, 1.02-1.17, 1.31-1.18 และ 1.06-1.15 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.77-1.37, 1.08-1.33, 1.10-1.38, 1.06-1.35 และ 0.98-1.13 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

ในถังปฏิกรณ์เมมเบรนที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.79-1.38, 0.89-1.32, 0.99-1.28, 0.98-1.32 และ 0.58-0.89 ลิตรต่อ

วัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.93-1.14, 0.84-1.11, 0.94-1.14, 0.91-1.28 และ 0.53-0.91 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 1.20-1.33, 1.18-1.36, 1.25-1.42, 1.32-1.57 และ 1.01-1.30 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

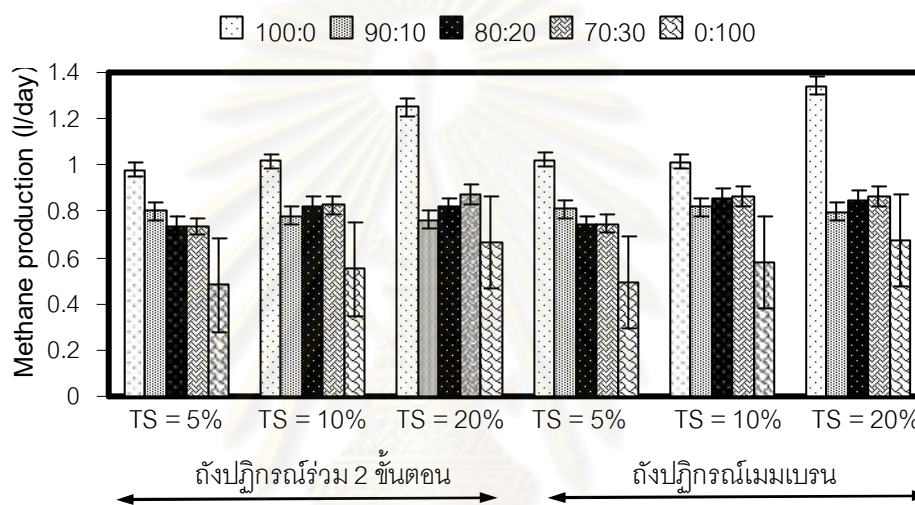


รูปที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารในถังปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน

รูปที่ 4.28 แสดงผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับใบปาล์มต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่ทุกสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดทั้งในถังปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน อัตราการย่อยสลายร่วมมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ การย่อยสลายมูลสุกรเพียงอย่างเดียวให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมากที่สุด และการย่อยสลายใบปาล์มเพียงอย่างเดียวให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนน้อยที่สุด

ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับใบปาล์มเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.84-1.21, 0.65-0.88, 0.62-0.85, 0.65-0.89 และ 0.23-0.68 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 0.81-1.21, 0.60-0.89, 0.60-0.95, 0.65-0.96 และ 0.40-0.69 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 0.76-1.37, 0.58-0.95, 0.60-0.96, 0.63-0.98 และ 0.58-0.76 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ที่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.79-1.38, 0.65-0.89, 0.68-0.82, 0.65-0.85 และ 0.39-0.65 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 0.93-1.14, 0.69-0.96, 0.65-0.98, 0.72-0.99 และ 0.46-0.68 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 1.20-1.53, 0.63-0.98, 0.66-0.94, 0.65-0.98 และ 0.58-0.79 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอน และถึงปฏิกรณ์เมมเบรน

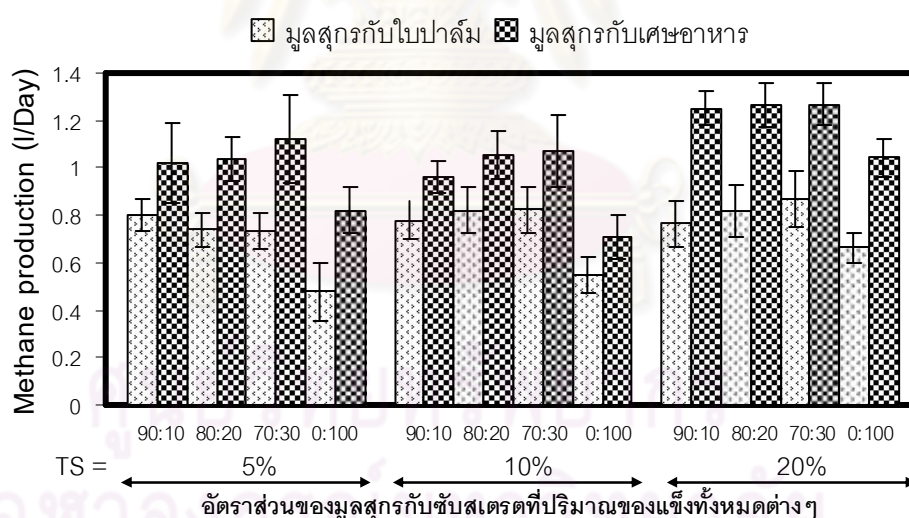
4.6.4 ผลของโคซับสเตรต

รูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงผลของโคซับสเตรตต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถึงปฏิกรณ์เมมเบรน ตามลำดับ พบว่าในระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงกว่าระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด โดยการใช้โปรแกรม SPSS ด้วยวิธี ANOVA วิเคราะห์ข้อมูล พบว่าในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% และ 20% ชนิดของโคซับสเตรตมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารและระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.53-1.37 ลิตรต่อวัน และ 0.23-1.21 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 1.02-

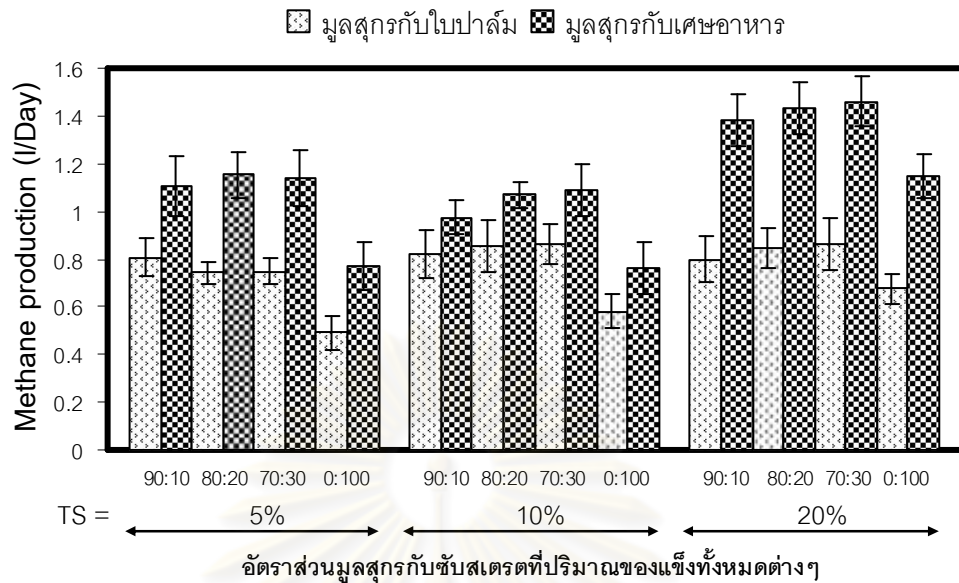
1.28 ลิตรต่อวัน และ 0.40-1.21 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 0.77-1.37 ลิตรต่อวัน และ 0.58-1.07 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

ในถึงปฏิกรณ์เมมเบรนที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% เท่านั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าชนิดของโคซับสเตรตมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร และระบบการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์มให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.58-1.38 ลิตรต่อวัน และ 0.39-1.18 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าอยู่ระหว่าง 0.53-1.28 ลิตรต่อวัน และ 0.46-1.14 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และที่สัดส่วนของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าอยู่ระหว่าง 1.01-1.58 ลิตรต่อวัน และ 0.58-1.03 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงให้เห็นว่าเศษอาหารเป็นโคซับสเตรตที่สามารถให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงกว่าไบปาล์ม เนื่องจากสมบัติของเศษอาหารมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายมากกว่าไบปาล์ม ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า จึงมีผลทำให้แนวโน้มของการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนมากกว่าการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบปาล์ม



รูปที่ 4.29 ผลของโคซับสเตรตในถึงปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน



รูปที่ 4.30 ผลของโคซับสเตรตในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่ออินทรีย์สารที่ถูกกำจัด

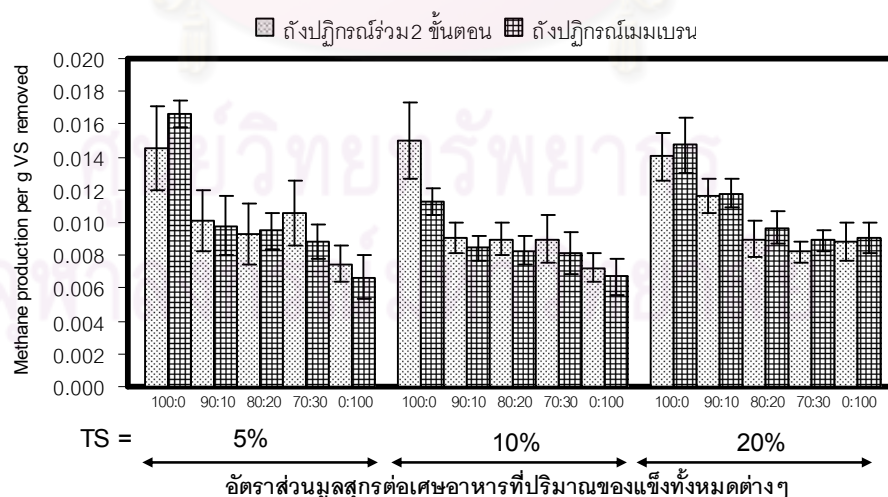
4.7.1 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด

รูปที่ 4.31 แสดงอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์หม่เบรอน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 แบบ ที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงปฏิกรณ์แต่ละประเภท พบว่าสัดส่วนปริมาณของแข็งไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญที่ทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ยกเว้นที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน โดยอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์หม่เบรอน มีค่าระหว่าง 0.0064-0.0179 และ 0.0067-0.0176 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.0075-0.0177 และ 0.0064-0.0124 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณ

ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.0092-0.0157 และ 0.0092-0.0164 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

รูปที่ 4.32 แสดงอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับใบปาล์มในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าทุก ๆ พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ถังปฏิกรณ์, สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด และอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.0061-0.0117 และ 0.0062-0.0115 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.0075-0.0116 และ 0.0072-0.0115 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.0069-0.0091 และ 0.0061-0.0091 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

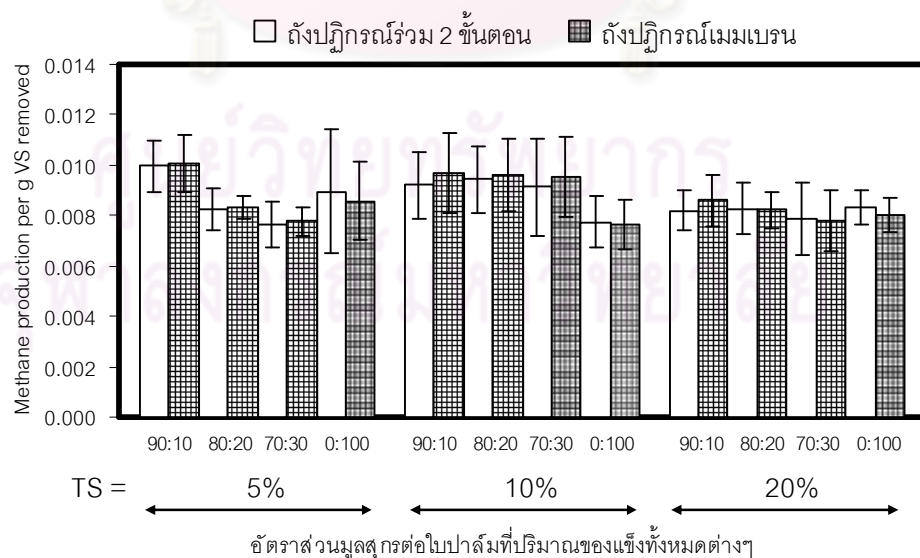
จากการศึกษาในส่วนนี้ พบว่าการย่อยสลายมูลสุกรเพียงอย่างเดียวจะได้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดมากที่สุด ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด เนื่องจากมูลสุกรมีลักษณะเป็นของเหลวถูกย่อยสลายในกระเพาะของสุกรมาบางส่วนแล้ว จึงถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนได้ง่ายกว่า



รูปที่ 4.31 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

รูปที่ 4.32 แสดงถึงอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์มในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าผลของถังปฏิกรณ์ ผลของอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.0061-0.0117 และ 0.0062-0.0115 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.0075-0.0116 และ 0.0072-0.0115 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.0069-0.0091 และ 0.0061-0.0091 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

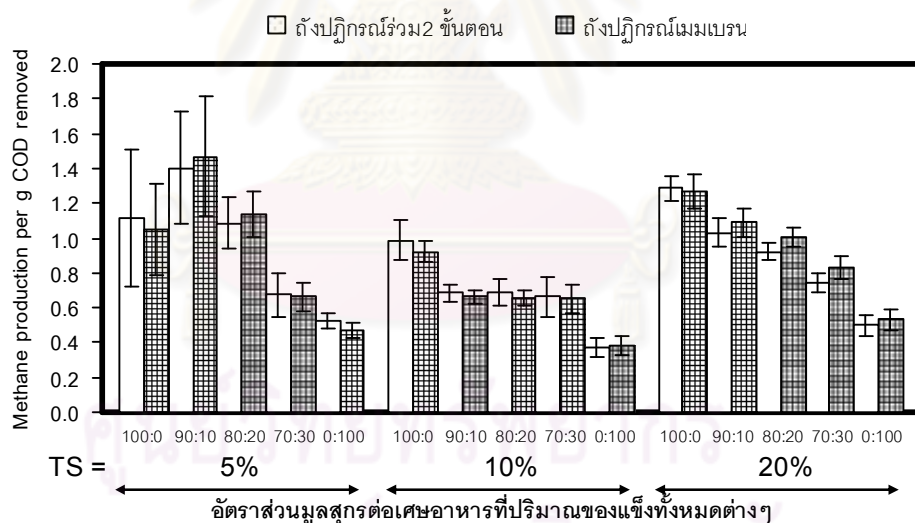
จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 การย่อยสลายร่วมมูลสุกรเพียงอย่างเดียวจะมีอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดมากที่สุด ที่ทุกอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมและทุกสัดส่วนของแข็งทั้งหมด เนื่องจากมูลสุกรมีลักษณะเป็นของเหลวถูกย่อยสลายในกระเพาะของสุกรมาบางส่วนแล้ว เมื่อนำมาย่อยสลายจึงทำให้ถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กได้ง่ายขึ้นสามารถนำไปผลิตเป็นมีเทนได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.32 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับไบโपाल์ม

4.7.2 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัด

รูปที่ 4.33 แสดงอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหารในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าถังปฏิกรณ์และสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราส่วนการย่อยสลายร่วมที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 5% และ 20% ทั้งในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.58-1.76 และ 0.52-1.87 ลิตรต่อกรัมของซีไอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.38-1.19 และ 0.40-1.07 ลิตรต่อกรัมของซีไอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.42-1.41 และ 0.45-1.38 ลิตรต่อกรัมของซีไอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

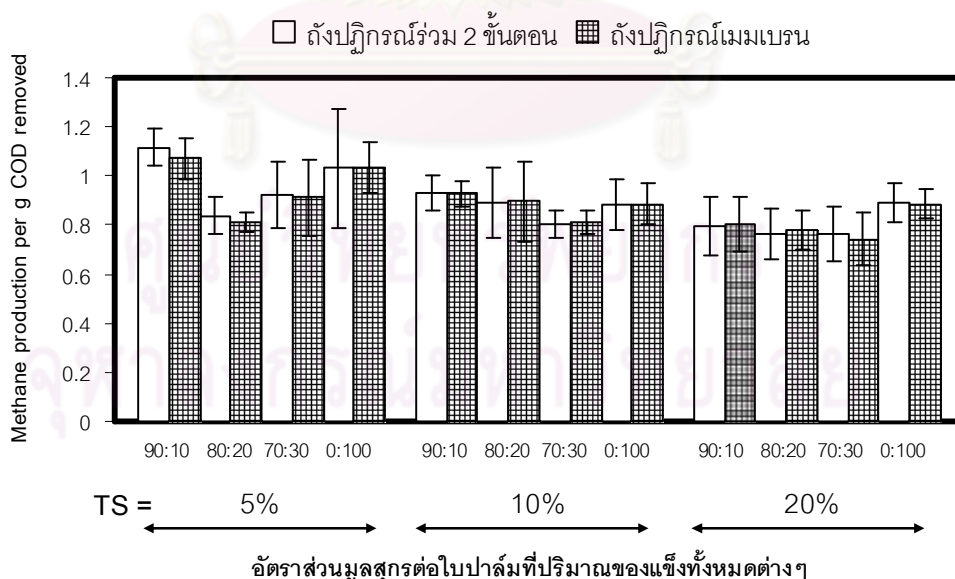


รูปที่ 4.33 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับเศษอาหาร

รูปที่ 4.34 แสดงอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วมมูลสุกรกับใบปาล์มในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ทุก ๆ พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ถังปฏิกรณ์ ปริมาณของแข็งทั้งหมด และอัตราส่วนการย่อยสลายร่วมไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่าย

ที่ถูกกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดที่สัดส่วน ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน และถังปฏิกรณ์เมมเบรนมีค่า ระหว่าง 0.75-1.34 และ 0.78-1.17 ลิตรต่อกรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาณ ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10% มีค่าระหว่าง 0.81-1.07 และ 0.82-1.05 ลิตรต่อกรัมของซีโอดีที่ถูก กำจัด ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 20% มีค่าระหว่าง 0.79-1.10 และ 0.79-1.09 ลิตรต่อกรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดจากถังปฏิกรณ์ ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน ในระบบการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารมี แฉวโน้ม ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่ามูลสุกรถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนได้ง่ายที่สุด และ พบว่าเมื่อ สัดส่วนของเศษอาหารและปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณ การกำจัด ซีโอดีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในระบบมีระยะเวลาในการย่อยสลายเท่าเดิม แต่ ปริมาณสาร อินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้มีเพิ่มขึ้น สารอินทรีย์ที่ถูกบ้อนเพิ่มขึ้นจึงไม่ถูก เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนทำให้อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณการกำจัดซีโอดีมีค่าลดลง แต่ใน ระบบการย่อยสลายมูลสุกรกับไบโपाल์ม พบว่าอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณการกำจัด ซีโอดี มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าเกิดจากไบโपाल์มไม่ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน และการเพิ่มสัดส่วนของ ไบโपाल์มไม่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สมีเทน



รูปที่ 4.34 อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดของการย่อยสลายร่วม มูลสุกรกับไบโपाल์ม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้บรรลุตตามวัตถุประสงค์ได้ผลดังนี้

- 1) สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

พารามิเตอร์		องค์ประกอบแก๊สมีเทน (%)	อัตราการเกิดแก๊สมีเทน (ลิตร/วัน)
ของแข็งทั้งหมด	5%	56.88±3.48	1.12±0.19
	10%	54.33±5.44	1.07±0.29
	20%	61.55±4.92	1.27±0.09
มูลสุกร : เศษอาหาร	100:0	50.87±3.72	1.16±0.15
	90:10	51.22±4.15	1.25±0.07
	80:20	52.84±3.99	1.26±0.09
	70:30	51.98±5.84	1.27±0.09
	0:100	52.15±5.77	1.04±0.08
มูลสุกร : ใบปาล์ม	100:0	50.87±5.92	1.17±0.15
	90:10	56.82±5.44	0.80±0.07
	80:20	56.88±6.13	0.82±0.10
	70:30	55.78±5.23	0.87±0.11
	0:100	56.15±6.07	0.66±0.06

- 2) สัดส่วนองค์ประกอบแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในถังปฏิกรณ์หม่เบรน

พารามิเตอร์		องค์ประกอบแก๊สมีเทน (%)	อัตราการเกิดแก๊สมีเทน (ลิตร/วัน)
ของแข็งทั้งหมด	5%	58.78±10.83	1.16±0.09
	10%	58.88±9.59	1.09±0.11
	20%	61.55±8.54	1.46±0.11
มูลสุกร : เศษอาหาร	100:0	53.45±5.32	1.34±0.09
	90:10	57.74±4.88	1.38±0.11
	80:20	54.64±6.36	1.43±0.11
	70:30	59.65±4.39	1.46±0.11
	0:100	54.23±5.84	1.15±0.09
มูลสุกร : ใบปาล์ม	100:0	53.45±7.33	1.34±0.09
	90:10	58.78±4.55	0.82±0.10
	80:20	61.55±3.21	0.85±0.11
	70:30	60.48±4.78	0.86±0.11
	0:100	59.18±4.32	0.68±0.06

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) การใช้ถังปฏิกรณ์เมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ใหม่
การใช้ถังปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิตและถังปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร เปรียบเทียบคุณภาพน้ำ
เสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน ในระบบการย่อยสลายมูลสุกรกับเศษอาหาร สรุปผลได้ดังนี้

		ถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน			ถังปฏิกรณ์เมมเบรนคอมพอสิต			ถังปฏิกรณ์เมมเบรนสมมาตร		
		100:0	80:20	0:100	100:0	80:20	0:100	100:0	80:20	0:100
TS removal (%)	TS=5%	43.6 ±3.2	41.3 ±2.8	41.7 ±2.5	46.5 ±3.8	47.7 ±3.9	45.0 ±1.8	55.6 ±3.7	54.9 ±2.2	52.6 ±1.7
	TS=10%	44.3 ±2.4	37.8 ±3.2	35.6 ±4.2	47.9 ±3.5	42.9 ±3.7	43.3 ±4.5	57.4 ±4.7	56.3 ±3.7	59.0 ±4.2
	TS=20%	43.4 ±2.7	43.1 ±3.2	43.5 ±3.2	49.2 ±4.0	47.1 ±2.8	47.6 ±3.8	55.2 ±2.1	57.4 ±2.5	56.6 ±2.8
VS removal (%)	TS=5%	38.9 ±6.0	36.8 ±4.4	42.2 ±2.1	41.7 ±13.0	48.6 ±2.0	45.5 ±2.4	49.9 ±3.0	50.8 ±1.5	56.2 ±0.9
	TS=10%	46.9 ±7.1	43.5 ±2.7	44.5 ±2.4	50.0 ±4.2	47.0 ±2.6	44.2 ±1.4	51.0 ±1.1	47.4 ±2.7	54.0 ±1.7
	TS=20%	43.0 ±1.3	37.9 ±2.2	44.2 ±2.2	45.5 ±2.4	46.6 ±0.9	47.3 ±0.9	52.7 ±1.7	56.6 ±1.5	54.4 ±1.2
COD removal (%)	TS=5%	86.9 ±1.5	93.5 ±1.8	94.0 ±0.7	85.8 ±3.4	94.0 ±1.3	94.4 ±0.5	87.5 ±1.6	94.6 ±0.7	93.9 ±0.8
	TS=10%	87.6 ±1.8	78.8 ±1.8	77.5 ±1.8	93.4 ±1.3	89.4 ±0.8	90.1 ±0.8	91.8 ±1.7	94.2 ±0.7	93.0 ±0.7
	TS=20%	79.7 ±1.8	84.3 ±2.7	85.1 ±1.3	87.3 ±0.6	87.0 ±1.4	88.8 ±0.8	94.7 ±0.8	94.3 ±0.5	95.1 ±0.4
COD (mg/L)	TS=5%	330 ±83	371 ±44	537 ±36	170 ±44	247 ±27	349 ±58	150 ±15	200 ±15	250 ±40
	TS=10%	372 ±66	542 ±35	580 ±44	194 ±42	322 ±59	418 ±65	170 ±25	275 ±30	275 ±35
	TS=20%	620 ±65	638 ±100	911 ±70	387 ±26	527 ±47	687 ±58	220 ±20	300 ±25	325 ±42

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้เป็นชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) ควรมีการเพิ่มขนาดชุดการทดลองและออกแบบให้ลักษณะดังปฏิกรณ์มีระยะเวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นหรือลดปริมาณการป้อนสารอินทรีย์ อีกทั้งการติดตั้งแผ่นเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ควรออกแบบให้มีลักษณะที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานเชิงพาณิชย์ต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พลังงานกู้โลกร้อนเชื้อเพลิงทางเลือกทางรอดประเทศไทย, 69. กระทรวงพลังงาน, 2551.
- [2] Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. (4th ed.). Boston: McGraw Hill, 2003.
- [3] Gerardi, M. H. The Microbiology of Anaerobic Digesters. New Jersey: John Wiley & Son, 2003.
- [4] Polprasert, C. Organic Waste Recycling Technology and Management. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 1996.
- [5] สุภัณฑิต นิมรัตน์. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [6] Michael, F.T. and Park Ridge, N.J. Anaerobic treatment of industrial waste water. New York: Data Corporation, 1988.
- [7] McCarty, P.L. Anaerobic Waste Treatment Fundamental Part 1,2,3,4. Public Works, 1964(95):107 - 115.
- [8] Braber, K. Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough. Biomass and Bioenergy 9(1995): 365-376.
- [9] Marty, B. Microbiology of anaerobic digestion. New York, 1984.
- [10] Holland, K.T., Knapp, J.S. and Shoemith, J.G. Anaerobic Bacteria. New York: Chapman and Hall, 1987.
- [11] สุริยะ สะวานท์. การศึกษากายการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากการเลี้ยงสุกรที่ได้รับจุลินทรีย์อีเอ็มกับจุลินทรีย์ผลิตแก๊สมีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
- [12] Hill, D.T., Taylor, S.E., and Grift, T.E. Simulation of low temperature anaerobic digestion of dairy and swine manure. Bioresource Technology 78(2001): 127-131. อ้างถึงใน สมฤดี ฤทธิ์ยากุล. ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพและผลพลอยได้จากการหมักมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.

- [13] Costello, D., Greenfield, P.F., and Lee, P.L. Strategized to minimize the operational Costs of High-Rate Anaerobic Treatment System. Australia: University of Queensland, 1989. อ้างถึงใน จินตนา จิตต์ภูักดี. การผลิตแก๊สชีวภาพจากเปลือกและพัลพ์สับปะรดโดยการหมักแบบ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.
- [14] กฤษณา สอนจันทร์ และรณชัย เอกฉัตร. หลักสูตรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น. โครงการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ, 2547.
- [15] Novaes, R.F.V. Microbiology of anaerobic digestion. Water Science Technology 18(1986): 1-14.
- [16] Garcia, J.L. Advances of Digestion Anaerobic. Mexico: Symposium International Mexico, 1982.
- [17] มั่นสิน ตันทุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [18] Raynal, J., Delgenes, J.P. and Moletta, R. Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process. Bioresource Technology 65 (1998): 97-103. อ้างถึงใน สุกัญญา อติชะ. ศึกษาการผลิตกรดอินทรีย์ระยะเหยงจากอินทรีย์สารความเข้มข้นสูงของขยะเศษอาหารในระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร, 2551.
- [19] อวิศา ullanาวัดณ์. อิทธิพลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [20] อาริยา วิรัชวรกุล. การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [21] Cho, J.K., Park, S.C. and Chang, H.N. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. Bioresource Technology 62(1995): 245-253.

- [22] Sosnowski, P., Wieczorek, A., Ledakowicz, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. Advance in Environmental Research 7(2003): 609-616.
- [23] Elango, D., Pulikesi, M., Baskaralingam, P., Ramamurthi, V., Sivanesan, S. Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage. Journal of Hazardous Materials 141(2007): 301-304.
- [24] Alvarez, R., Lidén, G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure and fruit and vegetable waste. Renewable Energy 33(2008): 726-734.
- [25] Forster-Carneiro, T., Pérez, M., Romero, L.I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactor treating food waste. Bioresource Technology 99(2008): 6763-6770.
- [26] Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. Bioresource Technology 99(2008): 8288-8293.
- [27] Bouallagui, H., Lahdheb, H., Romdan, E.B., Rachdi, B., Hamdi, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. Journal of Environmental Management 90(2009): 1844-1849.
- [28] Hobson, P. N. and Wheatley A. D. Anaerobic Digestion: Modern Theory and Practice. Elsevier Applied Science, 1993.
- [29] Souza, M.E. Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. Water Science Technology 1986(18): 55-69.
- [30] เถลิงเดช พิลาศรี. ความสูงและความหนาแน่นของชั้นวัสดุตัวกลางต่อประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529.



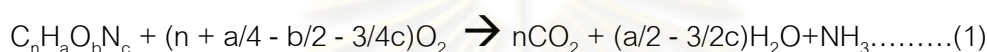
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

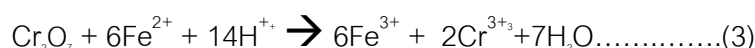
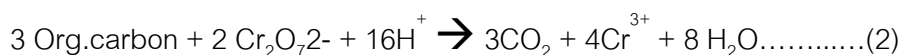
1. Chemical oxygen demand (COD) แบบ Closed reflux, Titrimetric method

ค่า COD หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100%) จะถูกออกซิไดส์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดดังสมการที่ 1



จะเห็นว่าสมการการเกิดปฏิกิริยาของ COD คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ส่วน COD ใช้ตัวเติมออกซิเจน (oxidizer) กรณีที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์บางพวกเช่น straight-chain aliphatic compound, aromatic hydrocarbon, pyridine และ betaine ปะปนอยู่ซึ่งสารเหล่านี้จะไม่ถูก oxidize ทางเคมี การหาค่า COD จะรู้ผลในเวลาไม่เกิน 3 ชม. ดังนั้นจึงเหมาะในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียเพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องได้ทันเวลาที่ และใช้ในการประเมินค่า BOD อย่างคร่าว ๆ

Strong oxidizing agent ที่ใช้ในการหาค่า COD มีด้วยกันหลายตัวคือ potassium permanganate, ferric sulfate, potassium iodate และ potassium dichromate การหาค่า COD โดยใช้โปแตสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอน หลักการของวิธีนี้คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกออกซิไดส์โดยโปแตสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การรีฟลักซ์ เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วย ferrous ammonium sulfate โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



มีการเติม AgSO_4 เป็นตัว catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์ของพวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ (straight chain aliphatic) นอกจากนี้ AgSO_4 ที่ใส่ไปจะไปทำปฏิกิริยากับ Cl^- , Br^- หรือ I^- ได้ แต่ AgSO_4 เป็น catalyst ที่ไม่ได้ผลในการออกซิไดส์สารประกอบพวก aromatic

และ pyridine สารรบกวนที่สำคัญคือ Cl^- จึงต้องใส่ HgSO_4 ลงไปก่อนเพื่อไปจับกับ Cl^- ให้อยู่ในรูปของ mercuric chloride complex โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่า COD ตั้งแต่ 50 มก. /ล ขึ้นไปได้และแน่นอน การรีฟลักซ์ มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Closed Reflux) ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแบบปิดสารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดส์ได้นานกว่า

การวิเคราะห์หาค่า COD โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) มีหลักการเช่นเดียวกับวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux) สารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าในระบบเปิดเพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดส์ได้นานกว่า ก่อนทำการทดลองทุกครั้งควรตรวจสอบฝาปิดหลอดแก้วว่ามีรอยแตกหรือไม่ ฝาจุกของหลอดทดลองที่อาจเกิดชำรุดในขณะที่ทำการย่อยสลายในตู้อบจะทำให้เกิดการปนเปื้อนและทำให้มีการสูญหายของสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงควรที่จะต้องระมัดระวังสำหรับการย่อยสลายในตู้อบจะใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การเลือกขนาดของหลอดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความไว (sensitivity) ที่ต้องการ

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.0167 M ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4.913 กรัม ที่อบแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (dessicator) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติม HgSO_4 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ ละลาย Ag_2SO_4 22 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม (ต้องใช้เวลาในการละลาย 1-2 วัน)

3. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.695 กรัม และ 1,10 phenanthroline monohydrate 1.485 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M ละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งทีนำมาใช้ เติมสารเคมีตามตารางภาคผนวกที่ ก-1 ในภาชนะย่อยสลาย แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ใช้เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยดทำประมาณ 1-2 หลอด ไทเทรทจนถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

$$\text{Molarity ของ } \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 = \frac{\text{มิลลิลิตร } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times 0.1}{\text{มิลลิลิตร } \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2}$$

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดของภาชนะ	ตัวอย่างน้ำ (ml.)	K ₂ Cr ₂ O ₇ (ml.)	กรดซัลฟิวริก (ml.)	ปริมาตรทั้งหมด
16 X 100 mm.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 X 150 mm.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 X 150 mm.	10.0	6.0	14.0	30.0
แอมพูลมาตรฐาน				
10 ml.	2.5	1.5	3.5	7.5

วิธีการวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก 20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตารางผนวกที่ ก2
- นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลายหรือแอมพูล เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลาย ซึ่งได้แก่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต
- ค่อย ๆ เทกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างน้ำและสารละลายในการย่อยสลาย
- ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นหรือถ้าใช้แอมพูลก็ให้เชื่อมให้สนิท แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งเพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
- นำหลอดทดลองนี้ไปใส่เครื่องย่อยสลาย (block digester) หรือตุ๋น ซึ่งได้ทำให้อุณหภูมิอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสก่อน ใช้เวลารีฟลักซ์ 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง โดยนำหลอดทดลองมาวางในที่วางหลอดทดลอง
- เปิดฝาจุกแล้วจึงใส่แท่งแม่เหล็กที่หุ้มด้วยทีเอฟอี (TFE covered magnetic bar) ถ้าใช้แอมพูล ให้เทของผสมลงไปในภาชนะที่ใหญ่กว่า เพื่อนำไปไตเตรท เดิมเพอร์โรอินอินดิเคเตอร์ประมาณ 1-2 หยด คนโดยใช้เครื่องกวนชนิดใช้แม่เหล็ก (magnetic stirrer) อย่างรวดเร็วในขณะที่ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง ถึงแม้บางครั้งสีฟ้าอมเขียวอาจจะกลับมาปรากฏ

อีกในหลายนาที่ถัดมา และในลักษณะเดียวกันให้ทำรีฟลักซ์และไตเตรทแบลงค์ที่มีรีเอเจนต์กับ น้ำกลั่นในปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำด้วย

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร COD} = \frac{(A-B) \times M \times 8,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

A = มิลลิลิตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์

B = มิลลิลิตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ

M = Molarity ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$

2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากสาร ตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (dessicator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะได้ ปริมาณของของแข็งทั้งหมด

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่จะใช้ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติ = A มิลลิกรัม
2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม
3. ค่อย ๆ รินตัวอย่างน้ำที่ต้องการหาของแข็งทั้งหมดใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำ ออกให้หมดบน water bath หรือ hot plate นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติ = B มิลลิกรัม น้ำหนักที่ เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร total solids} = \frac{(A-B) \text{ มิลลิกรัม} \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

3. ของแข็งระเหยทั้งหมด (total volatile solids, TVS)

ของแข็งระเหยทั้งหมด หมายถึง ปริมาณของสารที่ระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไปเรียกว่าปริมาณของแข็งคงตัว (fix solids)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่ได้จากการหาปริมาณของแข็งทั้งหมดแล้ว นำไปเผาในเตาเผา (muffle furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
2. ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งหาน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร fix solids} = \frac{\text{มิลลิกรัม fix solids} \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

ดังนั้น มิลลิกรัม/ลิตร total volatile solid = มิลลิกรัม/ลิตร total solid – มิลลิกรัม/ลิตร fix solids

4. กรดอินทรีย์ระเหย (volatile fatty acid, VFA) และความเป็นด่างทั้งหมด (total alkalinity, TAlk)

วิธีนี้เป็นวิธีหยาบ ๆ ค่าที่ได้ไม่แม่นยำนัก ไม่ควรนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียด แต่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมระบบเพื่อที่จะได้ทราบถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ใช้เวลาในการทดลองไม่เกิน 1 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หาสภาพด่างทั้งหมดที่ pH 4.0 โดยวิธีการไตเตรทแบบโพเทนชิอเมตริก
2. ต้มไล่กรดคาร์บอนิก
3. ไตเตรทกลับจาก pH 4.0 ไปเป็น 7.0 เพื่อหาสภาพด่างของกรดอินทรีย์ระเหย (volatile acid alkalinity) และสภาพด่างของเบส (base alkalinity) แล้วจึงคำนวณหาค่ากรดอินทรีย์ระเหยต่อไป

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.5 N
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 N

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองและไปเข้าเครื่องแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge) ที่ความเร็วรอบประมาณ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำ จากนั้นนำเอาส่วนใสที่อยู่ส่วนบนมา 50-200 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100-300 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของตัวอย่างน้ำ ไตเตรทตัวอย่างน้ำจนถึง pH 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.5 M บันทึกปริมาณกรดมาตรฐานที่ใช้ สมมติ = A มิลลิลิตร

2. ไตเตรทตัวอย่างน้ำต่อไปจน pH ถึง 3.3-3.5 ไม่ต้องบันทึกปริมาณกรดที่ใช้ จากนั้นนำไปต้มจนเดือดประมาณ 2-3 นาที กรดคาร์บอนิกจะถูกไล่ออกไป

3. ปรับ pH ให้เป็น 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M จดปริมาณสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการไตเตรทกลับตั้งแต่ pH 4.0 ถึง 7.0 ซึ่งจะเป็นสภาพต่างเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหย (volatile acid alkalinity) สมมติปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ สมมติ = B มิลลิลิตร

วิธีการคำนวณ

สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CaCO_3) = $\frac{\text{Ax Normality ของ } \text{H}_2\text{SO}_4 \times 50 \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$

สภาพต่าง VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CaCO_3) = $\frac{\text{Bx Normality ของ NaOH} \times 50 \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$

ก) กรณีที่ 1 ถ้าสภาพต่าง VFA น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH_3COOH) = สภาพต่าง VFA x 1.0

ข) กรณีที่ 2 ถ้าสภาพต่าง VFA มากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH_3COOH) = สภาพต่าง VFA x 1.5

5. ไนโตรเจนเจลดาคาร์บอนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หมายถึงผลบวกระหว่างออร์แกนิกไนโตรเจน (organic nitrogen) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ammonia nitrogen) สำหรับการวิเคราะห์หาออร์แกนิกไนโตรเจนถ้าไม่ได้แยกแอมโมเนียไนโตรเจนออกเสียก่อน ผลที่ได้จะได้เป็นไนโตรเจนทั้งหมด โดยไนโตรเจนทั้งหมดที่จะกล่าวถึงนี้หาได้โดยวิธีเจลดาคาร์บอน มีเมอร์คิวรี (II) ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งจะเปลี่ยนพวกออร์แกนิกไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต หลังจากการย่อยสลายละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นตัวเพิ่มจุดเดือดให้สูงขึ้นถึง 344-371 องศาเซลเซียส หลังจากการย่อยสลายแล้วให้เจือจางส่วนที่เหลือภายในขวดเจลดาคาร์บอนแล้วทำให้เป็นด่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น นำไปกลั่นโดยมีสารละลายกรดบอริกเป็นตัวดูดกลืน

สารเคมี

1. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (digestion solution) ละลาย K_2SO_4 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร ผสมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตร แล้วละลายเมอร์คิวรี (II) ออกไซด์แดง (red mercury (II) oxide) 2 กรัม ในกรดซัลฟูริก 3 N ค่อย ๆ เติมลงในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต แล้วเจือจางปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 14 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการตกตะกอน
2. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium hydroxide-sodium thiosulphate reagent) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตาไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร
4. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator) ละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (methyl red indicator) 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 เปอร์เซ็นต์ 100 มิลลิลิตร ละลายเมทิลีนบลู (methylene blue) 100 มิลลิกรัมในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตร แล้วผสมสารละลายทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน สารละลายนี้ควรเตรียมทุก ๆ เดือน
5. สารละลายอินดิเคตติ้งบอริกแอซิด (indicating boric acid solution) ละลายกรดบอริก 20 กรัม ในน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย เติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
6. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.01 M

วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างน้ำโดยให้มีปริมาตรที่เหมาะสม ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ก-2 ใส่ลงในขวดเจลดาทาร์ดและใส่ลูกแก้ว 3-4 ลูก
2. เติมสารละลายสำหรับย่อยสลายออร์แกนิกไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร
3. ต้มเคี่ยวจนได้สารละลายใส เคี่ยวต่อไปอีก 20-30 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 300 มิลลิลิตร
4. ทำให้เป็นด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไฮโอซัลเฟต ประมาณ 50 มิลลิลิตร โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วนำไปกลั่นลงในสารละลายอินดิเคติงบอริกแอซิด 50 มิลลิลิตร จนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 มิลลิลิตร
5. ทำส่วนที่กลั่นได้ให้เย็น นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.01 M โดยใช้อินดิเคเตอร์ผสม 2-3 หยด จุดปริมาตรของกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้ไว้

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร total nitrogen} = \frac{(A-B) \times M \times 1,000 \times 28}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

A = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้สำหรับตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้สำหรับแบลนด์

M = Molarity ของสารละลายกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม

ออร์แกนิกไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำ (mg/l)	ปริมาณของตัวอย่างน้ำ (ml)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

6. อินทรีย์คาร์บอน (Total organic carbon) ด้วยวิธี Walkley-Black

หลักการของวิธีนี้คือ ใช้ $K_2Cr_2O_7$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรงทำปฏิกิริยากับอินทรีย์คาร์บอนในกรดซัลฟูริกเข้มข้น แล้วไทเทรตหา $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือด้วย $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมท 1.0 N ละลาย $K_2Cr_2O_7$ (อบที่ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง) 49.04 กรัม ด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล ละลาย $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 196.1 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
4. เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) 1.48 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล 14 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินตะกอน (ที่ร่อนผ่านตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร) 0.5-2.0 กรัม (ทั้งนี้แล้วแต่ตัวอย่างจะมีอินทรีย์วัตถุมากหรือน้อย) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมท 1.0 นอร์มอล 10 มิลลิลิตร ด้วยปิเปตวัด ปริมาตรและเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นด้วยกระบอกตวงลงไป 20 มิลลิลิตร แก้วขวดเบา ๆ เพื่อให้ สารละลายกับดินตะกอนผสมกันประมาณ 1-2 นาที แล้วทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที ขั้นตอนนี้ทำ ในตู้ควัน
3. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 100 มิลลิลิตร และหยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ลงไป 4-5 หยดแล้วไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล จนกระทั่งสีของสาร แขนงลอยเปลี่ยนจากเขียวเป็นน้ำตาลแดง บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัส แอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไป ถ้าไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเกินจุดยุติ ให้เติม สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมทลงไปอีก 0.5-1.0 มิลลิลิตรแล้วไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัส แอมโมเนียมซัลเฟตอีกครั้งหนึ่ง จุดยุติคือจุดที่อินดิเคเตอร์เริ่มเปลี่ยนจากเขียวเป็นน้ำตาลแดง
4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (วิเคราะห์แบบลงค์) โดยทำเฉพาะข้อ 2 และข้อ 3 บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัส แอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้

5. คำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเป็นร้อยละ โดยใช้สูตร

$$\%OC = [(B-S) * N * 0.336]/W$$

$$\%OM = \%OC * 1.72$$

- B คือปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทแบลนค์ (มิลลิลิตร)
 S คือปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 N คือนอร์มอลิตีของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต
 W คือน้ำหนักของตัวอย่างดินตะกอน (กรัม)

7. องค์ประกอบเคมีของพีช

ในการทดลองจะวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบอยู่ในพีช โดยวิธีการมาตรฐานของ Tappi (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) ดังรายละเอียดการทดลองต่อไปนี้

การเตรียมตัวอย่างที่ปราศจากสารแทรก วิเคราะห์ตาม TAPPI T264 Om-88

1. ตั้งเครื่องมือสกัดสารแทรกโดยใช้เครื่อง soxhlet extraction
2. สกัดตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ซึ่งมีขนาด 40 mesh ด้วยสารละลายผสมของเอทานอล+เบนซิน (1:2 โดยปริมาตร) ปริมาตร 200 ml. เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง
3. นำตัวอย่างไปสกัดใหม่โดยสกัดด้วย 95% เอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. กรองตัวอย่างผ่าน buchner funnel และกำจัดตัวทำละลายที่มากเกินไปด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดเอทานอล เติตัวอย่างลงในปีกเกอร์ ขนาด 1,000 ml. และเติม 500 ml ของน้ำกลั่นต้มให้เดือดเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างแห้งแล้วกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นที่ต้มเดือด ปล่อยให้แห้งในอากาศ นำตัวอย่างที่เตรียมได้นี้ไปใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ทางเคมี

การหาปริมาณสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เอทานอล-เบนซิน วิเคราะห์ตาม TAPPI T204 Om-88

1. ชั่งตัวอย่าง น้ำหนักประมาณ 3 กรัม แล้วใส่ลงใน extraction thimble
2. ตวงสารละลายผสมของเอทานอลกับเบนซิน (อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร) จำนวน 200 ml. ใส่ลงในขวดกั่นกลมขนาด 250 ml.
3. จัดชุดสกัด soxhlet apparatus ควบคุมอุณหภูมิและจุดเดือดของตัวทำละลาย และใช้เวลาสกัดประมาณ 4-5 ชั่วโมง

4. นำสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหยให้เหลือปริมาตรประมาณ 20-25 ml โดยเครื่อง rotary evaporator แล้วเทใส่ปิกเกอร์ที่รู้น้ำหนักแล้วนำเข้าไประเหยใน oven ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ $100+5^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งแห้ง แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงใน dessicator แล้วชั่งน้ำหนักของสารที่เหลือรวมกับน้ำหนักของปิกเกอร์
5. ทำ blank โดยการนำตัวทำละลายเอทานอล-เบนซีน 200 ml ไประเหยให้แห้งโดยทำการทดลองต่างๆ เหมือนกับการทดลองข้อ 4
6. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์สารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายจากสูตร

$$\text{สารแทรก} = [(W_e - W_b) / W_p] \times 100$$

เมื่อ W_e = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของสารที่ถูกสกัด

W_b = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของ blank

W_p = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

การวิเคราะห์หาปริมาณเพนโตแซน วิเคราะห์ตาม TAPPI T223 cm-84

1. ใส่ตัวอย่างที่แห้งที่ปราศจากสารแทรกหนักประมาณ 0.5 กรัม ลงใน boiling flask ขนาด 500 ml และเติม 20 กรัมของ NaCl, 100 ml ของ 3.85 N HCl และ boiling stones ต่อ flask เข้ากับเครื่องมือกลั่นและทำซีดเครื่องหมายของระดับของกรดใน flask เติม 2.50 ml ของ 3.85 N HCl ลงไปใน separatory funnel ที่ต่ออยู่เหนือ flask
2. ให้ความร้อนและทำให้กรดกลั่นตัวในอัตราประมาณ 2.5 ml ต่อนาที เก็บส่วนที่กลั่นได้ใน volumetric flask ขนาด 250 ml ที่วางอยู่ใน ice bath
3. ในระหว่างการกลั่นรักษาระดับปริมาตรที่ซีดไว้ที่ flask ของ 100 ml ของกรดโดยการค่อยๆ เติมกรด HCl ที่ละน้อยๆ จาก separatory funnel หรือเพิ่ม 25 ml ทุกๆ 10 นาที กลั่นต่อไปเรื่อยๆ เป็นเวลา 90 นาที ในช่วงเวลาที่ปริมาตรของของเหลวที่กลั่นได้มีปริมาตรรวม 225+10 ml
4. ทำอุณหภูมิของของเหลวที่กลั่นได้ให้มีอุณหภูมิ 20°C แล้วเติม 3.85 N HCl ลงไปใน volumetric flask จนถึงระดับ 250 ml และผสมโดยเขย่า flask แล้วจึงเปิด 5 ml ของของเหลวที่กลั่นได้ใส่ลงไปใน volumetric flask ขนาด 50 ml เติม orcinol reagent 25 ml เขย่าและวาง flask ลงใน water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25°C
5. หลังจากเวลา 60 นาที เติม เอทานอลบริสุทธิ์ จนถึงระดับซีดที่ 50 ml เขย่าและนำกลับไปไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 25°C ใหม่ และหลังจากเวลา 60 นาที ให้นำไปวัดค่า absorbance ของสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 630 nm

6. อ่านจำนวนมิลลิกรัมของ xylan ในตัวอย่างจาก calibration graph ที่เตรียมไว้แล้ว
คำนวณหาปริมาณเพนโตแซนในตัวอย่างจากสูตร

$$\text{Pentosan, \%} = A/10W$$

$$A = \text{น้ำหนัก xylan ในตัวอย่าง (mg)}$$

$$W = \text{น้ำหนักแห้ง (g) ของตัวอย่าง}$$

การหาปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ด้วยวิธีของ Browing ใน method of wood chemistry

1. ชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ปราศจากสารแทรกประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม
2. เติมน้ำกลั่น 160 มล. และ กรดอะซิติก 0.5 มล. และ โซเดียมคลอไรด์ 1.5+0.1 กรัม ตามลำดับ ลงในขวดก้นกลมและทำการทดลองในตู้ควั่น
3. นำขวดก้นกลมไปตั้งใน water bath ที่มีอุณหภูมิประมาณ 70-80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยเขย่าขวดอย่างสม่ำเสมอ
4. หลังจากครบ 1 ชั่วโมง เติมกรดอะซิติก 0.5 มล. ตามด้วย โซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ลงในสารละลายที่ยังร้อนอยู่แล้วเขย่าขวด
5. หลังจากครบ 2 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ให้ปฏิบัติตามข้อ 4 เมื่อครบชั่วโมง
6. นำขวดก้นกลมมาวางในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งสารละลายในขวดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10°C แล้วนำสารละลายมากรองผ่าน sinter glass crucible เบอร์ 3 ล้างด้วยน้ำเย็น และอะซิโตนหลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C หลังจากอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างไว้วิเคราะห์หาปริมาณแอลฟาเซลลูโลสต่อไป
7. คำนวณหาปริมาณไฮโดรเซลลูโลสจาก

$$\% \text{ ไฮโดรเซลลูโลส} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของไฮโดรเซลลูโลสหลังการอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างไม้}}$$

การหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส วิเคราะห์ตาม TAPPI T203 om-88

1. ชั่งตัวอย่างจากการวิเคราะห์ % ไฮโดรเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มล. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 75 มล. ลงไปปรับอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 2.5°C
2. คนสารละลายด้วยเครื่องกวนจนกระทั่งสารละลายกระจายอย่างสมบูรณ์
3. ล้างเครื่องกวนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 2.5 มล. (ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 100 มล.) คนสารละลายด้วยแท่งแก้วนำไปแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 2.5°C เป็นเวลา 30 นาที

4. เติมน้ำกลั่นลงในสารละลายปริมาตร 100 มล. แล้วคนด้วยแท่งแก้ว ทิ้งไว้อีก 30 นาที
5. กรองสารละลายโดยใช้ sinter glass crucible เบอร์ 3
6. ล้างเยื่อที่เหลือด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลางและ 10% กรดอะซิติก ปริมาตร 40 มล. นำไปอบแห้งที่ 105°C ในเตาอบ
7. คำนวณหา% แอลฟาเซลลูโลสจาก

$$\% \text{ แอลฟาเซลลูโลส} = \frac{\text{น้ำหนักแอลฟาเซลลูโลส}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$$

การหาปริมาณลิกนินวิเคราะห์ตาม TAPPI T222 om-88

1. ชั่งน้ำหนักแห้งที่ปราศจากสารแทรกหนัก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 ml.
2. วางบีกเกอร์ลงในอ่างน้ำแข็งแล้วค่อยๆ เติม 72% H₂SO₄ที่แช่เย็นไว้ในตู้เย็นลงไป 15 ml พร้อมคนอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที เพื่อให้ผสมกันดีขึ้น
3. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำออกจากอ่างน้ำแข็งมาตั้งทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง พร้อมคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที
4. เติมน้ำกลั่น 400 ml ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 ml แล้วเทสารละลายในบีกเกอร์ลงไป ในขวดก้นกลม พร้อมทั้งเติมน้ำกลั่นลงไปอีกจนถึงระดับ 575 ml ที่ขีดไว้
5. ทำการ Reflux สารละลายนาน 4 ชั่วโมง เมื่อเสร็จเทสารละลายทั้งหมดใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml แล้วตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ 1 คืน
6. กรองผ่าน Sinter glass crucible เบอร์ 3 ที่ทราบน้ำหนักแล้ว ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงใน Dessicator หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักรวมของ glass crucible และลิกนิน
7. คำนวณหา % ลิกนินจาก

$$\% \text{ ลิกนินจาก} = A \cdot 100 / W$$

$$A = \text{น้ำหนักของลิกนินเป็นกรัม}$$

$$W = \text{น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่าง}$$

8. การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ (gas composition)

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) Shimadzu model GC-14B ภายใต้สภาวะการทดลอง ดังนี้

- คอลัมน์ UNIBEAD C Mesh Range 60/80
- เครื่องตรวจวัดแบบ flame ionize detector (FID)
- อุณหภูมิคอลัมน์ 130-150 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ injection port 100 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ detector 180 องศาเซลเซียส
- carrier gas ที่ใช้คือ แก๊สฮีเลียม ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

วิธีการวิเคราะห์

การฉีดตัวอย่างแก๊สชีวภาพโดยใช้ syringe แบบ gas tight syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร
ดูดแก๊สชีวภาพมา 1 มิลลิลิตร ฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี คำนวณร้อยละของก๊าซ
มีเทนโดยเทียบจากร้อยละของพื้นที่ใต้พีค (peak area) ของก๊าซมีเทนมาตรฐาน 99.9 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณการเตรียมสารละลายเศษอาหารที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 5%(w/v), 10%(w/v) และ 20%(w/v)

สมมติต้องการเตรียมสารละลายเศษอาหารที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (w/v) โดยที่เศษอาหารมีความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์ และ TS 40 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการคำนวณ

TS 5 กรัม จะต้องเติมน้ำ 95 มิลลิลิตร

TS 40 กรัม จะต้องเติมน้ำ $(95 \times 40) / 5 = 760$ มิลลิลิตร

ดังนั้นเศษอาหาร 100 กรัม จะต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $760 - 60 = 700$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ $100 + 700 = 800$ มิลลิลิตร

ต้องการให้ได้ปริมาตรทั้งหมด 1,000 มิลลิลิตร

ดังนั้นจะต้องใช้เศษอาหาร $= (100/800) \times 1,000 = 125$ กรัม

และต้องเติมน้ำลงไป $= (700/100) \times 125 = 875$ มิลลิลิตร

เนื่องจากปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียจากมูลสุกรมีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.2% เมื่อนำมาชั่งร่วมกับเศษอาหารและเศษปาล์ม จะทำให้น้ำเสียจากมูลสุกรตกตะกอนลงมาก่อน เพื่อให้ปริมาณของแข็งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมากที่สุด แล้วนำน้ำเสียนี้ไปเติมแทนน้ำในการคำนวณ

2. การคำนวณอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR)(g COD/l.d)

$$\text{OLR (g COD/l.d)} = \frac{\text{ปริมาตรของเหลวที่เข้าระบบ (l/d)} \times \text{ค่า COD ของของเหลวที่เข้าระบบ (mg/l)}}{\text{ปริมาตรความจุของเหลวของถังหมัก (l)}}$$

$$= \frac{Q \times S_0}{V}$$

$$= \frac{S_0}{\text{HRT}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่า COD ของของเหลวที่เข้าระบบ = 3,517.44 mg/l

ปริมาตรของเหลวที่เข้าระบบ = 0.40 l/d

ปริมาตรความจุของเหลวของถังหมัก = 1

$$\text{OLR} = \frac{0.4 \times 3,517.44 \times 10^{-3}}{1}$$

6.5

$$= 0.22 \text{ g COD/l.d}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

3. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% removal)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} = \frac{(\text{สารอินทรีย์ที่เข้าระบบ} - \text{สารอินทรีย์ที่ออกจากระบบ})}{\text{สารอินทรีย์ที่เข้าระบบ}} * 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ (%)

$$\text{COD ที่เข้าระบบ} = 3,517.44 \text{ mg/l}$$

$$\text{COD ที่ออกจากระบบ} = 476.32 \text{ mg/l}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ} &= \frac{(3,517.44 - 476.32)}{3,517.44} * 100 \\ &= 86.46 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ (%)

$$\text{TS ที่เข้าระบบ} = 21,375 \text{ mg/l}$$

$$\text{TS ที่ออกจากระบบ} = 11,857 \text{ mg/l}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \frac{(21,375 - 11,857)}{21,375} * 100 \\ &= 44.53 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัด VS ของระบบ (%)

$$\text{VS ที่เข้าระบบ} = 8,763.75 \text{ mg/l}$$

$$\text{VS ที่ออกจากระบบ} = 4,861.37 \text{ mg/l}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \frac{(8,763.75 - 4,861.37)}{8,763.75} * 100 \\ &= 44.53 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

4. การคำนวณปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ
(l/g organics added)

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ

$$= \frac{\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน (l/d)}}{\text{ของเหลวที่เข้าระบบ (l/d) * ค่าสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (mg/l)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า COD ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 3,517.44 \text{ mg/l}$$

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่เข้าระบบ} = \frac{0.8352}{0.4 * 3,517.44}$$

$$= 0.5936 \text{ l/g COD added}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า TS ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 21,375 \text{ mg/l}$$

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่เข้าระบบ} = \frac{0.8352}{0.4 * 21,375}$$

$$= 0.0977 \text{ l/g TS added}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก VS

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า VS ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 8,763.75 \text{ mg/l}$$

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก VS ที่เข้าระบบ} = \frac{0.8352}{0.4 * 8,763.75}$$

$$= 0.0049 \text{ l/g VS added}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

5. การคำนวณปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (l/g organics removed)

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ

$$= \frac{\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน (l/d)}}{\text{ของเหลวที่เข้าระบบ (l/d)} * (\text{ค่าสารอินทรีย์ที่เข้า} - \text{ออกระบบ}) \text{ (mg/l)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า COD ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 3,517.44 \text{ mg/l}$$

$$\text{ค่า COD ของของเหลวที่ออกระบบโดยเฉลี่ย} = 476.32 \text{ mg/l}$$

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่เข้าระบบ} = \frac{0.8352}{0.4 * (3,517.44 - 476.32)}$$

$$= 0.6866 \text{ l/g COD added}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า TS ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 21,375 \text{ mg/l}$$

$$\text{ค่า TS ของของเหลวที่ออกระบบโดยเฉลี่ย} = 11,857 \text{ mg/l}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่เข้าระบบ} &= \frac{0.8352}{0.4 * (21,375 - 11,857)} \\ &= 0.2197 \text{ l/g TS added} \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก VS

$$\text{ปริมาณแก๊สมีเทน} = 0.8352 \text{ l/d}$$

$$\text{ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 0.4 \text{ l}$$

$$\text{ค่า VS ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย} = 8,763.75 \text{ mg/l}$$

$$\text{ค่า VS ของของเหลวที่ออกระบบโดยเฉลี่ย} = 4,861.37 \text{ mg/l}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่เข้าระบบ} &= \frac{0.8352}{0.4 * (8,763.75 - 4,861.37)} \\ &= 0.0146 \text{ l/g TS added} \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ค่าฟลักซ์

การคำนวณค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

$$Q = 0.013 \text{ ลิตร/ชั่วโมง}$$

$$A = 0.00113 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{ฟลักซ์} = Q/A$$

$$\text{ฟลักซ์} = 0.013/0.00113$$

$$\text{ฟลักซ์} = 11.5 \text{ ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง}$$

7. การเตรียมสารละลาย Dextran ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (พีพีเอ็ม)

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย Dextran ที่น้ำหนักโมเลกุล 40,000 ให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลาย Dextran ที่น้ำหนักโมเลกุล 40,000

ความหนาแน่น : 1.128 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

Dextran 1 กรัม ต้องใช้ปริมาตรที่คำนวณตามสูตรดังนี้

จากสูตร $D = M/V$; $D =$ ความหนาแน่น, $M =$ น้ำหนัก และ $V =$ ปริมาตร

$$V = M/D = 1 / 1.128 = 0.886 \text{ มิลลิลิตร}$$

การเตรียมสารละลายป้อน Dextran ให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ใช้น้ำหนักโมเลกุล 400 จะต้องใช้ปริมาตรเท่ากับ 0.886 มิลลิลิตร และเติมน้ำให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร

9. ค่าร้อยละการกักกัน

การคำนวณค่าร้อยละการกักกันสารละลาย Dextran น้ำหนักโมเลกุล 40,000 ดอลตัน

$$C_p = 850 \text{ พีพีเอ็ม}$$

$$C_f = 2266.64 \text{ พีพีเอ็ม}$$

$$\%R = (1 - (850/2266.64)) \times 100$$

ดังนั้น ได้ค่าร้อยละการกักกัน = 64.50%

ภาคผนวก ค
ข้อมูลผลการทดลอง

1. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมด

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate) ขาเข้าที่อัตราส่วนต่างๆ

Total solids	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อพารามิเตอร์ต่างๆ					
	ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน			ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน		
	COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค	COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค
5%	0.2065	0.1621	3.2676	0.3514	0.2759	5.5610
10%	0.2193	0.6909	3.4294	0.3732	1.1759	5.8364
20%	0.2261	1.2471	3.9465	0.3849	2.1225	6.7166

^กCOD, gCOD / l.d.

^ข TS, gTS / l.d.

^ค VS, gVS / l.VS.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate) ขาออกที่อัตราส่วนต่างๆ

Total solids	มูลสุกรต่อเศษอาหาร	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อพารามิเตอร์ต่างๆ					
		ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน			ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน		
		COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค	COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค
5%	90:10	0.1581	0.1811	4.1422	0.2691	0.3082	7.0495
	80:20	0.2073	0.2025	4.5366	0.3528	0.3447	7.7208
	70:30	0.3482	0.3147	4.7298	0.5925	0.5355	8.0496
	0:100	0.3310	0.4126	4.7463	0.5633	0.7023	8.0777
10%	90:10	0.2928	0.7030	4.5299	0.4982	1.1965	7.7094
	80:20	0.3274	0.6493	5.1264	0.5572	1.1051	8.7245
	70:30	0.3397	0.6866	5.2761	0.5781	1.1685	8.9793
	0:100	0.4022	0.6546	4.7887	0.6845	1.1141	8.1499
20%	90:10	0.2710	1.3006	4.6073	0.4612	2.2134	7.8412
	80:20	0.3016	1.3530	5.5011	0.5132	2.3027	9.3623
	70:30	0.3746	1.4063	6.0961	0.6375	2.3934	10.3749
	0:100	0.4554	1.4307	4.9756	0.7751	2.4349	8.4680

^กCOD, gCOD / l.d.

^ข TS, gTS / l.d.

^ค VS, gVS / l.VS.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate) ชาออกที่อัตราส่วนต่างๆ

Total solids	มูลสุกรต่อเศษใบปาล์ม	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อพารามิเตอร์ต่างๆ					
		ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน			ถึงปฏิกรณ์เมมเบรน		
		COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค	COD ^ก	TS ^ข	VS ^ค
5%	90:10	0.1520	0.2678	3.5630	0.2587	0.4557	6.0673
	80:20	0.1831	0.3031	3.7759	0.3117	0.5188	6.4262
	70:30	0.1696	0.3422	4.0842	0.2886	0.5824	6.9508
	0:100	0.1001	0.3750	4.1209	0.1703	0.6383	7.0132
10%	90:10	0.1770	0.6959	3.6664	0.3013	1.1843	6.2397
	80:20	0.1937	0.6954	3.8455	0.3297	1.1835	6.5514
	70:30	0.2104	0.6995	3.9136	0.3580	1.1904	6.6606
	0:100	0.1326	0.6669	3.3898	0.2257	1.1350	5.7691
20%	90:10	0.2020	1.1857	3.9296	0.3438	2.0179	6.6877
	80:20	0.2206	1.1726	4.1980	0.3754	1.9956	7.1445
	70:30	0.2354	1.2307	4.7611	0.4006	2.0945	8.1028
	0:100	0.1585	1.3309	3.7205	0.2697	2.2650	6.3319

^กCOD, gCOD / l.d.

^ข TS, gTS / l.d.

^ค VS, gVS / l.VS.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวก ค-4 ผลผลิตแก๊สมีเทน (l/day) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	0.8352	1.0224	0.9360	0.7488	0.5328	0.9360	1.2027	1.4723	1.3478	1.0783	0.7672	2.0736	1.7319	2.1200	1.9409
2	1.1232	0.9360	1.1232	0.7344	0.6912	0.9936	1.6174	1.3478	1.6174	1.0575	0.9953	4.1472	2.3291	1.9409	2.3291
3	0.9936	0.9072	1.2240	0.9792	0.7344	1.0512	1.4308	1.3064	1.7626	1.4100	1.0575	6.2208	2.0603	1.8812	2.5381
4	1.0800	0.8352	1.0224	0.8496	0.7920	1.0800	1.5552	1.2027	1.4723	1.2234	1.1405	8.2944	2.2395	1.7319	2.1200
5	1.0512	0.8928	1.0656	1.2384	0.7632	1.0512	1.5137	1.2856	1.5345	1.7833	1.0990	10.3680	2.1798	1.8513	2.2096
6	0.7488	0.7056	0.9792	1.2672	0.7488	1.1376	1.0783	1.0161	1.4100	1.8248	1.0783	12.4416	1.5527	1.4631	2.0305
7	0.7920	0.7920	0.9360	1.2816	0.8496	0.9360	1.1405	1.1405	1.3478	1.8455	1.2234	14.5152	1.6423	1.6423	1.9409
8	0.8928	1.2384	1.0368	1.3536	0.8208	0.8928	1.2856	1.7833	1.4930	1.9492	1.1820	16.5888	1.8513	2.5679	2.1499
9	0.9216	1.0368	1.0656	1.0656	0.8352	0.9216	1.3271	1.4930	1.5345	1.5345	1.2027	18.6624	1.9110	2.1499	2.2096
10	0.8352	1.0800	1.0800	1.0800	0.8784	0.8064	1.2027	1.5552	1.5552	1.5552	1.2649	20.7360	1.7319	2.2395	2.2395
11	1.0656	1.3680	1.2384	0.9936	0.8064	1.0656	1.5345	1.9699	1.7833	1.4308	1.1612	22.8096	2.2096	2.8367	2.5679
12	1.1808	1.2096	1.0656	1.2096	0.8928	0.8928	1.7004	1.7418	1.5345	1.7418	1.2856	24.8832	2.4485	2.5082	2.2096
13	1.1232	1.0656	1.1088	1.1232	0.9072	1.1232	1.6174	1.5345	1.5967	1.6174	1.3064	26.9568	2.3291	2.2096	2.2992
14	1.2096	1.1088	0.9072	1.3536	0.9360	1.2096	1.7418	1.5967	1.3064	1.9492	1.3478	29.0304	2.5082	2.2992	1.8812
15	1.1520	0.9072	0.9648	1.1952	0.9504	1.1520	1.6589	1.3064	1.3893	1.7211	1.3686	31.1040	2.3888	1.8812	2.0006
ค่าเฉลี่ย	0.9792	1.0216	1.0383	1.1202	0.8185	1.0166	1.4405	1.4501	1.5123	1.5815	1.1654	16.5888	2.0743	2.0882	2.1778
SD	0.1537	0.1705	0.0919	0.1875	0.0971	0.1158	0.2183	0.2581	0.1418	0.2925	0.1548	9.2734	0.3144	0.3717	0.2042

ตารางภาคผนวก ค-5 ผลผลิตแก๊สมีเทน (l/day) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	1.1808	1.0944	1.1232	0.9936	0.576	0.9504	0.8928	0.936	0.9648	0.5328	1.2240	1.1808	1.2528	1.3248	1.0080
2	1.2816	1.0368	1.0656	1.0512	0.648	0.9792	0.9648	0.9792	0.9072	0.6336	1.2528	1.2240	1.2816	1.3680	1.0224
3	1.008	0.8928	1.0512	0.9792	0.6768	1.08	0.936	1.08	0.936	0.6768	1.3248	1.3968	1.3248	1.4976	1.0944
4	1.0512	0.9792	1.1808	1.08	0.6912	1.0656	0.8496	1.0656	-----	0.6624	1.3680	1.3536	1.3680	1.4112	1.0656
5	1.0656	0.9216	1.224	1.1088	0.6192	1.0368	0.9072	1.1088	1.0368	0.792	1.2528	1.3248	1.3392	1.5408	1.1088
6	0.9792	1.1088	1.1808	1.1952	0.7488	0.9792	0.9504	1.0944	1.1088	-----	1.3968	1.4112	1.4112	1.3392	1.0368
7	1.3824	1.2384	1.152	1.1664	0.7344	1.0224	1.0224	1.0368	1.0512	0.8064	1.4688	1.4544	1.4832	1.3680	1.1520
8	0.9792	1.1376	1.08	1.2096	0.792	0.9936	0.936	1.1232	1.08	0.6912	1.5264	1.5552	1.5408	1.4688	1.2240
9	0.8928	1.3104	1.2528	1.3104	0.7776	0.9792	0.9792	1.0656	1.1088	0.7488	1.4112	1.4832	1.3968	1.5696	1.2384
10	0.792	1.224	1.1952	1.2528	0.8208	0.9648	0.9648	1.0512	1.0656	0.8208	1.3680	1.5120	1.5552	1.6128	1.2960
11	0.8208	1.2528	1.2672	1.3248	0.72	1.0368	1.1088	1.152	1.1376	0.8496	1.1952	1.4256	1.3536	1.6704	1.2240
12	1.0224	1.3248	0.9936	1.2816	0.7488	0.9792	1.0656	1.1376	1.08	0.8784	1.2816	1.4832	1.5840	1.5408	1.2240
13	1.008	1.224	1.0368	1.0512	0.7488	0.936	1.0512	1.08	1.2096	0.9072	1.3536	1.3104	1.5696	1.4112	1.1376
14	1.1664	1.0656	1.1808	1.0224	0.8928	1.0368	1.0224	1.0944	1.2528	0.864	1.3248	1.3392	1.4832	1.3824	1.1520
15	0.9648	1.08	1.2816	0.9936	0.864	1.1376	0.9648	1.0368	1.2816	0.792	1.3968	1.2960	1.5264	1.4112	1.2384
ค่าเฉลี่ย	1.0216	1.1065	1.1550	1.1399	0.7677	1.0118	0.9744	1.0694	1.0872	0.7611	1.3430	1.3834	1.4314	1.4611	1.1482
SD	0.1470	0.1259	0.0965	0.1144	0.0998	0.0546	0.0694	0.0572	0.1104	0.1079	0.0918	0.1067	0.1102	0.1059	0.0905

ตารางภาคผนวก ค-6 ผลผลิตแก๊สมีเทน (l/day) ของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	0.8352	0.7920	0.6624	0.6912	0.3456	0.9360	0.6768	0.6048	0.6480	0.5040	0.7672	0.5760	0.6048	0.6336	0.5760
2	1.1232	0.6480	0.6912	0.7344	0.4608	0.9936	0.7920	0.6912	0.7200	0.4752	0.9953	0.6480	0.6912	0.6912	0.5472
3	0.9936	0.7200	0.8352	0.7920	0.2304	1.0512	0.7056	0.8208	0.7056	0.4032	1.0575	0.6768	0.7488	0.7488	0.6048
4	1.0800	0.7056	0.7200	0.6768	0.3888	1.0800	0.6048	0.7776	0.7344	0.4608	1.1405	0.7344	0.8208	0.7200	0.6480
5	1.0512	0.8208	0.7344	0.8352	0.4896	1.0512	0.7632	0.8496	0.7488	0.5328	1.0990	0.8352	0.7200	0.8352	0.6768
6	0.7488	0.7632	0.6192	0.7488	0.6048	1.1376	0.7920	0.9072	0.7920	0.5760	1.0783	0.7920	0.8496	0.8784	0.7344
7	0.7920	0.7776	0.7488	0.6768	0.4176	0.9360	0.7776	0.7920	0.8208	0.6048	1.2234	0.7488	0.9360	0.9360	0.6912
8	0.8928	0.8496	0.7920	0.7488	0.5040	0.8928	-----	0.8352	0.8496	0.5040	1.1820	0.7056	0.9648	0.9792	0.6336
9	0.9216	0.8784	0.7344	0.8352	0.5472	0.9216	-----	0.7056	0.8640	0.5616	1.2027	0.6912	1.0224	0.9216	0.7488
10	0.8352	0.8496	0.6768	0.8928	0.4320	0.8064	0.8928	0.9216	0.9360	0.5040	1.2649	0.7632	0.8784	0.9504	0.7056
11	1.0656	0.8208	0.6480	0.6192	0.3744	1.0656	0.8496	0.9504	0.8640	0.6048	1.1612	0.8352	0.8352	0.9504	0.6912
12	1.1808	0.7920	0.8208	0.6768	0.4752	0.8928	0.8640	0.8928	0.9648	0.6048	1.2856	0.9072	0.7920	0.9648	0.6480
13	1.1232	0.8640	0.7920	0.7344	0.6480	1.1232	0.7920	0.8496	0.9072	0.6480	1.3064	0.9504	0.7776	0.9360	0.6480
14	1.2096	0.8784	0.7488	0.6480	0.6768	1.2096	0.7776	0.7920	0.8928	0.5616	1.3478	0.8208	0.8208	0.9792	0.7632
15	1.1520	0.8496	0.8496	0.6768	0.6048	1.1520	0.8352	0.9360	0.9360	0.6912	1.3686	0.7776	0.7920	0.9216	0.6336
ค่าเฉลี่ย	0.9792	0.8006	0.7382	0.7325	0.4800	1.0166	0.7787	0.8218	0.8256	0.5491	1.1654	0.7642	0.8170	0.8698	0.6634
SD	0.1537	0.0682	0.0702	0.0779	0.1224	0.1158	0.0792	0.0982	0.0967	0.0762	0.1548	0.0985	0.1073	0.1153	0.0614

ตารางภาคผนวก ค-7 ผลผลิตแก๊สมีเทน (l/day) ของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	1.1808	0.8208	0.6768	0.6480	0.4320	0.9504	0.7200	0.6912	0.7200	0.4608	1.2240	0.6336	0.6624	0.6912	0.5760
2	1.2816	0.7056	0.7344	0.6768	0.5040	0.9792	0.7488	0.6480	0.7920	0.5040	1.2528	0.6912	0.7488	0.6480	0.6048
3	1.008	0.6480	0.7632	0.7488	0.4608	1.08	0.6912	0.7488	0.7488	0.4752	1.3248	0.6768	0.7200	0.7920	0.6192
4	1.0512	0.6768	0.7056	0.7056	0.3888	1.0656	0.7056	0.7920	0.8064	0.5616	1.3680	0.7488	0.7920	0.7488	0.6336
5	1.0656	0.7920	0.7632	0.7344	0.4176	1.0368	0.7344	0.8640	0.7776	0.5328	1.2528	0.8064	0.8208	0.7632	0.6480
6	0.9792	0.7920	0.7200	0.7200	0.4464	0.9792	0.7920	0.8496	0.8352	0.6048	1.3968	0.7776	0.8496	0.8064	0.7344
7	1.3824	0.8208	0.6768	0.7056	0.4608	1.0224	0.7488	0.8208	0.8640	0.5760	1.4688	0.8352	0.8928	0.8928	0.6624
8	0.9792	0.8784	0.7200	0.7632	0.4752	0.9936	-----	0.8928	0.8208	0.5328	1.5264	0.8928	0.9360	0.9216	0.6912
9	0.8928	0.8928	0.7056	0.7920	0.5328	0.9792	-----	0.7776	0.9360	0.6048	1.4112	0.8640	0.9072	0.9792	0.7488
10	0.792	0.8928	0.7632	0.8496	0.5040	0.9648	0.8352	0.9360	0.8928	0.6912	1.3680	0.7920	0.8784	0.9504	0.7920
11	0.8208	0.8640	0.7344	0.7632	0.4608	1.0368	0.8928	0.9072	0.9792	0.6336	1.1952	0.8352	0.8352	0.9792	0.6480
12	1.0224	0.8208	0.7632	0.8208	0.5040	0.9792	0.9360	0.9792	0.8640	0.5760	1.2816	0.9360	0.9216	0.9648	0.7056
13	1.008	0.8640	0.8208	0.7632	0.5328	0.936	0.9648	1.0080	0.9360	0.6768	1.3536	0.9792	0.9360	0.9216	0.6768
14	1.1664	0.8208	0.7920	0.7056	0.6048	1.0368	0.9072	0.9504	0.9504	0.6048	1.3248	0.7488	0.9360	0.9504	0.7488
15	0.9648	0.8352	0.8208	0.7920	0.6480	1.1376	0.9504	0.9360	0.9936	0.6768	1.3968	0.7632	0.8928	0.9216	0.6480
ค่าเฉลี่ย	1.0216	0.8083	0.7440	0.7459	0.4915	1.0118	0.8175	0.8534	0.8611	0.5808	1.3430	0.7987	0.8486	0.8621	0.6758
SD	0.1470	0.0760	0.0454	0.0545	0.0686	0.0546	0.1010	0.1060	0.0851	0.0715	0.0918	0.0955	0.0853	0.1105	0.0605

ตารางภาคผนวก ค-8 ค่าพีเอชของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	7.25	7.35	7.11	7.05	6.85	7.27	7.25	6.95	6.75	6.84	6.85	6.70	6.85	6.75	6.89
2	7.08	7.25	6.85	7.12	6.52	7.25	7.21	6.93	6.73	6.88	6.80	6.75	6.87	6.72	6.75
3	7.21	7.15	7.23	7.24	6.74	7.12	7.28	7.05	6.85	6.95	6.75	6.79	6.89	6.85	6.72
4	7.35	7.22	7.02	7.15	6.86	7.21	7.14	6.92	6.96	6.82	6.87	6.85	6.95	6.96	6.80
5	7.44	7.01	6.95	7.08	6.88	7.25	7.22	6.85	6.85	7.44	6.95	6.96	7.05	6.90	6.82
6	6.85	7.05	6.90	7.17	6.95	7.08	7.17	6.71	6.98	7.25	7.03	7.07	7.15	6.98	7.02
7	7.12	7.08	6.93	7.18	6.89	7.19	7.15	6.75	7.02	7.08	7.25	7.15	7.22	7.02	6.94
8	7.08	6.84	6.96	7.29	6.78	7.12	7.04	6.83	7.12	7.21	7.15	7.22	7.17	7.12	6.98
9	6.93	6.88	6.95	7.31	6.99	7.32	7.01	6.93	7.15	7.35	7.35	7.17	7.25	7.10	7.05
10	7.01	6.95	7.05	7.24	7.05	7.00	7.05	6.85	7.07	7.17	7.17	7.09	7.33	7.07	7.12
11	7.32	6.82	7.24	7.19	7.23	6.95	7.20	7.05	6.95	7.09	7.20	7.20	7.05	7.02	7.09
12	7.41	6.97	7.38	7.26	6.87	7.08	6.89	7.13	6.82	7.32	7.12	6.95	6.98	6.95	7.23
13	7.37	7.02	7.05	7.19	6.77	6.93	6.95	7.21	7.04	7.00	7.05	7.15	6.72	7.05	7.00
14	7.09	7.12	7.13	7.08	6.97	7.01	7.01	7.19	7.11	6.93	7.04	7.25	6.85	7.13	6.95
15	7.17	7.08	7.32	7.10	6.85	7.25	6.90	7.01	7.27	6.95	7.13	7.15	7.12	7.20	7.05
ค่าเฉลี่ย	7.20	7.11	7.05	7.10	6.83	7.14	7.10	6.96	6.98	7.09	7.05	7.03	7.03	6.99	6.96
SD	0.18	0.18	0.15	0.18	0.18	0.12	0.13	0.15	0.16	0.20	0.17	0.18	0.18	0.14	0.14

ตารางภาคผนวก ค-9 ค่าพีเอชของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	7.21	7.32	7.14	7.25	7.05	7.14	7.34	7.05	6.85	6.75	7.50	6.80	6.50	6.75	6.95
2	7.15	7.34	7.22	7.18	7.07	7.13	7.22	6.84	7.05	6.63	7.35	6.75	6.80	6.90	6.85
3	7.17	7.28	7.25	7.22	6.85	7.05	7.18	6.72	7.22	6.84	7.28	6.95	6.75	7.00	6.95
4	7.28	7.14	7.15	7.12	6.93	7.18	7.15	6.95	7.19	6.88	7.14	7.05	6.90	6.95	6.82
5	7.09	7.17	7.08	7.08	6.98	7.14	7.23	7.01	6.93	6.72	7.10	7.20	6.80	6.85	6.75
6	7.01	7.22	7.32	6.95	7.03	7.25	7.05	6.73	6.85	6.85	7.05	7.35	7.05	7.05	7.05
7	7.32	7.11	7.28	6.82	-----	6.95	7.09	6.85	6.95	6.95	7.00	6.60	7.10	7.00	7.15
8	7.24	7.05	7.34	6.75	-----	6.72	6.84	7.07	7.08	7.05	6.95	6.80	7.00	7.12	7.17
9	7.21	7.07	7.12	6.94	-----	7.01	6.95	7.13	7.14	6.94	6.80	-----	-----	-----	-----
10	7.13	6.85	7.05	7.02	-----	7.28	6.87	7.08	7.05	6.97	6.85	-----	-----	-----	-----
11	7.07	6.93	6.95	7.08	-----	6.95	7.15	7.05	6.94	7.08	7.20	-----	-----	-----	-----
12	6.98	6.98	7.01	7.15	7.08	7.08	7.4	7.13	6.89	7.02	6.70	6.75	6.80	7.15	7.20
13	6.85	7.03	6.91	7.22	7.11	6.85	7.2	7.09	7.02	6.93	6.50	6.95	6.90	7.08	6.95
14	6.95	7.21	7.02	7.38	7.22	7.19	7.24	6.94	7.12	7.1	6.80	7.15	7.08	7.15	7.05
15	7.08	7.13	7.28	7.42	7.15	7.28	7.17	6.88	7.07	7.06	6.80	7.10	6.80	7.05	7.18
ค่าเฉลี่ย	7.11	7.25	7.19	7.26	7.09	7.08	7.13867	6.968	7.02333	6.918	7.00	6.95	6.87	7.00	7.01
SD	7.22	7.07	7.22	7.38	7.35	0.16098	0.15766	0.13702	0.11806	0.13996	0.27	0.22	0.17	0.12	0.15

ตารางภาคผนวก ค-10 ค่าพีเอชของมูลสุกรกับไบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	7.25	7.27	7.22	7.12	7.25	7.27	7.21	6.95	6.98	6.95	6.85	7.25	6.95	6.75	6.84
2	7.08	7.35	7.25	7.04	7.34	7.25	7.19	6.98	7.21	7.05	6.80	7.21	6.93	6.73	6.88
3	7.21	7.28	7.18	7.15	7.32	7.12	7.15	7.25	7.22	7.04	6.75	7.28	7.05	6.85	6.95
4	7.35	7.31	6.85	7.05	7.42	7.21	7.08	7.22	7.15	7.08	6.87	7.14	6.92	6.96	6.82
5	7.44	7.30	6.92	7.09	7.28	7.25	7.05	7.18	7.18	7.25	6.95	7.22	6.85	6.85	7.44
6	6.85	7.22	6.95	7.17	7.17	7.08	7.13	7.24	6.98	7.18	7.03	7.17	6.71	6.98	7.25
7	7.12	7.15	6.87	7.24	7.22	7.19	7.15	7.14	7.05	7.08	7.25	7.15	6.75	7.02	7.08
8	7.08	7.28	6.98	7.15	7.18	7.12	7.04	7.08	7.12	7.21	7.15	7.04	6.83	7.12	7.21
9	6.93	7.40	6.95	7.08	7.25	7.32	7.01	6.98	7.14	7.18	7.35	7.01	6.93	7.15	7.35
10	7.01	7.25	6.90	7.22	7.11	7.00	7.18	6.95	7.07	7.17	7.17	7.05	6.85	7.07	7.17
11	7.32	7.08	7.05	7.15	7.05	6.95	7.20	7.09	6.98	7.14	7.20	7.20	7.05	6.95	7.09
12	7.41	7.11	7.10	7.02	7.08	7.08	6.95	7.13	7.24	7.19	7.12	6.89	7.13	6.82	7.32
13	7.37	7.15	7.12	7.07	7.18	6.93	6.98	7.19	7.22	7.22	7.05	6.95	7.21	7.04	7.00
14	7.09	7.17	7.07	6.95	7.24	7.01	7.01	7.22	7.11	7.18	7.04	7.01	7.19	7.11	6.93
15	7.17	7.20	7.15	6.92	7.11	7.25	6.90	7.14	7.09	7.16	7.13	6.90	7.01	7.27	6.95
ค่าเฉลี่ย	7.20	7.23	7.04	7.09	7.21	7.14	7.08	7.12	7.12	7.14	7.05	7.10	6.96	6.98	7.09
SD	0.18	0.09	0.13	0.09	0.10	0.12	0.10	0.11	0.09	0.08	0.17	0.13	0.15	0.16	0.20

ตารางภาคผนวก ค-11 ค่าพีเอชของมูลสุกรกับไบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	7.21	7.28	7.25	7.22	7.34	7.14	7.13	7.02	7.12	7.44	7.50	7.25	7.13	7.05	7.22
2	7.15	7.35	7.17	7.18	7.28	7.13	7.05	7.12	7.14	7.25	7.35	7.21	7.21	6.95	7.17
3	7.17	7.17	7.08	7.14	7.25	7.05	7.18	7.15	7.07	7.08	7.28	7.28	7.19	7.01	7.15
4	7.28	7.35	7.19	6.98	7.19	7.18	7.14	7.07	6.96	7.21	7.14	7.14	7.01	6.9	7.04
5	7.09	7.22	7.22	7.05	7.14	7.14	7.22	6.85	6.85	7.44	7.10	6.85	6.85	6.85	7.01
6	7.01	7.17	7.05	7.15	7.22	7.25	7.17	6.71	6.98	7.25	7.05	6.98	6.71	6.98	7.05
7	7.32	7.08	6.95	7.19	7.08	6.95	7.15	6.75	7.02	7.08	7.00	7.02	6.75	7.02	7.2
8	7.24	7.15	6.92	7.27	7.09	6.72	7.04	6.83	7.12	7.21	6.95	7.12	6.83	7.12	6.89
9	7.21	7.09	7.09	7.08	7.13	7.01	-----	-----	-----	-----	6.80	7.01	6.93	7.15	7.35
10	7.13	7.14	7.14	7.17	7.05	7.28	-----	-----	-----	-----	6.85	7.05	6.85	7.07	7.17
11	7.07	7.05	7.27	7.14	7.01	6.95	7.1	7.05	7.15	7.05	7.20	-----	-----	-----	-----
12	6.98	6.95	6.96	7.29	6.94	7.08	7.05	7.1	7.02	7.08	6.70	-----	-----	-----	-----
13	6.85	7.14	6.99	7.08	6.89	6.85	7.1	7.12	7.07	7.18	6.50	-----	-----	-----	-----
14	6.95	7.18	7.05	7.18	7.02	7.19	7.01	7.19	7.11	6.93	6.80	7.01	7.19	7.11	6.93
15	7.08	7.26	7.24	7.05	7.09	7.28	7.2	7.01	7.27	6.95	6.80	6.9	7.01	7.27	6.95
ค่าเฉลี่ย	7.11	7.17	7.10	7.14	7.14	7.08	7.12	7.00	7.07	7.17	7.00	7.07	6.97	7.04	7.09
SD	7.22	0.11	0.12	0.09	0.09	0.16098	0.07	0.16	0.10	0.16	0.27	0.13	0.18	0.12	0.14

ตารางภาคผนวก ค-12 พารามิเตอร์ควบคุมระบบของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

	วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
		100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
VFA (mg/l)	3	425.0	350.0	390.0	487.5	330.0	350.0	425.0	525.0	600.0	570.0	500.0	500.0	570.0	768.8	525.0
	6	150.0	212.5	300.0	375.0	270.0	437.5	375.0	495.0	562.5	525.0	387.5	437.5	525.0	656.3	480.0
	9	250.0	187.5	255.0	318.8	225.0	425.0	350.0	465.0	581.3	510.0	437.5	312.5	525.0	675.0	450.0
	12	312.5	156.3	375.0	468.8	255.0	275.0	387.5	412.5	525.0	480.0	350.0	487.5	540.0	731.3	
	15	212.5	187.5	375.0	468.8	285.0	325.0	312.5	435.0	515.6	495.0	375.0	462.5	450.0	656.3	
Alk (mg/l)	3	658.3	625.0	500.0	625.0	650.0	583.3	500.0	650.0	812.5	550.0	625.0	500.0	900.0	1000.0	600.0
	6	1225.0	1041.7	550.0	687.5	600.0	750.0	833.3	950.0	1062.5	650.0	791.7	916.7	1800.0	1062.5	500.0
	9	1250.0	1458.3	750.0	937.5	700.0	875.0	1375.0	1050.0	937.5	750.0	1041.7	1291.7	1550.0	1125.0	550.0
	12	1041.7	833.3	600.0	750.0	500.0	1166.7	816.7	750.0	1125.0	900.0	1208.3	900.0	1200.0	875.0	
	15	1083.3	1041.7	650.0	812.5	500.0	1041.7	1125.0	800.0	1312.5	800.0	916.7	750.0	1050.0	750.0	
TKN (mg/l)	5	103.6	182.9	280.0	308.9	238.0	462.0	459.2	400.4	557.2	579.6	448.0	657.1	714.0	444.3	761.6
	10	117.6	166.1	226.8	345.3	260.4	546.0	389.2	358.4	473.2	481.6	588.0	601.1	602.0	500.3	593.6
	15	89.6	205.3	245.3	272.5	271.6	504.0	347.2	456.4	627.2	621.6	588.0	531.1	770.0	584.3	453.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวก ค-13 พารามิเตอร์ควบคุมระบบของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เมเบรอน

	วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
		100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
VFA (mg/l)	3	312.5	312.5	300.0	281.3	300.0	375.0	375.0	375.0	375.0	450.0	350.0	225.0	382.5	281.3	420.0
	6	300.0	300.0	337.5	375.0	360.0	475.0	400.0	375.0	431.3	480.0	312.5	337.5	360.0	468.8	435.0
	9	350.0	250.0	270.0	412.5	375.0	437.5	412.5	345.0	468.8	412.5	312.5	312.5	360.0	487.5	420.0
	12	275.0	281.3	300.0	356.3	375.0	350.0	343.8	435.0	-----	435.0	343.8	337.5	360.0	-----	420.0
	15	250.0	337.5	300.0	375.0	330.0	400.0	437.5	480.0	-----	-----	275.0	312.5	375.0	-----	-----
Alk (mg/l)	3	416.7	483.3	400.0	750.0	650.0	583.3	500.0	600.0	625.0	700.0	416.7	350.0	500.0	625.0	650.0
	6	458.3	500.0	420.0	812.5	680.0	625.0	516.7	650.0	525.0	680.0	458.3	416.7	550.0	562.5	580.0
	9	500.0	541.7	350.0	775.0	500.0	416.7	483.3	550.0	587.5	750.0	316.7	458.3	600.0	525.0	580.0
	12	516.7	375.0	500.0	625.0	450.0	541.7	458.3	580.0	-----	720.0	325.0	316.7	390.0	-----	520.0
	15	341.7	333.3	450.0	600.0	520.0	541.7	500.0	620.0	-----	-----	350.0	358.3	470.0	-----	-----
TKN (mg/l)	5	364.0	517.1	518.0	402.3	453.6	308.0	601.1	728.0	444.3	453.6	588.0	546.0	602.0	798.0	1156.4
	10	392.0	517.1	560.0	374.3	593.6	504.0	629.1	868.0	584.3	649.6	574.0	476.0	588.0	952.0	1016.4
	15	378.0	461.1	448.0	304.3	313.6	588.0	797.1	588.0	500.3	593.6	644.0	700.0	882.0	1064.0	1240.4

ตารางภาคผนวก ค-14 พารามิเตอร์ควบคุมระบบของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

	วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
		100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
VFA (mg/l)	3	425.0	225.0	382.5	281.3	420.0	350.0	350.0	390.0	487.5	330.0	500.0	425.0	525.0	600.0	570.0
	6	150.0	337.5	360.0	468.8	435.0	437.5	212.5	300.0	375.0	270.0	387.5	375.0	495.0	562.5	525.0
	9	250.0	312.5		487.5	420.0	425.0	187.5	255.0	318.8	225.0	437.5	350.0	465.0	581.3	510.0
	12	312.5	337.5	360.0	356.3	420.0	275.0	156.3	375.0	468.8	255.0	350.0	387.5	412.5	525.0	480.0
	15	212.5	312.5	375.0	375.0		325.0	187.5	375.0	468.8	285.0	375.0	312.5	435.0	515.6	495.0
Alk (mg/l)	3	658.3	350.0	500.0	625.0	650.0	583.3	500.0	625.0	658.3	650.0	625.0	500.0	650.0	812.5	550.0
	6	1225.0	416.7	550.0	562.5	580.0	750.0	550.0	687.5	1225.0	600.0	791.7	833.3	950.0	1062.5	650.0
	9	1250.0	458.3		525.0	580.0	875.0	750.0	937.5	1250.0	700.0	1041.7	1375.0	1050.0	937.5	750.0
	12	1041.7	316.7	390.0	625.0	520.0	1166.7	600.0	750.0	1041.7	500.0	1208.3	816.7	750.0	1125.0	900.0
	15	1083.3	358.3	470.0	600.0		1041.7	650.0	812.5	1083.3	500.0	916.7	1125.0	800.0	1312.5	800.0
TKN (mg/l)	5	103.6	546.0	602.0	798.0	1156.4	462.0	182.9	280.0	308.9	238.0	448.0	459.2	400.4	557.2	579.6
	10	117.6	476.0	588.0	952.0	1016.4	546.0	166.1	226.8	345.3	260.4	588.0	389.2	358.4	473.2	481.6
	15	89.6	700.0	882.0	1064.0	1240.4	504.0	205.3	245.3	272.5	271.6	588.0	347.2	456.4	627.2	621.6

ตารางภาคผนวก ค-15 พารามิเตอร์ควบคุมระบบของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรณ

	วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
		100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
VFA (mg/l)	3	312.5	375.0	375.0	375.0	450.0	375.0	225.0	382.5	281.3	420.0	350.0	312.5	300.0	281.3	300.0
	6	300.0	400.0	375.0	431.3	480.0	475.0	337.5	360.0	468.8	435.0	312.5	300.0	337.5	375.0	360.0
	9	350.0	412.5	345.0	468.8	412.5	437.5	312.5	360.0	487.5	420.0	312.5	250.0	270.0	412.5	375.0
	12	275.0	343.8	435.0		435.0	350.0	337.5	360.0		420.0	343.8	281.3	300.0	356.3	375.0
	15	250.0	437.5	480.0			400.0	312.5	375.0			275.0	337.5	300.0	375.0	330.0
Alk (mg/l)	3	416.7	500.0	600.0	625.0	700.0	583.3	483.3	400.0	750.0	650.0	416.7	350.0	500.0	625.0	650.0
	6	458.3	516.7	650.0	525.0	680.0	625.0	500.0	420.0	812.5	680.0	458.3	416.7	550.0	562.5	580.0
	9	500.0	483.3	550.0	587.5	750.0	416.7	541.7	350.0	775.0	500.0	316.7	458.3	600.0	525.0	580.0
	12	516.7	458.3	580.0		720.0	541.7	375.0	500.0	625.0	450.0	325.0	316.7	390.0		520.0
	15	341.7	500.0	620.0			541.7	333.3	450.0	600.0	520.0	350.0	358.3	470.0		
TKN (mg/l)	5	364.0	657.1	714.0	444.3	761.6	308.0	517.1	518.0	402.3	453.6	588.0	601.1	728.0	444.3	453.6
	10	392.0	601.1	602.0	500.3	593.6	504.0	517.1	560.0	374.3	593.6	574.0	629.1	868.0	584.3	649.6
	15	378.0	531.1	770.0	584.3	453.6	588.0	461.1	448.0	304.3	313.6	644.0	797.1	588.0	500.3	593.6

ตารางภาคผนวก ค-16 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	12288	13327	15874	24755	32215	52155	61038	52533	58950	52155	98907	100443	90448	100884	109945
2	11897	13453	15259	24413	35876	48346	62880	53500	59564	48346	80532	90882	100245	110453	109423
3	12157	13587	13426	23785	36679	50292	48849	56056	58543	50292	99921	100584	110113	110102	119542
4	12234	13676	15688	22678	34568	56600	50289	56375	58555	56600	95455	99532	104342	105843	110448
5	12579	13559	15477	22253	34457	50166	49491	55534	59374	50166	94360	100884	105387	104790	100448
6	12588	13789	19478	25883	30679	56692	62960	55798	61257	56692	100435	103749	98344	102486	105920
7	12357	13778	15876	26122	31134	62828	63566	55266	60984	62828	90227	103357	107874	103948	108432
8	12457	13465	16288	25455	32567	56072	54911	53120	56573	56072	80743	99555	100045	103394	110047
9	12345	13789	17387	24871	29908	56337	55476	52555	54325	56337	99502	95883	108449	110443	111221
10	12673	13856	16299	25738	30546	48565	53560	52008	55584	48565	93280	100432	104748	110002	109432
11	12346	13765	18248	25832	32114	45251	64214	51753	56739	45251	100222	101184	105321	112822	104895
12	12654	13789	15525	24562	30223	56208	52605	54973	56600	56208	100048	102005	105990	105905	105839
13	12691	14010	16894	25511	29567	44896	53637	54895	58432	44896	95994	100005	110145	109934	110493
14	12679	14134	15587	25579	31335	45505	59498	54555	59300	45505	100223	98763	105521	110025	105593
15	12559	14236	19337	26252	31238	52342	58742	52877	62432	52342	100078	95589	98839	103294	112244
ค่าเฉลี่ย	12434	13748	16443	24913	32207	52150	56781	54120	58481	52150	95328	99523	103721	106955	108928
SD	230	251	1608	1212	2210	5230	5393	1568	2209	5230	6726	3277	5287	3735	4264

ตารางภาคผนวก ค-17 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หมักเบรณ

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	11557	12767	11969	19257	30577	45155	52328	53732	49875	48533	87533	95959	95253	96625	95957
2	11766	12885	11896	20553	29904	48464	49563	53986	50531	47654	89231	94325	93214	95859	94832
3	11934	12901	11358	19879	31786	51292	49322	52514	50832	48578	76548	94421	95780	100028	97145
4	11846	12878	11447	19543	31544	52600	48756	51563	52897	49789	85992	87843	99976	101127	100075
5	11888	12674	11356	20154	30875	49167	47655	51554	52773	49534	85483	89003	101438	100439	101190
6	11897	13007	13125	22900	29984	52921	48533	51419	55314	50225	80768	91127	101139	101113	103270
7	11655	12989	11446	21798	30578	52686	48921	52536	54531	50113	81143	92928	100545	102410	108850
8	11767	12874	11496	21335	32580	47732	47655	49348	52414	50456	81122	85532	98834	105780	105250
9	11900	12689	11654	21993	32123	47889	51155	47655	52576	50887	83294	96878	90260	100230	102430
10	11255	12566	14433	26112	30775	48647	50894	45321	53565	49876	87794	93542	95428	99540	102290
11	11343	12905	15327	23443	29584	46259	50765	47653	52425	49932	83375	95546	96215	100250	102784
12	11443	12788	15348	27038	28472	46203	51823	44937	52278	49954	86893	94844	95446	99880	99985
13	11766	12653	15236	26543	29100	48956	51166	48654	52481	52553	92155	87169	92628	101420	100443
14	11906	13256	15386	26548	30556	45515	52325	47725	52375	52778	95847	99902	92775	101830	101028
15	11836	13325	14848	26671	29225	47891	49853	47886	53385	50773	85593	92448	96948	98930	99855
ค่าเฉลี่ย	11717	12877	13088	22918	30511	48758	50048	49766	52550	50109	85518	92764	96392	100364	101026
SD	219	210	1764	2924	1168	2578	1575	2916	1409	1354	4832	3971	3410	2319	3521

ตารางภาคผนวก ค-18 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L) ของมูลสุกรกับไบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	12288	18102	20485	23577	25559	52155	45892	49985	49943	48585	98907	76543	74432	75800	85250
2	11897	18102	22088	22995	25784	48346	49925	49321	48845	48890	80532	78924	80019	78900	83493
3	12157	19098	20211	22122	25732	50292	48765	48972	47231	50002	99921	80124	77717	79400	82408
4	12234	19121	21185	21993	25325	56600	46554	48585	47559	45829	95455	75547	80044	82500	80017
5	12579	19005	19994	22128	25456	50166	47732	48327	47878	46600	94360	75489	78423	84500	89395
6	12588	17983	21015	22295	26995	56692	46835	48025	48239	46500	100435	71517	76564	85500	90104
7	12357	16882	20533	23558	26432	62828	47739	47995	47834	45300	90227	74432	81123	83200	87553
8	12457	19512	20997	23735	25892	56072	46565	47877	42432	44400	80743	80054	85578	81400	91147
9	12345	19554	21224	22456	23454	56337	46213	47723	45549	43500	99502	79941	81145	82800	90895
10	12673	20010	21421	23793	24125	48565	46009	45557	44848	43700	93280	78227	79953	83500	89987
11	12346	19148	21085	23538	25011	45251	46432	44983	44586	43800	100222	81413	75461	82400	90708
12	12654	18908	21187	23432	25568	56208	45875	44220	45583	43300	100048	82248	79432	81900	91133
13	12691	19138	21209	23984	25114	44896	45992	44670	46933	42900	95994	81419	78485	82700	90708
14	12679	18213	20558	22358	25215	45505	45800	45834	46128	42500	100223	78825	77215	83200	90008
15	12559	18908	20993	23009	25345	52342	45500	45523	46614	42200	100078	71517	76995	84000	87447
ค่าเฉลี่ย	12434	18779	20946	22998	25400	52150	46789	47173	46680	45200	95328	77748	78839	82113	88017
SD	230	788	521	708	839	5230	1243	1855	1895	2466	6726	3441	2725	2452	3591

ตารางภาคผนวก ค-19 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L) ของมูลสุกรกับไบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	11557	16002	19595	22289	24109	45155	44453	48903	46432	45593	87533	68847	75532	74700	82121
2	11766	16843	18742	21748	24200	48464	44400	47575	47135	45564	89231	65328	74985	75200	84453
3	11934	16674	19275	21509	24500	51292	44500	47400	47563	44632	76548	70485	75512	75500	85521
4	11846	16776	19004	21375	24000	52600	44300	47200	46729	45500	85992	75521	76852	78400	84548
5	11888	17953	19985	20321	24300	49167	44321	48558	46684	44500	85483	74987	76639	79500	82148
6	11897	16943	21142	19954	24400	52921	44678	47124	47710	45916	80768	75583	72145	84400	83349
7	11655	16554	20059	21145	24500	52686	44990	47725	47820	44412	81143	76847	79564	83200	89594
8	11767	16695	19983	22574	23700	47732	45923	44400	45893	43439	81122	75390	80053	82900	82423
9	11900	16893	19741	22235	23300	47889	47812	43200	44549	44781	83294	74748	79990	83200	85461
10	11255	17004	20054	22289	23500	48647	47732	43342	45438	44265	87794	76428	78594	81700	86674
11	11343	17183	19834	21978	23800	46259	45544	44412	45526	44300	83375	76684	77589	82500	81148
12	11443	16623	18553	22254	23600	46203	46345	44453	44439	42580	86893	75428	78123	74500	82322
13	11766	16280	20409	21895	23500	48956	45800	44228	44322	45510	92155	74900	74752	78200	81718
14	11906	17140	19843	23593	23800	45515	46200	43921	45958	43270	95847	73500	73548	76700	82225
15	11836	16993	19192	23034	23200	47891	46193	43875	45512	44344	85593	75800	75472	75800	89900
ค่าเฉลี่ย	11717	16837	19694	21880	23894	48758	683191	686316	691710	668606	85518	74032	76623	79093	84240
SD	219	440	666	943	430	2578	1175	2045	1168	957	4832	3272	2365	3598	2758

ตารางภาคผนวก ค-20 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	3080	4030	4992	9679	11869	17153	21841	20341	24027	17153	31537	34381	34570	43391	38925
2	3680	4518	5124	9546	12780	13925	21324	19250	24751	13925	24561	31407	37078	48473	40358
3	3605	4787	4730	9299	14302	14491	16994	20896	25112	14491	30863	36086	38555	47336	44122
4	3032	4061	4816	8867	13102	15439	17383	22234	25503	15439	29355	35078	39493	44512	40256
5	3663	3950	4509	8502	12671	14714	17317	21606	24742	14714	29147	35575	40142	44721	37164
6	3223	4082	6326	10113	10884	17535	21155	22628	25801	17535	31732	34918	38354	43375	39776
7	3310	4105	5666	9809	11389	18527	20906	23214	26165	18527	28492	35990	41973	45730	42183
8	3172	3697	5127	9083	11384	16585	17446	22449	23511	16585	24944	33759	39061	44341	42919
9	3202	3860	4490	8484	10503	17534	18005	21142	22246	17534	31287	33135	43374	48586	41402
10	3662	4004	4642	8715	10566	13816	19169	18560	23840	13816	27172	36033	41805	47553	39860
11	3445	4254	5380	9267	11460	13663	22902	20118	22769	13663	29455	36437	42237	49596	38820
12	3073	4015	5470	8348	10575	15612	19370	21435	22081	15612	29909	36598	41345	48726	40017
13	3383	4561	4889	9762	10654	11879	19255	21411	22848	11879	29650	35000	42598	49471	42992
14	3261	4681	4081	9690	11013	12832	21197	21907	23645	12832	29184	35499	40003	49412	41186
15	3917	4439	6238	9690	11554	14388	19646	21244	24749	14388	31033	35252	38597	47057	41178
ค่าเฉลี่ย	3381	4203	5099	9257	11647	15206	19594	21229	24119	15206	29221	35010	39946	46819	40744
SD	269	321	631	561	1112	1925	1890	1261	1278	1925	2194	1384	2360	2275	1823

ตารางภาคผนวก ค-21 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	4055	3779	3591	6021	10578	11329	16990	19229	17838	17396	28109	31167	35568	37336	35523
2	2801	3348	3514	6607	10472	11544	15324	18657	18138	17606	27155	29797	35282	36800	35515
3	2245	3519	3358	6023	11166	12213	15426	18858	18706	17917	23734	30281	35362	38881	35885
4	2753	3740	3499	6069	11035	12274	15604	18395	20023	17761	26636	28092	36901	39996	35577
5	2980	2692	3169	6145	10516	11696	14729	17585	19291	19315	25640	28258	37583	40387	36266
6	3680	4368	3752	7438	10693	12961	14564	18911	20694	18917	24682	29197	37644	41032	36651
7	4156	4576	3308	6981	10768	12480	15280	19381	21026	17864	24738	30276	37745	42244	38010
8	1739	3308	3180	7110	11986	11170	14913	18196	20249	17494	24421	28217	36450	44523	36290
9	2492	2657	3561	6670	10750	11779	15895	17589	19798	17741	24713	32512	34254	42678	36076
10	2577	3631	4093	8448	10645	11969	16387	17475	19599	17521	25768	31748	35509	41548	37009
11	3165	3601	5501	7051	10597	10546	17200	17942	19888	17594	24637	32553	34676	42035	37249
12	2779	3106	5100	8461	10381	10743	17957	16743	18739	17818	24886	32446	34924	41510	35775
13	3137	3373	5281	8247	10703	11152	17397	18128	19589	18326	27407	29271	33402	44199	33357
14	3063	3410	5250	8300	10733	10874	17769	18121	20424	18990	28332	33957	34716	45773	32369
15	3336	4155	5332	8020	10498	11106	16807	17616	20641	18317	25721	30166	35764	44410	33112
ค่าเฉลี่ย	2997	3551	4099	7173	10768	11589	16150	18188	19643	18039	25772	30529	35719	41557	35644
SD	645	539	905	928	394	692	1138	730	947	603	1434	1811	1305	2609	1570

ตารางภาคผนวก ค-22 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (mg/L) ของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	3080	4889	5715	7200	7749	17153	12966	14773	14748	13968	31537	23720	23486	25075	25677
2	3680	5235	6234	7243	8800	13925	14534	14444	14434	13802	24561	24115	24946	28159	25465
3	3605	5349	5769	6623	8062	14491	14427	14761	13669	13976	30863	23916	24181	29251	25415
4	3032	5389	6153	6668	7747	15439	13343	14632	14339	12896	29355	22748	25843	30121	24461
5	3663	5237	5705	6893	7947	14714	13422	14932	14368	13160	29147	21854	24574	31206	27400
6	3223	4876	5883	7150	8525	17535	13190	14981	15055	13499	31732	20676	23797	32362	26887
7	3310	4799	5796	7263	8450	18527	13414	14666	14632	13214	28492	21924	25358	30068	25522
8	3172	5376	6106	7498	7822	16585	13762	15106	12666	12663	24944	24856	27864	29687	27599
9	3202	5449	6156	6986	7062	17534	13167	14597	13656	12002	31287	24782	26039	30512	26787
10	3662	5715	6008	7626	7225	13816	12937	13262	13109	12039	27172	23919	25677	29926	26888
11	3445	5339	6231	7454	7466	13663	13345	13176	12729	11804	29455	24135	24589	29697	27702
12	3073	5167	6230	7463	7681	15612	13051	13010	12864	12098	29909	23752	25814	29910	28233
13	3383	5466	5966	7301	7557	11879	12724	13468	13413	11836	29650	23414	25004	29433	28165
14	3261	5059	5871	6837	7348	12832	12620	13365	13391	11411	29184	22580	26221	29769	26885
15	3917	5293	6204	7200	7413	14388	12254	13193	13402	11360	31033	20639	25069	29795	25928
ค่าเฉลี่ย	3381	5243	6002	7160	7790	15206	13277	14158	13765	12649	29221	23135	25231	29665	26601
SD	269	250	199	303	497	1925	613	793	778	920	2194	1350	1092	1569	1133

ตารางภาคผนวก ค-23 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (mg/L) ของมูลสุกรกับไบโพลัมที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	4055	4322	5467	6807	7131	11329	13027	14749	13989	12647	28109	20368	23003	28252	24291
2	2801	4871	5290	6851	7877	11544	12476	14394	14875	12115	27155	19388	22934	27779	24762
3	2245	4670	5501	6440	7482	12213	12505	14753	15146	11894	23734	21035	22829	28275	25212
4	2753	4728	5520	6481	7066	12274	13043	13846	14331	12085	26636	22239	23708	29620	24705
5	2980	4947	5703	6330	7334	11696	12652	14615	14305	11339	25640	22462	23574	29375	24209
6	3680	4594	5919	6399	7374	12961	13106	13550	14788	11727	24682	22264	22116	31355	24046
7	4156	4706	5662	6519	7588	12480	13293	13369	14764	11960	24738	22965	23777	30801	25454
8	1739	4600	5811	7131	7146	11170	12912	12483	14022	11820	24421	23179	24012	31369	23342
9	2492	4708	5726	6917	6978	11779	13447	12980	12972	12127	24713	22765	24468	29969	24792
10	2577	4856	5624	7144	6867	11969	13105	12766	13637	11805	25768	23271	24547	29469	24997
11	3165	4792	5862	6960	6793	10546	12239	13572	13207	12058	24637	22578	24312	29329	23168
12	2779	4543	5456	7088	6870	10743	13042	13269	12641	11318	24886	22368	24886	26164	23997
13	3137	4649	5741	6665	6707	11152	12915	12828	12452	12101	27407	21831	23917	27425	24082
14	3063	4761	5667	7215	6697	10874	12869	12771	12868	11687	28332	21822	23156	26761	23969
15	3336	4757	5672	7207	6624	11106	12730	12978	11989	12031	25721	22620	24230	25863	26565
ค่าเฉลี่ย	2997	4700	5641	6810	7102	11589	193362	202924	205986	178715	25772	22077	23698	28787	24506
SD	645	152	169	316	367	692	323	777	993	329	1434	1072	764	1762	857

ตารางภาคผนวก ค-24 ปริมาณซีไอดี (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	380.45	168.544	271.136	550	600	476.32	420.44	500	550	650	650	625	700	725	800
2	515.32	168.544	311.44	550	600	476.32	420.44	500	550	650	650	625	700	725	800
3	440.89	256.48	293.12	575	500	476.32	476.32	550	500	575	725	675	750	800	985
4	440.89	289.32	274.8	575	500	378.85	476.32	550	500	575	725	675	750	800	985
5	366.4	256.48	344.416	575	500	378.85	455.85	525	600	600	675	650	785	825	950
6	256.48	311.44	344.416	500	525	400.24	455.85	525	600	600	675	650	785	825	950
7	311.44	274.8	311.44	500	525	400.24	400.24	525	600	600	600	600	600	750	900
8	274.8	311.44	328.48	475	575	356.48	400.24	500	550	500	600	600	600	750	900
9	311.44	274.8	328.48	475	575	366.4	378.85	500	550	500	550	550	625	700	995
10	274.8	219.84	512.84	450	500	256.48	490.25	550	525	550	550	550	625	700	995
11	219.84	271.136	476.32	450	500	311.44	490.25	550	525	550	575	575	500	800	925
12	271.136	293.12	512.84	500	550	311.44	468.13	600	475	600	575	575	500	800	925
13	293.12	311.44	444.53	500	550	320.35	486.13	600	475	600	625	600	550	775	875
14	311.44	274.8	411.34	550	525	320.35	400.24	575	500	575	625	600	550	775	875
15	274.8	344.416	411.32	550	525	356.48	400.24	575	500	575	500	625	550	700	800
ค่าเฉลี่ย	330	268	371	518	537	372	441	542	533	580	620	612	638	763	911
SD	83	50	84	45	36	66	40	35	43	44	65	40	100	45	70

ตารางภาคผนวก ค-25 ปริมาณซีไอดี (mg/L) ของมูลสุกรกับเศษอาหารที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	113	148	240	420	450	240	350	425	475	500	400	500	575	675	725
2	189	148	240	420	450	240	350	425	475	500	400	500	575	675	725
3	217	156	257	386	400	147	320	350	400	525	425	550	600	650	750
4	236	156	257	386	400	147	320	350	400	525	425	550	600	650	750
5	240	156	272	410	400	257	275	325	425	425	420	475	550	700	700
6	134	183	217	324	350	257	275	325	425	425	420	475	550	700	700
7	134	183	217	324	350	169	256	325	425	425	380	525	500	650	675
8	113	202	236	350	325	169	256	225	350	400	380	525	500	650	675
9	113	202	236	350	325	220	278	225	350	400	375	500	525	625	600
10	151	226	275	386	300	195	239	275	325	375	375	500	525	625	600
11	149	226	290	386	300	195	239	275	325	375	350	450	475	600	625
12	179	200	277	424	320	140	256	350	295	350	350	450	475	600	625
13	179	200	277	424	320	140	256	350	295	350	375	475	500	550	675
14	200	240	200	400	275	196	220	300	350	350	375	475	500	550	675
15	200	240	214	400	275	196	220	300	350	350	360	475	450	550	800
ค่าเฉลี่ย	170	191	247	386	349	194	274	322	378	418	387	495	527	630	687
SD	44	33	27	34	58	42	43	59	59	65	26	32	47	51	58

ตารางภาคผนวก ค-26 ปริมาณซีไอดี (mg/L) ของมูลสุกรกับใบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	380.45	240	280	300	200	476.32	240	300	320	250	650	300	300	325	300
2	515.32	240	280	300	200	476.32	240	300	320	250	650	300	300	325	300
3	440.89	280	300	320	160	476.32	260	320	300	275	725	275	325	300	325
4	440.89	280	300	320	160	378.85	260	320	300	275	725	275	325	300	325
5	366.4	220	240	280	180	378.85	250	275	275	225	675	325	325	350	275
6	256.48	220	240	280	180	400.24	250	275	275	225	675	325	325	350	275
7	311.44	220	240	280	180	400.24	250	275	275	225	600	325	325	350	275
8	274.8	260	250	250	220	356.48	275	250	300	240	600	300	300	300	300
9	311.44	260	250	250	220	366.4	275	250	300	240	550	300	300	300	300
10	274.8	240	300	220	200	256.48	300	275	275	220	550	275	275	275	250
11	219.84	240	300	220	200	311.44	300	275	275	220	575	275	275	275	250
12	271.136	320	290	240	220	311.44	325	250	280	200	575	300	320	300	275
13	293.12	320	290	240	220	320.35	325	250	280	200	625	300	320	300	275
14	311.44	280	270	260	200	320.35	290	240	250	250	625	350	300	325	250
15	274.8	280	270	260	200	356.48	290	240	250	250	500	350	300	325	250
ค่าเฉลี่ย	330	260	273	268	196	372	275	273	285	236	620	305	308	313	282
SD	83	33	24	33	20	66	29	27	21	23	65	25	18	25	26

ตารางภาคผนวก ค-27 ปริมาณซีไอดี (mg/L) ของมูลสุกรกับใบปาล์มที่อัตราส่วนและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรอน

วันที่	TS = 5%					TS = 10%					TS = 20%				
	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100	100:0	90:10	80:20	70:30	0:100
1	113	180	200	240	160	240	200	240	240	150	400	250	300	280	275
2	189	180	200	240	160	240	200	240	240	150	400	250	300	280	275
3	217	240	180	200	150	147	160	225	225	125	425	275	275	300	300
4	236	240	180	200	150	147	160	225	225	125	425	275	275	300	300
5	240	160	160	180	175	257	175	200	200	175	420	200	280	250	225
6	134	160	160	180	175	257	175	200	200	175	420	200	280	250	225
7	134	160	180	180	175	169	175	200	200	175	380	200	280	250	225
8	113	140	200	200	180	169	200	175	150	200	380	225	225	265	200
9	113	140	200	200	180	220	200	175	150	200	375	225	225	265	200
10	151	180	160	180	160	195	150	160	180	150	375	250	250	280	225
11	149	180	160	180	160	195	150	160	180	150	350	250	250	280	225
12	179	150	220	160	180	140	175	180	200	120	350	245	275	225	200
13	179	150	220	160	180	140	175	180	200	120	375	245	275	225	200
14	200	140	180	175	150	196	195	160	175	175	375	225	225	250	225
15	200	140	180	175	150	196	195	160	175	175	360	225	225	250	225
ค่าเฉลี่ย	170	169	185	190	166	194	2685	2880	2940	2365	387	236	263	263	235
SD	44	33	21	24	13	42	18	29	28	27	26	24	27	23	35

ภาคผนวก ง
วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ ง-1 ผลของดังปฏิกิริยามีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของ
มูลสุกรกับเศษอาหารที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.001	0.013	0.000
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.080	0.004	0.084
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.005	0.009	0.006
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.638	0.841	0.085
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.962	0.428	0.745
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.989	0.860	0.797

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ง-2 ผลของถึงปฏิกรณ์ที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของ
มูลสุกรกับไบโพลีเมอร์ที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.087	0.270	0.148
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.694	0.132	0.362
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.008	0.000	0.180
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.893	0.801	0.835
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.843	0.718	0.947
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.713	0.786	0.976

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ง-3 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลาย
รวมของมูลสุกรกับเศษอาหาร

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$	
	ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน	ถึงปฏิกรณ์ เมมเบรน
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.013	0.064
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.151	0.815
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.880	0.001
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.012	0.002
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.938	0.424
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.323	0.239

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ง-4 เปรียบเทียบผลของแต่ละปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรในระบบ
การย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหาร

ตัวแปร	เปรียบเทียบ TS	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$	
		ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน	ถึงปฏิกรณ์ เมมเบรน
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	5% 10%	0.169	0.640
	5% 20%	0.606	0.157
	10% 20%	0.109	0.162
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	5% 10%	0.527	0.944
	5% 20%	0.887	0.939
	10% 20%	0.167	1.000
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	5% 10%	0.976	0.924
	5% 20%	1.000	0.002
	10% 20%	0.950	0.025
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	5% 10%	0.968	0.896
	5% 20%	0.030	0.025
	10% 20%	0.042	0.005
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหย ง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	5% 10%	0.983	0.732
	5% 20%	1.000	0.312
	10% 20%	0.989	0.990
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	5% 10%	0.412	0.404
	5% 20%	0.985	0.241
	10% 20%	0.503	1.000

ตารางภาคผนวกที่ ง-5 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลาย
รวมของมูลสุกรกับไบโพลัม

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$	
	ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน	ถึงปฏิกรณ์ เมมเบรน
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.679	0.490
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.513	0.285
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.691	0.124
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.767	0.555
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.682	0.877
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.355	0.564

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ง-6 เปรียบเทียบผลของแต่ละปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรในระบบ
การย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบโपाल์ม

ตัวแปร	เปรียบเทียบ TS	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$	
		ถึงปฏิกรณ์รวม 2 ขั้นตอน	ถึงปฏิกรณ์ เมมเบรน
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	5% 10%	0.876	0.836
	5% 20%	0.806	0.975
	10% 20%	0.993	0.371
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	5% 10%	0.999	0.511
	5% 20%	0.595	0.476
	10% 20%	0.588	0.993
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	5% 10%	1.000	0.638
	5% 20%	0.892	0.695
	10% 20%	0.852	0.103
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	5% 10%	1.000	0.916
	5% 20%	0.893	0.689
	10% 20%	0.907	0.903
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหย ง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	5% 10%	0.949	0.961
	5% 20%	0.766	0.968
	10% 20%	0.961	1.000
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	5% 10%	0.174	0.365
	5% 20%	0.684	0.837
	10% 20%	1.000	1.000

ตารางภาคผนวกที่ ง-8 ผลของโคซซับสเตรตที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของ
ที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์รวม 2 ชั้นตอน

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.000	0.000	0.000
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.334	0.217	0.257
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.190	0.071	0.001
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.040	0.169	0.002
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.014	0.001	0.008
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.544	0.022	0.089

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ๗-8 ผลของโคซซับสเตรตที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของ
ที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หมักแบบ

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.000	0.001	0.000
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.028	0.105	0.012
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.393	0.033	0.012
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.057	0.107	0.001
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.002	0.010	0.003
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.949	0.004	0.152

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 ผลของอัตราการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.949	0.951	0.494
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.189	0.663	0.086
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.595	0.677	0.663
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.143	0.041	0.017
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.000	0.002	0.000
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.027	0.220	0.000

ตารางภาคผนวกที่ ง-10 ผลของอัตราการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับเศษอาหารที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรน

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.404	0.537	0.882
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.143	0.700	0.014
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.849	0.944	0.925
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.313	0.000	0.189
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.004	0.164	0.000
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.037	0.202	0.007

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 ผลของอัตราการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบปาส์มที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอน

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.193	0.031	0.165
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.002	0.919	0.085
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.693	0.922	0.168
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.000	0.000	0.000
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.062	0.121	0.106
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.054	0.063	0.073

ตารางภาคผนวกที่ ง-10 ผลของอัตราการย่อยสลายร่วมของมูลสุกรกับไบโอปาส์ที่มีต่อตัวแปรในระบบการย่อยสลายร่วมของที่สัดส่วนของแข็งต่างๆ ในถังปฏิกรณ์หม่เบรน

ตัวแปร	นัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$		
	TS = 5%	TS = 10%	TS = 20%
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS removal)	0.156	0.046	0.203
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS removal)	0.047	0.407	0.194
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)	0.894	0.774	0.366
ปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน (Methane production)	0.000	0.031	0.001
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (Methane production per VS removal)	0.051	0.068	0.072
อัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด (Methane production per COD removal)	0.125	0.112	0.168

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัญชลี แทนนิต เกิดเมื่อวันที่ 26 มีนาคม พุทธศักราช 2528 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค ในปีการศึกษา 2551 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย