

ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมัก  
ไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง

นางสาวทวิรัตน์ สเลอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECTS OF MIXING TIME AND SLUDGE RECIRCULATION ON BIOGAS  
PRODUCTION FROM FOOD WASTE BY FULL-SCALE DRY ANAEROBIC DIGESTION  
SYSTEM

Miss Tawinun Saleard

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science  
(Interdisciplinary Program)  
Graduate School  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2011  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิต ก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศ แบบแห้งในขนาดใช้งานจริง
โดย	นางสาวทวิพันธ์ สเลอาด
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาสันต์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิทย์ ลือพร้อมชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.สมชาย ดารารัตน์)

ทวินันท์ สเลอาด : ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง. (EFFECTS OF MIXING TIME AND SLUDGE RECIRCULATION ON BIOGAS PRODUCTION FROM FOOD WASTE BY FULL-SCALE DRY ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 160 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นลักษณะถังสแตนเลสรูปทรงกระบอกแนวนอนมีปริมาตร 12 ลูกบาศก์เมตร ภายในมีใบพัดกวน ซึ่งในงานวิจัยแบ่งออกเป็นการทำงานทดลอง 2 ช่วงการทำงาน โดยช่วงการทำงานที่ 1 หาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วงการทำงานที่ 2 หาค่าเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วันของแต่ละการทำงาน

ผลการทดลองที่สภาวะคงตัวจากการทดลองหาอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าที่อัตราการเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 80.93 และ 82.91 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดร้อยละ 69.87 และ 71.92 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหียร้อยละ 82.50 และ 83.85 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าอัตราเวียนตะกอนมีผลต่อการกำจัดซีโอดี ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมด และยังพบอีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพคือ 0.69 และ 0.71 ลบ.ม.ต่อกก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเป็น 56.35 และ 60.90 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าที่อัตราเวียนตะกอนที่ 100 เปอร์เซ็นต์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด

จากการทดลองหาค่าเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 85.07, 87.35 และ 83.58 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากที่สุด ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าร้อยละ 74.85, 76.42 และ 78.29 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยมีค่าร้อยละ 85.40, 86.69 และ 87.68 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาการกวนเพิ่มมากขึ้นสามารถกำจัดปริมาณของแข็งและของแข็งระเหยได้มากขึ้น และยังพบอีกว่าเมื่อเปรียบเทียบเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ามีค่า 0.53, 0.69 และ 0.52 ลบ.ม.ต่อกก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเป็น 58.4, 61.6 และ 55.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สรุปได้ที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา..... 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 5187167020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : DRY ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM / SLUDGE RECIRCULATION

TAWINUN SALEARD : EFFECTS OF MIXING TIME AND SLUDGE RECIRCULATION ON BIOGAS PRODUCTION FROM FOOD WASTE BY FULL-SCALE DRY ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM. ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 160 pp.

This research aims to study the effects of mixing time and sludge recirculation on biogas production from food waste by a full scale dry anaerobic digestion system. The system used in the study was a horizontal cylindrical stainless steel tank with a volume of 12 m<sup>3</sup> and equipped with a paddle mixer. The research was divided into two experiments. The first experiment was studied about the sludge recirculation rate. The second experiment was to find the appropriate mixing time to produce biogas. The system was operated for approximately 30 days per each experiment.

The result of the experiment at steady state showed an efficiencies of COD removal to be 80.93% and 82.91% at a sludge recirculation rate of 50 and 100 percent (volume by volume), respectively. The efficiencies of TS removal were 69.87% and 71.92% and for TVS removal were 82.50% and 83.85 %, respectively. The sludge recirculation rate is effective to improve efficiencies of COD, TS and TVS removal. The biogas yield was 0.69 m<sup>3</sup>/kg COD removed for a recirculation rate at 50 percent and 0.71 m<sup>3</sup>/kg COD removed for a recirculation rate at 100 percent with methane percentages content of 56.35% and 60.90%, respectively. It can be concluded that the sludge recirculation rate of 100 percent can produce the highest biogas rate in this study.

The experiment of the influence of the mixing time on the biogas production with the mixing time at 30, 60 and 90 minutes per day and it was found that the efficiencies of COD removal were 85.07%, 87.35% and 83.58%, respectively. It shows that the mixing time at 60 minutes per day has the best organic removal rate. The efficiencies of TS removal were 74.85%, 76.42% and 78.29% and the efficiencies of TVS removal were 85.40%, 86.69% and 87.68 %, respectively, which shows that an increase in mixing time can enhance the effective of COD, TS and TVS removal significantly. The comparison of mixing time at 30, 60 and 90 minutes per day showed a biogas rate of 0.53, 0.69 and 0.52 m<sup>3</sup>/kgCOD removed and also production of methane at 58.4%, 61.6% and 55.9%, respectively. As a result, the mixing time of 60 minutes per day is most suitable for biogas production in this study.

Field of Study Environmental Science Student's Signature.....

Academic Year 2011 Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และทุนสนับสนุนในการทำวิจัยบางส่วน ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ในงานวิจัยได้สำเร็จออกมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิทย์ ลือพร้อมชัย และ ดร.สมชาย ดารารัตน์ ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน สำหรับทุนสนับสนุนโครงการศึกษาวิจัยพัฒนานี้

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีในการทำวิจัย ตลอดจนทุนจากภาควิชาที่สนับสนุนในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้พื้นที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ยาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจเสมอมา โดยเฉพาะคุณพ่อและคุณแม่ที่สนับสนุนด้านทุนทรัพย์ในการศึกษาตลอด 25 ปี พร้อมทั้งสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดชีวิตของข้าพเจ้าจนถึงทุกวันนี้

ท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนของข้าพเจ้าที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยกันตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มุลฝอย.....	4
2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	16
2.3 ก๊าซชีวภาพ.....	30
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	33
2.5 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง.....	52
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	59
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	59
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	61
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง.....	65
3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล.....	67
3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ.....	68

4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	69
	4.1 การเริ่มต้นระบบ.....	69
	4.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของเศษอาหาร.....	70
	4.3 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบ.....	71
	4.4 ผลการทดลองช่วงที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาหาอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	73
	4.5 ผลการทดลองช่วงที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาหาเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	99
	4.6 ปริมาณการใช้ไฟฟ้า.....	132
5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	133
	รายการอ้างอิง.....	135
	ภาคผนวก.....	143
	ภาคผนวก ก.....	144
	ภาคผนวก ข.....	157
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	160



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทกิจกรรมหรือสถานที่ของแหล่งที่มาและชนิดของมูลฝอยที่เกิดขึ้น.....	5
2.2	ปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการเก็บขนในปี 2550 – 2551.....	13
2.3	แสดงองค์ประกอบมูลฝอยของกรุงเทพมหานครปีงบประมาณ พ.ศ. 2548 – 2552.....	15
2.4	จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	24
2.5	จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน.....	27
2.6	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีขององค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	31
2.7	ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น.....	32
2.8	ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย.....	34
2.9	ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	40
2.10	ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีผลกระตุ้นและยับยั้งแบคทีเรีย.....	41
2.11	ปริมาณของโลหะหนักที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ..	42
2.12	ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ.....	43
2.13	ความเข้มข้นของซัลไฟด์และผลที่มีต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน.	44
2.14	สารอินทรีย์บางชนิดที่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาของแบคทีเรียเมทาโนเจน.....	47
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย.....	61
3.2	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ความถี่ และวิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ.....	68
4.1	ลักษณะสมบัติของน้ำหมักในถังหมักที่ได้จากการ Acclimatization ของจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	70
4.2	ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเศษอาหาร.....	71
4.3	แสดงค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดเฉลี่ย ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	87
4.4	แสดงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	88

ตารางที่		หน้า
4.5	แสดงค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซนต์.....	90
4.6	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบและ เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนเฉลี่ย ตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	94
4.7	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	96
4.8	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	98
4.9	ปริมาณเฉลี่ยของค่าซีโอดีในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ.....	114
4.10	ปริมาณเฉลี่ยของค่าของแข็งทั้งหมดในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ.....	116
4.11	ปริมาณเฉลี่ยของค่าของแข็งระเหยในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ.....	118
4.12	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบและเปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนเฉลี่ย ตลอดการทดลองที่เวลาการกวนต่างๆ.....	125
4.13	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่เวลาการกวนต่างๆ.....	127
4.14	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่เวลาการกวนต่างๆ.....	129
4.15	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระยะเวลา 24 ชม. ที่เวลาการกวนต่างๆ.....	130
4.16	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าและผลตอบแทนพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของแต่ละการทดลองที่เวลาการกวนต่างๆ.....	132

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการในปี 2551....	14
2.2	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์และกลุ่มแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	19
2.3	จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	20
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Partial Pressure ของ CO <sub>2</sub> (atms) กับความเข้มข้นของ ไบคาร์บอเนต (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต).....	36
2.5	ถังกวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม.....	50
2.6	ถังกวนผสมที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกิริยา.....	51
2.7	ถังกวนผสมที่อาศัยก๊าซที่เกิดขึ้นภายในถังเป็นตัวกวนผสม.....	52
2.8	รูปแบบถังหมักแบบแห้ง.....	53
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.2	ไดอะแกรมด้านซ้ายและด้านหน้าของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง.....	62
3.3	ด้านหน้าของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง.....	63
3.4	ด้านข้างของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง.....	63
3.5	ก๊าซมิเตอร์ที่เชื่อมต่อด้านข้างของถังหมัก.....	64
4.1	ปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบในแต่ละวันที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	72
4.2	ปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบในแต่ละวันที่เวลาการกวนต่างๆ.....	73
4.3	อุณหภูมิของน้ำหมักภายในระบบและอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบที่อัตรา เวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซนต์.....	75
4.4	พีเอชของเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบจากอัตราเวียน ตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซนต์.....	76
4.5	สภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	77
4.6	กรดอินทรีย์ระเหยของน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	79
4.7	อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบของ อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	80
4.8	ซีไอดีทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตรา เวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซนต์.....	82

ภาพที่	หน้า
4.9 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	83
4.10 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	84
4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำหมักที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	85
4.12 ค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	87
4.13 ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	89
4.14 ค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์.....	90
4.15 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ.....	91
4.16 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ.....	92
4.17 คุณหมุมิของน้ำหมักภายในระบบและคุณหมุมิของบรรยากาศโดยรอบที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	100
4.18 พีเอชของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	102
4.19 สภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการกวนต่างๆ.....	103
4.20 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการกวนต่างๆ.....	105
4.21 ปริมาณของกรดอะซิติก กรดไฟโฟอินิกและกรดบิวไทริกที่เวลาการกวนต่างๆ.....	106
4.22 อัตราส่วนระหว่างกรดไฟโฟอินิกต่อกรดอะซิติกที่เวลาการกวนต่างๆ.....	107
4.23 ค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการกวนต่างๆ.....	108
4.24 ซีไอดีทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	109

ภาพที่	หน้า
4.25 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบ ของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	110
4.26 ปริมาณของแข็งระเหยของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของ เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	111
4.27 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	112
4.28 ค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยที่เวลาการต่างๆ.....	112
4.29 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดซีโอดีที่เวลาการกวนต่างๆ.....	114
4.30 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับเวลาการกวนต่างๆ.....	115
4.31 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลาการกวนต่างๆ.....	117
4.32 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดกับเวลาการกวนต่างๆ...	117
4.33 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดที่เวลาการกวนต่างๆ.....	119
4.34 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยกับเวลาการกวนต่างๆ.....	119
4.35 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่เวลาการกวนต่างๆ.....	122
4.36 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของปริมาณก๊าซชีวภาพที่เวลาการกวนต่างๆ.....	122
4.37 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักขยะเปียกที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่เวลาการกวน ต่างๆ.....	123
4.38 สัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพกับเวลาการกวนต่างๆ.....	125
4.39 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ระยะเวลา 0, 0.5, 1, 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง ของ เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน.....	131

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของมูลฝอย โดยเฉพาะในเมืองขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากการอุปโภค และบริโภคของประชากรที่มากขึ้น ตามการขยายขนาดประชากรของเมืองนั้นๆ พร้อมกับความเจริญเติบโตทางสังคมและเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้ถูกทิ้งในรูปของมูลฝอย โดยในปี 2551 มีปริมาณมูลฝอยจากชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ 15.03 ล้านตัน หรือ 41,064 ตันต่อวัน เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ประมาณ 0.26 ล้านตัน หรือร้อยละ 1.82 ในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณมูลฝอยที่เก็บขนได้ประมาณวันละ 8,780 ตัน คิดเป็นร้อยละ 21 (สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย , 2551) ซึ่งมูลฝอยต่างๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วยอินทรีย์วัตถุ และ อินทรีย์วัตถุ (Organic and Inorganic Substances) แต่มูลฝอยที่อยู่ในรูปของอินทรีย์สาร (Organic waste) ไม่ว่าจะเป็น เศษอาหาร เศษพืช ผัก ผลไม้ ล้วนทำให้เกิดผลกระทบ เช่น แหล่งเชื้อโรคต่างๆ ก่อปัญหากลิ่นเหม็นและน้ำเสียที่จะมาจากการชะของมูลฝอยรอบๆ บริเวณ และที่สำคัญยังเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ เนื่องจากในกระบวนการจัดการมูลฝอยแบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลหรือการเทกองกลางแจ้ง ที่มีการแพร่ระบาดของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมูลฝอยโดยจุลินทรีย์ ซึ่งก๊าซชีวภาพดังกล่าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจัดเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ที่เป็นสาเหตุที่สำคัญในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบรรยากาศโลก โดยเฉพาะการเกิดก๊าซมีเทนซึ่งมีศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของบรรยากาศโลกได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 20 เท่า อีกทั้งการหมักทำปุ๋ยมีข้อเสียคือ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงรวมทั้งการขาดตลาดมารองรับมีข้อจำกัด สำหรับวิธีการเผาซึ่งเป็นทางเลือกในการกำจัดมูลฝอยอีกรูปแบบหนึ่ง สามารถลดปริมาตรมูลฝอยลงได้มากกว่าร้อยละ 70 - 90 แต่หากมูลฝอยที่มีความชื้นสูง เช่น เศษอาหาร จะทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมากขึ้น ซึ่งระบบการเผาดังกล่าวมีค่าก่อสร้างและค่าดำเนินการสูงมาก ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการกับมูลฝอยที่มีประสิทธิภาพและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งก็คือ การหมักมูลฝอยในสภาวะไร้อากาศ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการย่อยมูลฝอยโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ สามารถนำกลับมาเป็นพลังงานได้และยังทำให้มีอัตราการเกิดก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าวิธีการกำจัดมูลฝอยด้วยวิธีอื่นๆ

เทคโนโลยีระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งที่มีการเวียนตะกอน (Dry anaerobic digestion with sludge recirculation) เป็นระบบที่สามารถรับปริมาณของแข็งในของเหลวได้มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ (Total solid 20%) (Bolzonella *et al.*, 2003 ) แต่ระบบหมักไร้อากาศแบบเปียกสามารถรับปริมาณของแข็งในของเหลวได้น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งมีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดขยะอินทรีย์ที่มีสัดส่วนของแข็งค่อนข้างสูงจากโรงอาหารได้โดยตรง โดยอาศัยการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเศษอาหาร ให้มีขนาดเล็กลงกลายเป็นน้ำหมักชีวภาพและผลผลิตหลักที่ได้เป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนประมาณ 50 – 60 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในการหุงต้ม ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง ซึ่งการกวนเป็นขั้นตอนที่ทำให้อินทรีย์สารและจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดภาวะเสถียร และทำให้ไม่เกิดฝ้า (Scum) ที่ระดับผิว ที่จะกั้นไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้นไหลผ่านสะดวก (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551) ส่วนการเวียนตะกอนกลับมาผสมกับเศษอาหารที่ส่งเข้ามาที่หัวถัง จะทำให้มีการผสมระหว่างจุลินทรีย์กับเศษอาหารได้ดีขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการเลือกใช้เวลาการกวนและการเวียนตะกอนก็เป็นเงื่อนไขการทำงานที่มีความสำคัญ และจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเลือกใช้ให้เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด และช่วยแก้ไขปัญหาขยะล้นเมืองและปัญหาโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของเวลาการกวนและอัตราเวียนตะกอนต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารภายในระบบถังหมัก

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาการกวนและอัตราเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้จริงซึ่งขอบเขตของการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองในขนาดใช้จริง (full scale) โดยทำการทดลองและใช้เศษอาหารจากโรงอาหารของหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในช่วงปริมาณ 100 - 150 กิโลกรัมต่อวัน โดยใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนถังหมักเศษอาหารสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพรูปทรงกระบอกแนวนอน และส่วนเก็บก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอปลอย (floating drum)

1.3.2 ดำเนินการวิจัยหาเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพโดยทำการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

- 1) ช่วงการทดลองที่ 1 ศึกษาหาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้เวลาการกวน 15 นาทีต่อวัน และปรับให้ค่าอัตราเวียนตะกอนแตกต่างกันที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ)
- 2) การทดลองที่ 2 ศึกษาหาค่าเวลาการกวนกับอัตราเวียนตะกอนที่เหมาะสม โดยเลือกค่าการเวียนตะกอนที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 แล้วปรับเวลาการกวนแตกต่างกันที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

1.3.3 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าซีไอดีทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด สภาพต่างทั้งหมด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ รวมทั้งปริมาณก๊าซทั้งหมดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลของเวลาการกวนและอัตราเวียนตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง

2. สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารให้นำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของก๊าซหุงต้มในโรงอาหาร

3. ลดปริมาณขยะอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในโรงอาหารให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของปุ๋ยน้ำชีวภาพได้



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มูลฝอย

พระราชบัญญัติสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ให้คำจำกัดความมูลฝอย หมายถึง สิ่งต่าง ๆ ที่เราไม่ต้องการ ที่เป็นของแข็งหรืออ่อน มีความชื้น ได้แก่ เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร ถูพลาสติกภาชนะกล่องใส่อาหาร แก้ว มูลสัตว์ หรือซากสัตว์รวมตลอดถึงวัตถุอื่น สิ่งใดที่เก็บกวาดได้จากถนนตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น รวมถึงสถานที่สาธารณะ ตลาดและโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น อุจจาระและปัสสาวะของมนุษย์ ซึ่งเป็นสิ่งปฏิภูลจะมีวิธีจัดเก็บและกำจัดแตกต่างไปจากวิธีการจัดมูลฝอย (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

##### 2.1.1 แหล่งกำเนิดมูลฝอย

แหล่งกำเนิดของมูลฝอยแบ่งตามการใช้ประโยชน์ของที่ดิน ได้แก่

1. มูลฝอยจากบ้านพักอาศัย (Residential Waste)
2. มูลฝอยจากธุรกิจการค้า (Commercial Waste)
3. มูลฝอยทางการเกษตร (Agricultural Waste)
4. มูลฝอยจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Waste)
5. มูลฝอยจากโรงพยาบาล (Hospital Waste)

##### 2.1.2 ชนิดของมูลฝอย

การจำแนกชนิดของมูลฝอยมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมูลฝอยที่เกิดขึ้นเกิดจากปัจจัยหลายด้าน อีกทั้งสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้องจำแนกชนิดของมูลฝอยนั้นๆ เพื่อที่จะสามารถจัดการมูลฝอยนั้นอย่างถูกวิธี และถูกหลักวิชาการ ซึ่งชนิดของมูลฝอยนั้นจะมีค่าความสัมพันธ์กับการย่อยสลายของจุลินทรีย์แตกต่างกัน ดังนั้นนักวิชาการสิ่งแวดล้อมจำแนกชนิดของมูลฝอย ออกเป็นลักษณะต่างๆ กัน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทกิจกรรมหรือสถานที่ของแหล่งที่มาและชนิดของมูลฝอยที่เกิดขึ้น

แหล่งที่มา	ประเภทกิจกรรมหรือสถานที่	ชนิดของมูลฝอย
ที่อยู่อาศัย	บ้านพักเดี่ยว ห้องแถว อพาร์ทเมนต์ คอนโดมิเนียม ฯลฯ	เศษอาหาร ขยะแห้ง ขี้เถ้า ขยะพิเศษ
ย่านธุรกิจ	ร้านค้า ภัตตาคาร ตลาด สำนักงาน โรงแรม โรงพิมพ์ อู่ซ่อมรถ โรงพยาบาล สถาบันการศึกษา ฯลฯ	เศษอาหาร ขยะแห้ง ขี้เถ้า ขยะจากการทำลายตึกและการก่อสร้าง ขยะพิเศษ สารพิษ
เทศบาล	เช่นเดียวกับที่อยู่อาศัยและย่านธุรกิจ	เช่นเดียวกับที่อยู่อาศัยและย่านธุรกิจ
อุตสาหกรรม	การก่อสร้าง โรงทอผ้า การกลั่นน้ำมัน โรงเลื่อย การทำเหมืองแร่ โรงงานผลิตสินค้าต่างๆ ฯลฯ	เศษอาหาร ขยะแห้ง ขี้เถ้า ขยะจากการทำลายตึกและการก่อสร้าง ขยะพิเศษ สารพิษ
ที่สาธารณะ	ถนน ตรอกซอย ที่จอดรถ สนามเด็กเล่น สวนสาธารณะ ชายหาด สถานที่ท่องเที่ยว ฯลฯ	ขยะพิเศษ ขยะแห้ง
การประปาและกำจัดน้ำทิ้ง	โรงประปา โรงกำจัดน้ำทิ้งจากชุมชน โรงพยาบาล และอุตสาหกรรม	กากตะกอนจากขบวนการกำจัด
เกษตรกรรม	ไร่นา สวนผัก-ผลไม้ ฟาร์มโคนม ฟาร์มสัตว์อื่นๆ ฯลฯ	ผัก-ผลไม้ที่เน่าเปื่อย ขยะจากผลผลิตทางการเกษตร ขยะแห้ง สารพิษ มูลสัตว์

หมายเหตุ โดยทั่วไปแล้ว เทศบาล หมายถึง ย่านที่อยู่อาศัย และย่านธุรกิจรวมกัน

ที่มา: พัชรี หอวิจิตร (2529)

### 2.1.3 ผลกระทบของมลพิษต่อสภาวะแวดล้อม

มลพิษนับวันจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามจำนวนประชากร หากไม่มีการกำจัดให้ ถูกวิธีและเหมาะสมแล้วปัญหาความสกปรกและการเกิดมลพิษทั้งทางดิน น้ำ และอากาศ จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งทางตรงและทางอ้อม (สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2554) ดังนี้

#### 2.1.3.1 ผลกระทบต่อดิน (Soil Pollution)

มลพิษที่เทกองทิ้งไว้ จะทำให้พื้นดินสกปรกดินมีสภาพเป็นเกลือ ต่างหรือกรด หรือมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในดินตลอดจนทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของดินเปลี่ยนแปลงไป เช่น ไซเดียมทำให้เนื้อดินแตกร่วน นอกจากนี้ในกองมูลฝอยอาจมีโลหะหนักที่ปะปนมากับขยะ เช่นปรอท แคดเมียมตะกั่วหากมีการปนเปื้อนลงสู่ดินแล้วอาจมีการแพร่กระจายมาสู่มนุษย์ทำให้เกิดเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

#### 2.1.3.2 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำ (Water Pollution)

1. มลพิษที่ตกลงไปในแหล่งน้ำ ลำคลอง และท่อระบายน้ำ จะทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน การไหลของน้ำไม่สะดวกจึงเกิดสภาวะน้ำท่วมได้ง่าย ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงต้องมีการกำจัดขยะในคูคลองหรือท่อระบายน้ำอยู่เสมอ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว
2. ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ เช่น น้ำเน่า น้ำเป็นพิษ น้ำมีเชื้อโรคปนเปื้อน และน้ำที่มีคราบน้ำมัน ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้อุปโภคบริโภค สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะพืชและสัตว์น้ำ น้ำเสียที่เกิดจากกองขยะเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์สารอนินทรีย์ เชื้อโรค และสารพิษต่างๆ เจือปนอยู่ เมื่อไหลไปตามพื้นดินบริเวณใด ก็จะทำให้บริเวณนั้นเกิดความสกปรก ความเสื่อมโทรมของพื้นดินและอาจเปลี่ยนสภาพทำให้ดินมีคุณสมบัติเป็นด่างหรือกรด กรณีที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำก็จะทำให้คุณภาพน้ำเสีย

#### 2.1.3.3 ผลกระทบต่ออากาศ (Air Pollution)

มลพิษที่กองทิ้งไว้ในชุมชน หรือในแหล่งกำจัดซึ่งไม่มีการฝังกลบ หรือขณะเก็บขนไม่มีการปกปิดอย่างมิดชิด ขยะเหล่านั้นจะส่งกลิ่นเหม็นออกมาขึ้นส่วนของมลพิษจะปลิวในอากาศทำให้เกิดความสกปรกแก่บรรยากาศ ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ นอกจากนี้อีก

ประการหนึ่งการเผามูลฝอยทำให้เกิดควันและซีไ้ดำ การหมักและเน่าสลายของมูลฝอย จะก่อให้เกิดก๊าซพิษและกลิ่นเหม็น เนื่องจากขยะที่กองทิ้งไว้นานๆ จะมีก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมัก ได้แก่ ก๊าซชีวภาพ และก๊าซไข่เน่าซึ่งมีกลิ่นเหม็น

#### 2.1.3.4 ผลกระทบต่อทัศนียภาพ (Visual Pollution)

ปัญหามูลฝอยจากการทิ้งไม่เป็นระเบียบเรียบร้อย ทำให้เกิดความสกปรก ขาดความเป็นระเบียบเป็นที่น่ารังเกียจแก่ผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงรวมทั้งผู้พบเห็น ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการขาดความรับผิดชอบหรือจิตสำนึกที่ดีในการทิ้งมูลฝอยของประชาชน หรือความไม่เพียงพอของภาชนะรองรับมูลฝอย

#### 2.1.3.5 แหล่งเพาะพันธุ์และแพร่กระจายของเชื้อโรค (Breeding Places)

โดยเฉพาะมูลฝอยติดเชื้อจากสถานพยาบาล ซึ่งปะปนกับขยะทั่วไปทำให้ประชาชนที่ไปคุ้ยเขี่ยมูลฝอย (Scavenger) มีการสัมผัสกับเชื้อโรคที่ปนมากับมูลฝอย นอกจากนี้มูลฝอยเปียกที่มีแบคทีเรียทำหน้าที่ย่อยสลายมักจะมีเชื้อโรคจากกองมูลฝอยแพร่กระจายไปกับน้ำแมลงวัน แมลงสาบ และสุนัขที่มากุ้ยเขี่ยกองขยะซึ่งเป็นแหล่งที่อยู่และแหล่งอาหารของสัตว์เหล่านั้น เช่น เชื้อที่ทำให้เกิดโรคอหิวาต์ ไทฟอยด์ และโรคบิด

#### 2.1.3.6 เกิดเหตุรำคาญ (Nuisance) และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

เหตุรำคาญที่มาจากกองมูลฝอย เป็นผลมาจากการเกิดผลกระทบต่อทัศนียภาพ ก๊าซพิษ กลิ่นเหม็นเพราะขยะที่กองทิ้งไว้มักมีปัญหา จะมีขยะเปียก เศษอาหารเป็นองค์ประกอบอยู่ ทำให้เกิดการเน่าเสียหรือการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) ได้นอกจากนี้บางครั้งพบว่า เมื่อมีการกำจัดมูลฝอยโดยการเผาเป็นครั้งคราว (Open Dumping on land and Burning) มักจะมีเหตุรำคาญจากควันหรืออันตรายจากสารพิษที่มีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

## 2.1.4 วิธีการกำจัดมูลฝอย (Method of Refuse Disposal) (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2541)

การจัดการและกำจัดมูลฝอยที่ใช้กันอยู่ มีวิธีต่างๆ ดังนี้

### 2.1.4.1 การนำมูลฝอยไปเทกองกลางแจ้ง หรือการนำมูลฝอยไปทิ้งไว้ตามธรรมชาติ (Open Dump)

เทศบาล สุขาภิบาล ในประเทศไทย มีให้เห็นกันอยู่ทั่วไป เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ วิธีนี้มีปัญหา เรื่องกลิ่นรบกวนรุนแรง เป็นการรบกวนผู้ที่อาศัยใกล้เคียง ก่อปัญหาเกี่ยวกับทัศนียภาพ การแพร่กระจายของเชื้อโรค สัตว์แมลงต่าง ๆ เช่น แมลงวัน แมลงหวี่ และยังพบว่าเกิดปัญหาน้ำชะจากกองมูลฝอย เกิดความเน่าเสียแก่น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ซึ่งการจัดการกับมูลฝอยวิธีนี้เป็นวิธีเก่าแก่ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมานานแล้ว เป็นวิธีที่นำมูลฝอยไปกองทิ้งไว้ในที่ดินกว้าง ๆ เฉย ๆ แล้วปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติเป็นการกำจัดมูลฝอยที่ง่ายและลงทุนน้อย แต่ในปัจจุบันที่ดินแพงมาก พื้นที่สาธารณะ หรือที่รกร้างว่างเปล่าก็เกือบไม่หลงเหลืออยู่เลย วิธีนี้ต้องใช้พื้นที่มากด้วยและชุมชนเมืองยิ่งขยายตัวมากขึ้น การนำมูลฝอยไปกองทิ้งไว้ในพื้นที่ที่กว้างขวางเช่นนี้จึงไม่เหมาะสม เนื่องจากเศษวัสดุบางอย่างในกองมูลฝอยจะใช้เวลานานกว่าจะย่อยสลาย เช่น โฟมจะไม่ย่อยสลาย กระจังป้องกัน 1,000 ปี กระจังอลูมิเนียม 200 – 500 ปี กระจก 450 ปี ก้นบุหรี่ 12 ปี ถุงเท้าขนแกะ 1 ปี กระดาษ 2 – 5 เดือน ผ้าฝ้าย 1 – 5 เดือน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2541)

### 2.1.4.2 การนำมูลฝอยไปหมักทำปุ๋ย (Composting Method)

โดยแยกมูลฝอยอันตราย มูลฝอยติดเชื้อออกไปกำจัดเป็นพิเศษเสียก่อน ส่วนมูลฝอยพวกสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ง่าย พวกผัก ผลไม้ เมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้จะเกิดการเน่าเปื่อยสามารถนำมูลฝอยที่ผ่านการย่อยสลายนั้นมาใส่ปรับปรุงคุณภาพดินได้ ซึ่งสามารถนำมูลฝอยไปทำเป็นปุ๋ยสำหรับใช้บำรุงดินเพื่อการเกษตร โดยการย่อยสลายตามกระบวนการธรรมชาติ (Composting) เป็นการนำมูลฝอยประเภทอินทรีย์วัตถุไปรวมกันไว้ แล้วปล่อยให้มูลฝอยถูกย่อยสลายไปเองตามธรรมชาติ หรือโดยวิธีช่วยกระตุ้นให้มูลฝอยถูกย่อยสลายเร็วขึ้น การกำจัดมูลฝอยโดยวิธีนี้ใช้กันทั่วไปในยุโรปและเอเชีย ในประเทศไทยเองโดยเฉพาะกรุงเทพมหานครก็ใช้วิธีนี้คือการนำมูลฝอยไปรวมกันไว้ในแหล่งรวมมูลฝอย เช่นที่ รามอินทรา แขวงท่าแร้ง หนองแขม และชอยอ่อนนุช จนมูลฝอยเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงสภาพไป นอกจากนี้กรุงเทพมหานครยังใช้หลักการกำจัดมูลฝอยดังกล่าว โดยการนำมูลฝอยประเภทอินทรีย์วัตถุไปผลิตเป็นปุ๋ยจำหน่ายแก่ประชากรทั่วไป

การกำจัดมูลฝอยโดยวิธีนี้ พบว่าจะมีปัญหาอยู่ที่การแยกมูลฝอยประเภทอินทรีย์วัตถุออกมาจาก มูลฝอยประเภทอื่นๆ ซึ่งบริเวณที่รวมมูลฝอยอาจไม่อยู่ห่างไกลจากชุมชนและมูลฝอยที่นำมาของ รวมไว้ในปริมาณมากจะส่งกลิ่นเหม็น ทำให้แหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียงเน่าเสีย เกิดทัศนียภาพที่ ไม่น่ามอง และจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดมูลฝอยเป็นบริเวณกว้าง มูลฝอยที่เก็บมากอง รวมกันไว้นั้น มักจะมีอินทรีย์วัตถุปนอยู่มาก ซึ่งมูลฝอยประเภทนี้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ใน ธรรมชาติ จะเกิดปฏิกิริยาการ Organisms ซึ่งมีความร้อนเกิดจากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็น ความร้อนเกิดจากการสลายตัวของมูลฝอย สูงถึง 65 องศาเซลเซียส เมื่อทำการหมักเป็นเวลานาน ก็จะทำให้เชื้อโรคและพยาธิถูกทำลายไปได้ กับอีกกลุ่มคือ Anaerobic Organisms ก็มีความร้อน ที่เกิดจากปฏิกิริยา แม้จะไม่สูงมากนัก แต่เชื้อจุลินทรีย์และพยาธิต่างๆ ก็ตายได้เหมือนกัน ความร้อนนำไปใช้เป็นพลังงานได้ การหมักด้วย Aerobic Process จะต้องปรับปรุงสถานะของ มูลฝอยให้เหมาะสมก่อนหมัก เช่น ขนาดของมูลฝอยไม่ควรใหญ่กว่า 5 ซม. ความชื้นร้อยละ 40 – 65 และต้องมีการคัดแยกวัตถุพวกที่ไม่ย่อยสลายออกให้มากที่สุด ดังหมักจะต้องมีช่องให้อากาศ ผ่านได้โดยอาจจะต้องใช้เครื่องเป่าอากาศช่วย พร้อมทั้งจะต้องมีการกลับมูลฝอยให้สัมผัสอากาศ อยู่เสมอ จึงจะสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ระยะเวลาที่ใช้หมักประมาณ 5 – 20 วัน แต่การ หมักด้วย Anaerobic Process ไม่ต้องใช้อากาศช่วย จึงหมักได้ในถังปิดหรือในหลุมดิน ความชื้น ควรสูงเกินกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป ถ้าใช้ถังปิดจะต้องมีท่อระบายก๊าซออก มูลฝอยจากกสิกรรมและ พวกมูลสัตว์ จะได้ก๊าซชีวภาพซึ่งมีปริมาณมีเทนปนอยู่ร้อยละ 40 – 70 โดยปริมาตร ทำให้สามารถ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มแสงสว่าง ตู้เย็น เครื่องยนต์ได้

#### 2.1.4.3 การเผาด้วยความร้อนสูง หรือการกำจัดโดยใช้เตาเผา (Incineration)

มีข้อดี คือใช้พื้นที่น้อย และสามารถนำความร้อนที่เกิดจากการเผา มูลฝอยไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้อีกได้แก่ การนำไปต้มน้ำเพื่อนำเอาไอน้ำไปให้ความร้อนแก่อาคาร ประเภทต่าง ๆ และการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ราคาในการก่อสร้างและดำเนินการ เผาที่สูง และยังคงก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ การสร้างโรงงานเผามูลฝอย ( Incineration ) เป็นการเก็บมูลฝอยไปเผาในเตาเผาในโรงงานที่จัดสร้างขึ้นโดยใช้ความร้อนสูงประมาณ 1,700 – 1,800 องศาฟาเรนไฮต์ ( หรือ 676 – 1,100 องศาเซลเซียส ) ซึ่งจะทำให้มูลฝอยที่เผาไหม้ได้ ถูก เผาอย่างสมบูรณ์กลายเป็นขี้เถ้า ทำให้มูลฝอยลดลงได้ดีถึงร้อยละ 75 – 95 ซึ่งการกำจัดมูลฝอย โดยวิธีนี้ช่วยให้ลดปริมาณมูลฝอยลงได้มาก โดยเพียงแต่นำขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไปทิ้งใน

บริเวณที่จัดไว้ต่อไป (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2541) ข้อเสียของการกำจัดมูลฝอยโดยวิธีนี้คือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างโรงงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การดูแลรักษาค่อนข้างสูง จะต้องแยกมูลฝอยที่เผาไหม้ได้และที่เผาไหม้ไม่ได้ออกจากกัน และการเผามูลฝอยเองก็ย่อมมีอากาศเสียเกิดขึ้น การเผามูลฝอยด้วยเตาเผามูลฝอยเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้ในการกำจัดมูลฝอยพิเศษบางชนิด เช่น มูลฝอยที่มีการปนเปื้อนของเชื้อโรค และมูลฝอยที่มีส่วนที่เผาไหม้ได้เป็นส่วนมากปนอยู่ และเตาเผามูลฝอยนี้ยังเหมาะสำหรับการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลต่าง ๆ อีกด้วย (อรัลดา บุญแสน, 2537) มูลฝอยที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโดยวิธีเผาต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 50 มีสารที่เผาไหม้ได้อย่างน้อยร้อยละ 25 และมีสารที่เผาไหม้ไม่ได้ไม่เกินร้อยละ 60

#### 2.1.4.4 การฝังกลบอย่างถูกสุขอนามัยหรือถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill)

นิยมใช้วิธีนี้กันมาก เพราะค่าใช้จ่ายต่ำ บริเวณที่มีการฝังกลบอย่างถูกสุขอนามัยจะมีการปูพลาสติกพิเศษเพื่อป้องกันน้ำชะจากกองมูลฝอย เมื่อเทกองมูลฝอยแล้วก็จะกลบเสร็จในแต่ละวัน วิธีนี้จะช่วยลดกลิ่นรบกวน ลดการแพร่กระจายจากสัตว์น้ำ โรคต่าง ๆ ตลอดจนสามารถควบคุมน้ำชะจากกองมูลฝอยได้ การปรับปรุงพื้นที่ด้วยมูลฝอย (Sanitary Landfill) เป็นวิธีกำจัดมูลฝอยที่นิยมแพร่หลายโดยเฉพาะในยุโรปและสหรัฐอเมริกา เนื่องจากสามารถกำจัดมูลฝอย Mixed Refuse ได้โดยไม่ต้องคัดแยกมูลฝอย และสามารถปรับปรุงพื้นที่ให้เป็นพื้นที่ที่ดีมีประโยชน์ได้ ในการปรับปรุงพื้นที่ด้วยมูลฝอย จะทำได้โดยนำเอามูลฝอยมาบดอัดลงในดินด้วยรถแทรกเตอร์ แล้วใช้ดินกลบทับหน้ามูลฝอยพร้อมบดอัดทับให้แน่นอีกครั้ง ทำเป็นชั้นๆ จนสามารถปรับระดับพื้นดินได้ตามต้องการ ปล่อยให้มูลฝอยเกิดการสลายตัว ซึ่งสามารถใช้พื้นดินดังกล่าวนี้เป็นสนามเด็กเล่น สนามกีฬา ที่พักผ่อนหย่อนใจหรือก่อสร้างอาคารบางประเภท วิธีการฝังกลบมูลฝอยที่ดี คือ (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2541)

ก) แบบถมพื้นที่ (Area Method) เป็นการฝังกลบมูลฝอยให้พื้นที่ที่เป็นหลุมเป็นบ่อหรือเป็นพื้นที่ที่ต่ำอยู่ก่อนแล้ว และต้องการถมให้พื้นที่แห่งนั้นให้สูงขึ้นกว่าระดับเดิม เช่น บริเวณบ่อดินลูกรัง ริมตลิ่ง เขื่อนหรือบริเวณที่ดินถูกขุดออกไปทำประโยชน์อย่างอื่นมาก่อนแล้ว เป็นต้น ซึ่งการฝังกลบลงในพื้นที่เช่นนี้ ก็จะเทมูลฝอยลงไปได้เลยแล้วเกลี่ยมูลฝอยให้กระจายพร้อมทั้งบดอัดให้แน่น จากนั้นใช้ดินกลบแล้วจึงบดอัดให้แน่นอีกครั้งหนึ่ง

ข) แบบขุดเป็นร่อง (Trench Method) เป็นการกำจัดมูลฝอยแบบฝังกลบในพื้นที่ราบ จึงต้องใช้วิธีขุดเป็นร่องก่อน ซึ่งการขุดร่องต้องให้มีความกว้างอย่างน้อยประมาณ 2 เท่าของขนาดเครื่องจักรกลที่ใช้ เพื่อให้ความสะดวกในการทำงานของเครื่องจักร ส่วนความลึกขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดินจะลึกเท่าไรก็ได้ แต่ต้องไม่ให้ถึงระดับน้ำใต้ดิน ส่วนมากจะขุดลึกประมาณ 2 – 3 เมตร และต้องทำให้ลาดเอียงไปทางใดทางหนึ่งเพื่อที่จะไม่ให้น้ำขังในร่องเวลาฝนตก ดินที่ขุดมาจากร่องก็กองไว้ทางด้านใดด้านหนึ่งสำหรับใช้เป็นดินกลบต่อไป นอกจากนี้มูลฝอยก็ทำเช่นเดียวกันกับแบบถมพื้นที่ คือ เมื่อเทมูลฝอยลงไปร่องแล้วก็เกลี่ยให้กระจาย บดทับให้แน่น แล้วใช้ดินกลบและบดทับอีกครั้ง

#### 2.1.4.5 การนำมูลฝอยไปทิ้งทะเล (Dumping at Sea)

ตามปกติ ผิวดินของพื้นน้ำแหล่งต่างๆ โดยเฉพาะทะเล มหาสมุทร เป็นที่ทับถมสิ่งปฏิกูลตามธรรมชาติได้อย่างกว้างขวางอยู่แล้ว แต่เมื่อในปัจจุบัน พื้นผิวโลกที่เป็นพื้นดินนั้นวันจะมีน้อยลงและมีค่ามากขึ้น การนำมูลฝอยไปทิ้งในทะเลมหาสมุทร จึงนิยมทำกันในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ในสหรัฐอเมริกา (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2541)

#### 2.1.4.6 การนำมูลฝอยกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ (Re-cycle and Re-use)

มูลฝอยบางประเภทสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่น แก้ว กระดาษ พลาสติก โลหะต่างๆ ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดมูลฝอยและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งมูลฝอยที่ทิ้งในแต่ละวันจากอาคารสถานที่ต่างๆ นั้นมีมากมาย ยังนับว่ามีสิ่งของบางอย่างที่แม้ไม่มีประโยชน์สำหรับสถานที่หนึ่ง แต่อาจเป็นความต้องการของผู้อื่นได้ เช่น กระดาษทุกชนิด สามารถนำกลับไปทำเป็นกระดาษกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตกระดาษลงได้ส่วนหนึ่งและเป็นการสงวนทรัพยากรธรรมชาติได้ด้วย หรือแม้แต่กล่องกระดาษที่ทิ้งตามบริษัท ห้างร้าน ก็อาจนำไปใช้บรรจุสินค้าต่างๆ ตามท้องตลาดได้ เป็นต้น การนำวัสดุที่ทิ้งเป็นมูลฝอยกลับไปใช้นับว่าเป็นผลดีทั้งในแง่เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม แต่วิธีการคัดเลือกสิ่งของที่จะนำกลับไปใช้ได้ ก่อให้เกิดความล่าช้าในการขนถ่ายมูลฝอย เกิดความสกปรกในบริเวณที่มีการคัดเลือกสิ่งของจากมูลฝอย และผู้คัดเลือกมูลฝอยก็มักได้รับเชื้อโรคจากกองมูลฝอย (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2543)



#### 2.1.4.7 การนำมูลฝอยไปเป็นอาหารสัตว์ (Hog Feeding)

มูลฝอยจำพวกเศษอาหาร ผัก ผลไม้ จากอาคารบ้านเรือน ร้านอาหาร ภัตตาคาร ตลาดสด หากนำไปเลี้ยงสัตว์ เช่น หมู วัว เป็ด ไก่ แพะ แกะ ปลา จะเป็นการช่วยลดปริมาณมูลฝอยลงได้จำนวนหนึ่ง เพราะในแต่ละวันเศษอาหารจะมีปริมาณนับร้อยตัน การแยกมูลฝอยประเภทเศษอาหารเพื่อนำไปเลี้ยงสัตว์ จึงนับเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดได้มากที่สุด แต่ข้อเสียในการนำมูลฝอยพวกเศษอาหารไปเลี้ยงสัตว์นี้ อาจทำให้เกิดอันตรายแก่สัตว์เลี้ยงและผู้ที่เป็นโรคสัตว์เลี้ยงขึ้นได้ ถ้าในเศษอาหารมีพวกเชื้อโรคปะปนอยู่ การนำเศษอาหารที่ได้ไปให้ความร้อนก่อนจะทำให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น นอกจากการกำจัดมูลฝอยด้วยวิธีต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ในประเทศที่พัฒนาแล้วยังมีการกำจัดมูลฝอยอื่นๆ อีก เช่น การย่อยหรือการทำให้เศษอาหารเป็นของเหลวแล้วทิ้งลงในท่อน้ำทิ้ง ซึ่งเป็นการกำจัดมูลฝอยขั้นต้นจากบ้านเรือน การอัดสิ่งปฏิกูลที่เป็นของเหลวลงสู่ใต้ชั้นหิน ซึ่งมักเป็นการกำจัดสิ่งปฏิกูลจากโรงงานอุตสาหกรรม และการทิ้งสิ่งปฏิกูลลงสู่ถังรองรับที่จัดสร้างขึ้นเพื่อการจัดสิ่งปฏิกูลขึ้นโดยเฉพาะ (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2543)

#### 2.1.5 สถานการณ์ปริมาณมูลฝอย

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการผลิตสินค้าและบรรจุภัณฑ์ ในรูปแบบต่างๆ มากมาย เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น ซึ่งสินค้าและบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่มีการผลิตที่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์ที่กำจัดยาก อีกทั้งประชาชนไม่เห็นความสำคัญในการคัดแยกมูลฝอยและของเสียอันตรายชุมชน ณ แหล่งกำเนิดเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ทำให้มีปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั่วประเทศเพิ่มขึ้นทุกปีซึ่งจากรายงานสรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย โดยกรมควบคุมมลพิษ (2551) พบว่าปริมาณมูลฝอยของประเทศไทยยังคงเพิ่มสูงขึ้น ในปี 2551 มีมูลฝอยทั่วประเทศประมาณ 15.03 ล้านตัน หรือ 41,064 ตันต่อวัน (ยังไม่รวมปริมาณมูลฝอยก่อนนำมาทิ้งในถัง) ในเขตกรุงเทพมหานครมีมูลฝอยที่ได้รับการเก็บขน 8,780 ตัน ต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 21 ในขณะที่ในเขตเทศบาลและเมืองพัทยามีมูลฝอย 14,915 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 36 และในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลมีมูลฝอย 17,369 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 43 ของปริมาณมูลฝอยทั่วประเทศ เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมาจะพบว่ามูลฝอยมีปริมาณเพิ่มขึ้นประมาณ 0.27 ล้านตัน หรือร้อยละ 1.81 ตามการขยายตัวของชุมชนและจำนวนประชากร โดยในเขตเทศบาลมีปริมาณมูลฝอยเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 9.67 ในขณะที่มูลฝอยนอกเขตเทศบาลลดลงร้อยละ 4.57 ซึ่งเป็นผลมาจากการยกฐานะขององค์การบริหารส่วนตำบลจำนวน

343 แห่งขึ้นเป็นเทศบาล อัตราการผลิตมูลฝอยโดยเฉลี่ยทั่วประเทศในปี 2551 อยู่ที่ 0.64 กิโลกรัม ต่อคนต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

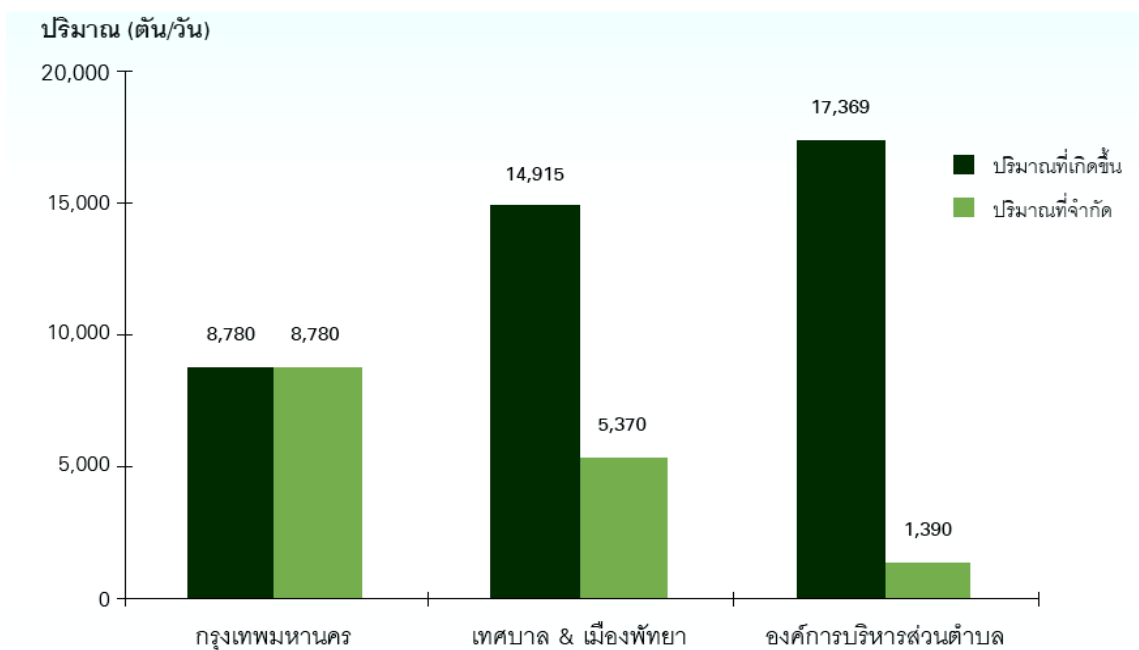
**ตารางที่ 2.2** ปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการเก็บขนในปี 2550 – 2551

พื้นที่	ปริมาณมูลฝอย (ตันต่อวัน)		เพิ่มขึ้น/ลดลง (ร้อยละ)
	ปี 2550	ปี 2551	
กรุงเทพมหานคร*	8,532	8,780	+ 2.91
เขตเทศบาลและเมืองพัทยา (1,620 แห่ง)	13,600	14,915	+ 9.67
เขตองค์การบริหารส่วนตำบล (6,157 แห่ง)	18,200	17,369	- 4.57
รวม	40,332	41,064	+ 1.81

หมายเหตุ : \*ข้อมูลการเก็บขนมูลฝอย รวบรวมจากสำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2550 – 2551

มูลฝอยทั่วประเทศได้รับการกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ 15,540 ตันต่อวันหรือร้อยละ 38 กรุงเทพมหานครดำเนินการเก็บขนมูลฝอยเองทั้งหมดและว่าจ้างบริษัทเอกชนเป็นผู้ดำเนินการกำจัดในเขตเทศบาลและเมืองพัทยาสามารถกำจัดมูลฝอยได้ 5,370 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 36 ของปริมาณมูลฝอยในเขตเทศบาล และในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลสามารถกำจัดมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาลได้เพียง 1,390 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของปริมาณมูลฝอยในเขตองค์การบริหารส่วนตำบล (ภาพที่ 2.1)



**ภาพที่ 2.1** ปริมาณขยะมูลฝอยที่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการในปี 2551

- ที่มา:** (1) ข้อมูลการเก็บขนขยะมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร รวบรวมจากสำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร, มกราคม 2552
- (2) ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยของเทศบาล เมืองพัทยา และ องค์การบริหารส่วนตำบล ประมาณการโดยกรมควบคุมมลพิษ, 2551

### 2.1.6 องค์ประกอบมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร

ปริมาณมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร 8,780 ตัน/วันและ 8,787 ตัน/วัน ในปี 2551 และ 2552 ตามลำดับได้มีการศึกษาองค์ประกอบมูลฝอยที่ศูนย์กำจัดมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร ที่อ่อนนุช สายไหม และหนองแขม ระหว่างปี พ.ศ. 2547 - 2552 (ตารางที่ 2.3) พบว่า ในปี 2552 มีวัสดุที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ถึงร้อยละ 60 ประกอบด้วยมูลฝอยประเภทหมักทำปุ๋ยซึ่งส่วนใหญ่เป็นขยะเศษอาหารกิ่งไม้และใบไม้ มีปริมาณสูงที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 50.01 และวัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิลใช้ใหม่ได้ร้อยละ 10.29 ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาหาวิธีการจัดการที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบมูลฝอยของกรุงเทพมหานครปีงบประมาณ พ.ศ. 2548 - 2552

หน่วย: ร้อยละ/Unit: percent

ประเภท/ใช้ประโยชน์ [Waste category/Use]	ปีงบประมาณ [Fiscal year]				
	2548	2549	2550	2551	2552
<b>ประเภทหมักปุ๋ย [Composting category]</b>	50.53	51.06	49.66	50.02	50.01
เศษอาหาร [Food waste]	44.32	44.99	42.11	41.95	44.34
ไม้และใบไม้ [Stick and leafs]	5.11	6.07	7.55	8.07	5.67
ประเภทอื่นๆ [others]	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>ประเภทเข้าสู่ขบวนการผลิตใหม่ [Recyclable category]</b>	9.69	10.44	13.68	9.93	10.29
กระดาษ [Recyclable paper]	0.72	1.96	2.32	0.35	1.19
พลาสติก [Recyclable plastic]	2.55	3.77	4.87	3.86	3.25
โฟม [Foam]	1.20	1.44	2.01	1.22	1.44
แก้ว [Glass]	3.16	1.65	2.72	2.55	2.70
โลหะ [Metal]	2.06	1.62	1.76	1.95	1.71
<b>ประเภทฝังกลบ [Landfill category]</b>	39.78	38.50	36.66	36.66	36.66
กระดาษ [Non-recyclable paper]	8.93	9.83	9.40	10.62	10.70
พลาสติก [Non-recyclable plastic]	24.46	21.26	19.63	20.00	19.18
หนังและยาง [Feather and rubber]	0.83	1.03	0.95	1.93	1.95
ผ้าและสิ่งทอ [Cloths and textiles]	4.58	5.2	5.28	5.31	5.52
หินและเซรามิก [Rocks and ceramics]	0.53	0.26	0.61	0.99	0.81
กระดูกและเปลือกหอย [Bones and shells]	0.45	0.92	0.79	1.21	1.54
<b>รวม [Total]</b>	100	100	100	100	100

หมายเหตุ: อื่นๆ หมายถึงมูลฝอยที่ไม่สามารถแยกประเภทได้เนื่องจากมีสภาพเริ่มย่อยสลายและ  
ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์วัตถุ

ที่มา: สำนักสิ่งแวดล้อม (2552)

เมื่อศึกษาถึงองค์ประกอบของมูลฝอยพบว่า ส่วนใหญ่เป็นมูลฝอยที่มาจากการบริโภคและกิจกรรมการดำรงชีวิตโดยมีองค์ประกอบของมูลฝอยประเภทเศษอาหารเป็นปริมาณมากถึงร้อยละ 44.34 ของขยะมูลฝอยกรุงเทพมหานคร (สำนักสิ่งแวดล้อม, 2552) ซึ่งแหล่งที่เกิดขยะประเภทเศษอาหารแหล่งใหญ่ๆ มาจากบ้านพักอาศัย ร้านค้าและตลาดสด เป็นต้น ลักษณะของขยะประเภทนี้เป็นมูลฝอยที่มีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง มีน้ำหนักมากและมักเกิดน้ำชะขยะจากบริเวณแหล่งพักมูลฝอยเพื่อรอการจัดเก็บ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บและการขนส่ง แต่อย่างไรก็ตามจากการที่มูลฝอยประเภทนี้มีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงและสามารถย่อยสลายได้ง่าย (Mohan และคณะ, 2009) แนวทางการกำจัดจึงมีความเหมาะสมในการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เช่น การทำปุ๋ยหมัก การย่อยสลายแบบไร้อากาศ การฝังกลบ เป็นต้น

สำหรับสถานการณ์พลังงานในอนาคตของประเทศไทยควรมีการนำมูลฝอยเหล่านี้มาเป็นพลังงานทดแทนเนื่องจากปริมาณมูลฝอยที่พบทั่วประเทศมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในแต่ละวันมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น โดยเฉพาะการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เนื่องจากมูลฝอยเหล่านี้ยังมีปริมาณสารอินทรีย์ที่คงเหลือในเนื้อขยะค่อนข้างสูง จึงควรที่จะนำสารอินทรีย์ที่เหลือมาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีมูลค่าและใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนต่อไปแทนการทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์เพื่อเป็นแนวทางในการรับมือกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหาขยะและปัญหาด้านพลังงานในอนาคตต่อไป

## 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

### 2.2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ ในสภาวะที่ไร้อากาศและเป็นสภาวะรีดิวิซ์ (อาริยา วิริชวรกุล, 2546) ดังสมการ (2.1)



ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศได้เป็นขั้นตอนดังนี้ (พัศตราภรณ์ จันทจรัสปัญญา, 2547)

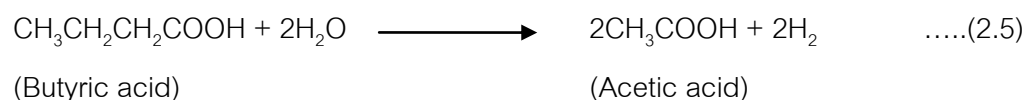
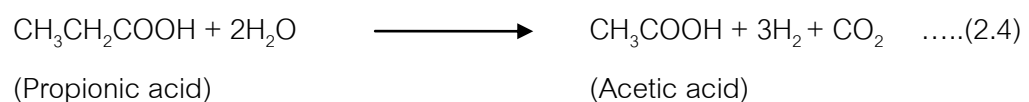
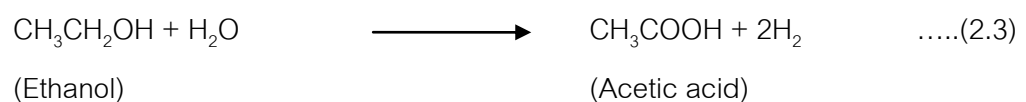
### ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันไปเป็นสารโมเลกุลเล็ก โดยเอนไซม์นี้ี้จะมีความเฉพาะเจาะจงต่อสารชนิดนั้นๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน รวมทั้งกรดชนิดต่าง ๆ เช่น กรดอะซิติก กรดโพไฟโอนิก กรดบิวไทริก กรดแลกติก และเอทานอล เป็นต้น ปฏิกริยาในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ จำนวนแบคทีเรียและสภาพแวดล้อมของระบบเช่น ค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ เป็นต้น ดังสมการ (2.2)



### ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นกรดอะซิติก (Acidogenesis and Acetogenesis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ถูกผลิตจากขั้นตอนแรกไปเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน หรือฟอร์มเมท และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ตัวอย่างปฏิกริยาในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นไปเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน (Mucha *et al.*, 1988) แสดงได้ดังสมการ (2.3) – (2.5) ต่อไปนี้

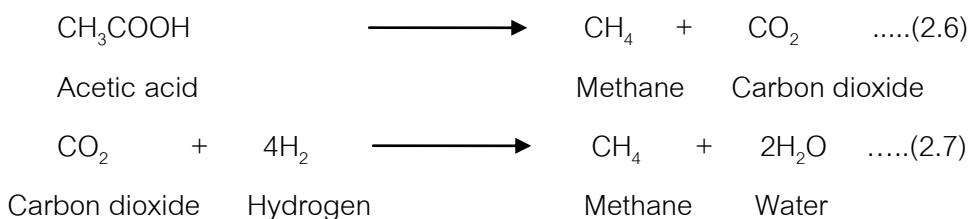


ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยและไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนได้

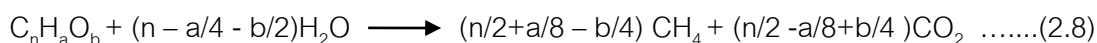
### ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ในขั้นตอนนี้ อะซิเตทฟอร์มเมท ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากขั้นตอนที่ 2 จะถูกใช้โดยแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) ย่อยสลายแล้วเปลี่ยนไปเป็นก๊าซต่าง ๆ ซึ่งก๊าซที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณสองในสามของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดมาจากการใช้อะซิเตท นอกจากนี้จะเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และบางส่วนอาจเกิดจากฟอร์มเมท เมทานอล (Methanol) และเมทิลเอมีน (Methylamine) และสารอื่น ๆ

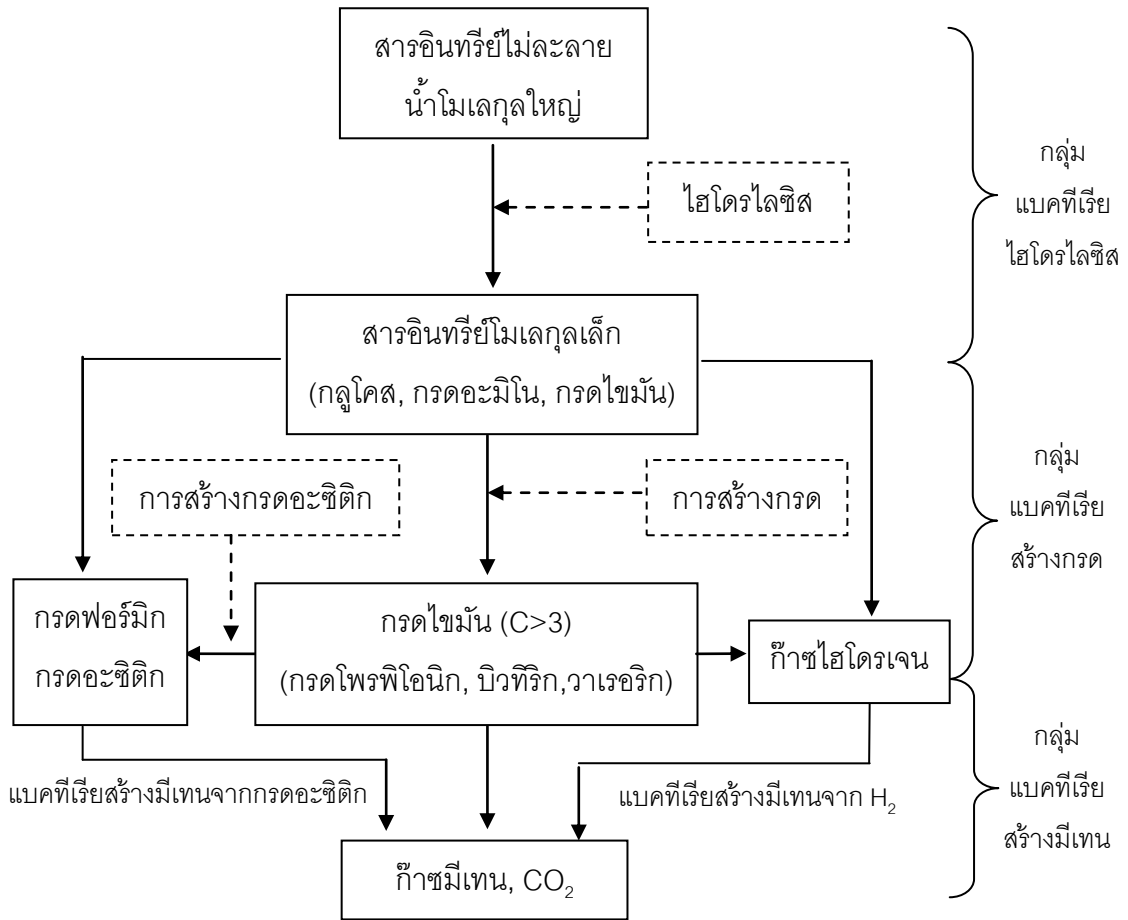
ปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งปฏิกิริยารีดักชันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยก๊าซไฮโดรเจนไปเป็นก๊าซมีเทน (Albagnac, 1990) แสดงดังสมการ (2.6) และ (2.7)



ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นหลักประมาณร้อยละ 75 - 80 ในองค์ประกอบของก๊าซทั้งหมด ถ้ารู้องค์ประกอบของสับสเตรทและให้สับสเตรทถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซทั้งหมดสามารถทำ mass balance ระหว่างองค์ประกอบของสับสเตรทกับก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกผลิตขึ้น เพื่อให้เข้าใจกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจากสับสเตรทมากขึ้น สามารถศึกษาได้จากสมการ (2.8) (พัสดราภรณ์ จันทจรัสปัญญา. 2547)



ร้อยละของสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนจากสารอินทรีย์ใน 3 ขั้นตอนสามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์และกลุ่มแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้อากาศ  
ที่มา: สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ (2552)

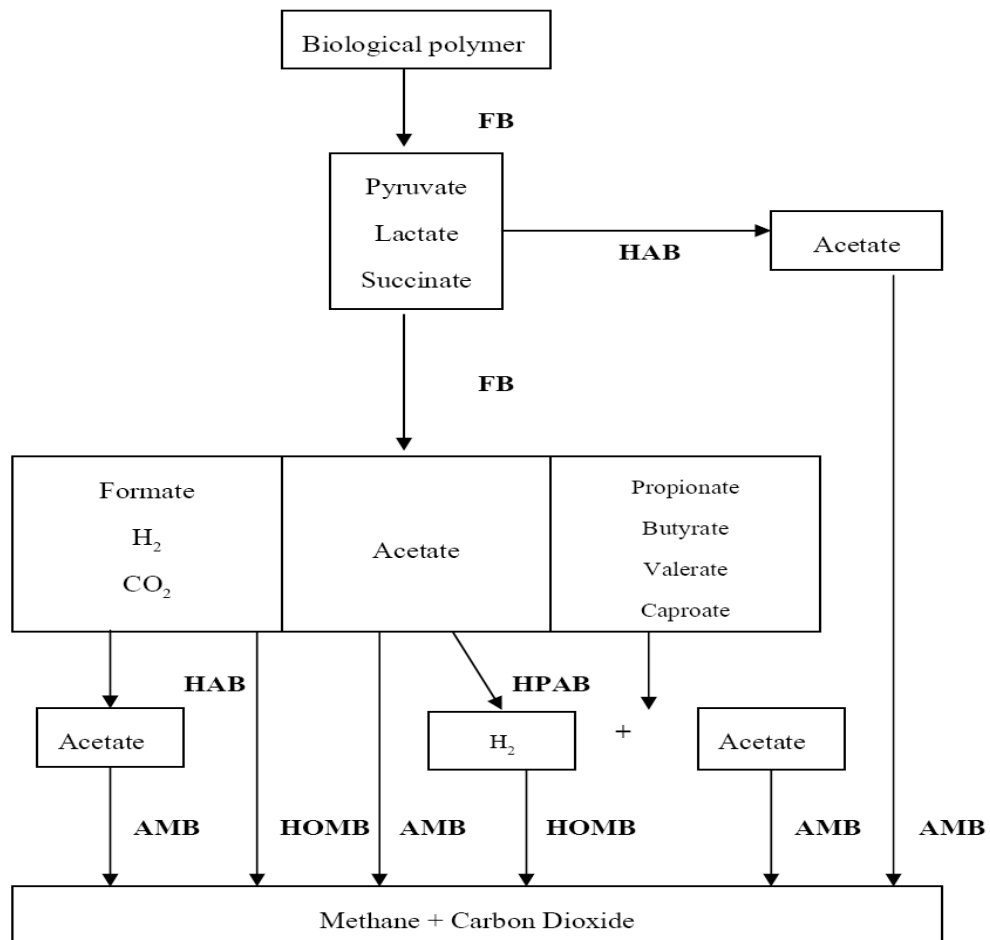
การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ มีข้อดีหลายประการคือ (Rao, et al., 2000)

1. ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศนี้ไม่ต้องการออกซิเจนเลยซึ่งต่างจากระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการให้อากาศกับระบบ
2. ได้ก๊าซมีเทนมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน
3. ตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินที่มีคุณภาพ
4. สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหการกำจัดขยะของเสียต่าง ๆ ได้
5. สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ โดยการเปลี่ยนก๊าซชีวภาพให้เป็นพลังงานนำกลับมาใช้ใหม่ได้



## 2.2.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (นพพร, 2529)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 นั้นจะต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดที่ทำงานแตกต่างกันเพราะขยะของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ



FB: Fermentative Bacteria, HAB : Homoacetogenic Bacteria

HPAB: Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria,

AMB: Acetoclastic Methanogenic Bacteria

HOMB: Hydrogen Oxidizing Methanogenic Bacteria

ภาพที่ 2.3 จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ที่มา: Garcia (1982)

### 2.2.2.1 แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (Non-methanogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดไม่สร้างก๊าซมีเทนมีความสำคัญต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศเป็นอย่างมาก โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างซับสเตรทที่แบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ด้วยการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียชนิดนี้มีหลายชนิดทั้งแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดและแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนได้บ้าง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด แบคทีเรียนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศตั้งแต่ขั้นตอนไฮโดรไลซิส ไปจนถึงขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Fermentative bacteria และ Acetogenic bacteria ตัวอย่างของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

#### 1) Fermentative bacteria

ทำหน้าที่ในขั้นตอน Hydrolysis และขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์และปล่อยออกมาในเซลล์เพื่อย่อยสลายสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น แป้ง โปรตีน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และไขมัน ให้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน กรดไขมัน เพื่อที่จะทำให้อินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ สารเหล่านี้จะผ่านเข้าไปในเซลล์และถูกเปลี่ยนไปเป็นสารต่าง ๆ เช่น อะซิเตท แลคเตท โพรพิโอเนท บิวทิเรต และเอทานอล เป็นต้น ผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น และสภาวะที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนต่ำ จุลินทรีย์จะผลิตสารอินทรีย์พวกอะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แต่ในสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซไฮโดรเจนสูง จุลินทรีย์จะผลิตแลคเตท โพรพิโอเนทและเอทานอล เป็นต้น

ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียใน Family Streptococcus, Enterobacteriaceae Bacillaceae และ Lactobacillaceae และแบคทีเรียในสกุล *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Eubacterium* และ *Lactobacillus* (Novaes, 1986)

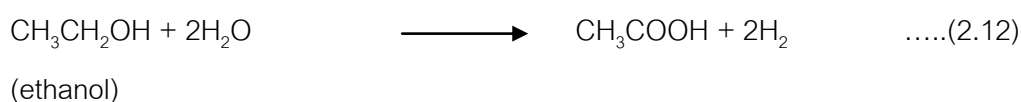
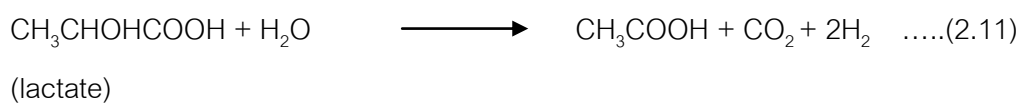
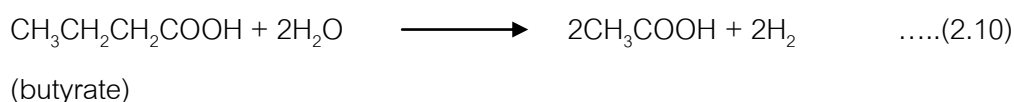
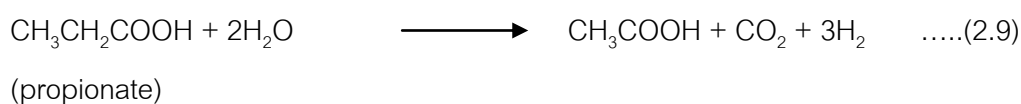
#### 2) Acetogenic bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซไฮโดรเจน เมทานอลและเมทิลลามีน แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสำคัญในการสร้างสมดุลระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอน

การสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกเพื่อให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ซึ่งจะช่วยลดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ โดยหากมีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและเกิดการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนรวมทั้งแบคทีเรียชนิดอื่นได้ ในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกนั้นได้รับผลโดยตรงจากความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน โดยสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ และสำหรับสลายกรดไพรูโวนิกให้เป็นกรดอะซิติกจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า  $9 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามซัสเตรทที่ใช้ดังนี้ คือ

(1) แบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Hydrogen producing bacteria)

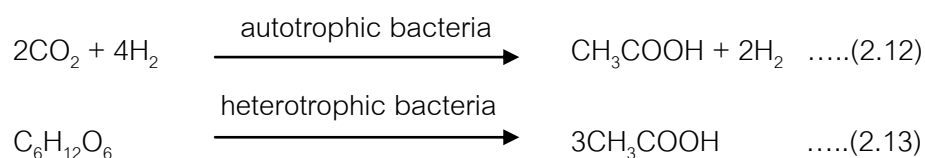
เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอล ให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Macleod *et al.*, 1990) และยังมีหน้าที่ที่สำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน พบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ โดยถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปริมาณมากจะทำให้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เพิ่มมากขึ้น pH ในระบบเป็นกรดจนกระทั่งไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกนี้ แต่ถ้าในระบบมีพวก Methanogenic bacteria อยู่ด้วย ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน จึงทำให้ในระบบมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนไม่สูงมากจนถึงระดับที่เป็นพิษได้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาการเกิดอะซิเตท ดังสมการ (2.9) – (2.12)



ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Desulfovibrio*, *Selenomonas*, *Syntrophomonas* และ *Ruminococcus* แบคทีเรียเหล่านี้มีอยู่ประมาณ  $10^6$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร

(2) แบคทีเรียผลิตอะซิเตออย่างเดี่ยว (Homoacetogenic bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตกรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปฏิกิริยาแต่จะมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและมีการใช้แหล่งพลังงานสารอินทรีย์คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาผลิตเป็นกรดอะซิติกภายใต้การเจริญเติบโตแบบออโตโทรฟิก (autotrophic) และยังสามารถใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนให้อิเล็กตรอนและรับอิเล็กตรอนภายใต้การเจริญเติบโตแบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) หรือเรียกว่าการหมัก (fermentation) ปฏิกิริยาการย่อยสลายทั้ง 2 แบบ ดังสมการ (2.12) และ (2.13)



ตารางที่ 2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

Microorganisms	Substrate degraded	Fermentation products	
1. Hydrolysis and acidogenesis			
<u>Aerobes</u>	<i>Pseudomonas</i>	nutritionally highly	lactate
	<i>Micrococcus</i>	versatile starch	lactate
<u>Facultative</u>	<i>Bacillus</i>	starch, maltose	lactate
<u>Anaerobes</u>	<i>Streptococcus</i>	maltose	lactate
	<i>Lactobacillus</i>	numerous sugars	acetate
	<i>Escherichia</i>	numerous sugars	acetate
	<i>Clostridium</i>	cellulose	acetate
<u>Anaerobes</u>	<i>Ruminococcus</i>	cellulose,	acetate, succinate
	<i>Bacteroides</i>	cellobiose	ethanol, hydrogen
	<i>Butyrivibrio</i>	starch	formate
	<i>Megasphaera</i>	cellulose	branched VFA
	<i>Selenomonas</i>	lactate, glucose	hydrogen
	<i>Desulfovibrio</i>	other sugars	acetate, propionate
	<i>Bifidobacterium</i>	lactate, malate	lactate, hydrogen
	<i>Propionibacterium</i>	proteins	acetate
	<i>Peptostreptococcus</i>	amino acids	propionate
	<i>Anaerovibrio</i>	amino acids	propionate
		proteins	VFA

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

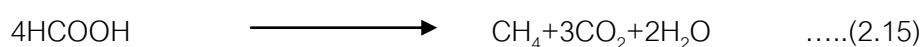
Microorganisms	Substrate degraded	Fermentation products
<b>2. Acetogenesis</b>		
<b>2.1 hydrogen producing acetogenic bacteria</b>		
<i>Desulfovibrio</i>	amino acids	acetate
<i>Selenomonas</i>	lactate, malate	acetate
<i>Ruminococcus</i>	lactate	acetate
<i>Clostridium</i>	malate	acetate
<i>Syntrophobacter wolinii</i>	proteins	acetate
<i>Syntrophomonas wolffii</i>	lactate, malate	acetate
<b>2.2 Homoacetogenic bacteria</b>		
<i>Clostridium aceticum</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	acetate
<i>C. formicoaceticum</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	acetate
<i>C. thermoautotrophicum</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	acetate
<i>Acetobacterium woodii</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	acetate
<i>Acetogenium kivui</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	acetate

ที่มา: Marty (1984)

### 2.2.2.2 แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria)

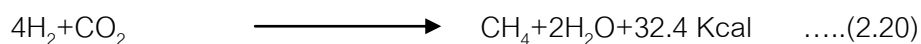
Methanogenic bacteria หรือ methanogen เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอน methanogenesis แบคทีเรียกลุ่มนี้จัดเป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง (strictly anaerobic bacteria) เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียนี้ สามารถเจริญได้ดีใน pH ที่เป็นกลางประมาณ 6.8 - 7.2 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ในการแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวน

เป็น 2 เท่าต้องใช้เวลา 3-5 วัน มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย หรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ภายนอก ช่วง pH ที่เหมาะสม เป็นต้นและมีข้อจำกัด คือสามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพียงไม่กี่ชนิด เช่น อะซิเตท และสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเท่านั้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอร์เมท เมทานอล และ เมทิลกลามีน ดังสมการ (2.14) – (2.19) และตารางที่ 2.5

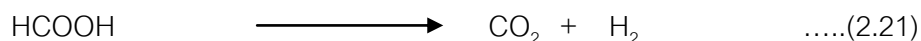


สามารถแบ่ง methanogenic bacteria ออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่  $\text{CO}_2$  reducing methanogenic bacteria ( $\text{H}_2$  oxidizing methanogenic bacteria) และ acetoclastic methanogenic bacteria โดยอาศัยหลักการใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน (ทรงพล, 2544; Mahendra *et al.*, 1991; John *et al.*, 1994)

1)  $\text{CO}_2$  reducing methanogenic bacteria หรือ  $\text{H}_2$  oxidizing methanogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือได้คาร์บอนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจำนวนมากมาจากก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ (2.20) โดยพบว่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนในระบบเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้



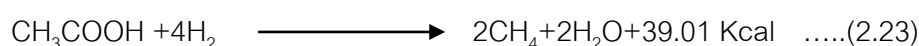
สำหรับสารอื่นแบคทีเรียนี้สามารถใช้ฟอร์เมทได้เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าฟอร์เมทสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ (2.21)



2) acetoclastic methanogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากหมู่เมทิลในโมเลกุลอะซิเตท ดังสมการ (2.22) โดยพบว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ มาจากการใช้อะซิเตทของแบคทีเรียนี้ (Zinder and Anguish, 1992)



ปฏิกิริยาด้านบนนี้ให้พลังงานไม่เพียงพอในการดำรงชีวิตของเซลล์ (พิสูจน์ตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิค) การเปลี่ยนอะซิเตทให้เป็นก๊าซมีเทนอาจเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยาที่มีก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการ (2.23)



ในปฏิกิริยานี้อะซิเตทเป็นสารตัวสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอนจากก๊าซไฮโดรเจน พลังงานที่ได้สูงกว่าและเพียงพอสำหรับการดำรงชีวิตของเซลล์

ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียในสกุล *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, *Methanothrix* และ *Methanomicrobium* (Koga et al., 1993; Griffin et al., 1998; Casserly and Erijman, 2003)

#### ตารางที่ 2.5 จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน

Species	Morphology	Substrate	Optimal Temperature (°C)	Optimal PH
<b>ORDER II. METHANOCOCCALES</b>				
<i>Family I. Methanococcaceae</i>				
<i>Genus I. Methanococcus</i>				
<i>M. maripaludis</i>	Regular to irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	35-39	6.8-7.2
<i>M. thermolithotrophicus</i>	Regular to irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	65	6.5-7.5
<i>M. vannielii</i>	Regular to irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	36-40	7.0-9.0
<i>M. voltae</i>	Regular to irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	35-40	6.7-7.4



ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Optimal Temperature (°C)	Optimal PH
<b>ORDER III. METHANOMICROBIALES</b>				
<i>Family I. Methanomicrobiaceae</i>				
<i>Genus I. Methanobacterium</i>				
<i>M. mobile</i>	Short rods	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	40	6.1-6.9
<i>M. paynteri</i>	Short irregular rods	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	40	6.5-7.0
<i>Genus II. Methanogenium</i>				
<i>M. aggregans</i>	Irregular cocci forming aggregates	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	35	
<i>M. bourgense</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	37	
<i>M. cariaci</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	20-25	
<i>M. fritonii</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	57	
<i>M. marisnigri</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	20-25	6.8-7.3
<i>M. olentangyi</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	37	7.0-7.5
<i>M. tatii</i>	Regular to Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	37-40	
<i>M. thermophilicum</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	55-58	7.0
<i>M. wolfei</i>	Irregular cocci	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	45	7.0
<i>Genus III. Methanospirillum</i>				
<i>M. hungatei</i>	Regular curved Rods to long Spiral Filament	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	30-40	6.7-7.4

## ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Optimal Temperature (°C)	Optimal PH
<i>Family II. Methanosarcinaceae</i>				
<i>Genus I. Methanosarcina</i>				
<i>M. acetivorans</i>	Irregular cocci forming cyste	Methanol Methylamines, Acetate		6.5-7.0
<i>M. barkeri</i>	Irregular cocci forming packets	Methanol Methylamines, Acetate		7.0
<i>M. mazei</i>	Irregular cocci forming packets	Methanol Methylamines, Acetate, H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	30-40	6.0-7.0
<i>M. vavvolata</i>	Irregular cocci forming cyste	Methanol Methylamines, Acetate, H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	40	
<i>Family III. Methanosarcinaceae</i>				
<i>Genus I. Methanophanus</i>				
<i>M. endosymbiosus</i>	Plate-shaped	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	32	
<i>M. limicola</i>	Plate-shaped	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	40	
<i>Family not assigned</i>				
<i>Genus I. Methanotherix</i>				
<i>M. concilii</i>	Rods to filaments	Acetate	35-40	
<i>M. sochngeii</i>	Rods to filaments	Acetate	37	7.4-7.8
<i>M. thermoactophila</i>	Rods to filaments	Acetate	65	

## ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Optimal Temperature (°C)	Optimal PH
<i>Genus III. Methanospirillum</i>				
<i>M. hungatei</i>	Regular curved Rods to long Spiral Filament	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> , Formate	30-40	6.7-7.4
<i>ORDER and Family not assigned</i>				
<i>Genus I. Methanolobus</i>				
<i>M. tindarius</i>	Irregular cocci	Methanol methylamines	25	

ที่มา : Vogel (1987)

### 2.3 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังอาจมีก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ปนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของการหมัก ซึ่งการที่ก๊าซมีเทนมีคุณสมบัติติดไฟได้เองจึงสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้

#### 2.3.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

สำหรับก๊าซชีวภาพที่ได้ออกมาที่ 0 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ มีองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ ดังนี้ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) 65-70 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และไอน้ำ 1 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนประมาณ 4.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่น 1.15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (นคร ทิพยาวงศ์, 2553) ดังตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากการที่ก๊าซมีเทนมีคุณสมบัติติดไฟได้  
 นี้เองจึงสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีขององค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	มีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ไฮโดรเจนซัลไฟด์
สถานะ :	ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซและของเหลว ภายใต้ความร้อน
สี :	ไม่มีสี	ไม่มีสี	ไม่มีสี
กลิ่น :	ไม่มีกลิ่น	ไม่มีกลิ่น	ก๊าซไข่เน่า
น้ำหนักโมเลกุล :	16.04	44.01	34.04
จุดเดือด (องศาเซลเซียส) :	-161.5	-79	-60.2
จุดหลอมเหลว/จุดเยือก แข็ง (องศาเซลเซียส) :	-182	-70	-85.7
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	0.466	1.101	1.45
ความดันไอ (มม.ปรอท) :	-	569 ที่ -82 องศา เซลเซียส	-
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1) :	-	1.5	1.21
ความสามารถในการละลาย น้ำที่ (กรัม/100 มล.) :	-	ละลายน้ำได้	ละลายน้ำได้
ค่าความเป็นกรด – ด่าง :	-	-	4.5 ที่ 20 องศาเซลเซียส
ข้อมูลทางกายภาพและเคมี อื่นๆ :	สารนี้สามารถ ละลายได้ในน้ำ แอลกอฮอล์และ อีเธอร์	ละลายได้ ไฮโดรคาร์บอน.ตัวทำ ละลายอินทรีย์	สารนี้ไวต่อความชื้น

ที่มา : ดัดแปลงจาก ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ (2554)

## 2.3.2 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

### 2.3.2.1 ประโยชน์ด้านพลังงาน

จากคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพข้างต้น สามารถนำก๊าซชีวภาพปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร มาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อนเทียบเท่า
ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46 กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67 ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60 ลิตร
น้ำมันเตา	0.55 ลิตร
ไม้ฟืน	1.50 กิโลกรัม

ที่มา: นคร ทิพย์าวงศ์ (2553)

ดังนั้นก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มได้โดยตรง เหมือนก๊าซแอลพีจี ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่าน ก๊าซชีวภาพยังสามารถให้พลังงานด้านแสงสว่างเมื่อนำมาใช้กับตะเกียงหรือเครื่องปั่นไฟรวมทั้งให้พลังงานความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ แทนน้ำมันได้อีกด้วย

### 2.3.2.2 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

ลดปัญหาของกลิ่นและก๊าซพิษ ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน ลดปัญหาการเกิดโรค ไม่เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ หรือแพร่พันธุ์เชื้อโรค และสัตว์นำโรค ลดการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก ลดปัญหาเรื่องคุณภาพในแหล่งน้ำธรรมชาติ ไม่เป็นต้นเหตุทำให้แหล่งน้ำสาธารณะเน่าเสีย

### 2.3.2.3 ประโยชน์ด้านการเกษตร

1. การทำเป็นปุ๋ย กากที่ได้จากการหมักแก๊สชีวภาพเราสามารถนำไปใช้ เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สด ๆ และปุ๋ยคอก ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่มีกากหมัก จะมีการเปลี่ยนแปลง สารประกอบไนโตรเจนในมูลสัตว์ ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

2. การทำเป็นอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมัก นำไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัด คือ ควรใส่ อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัม ต่อส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลด ต้นทุนการผลิตอีกด้วย

ซึ่งในการเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นมานั้นเกิดขึ้นจากการหมักแบบไร้อากาศโดย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยจะมีปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไป

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบ ไร้อากาศ

เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ประกอบด้วย จุลินทรีย์ 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกันคือ แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด และแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้าง ก๊าซมีเทน ดังนั้นในการควบคุมระบบให้มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทำให้ จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ในสภาวะที่สมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักที่สำคัญ 2 ประการ คือปัจจัย ทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factors) และปัจจัยทางด้านการทำงาน (Operational Factors)

### 2.4.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factor)

#### 2.4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง รวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตหรือเรียกว่า ปฏิกิริยาทางชีวเคมีอีกด้วย ปฏิกิริยา ทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีความ จำเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียภายในระบบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แบคทีเรียมีแนวโน้มที่จะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เพิ่มขึ้นด้วย แต่เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีความชอบอุณหภูมิในช่วงที่แตกต่างกัน ดังนั้น

การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดแบคทีเรียจึงมีความสำคัญเช่นเดียวกัน อุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 2.8 แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดและกลุ่มที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนส่วนใหญ่มีความชอบอุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกมากกว่าช่วงไซโคฟิลิก ในช่วงเทอร์โมฟิลิก อัตราเร็วของปฏิกิริยาและ ประสิทธิภาพของระบบจะมากกว่าในช่วงมีโซฟิลิก (Ahn and Forster, 2002) ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาณถังหมักลง (Pagilla et al. 2000; Zupancic and Ros. 2003) แต่ระบบหมักที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสีย คือ แบคทีเรียในช่วงเทอร์โมฟิลิกทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่าแบคทีเรียในช่วงมีโซฟิลิกทำให้การควบคุมระบบมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบและยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบ

แบคทีเรียเมทาโนเจนมีความอ่อนไหวตลอดเวลา อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพียง 2-3 °C จะมีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนโดยเฉพาะในช่วงฤดูหนาว การผลิตก๊าซที่ลดลงจะมีผลทำให้ค่า COD ของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจมีผลทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียต่อเนื่อง เช่นระบบเอเอสเกิดปัญหาจากภาวะสารอินทรีย์ที่สูงเกินไปได้

**ตารางที่ 2.8** ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

ชนิดของช่วงอุณหภูมิ	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่เหมาะสม (องศาเซลเซียส)
ไซโคฟิลิก	10-30	12-18
มีโซฟิลิก	20-50	25-40
เทอร์โมฟิลิก	35-75	55-65

**ที่มา:** ดัดแปลงจาก Metcalf and Eddy (1991)

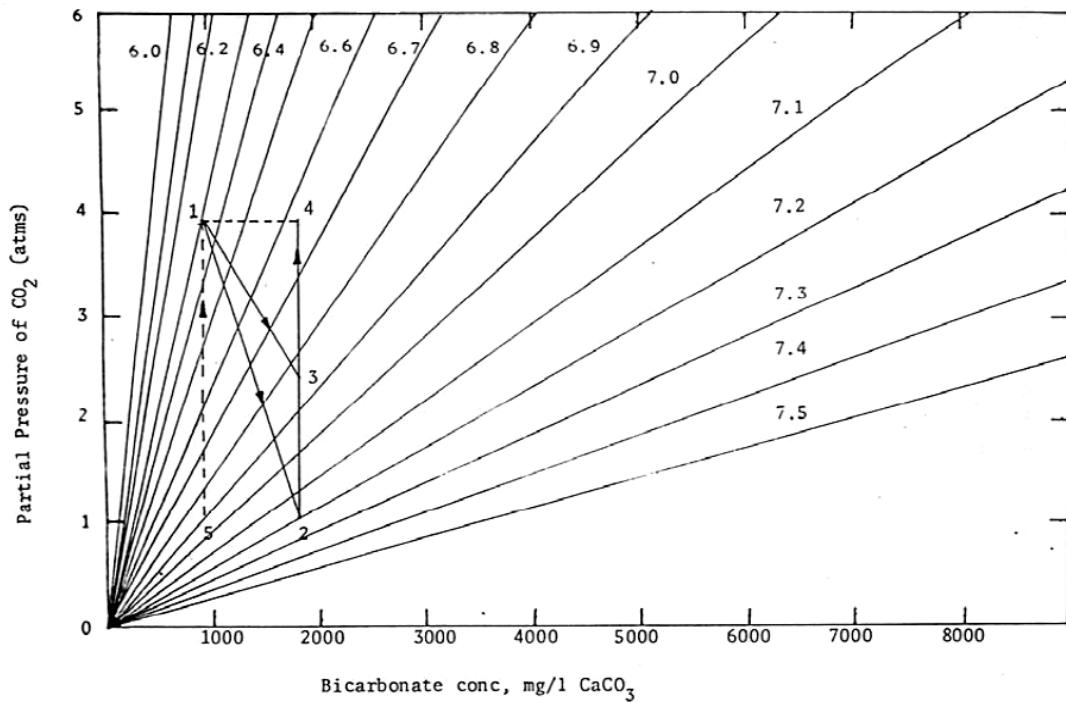
สำหรับประเทศไทยซึ่งมีสภาพค่อนข้างร้อนและมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20 – 35 °C จึงมีความเหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้อุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิกโดยไม่จำเป็นต้องให้อุณหภูมิเพิ่มแก่ระบบแต่อย่างใด

### 2.4.1.2 ค่าพีเอช (pH)

พีเอช สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะภายในถังหมักไม่ใช่อากาศได้ แต่ก็มีปัญหาคือ ในขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าพีเอชกลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของบัฟเฟอร์ (Buffering Effect) ของความเป็นต่างในถังหมักนั่นเอง ดังนั้นค่าพีเอชจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลช้าสำหรับการแก้ไขสภาวะในถังหมัก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพีเอชก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมระบบการหมักแบบไร้อากาศ

ในปี 1964 McCarty พบว่า ระบบจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชระหว่าง 6.6-7.6 สำหรับค่าที่เหมาะสมคือ 7.0-7.2 ถ้า pH มีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงและถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์พวกที่สร้างก๊าซมีเทนเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ใช้กรดอินทรีย์ระเหยไม่ทัน ทำให้ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยถูกสะสมเพิ่มมากขึ้น pH จึงลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้า pH ลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ Methanogenic Bacteria หยุดการเจริญเติบโต ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีเข้าไปควบคุมให้ pH อยู่ระหว่าง 7.0-7.5 โดยสารเคมีที่ใช้ในการเพิ่ม pH ให้แก่ระบบ ได้แก่ ปูนขาว  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  หรือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เป็นต้น ถ้าใช้  $\text{NaOH}$  ปูนขาวหรือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  สมดุลทางไอออนิกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้  $\text{CO}_2$  ถูกดึงออกจากบรรยากาศของก๊าซที่อยู่ในถังหมักเข้าไปทดแทนส่วนของ  $\text{CO}_2$  ในน้ำซึ่งถูกทำลายไปโดยสารละลายต่างที่เติมลงไปเพื่อสร้างความเป็นต่างคาร์บอนเนตของสารตัวอย่าง เช่น ถ้าสภาวะเริ่มต้นของถังหมักอยู่ที่ตำแหน่ง 1 ในภาพที่ 2.5 การเติม  $\text{NaOH}$  หรือ  $\text{Ca(OH)}_2$  จะทำให้ Partial Pressure ของ  $\text{CO}_2$  ลดลง และไบคาร์บอนเนตเพิ่มขึ้น จุดสมดุลก็จะเปลี่ยนไปอยู่จุดที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียจะสร้าง  $\text{CO}_2$  ขึ้นมาใหม่ทำให้ Partial Pressure ของ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ระดับเดิม จุดสมดุลจึงเลื่อนจากจุด 2 ไปอยู่ที่จุด 4 เป็นผลให้พีเอชลดลงทั้งที่ความเป็นต่างยังคงเดิมอยู่ ถ้า  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  มีจำนวนเท่ากันถูกเติมลงไปแทน จุดสมดุลจะเปลี่ยนจากจุด 1 ไปยังจุดที่ 3 ก่อนที่จะไปหยุดที่จุด 4 ด้วยเหตุผลเดียวกัน ถ้า  $\text{NaHCO}_3$  ปริมาณเท่ากันถูกใช้แทน สมดุลจะเลื่อนจากจุด 1 ไปยังจุด 4 โดยตรง ทั้งนี้เพราะว่า  $\text{CO}_2$  ในถังหมักไม่ถูกดึงไปใช้สร้างคาร์บอนเนต (เพราะเราเติมคาร์บอนเนตลงไปในตัวเอง) ดังนั้นการกำจัด  $\text{CO}_2$  ออกจากคาร์บอนเนตในถังหมักโดยตรงก็อาจช่วยให้พีเอชสูงขึ้นได้ ในกรณีนี้จุดสมดุลจะเลื่อนจากจุด 1 ไปยังจุด 5 แต่เมื่อแบคทีเรียสร้าง  $\text{CO}_2$  ขึ้นมาใหม่จุดสมดุลนี้จะเลื่อนกลับไปจุด 1 อีก การปรับพีเอชแบบนี้จึงไม่ใช่วิธีการถาวรและไม่อาจใช้ได้





ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Partial Pressure ของ  $\text{CO}_2$  (atms) กับความเข้มข้นของ ไบคาร์บอเนต (มก./ล.แคลเซียมคาร์บอเนต)

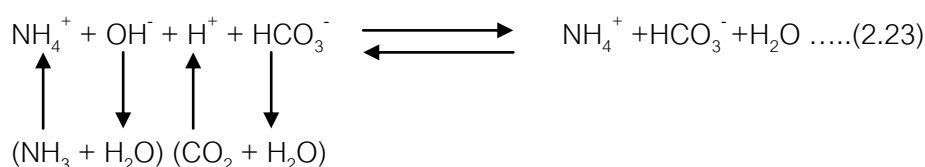
ที่มา: McCarty (1964)

ตัวอย่างข้างต้นแสดงว่าสารเคมีที่ใช้ควบคุมพีเอช อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ชนิดแรกสามารถให้คาร์บอเนตกับน้ำได้โดยตรง ชนิดที่สองใช้วิธีจับ  $\text{CO}_2$  หรือ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  และเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอเนตการเลือกสารเคมีชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องพิจารณา 2 อย่าง ปัจจัยข้อแรกเกี่ยวข้องกับการเติมสารเคมี สารเคมีที่จับ  $\text{CO}_2$  ทำให้พีเอชสูงเกินความต้องการก่อนเสมอ จากนั้น  $\text{CO}_2$  ที่สร้างใหม่จะทำให้ pH ลดลงไปจนถึงจุดที่ต้องการ ถ้าปริมาณของสารเคมีที่ต้องการใช้อยู่ในระดับสูง การเติมสารเคมีที่จับ  $\text{CO}_2$  ลงไปที่เดียว อาจทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นสูงจนถึงระดับที่อาจเป็นพิษได้ ด้วยเหตุนี้การเติมสารเคมีที่จับ  $\text{CO}_2$  จึงค่อย ๆ เติมทีละน้อยอย่างช้า ๆ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของพีเอชเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่วนการเติมสารประกอบไบคาร์บอเนตโดยตรงนั้นไม่มีผลแบบที่เกิดขึ้นกับสารจับ  $\text{CO}_2$  ทำให้มีความสะดวกกว่า ทำให้สามารถเติมสารเคมีและปรับพีเอชให้ละเอียดและแม่นยำ ปัจจัยข้อที่สองคือความสามารถในการละลายน้ำของสารที่เป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา การเติมปูนขาวให้กับถังหมัก จะทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากปูนขาวจะรวมกับ  $\text{CO}_2$  หรือ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ทำให้ได้สารไบคาร์บอเนตซึ่งมีขีดจำกัดในการละลายน้ำอยู่ประมาณ 500-1000 มล./ล. การเติมปูนขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งไม่

ละลายน้ำ เป็นเหตุให้เกิดการกำจัด  $\text{CO}_2$  โดยที่ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตไม่เพิ่มตามขึ้นด้วย จึงทำให้พีเอชไม่เสถียรภาพ ทั้งนี้ที่แบคทีเรียผลิต  $\text{CO}_2$  ขึ้นมาใหม่ พีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็วทันที

### 2.4.1.3 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นด่างเป็นค่าที่แสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ในการรองรับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบ ระบบที่มีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นสูงจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอย่างรวดเร็วและส่งผลต่อระบบได้สภาพต่างที่มีความสำคัญในระบบแบบไร้อากาศ คือ สภาพต่างในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งมีความเป็นด่างไบคาร์บอเนตนี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำทำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียไบคาร์บอเนต ดังสมการที่ (2.23)



โดยสำหรับระบบแบบไร้อากาศค่าสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนตนี้จะไม่มีส่วนที่เหมาะสมตายตัว เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในระบบ ซึ่งการสร้างความเป็นด่างตามธรรมชาตินี้ มีความสำคัญคือจะเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุมพีเอชให้อยู่ระหว่าง 6.8 ถึง 7.2 อย่างไรก็ตามเมื่อสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีความเข้มข้นมากนอกจากจะมีปริมาณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในระบบเพิ่มมากขึ้นแล้วยังมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์มากด้วยทำให้ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็จะถูกทำลายไปและถูกแทนที่โดย Volatile -Acid Alkalinity (VAA) ดังสมการที่ (2.24)



การทำลายความสามารถในการบัฟเฟอร์นี้ เป็นสาเหตุทำให้พีเอชลดลง ถึงแม้ว่าความเป็นด่างจะมีความจำเป็นในการควบคุมสภาวะสมดุลของการหมักก็ตาม แต่ความเป็นด่างอย่างเดียวไม่สามารถที่จะชี้ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการหมักได้นอกจากจะใช้เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างที่แสดงในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ควรจะสูงกว่าค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในรูปของ

แคลเซียมคาร์บอเนตเช่นเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของทั้งสองเท่ากันความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ก็จะลดลงเหลือเพียงเล็กน้อย ปัญหาที่จะเกิดขึ้นทันที (McCarty, 1964) ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ ในการควบคุมดูแลระบบจึงควรที่จะมีการพิจารณาถึงอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนต ในหน่วยมก./ล. ของกรดอะซิติกต่อ มก./ล. ของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งโดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศควรที่จะมีอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนตที่น้อยกว่า 0.4 และไม่ควรมากกว่า 0.8 เนื่องจากที่อัตราส่วนมากกว่านี้จะทำให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ เมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ค่าพีเอชของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้

#### 2.4.1.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายหรือ VFA ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรไพโอนิก กรดฟอรั่มิก เป็นต้น การที่พบกรดพวกนี้ในปริมาณมากมักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบเนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ระบบที่มีการสะสมของ VFA ในปริมาณที่มากในช่วงแรก VFA จะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง ต่อมาถ้ายังไม่มีการใช้หรือการกำจัด VFA ให้มีปริมาณน้อยลงอีก ค่าพีเอชของระบบก็จะลดต่ำลงและถ้าค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน ระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993) ซึ่งปริมาณกรดโพรไพโอนิกที่ใช้เป็นตัวทำนายการล้มเหลวของระบบนั้น ถ้ามากกว่า 3 ก./ล. บ่งชี้ถึงสภาพของระบบที่ต้องดูแลอย่างใกล้ชิด ส่วนกรดไอโซวาเรอริก และไอโซบิวทีริก ถ้ามีในปริมาณน้อยกว่า 5 มก./ล. แสดงว่าระบบอยู่ในสภาพปกติ แต่ถ้ามี 5-15 มก./ล. แสดงว่าระบบเริ่มมีปัญหา และถ้ามากกว่า 15 มก./ล. แสดงว่าระบบล้มเหลว (Hill and Bolte, 1989) จากการศึกษาของ Bajpai and Lannotti (1988) พบว่า กรดโพรไพโอนิกมีผลยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ ถ้าความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิกมากกว่า 20 มิลลิโมล มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนและยับยั้งการเกิดมีเทน โดยกรดอะซิติกเกิดจากการย่อยสลายกรดโพรไพโอนิก กรดอะซิติกจึงอาจเป็นตัวการที่เป็น Rate Limiting Step ของการเกิดก๊าซมีเทนเพราะจุลินทรีย์ที่ใช้กรดอะซิติกในการผลิตก๊าซมีเทนมีอัตราการเจริญต่ำ ดังนั้นถ้ามี

Methanogenic Bacteria อยู่มาก การใช้กรดอะซิติกจะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว โดยผลการยับยั้งการย่อยสลายกรดอินทรีย์จะส่งผลต่อการยับยั้งการย่อยสารโมเลกุลใหญ่ต่อไป

จังกุล (2537) ได้ศึกษาถึงผลของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยศึกษากรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรไพโอนิก ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้สารตั้งต้นและความเข้มข้นของสารตั้งต้น และศึกษาการใช้กรดอินทรีย์มากกว่า 1 ชนิดร่วมกับสารตั้งต้นต่อการเกิดก๊าซมีเทน โดยใช้จุลินทรีย์ที่มาจากถังหมักเปลือกสับประรด ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ผสม จึงใช้กรดอินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดเป็นสารอาหารในการผลิตมีเทน แต่ความเข้มข้นของกรดตั้งต้นมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซมีเทน โดยเฉพาะในกรณีของกรดอะซิติกพบว่าเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 40 มิลลิโมล อัตราการใช้กรดอะซิติกลดลงและความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิก และบิวทีริกไม่มีผลยับยั้งการใช้กรดอะซิติก แต่เนื่องจากกรดบิวทีริกและกรดโพรไพโอนิกเมื่อถูกย่อยสลายได้กรดอะซิติกทำให้ความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการย่อยกรดอะซิติกเอง ความเข้มข้นของกรดอะซิติกมากกว่า 3.3 มิลลิโมล จะยับยั้งการย่อยสลายกรดโพรไพโอนิกซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การย่อยกรดโพรไพโอนิกช้ากว่าการย่อยกรดอะซิติก จึงมักใช้กรดโพรไพโอนิกเป็นตัวบ่งชี้ความล้มเหลวของระบบ และสรุปได้ว่าความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิกสูงจะยับยั้งการเกิดก๊าซมีเทน

#### 2.4.1.5 สารอาหาร (Nutrients)

จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศต้องการสารอาหารหลายชนิด ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอาหารหลัก (Macronutrient) และสารอาหารรอง (Micronutrient หรือ Trace Element) โดยสารอาหารหลักได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) แสดงไว้ในตารางที่ 2.9 ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีน และฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นในการควบคุมสภาวะให้เหมาะสม จึงต้องใส่สารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เช่น ขยะของเสียเศษอาหาร ผักผลไม้ มีสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์แล้วแต่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่างไม่มี จึงจำเป็นต้องเติมสารอาหาร

เหล่านี้เพิ่ม นอกจากนี้สารอาหารรองนั้นจุลินทรีย์มีความต้องการน้อยมาก และในธรรมชาติก็มีเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์อยู่แล้ว

**ตารางที่ 2.9** ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

สารอาหาร	ความเข้มข้น (ก./ล.)	ผล
Fe <sup>2+</sup>	0.2	โครงสร้าง Biofilm การตกตะกอนของซัลไฟด์
Ni <sup>2+</sup>	0.01	สร้าง F420 Co factor ในพวก Methanogen
	0.006	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.02	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
Ca <sup>2+</sup>	0.03	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์

**ที่มา :** สุรพล (2530)

Mousa และ Forster (1998) รายงานว่าได้มีการเติม growth factors คือ สารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย (simple organic compounds) เช่น กลูโคส (glucose) และไกลซีน (glycine) ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป เพื่อยับยั้งกรดกาลิก (gallic acid) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นบางครั้งในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ที่มีผลในการยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้

#### 2.4.1.6 สารพิษ (Toxic)

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีหลายชนิด ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษไม่ได้หมายถึงสารอันตรายโดยตรงเท่านั้น สารบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นสารพิษได้ รวมถึงไอออนบวกและโลหะหนักต่าง ๆ ควรมีการตรวจวัดปริมาณสารพิษในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเพื่อหาทางแก้ไขหรือลดความเป็นพิษลงเช่น การตกตะกอนแยกโลหะหนักออกก่อน เป็นต้น จุลินทรีย์แบบไร้อากาศมีความทนทานต่อสารพิษมากกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น แต่หากระบบล้มเหลวลง เนื่องจากสารพิษระบบจะใช้เวลาในการฟื้นตัวนานเช่นเดียวกัน สารที่เป็นพิษหรือสารที่สามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ได้แก่

### 1) ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (light metal cation)

ไอออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือ การเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH ในระบบ จะมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีผลกระตุ้นและยับยั้งแบคทีเรีย

ไอออนประจุบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	ช่วงกระตุ้น	ช่วงยับยั้ง	ช่วงก่อให้เกิดความเป็นพิษ
$\text{Ca}^{2+}$	100-200	2,500-4,500	8,000
$\text{Mg}^{2+}$	75-150	1,000-15,000	3,000
$\text{K}^+$	200-400	2,500-4,500	12,000
$\text{Na}^+$	100-200	3,500-5,500	8,000

ที่มา : McCarty (1964)

นอกจากความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแล้วสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ หากมีไอออนประจุบวกของโลหะเบาสองชนิดในระบบอาจทำให้ระดับความเป็นพิษเปลี่ยนแปลงไปใน 2 ลักษณะคือ

- (1) มีฤทธิ์เสริมกัน (synergism) โดยไอออนประจุบวกชนิดหนึ่ง มีผลทำให้ไอออนประจุบวกอีกชนิดมีระดับความเป็นพิษรุนแรงขึ้นหรือมีการแสดงความเป็นพิษเฉพาะตัวของไอออนประจุบวกทั้งสองชนิด
- (2) มีฤทธิ์หักล้างกัน (antagonism) โดยไอออนประจุบวกชนิดหนึ่งมีผลทำให้ระดับความเป็นพิษของไอออนประจุบวกชนิดหนึ่งในระดับที่กระตุ้นแบคทีเรียแล้วส่งผลทำให้ผลของความเป็นพิษของไอออนประจุบวกอีกชนิดหนึ่งลดลง

## 2) โลหะหนัก (heavy metal)

โลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิเกิล โคบอลท์ ทองแดง และ โครเมียม เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้จะยับยั้งการเจริญเติบโตหรืออาจทำให้จุลินทรีย์ตายได้ อย่างไรก็ตามโลหะหนักที่เป็นพิษจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งโลหะหนักจะแตกตัวเป็นไอออนเท่านั้น McCarty (1964) พบว่าพิษของโลหะหนักจะรุนแรงมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักนั้น ตัวอย่างเช่น เหล็กและอลูมิเนียม จะไม่เป็นพิษเนื่องจากเกลือของโลหะทั้งสองมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในถังหมักแบบไร้อากาศเพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษนอกจากนี้โลหะหนักที่มี Valiancy สูงจะมีพิษมากกว่าโลหะหนักที่มี Valiancy ต่ำ เช่น  $\text{Cr}^{+6}$  มีพิษมากกว่า  $\text{Cr}^{+3}$  ตารางที่ 2.11 แสดงปริมาณของโลหะหนักที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศหมดประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.11 ปริมาณของโลหะหนักที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ )	163
Copper ( $\text{Cu}^{2+}$ )	170
Ferrous ( $\text{Fe}^{2+}$ )	1,750
Chromium ( $\text{Cr}^{6+}$ )	450
Mercury ( $\text{Hg}^{2+}$ )	1,365

ที่มา : Vogel (1987)

## 3) กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acids)

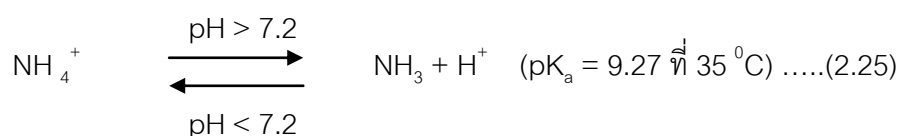
กรดอินทรีย์ระเหยเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน เพราะการที่เกิดกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พีเอชลดลง ซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ กรดอินทรีย์ระเหยที่ปริมาณความเข้มข้นสูงๆ จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในถังหมักแบบไร้อากาศ ทำให้จุลินทรีย์เกิดเสียสมดุลย์ และทำให้ระบบล้มเหลว อย่างไรก็ตามถ้ากำลังความเป็นบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ภายในถังหมักสูงพอที่จะรักษาพีเอช ให้ใกล้เคียง 7 หรือเท่ากับ 7 ปรากฏว่า กรดอินทรีย์ระเหยที่มี

ปริมาณความเข้มข้นสูงถึง 10,000 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติกจะไม่เป็นพิษโดยตรงต่อแบคทีเรีย McCarty and McKinney (1961b) ได้แสดงให้เห็นถึงผลของกรดอินทรีย์ระเหยที่มีต่อความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (Upflow Reactor) ถ้าหากกำลังความเป็นบัฟเฟอร์ภายในถังหมักไม่เพียงพอ จะทำให้พีเอชต่ำลงและแบคทีเรียจะทนอยู่ไม่ได้ พิษของกรดระเหยง่ายสามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีปรับสภาพ เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น และเพิ่มระยะเวลาเก็บน้ำเสียภายในระบบให้นานขึ้นหรือลดอัตราภาระสารอินทรีย์

#### 4) ก๊าซบางชนิด

##### (1) แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบแบบไร้อากาศ จะมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย คือ พวกโปรตีน หรือยูเรีย (Urea) ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยสารสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นกับพีเอช ดังแสดงในสมการที่ (2.25)



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกรณ์จะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกรณ์จะดำเนินไปทางขวา ซึ่ง  $\text{NH}_3$  จะยับยั้งการทำงานและเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศมากกว่า  $\text{NH}_4^+$  ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการจะรวมทั้ง  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{NH}_3$  ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อ pH สูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา : Lane, et al. (1984)



การลดพิษของแอมโมเนียในโตรเจนทำได้โดยการเจือจาง (Dilution) น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดหรืออาจกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

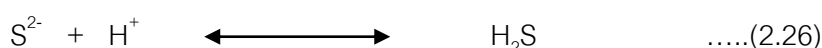
### (3) ซัลไฟด์ (sulfide)

ซัลไฟด์ที่พบในระบบแอนแอโรบิกนั้นมาจาก (1) น้ำเสียที่มีองค์ประกอบของซัลไฟด์หรือ (2) ปฏิกิริยาชีวเคมีในถังปฏิกรณ์จากการรีดักชันของซัลเฟต และสารประกอบซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ชนิดอื่น เช่น ซัลไฟด์ และไทโอซัลเฟต นอกจากนี้ยังได้จากการย่อยสลายโปรตีนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มก./ล. สามารถยับยั้งและเกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ดังตารางที่ 2.14

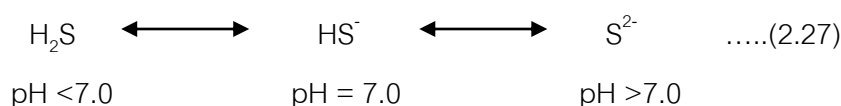
ตารางที่ 2.13 ความเข้มข้นของซัลไฟด์และผลที่มีต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ความเข้มข้นของซัลไฟด์ (มก./ล.)	การยับยั้งที่มีต่อแบคทีเรีย
100	ทนต่อการยับยั้งได้โดยมีการปรับตัวเพียงเล็กน้อยหรือไม่จำเป็นต้องมีการปรับตัว
100-200	อาจจะทนต่อการยับยั้งได้โดยมีการปรับตัว
> 200	ยับยั้งอย่างรุนแรง

นอกจากนี้ซัลไฟด์ยังสามารถอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H<sub>2</sub>S) ได้โดยรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน ดังสมการที่ (2.26)



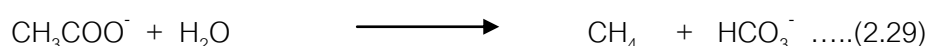
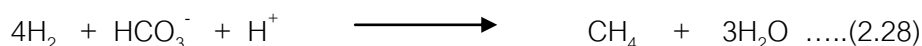
โดยที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นซัลไฟด์ได้ที่ค่าพีเอชมากกว่า 7.0 ดังสมการ (2.27)



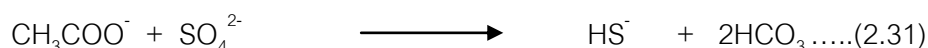
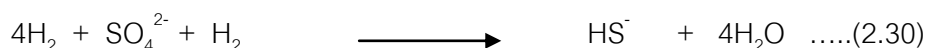
ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีลักษณะสมบัติเป็นกรดอ่อน ละลายน้ำได้ และสามารถเคลื่อนผ่านชั้นน้ำไปสู่ชั้นอากาศ ทำให้ก๊าซที่ได้จากระบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการกัดกร่อน การกำจัดซัลไฟด์ออกจากระบบสามารถทำได้โดยใช้วิธีเดียวกับการกำจัดโลหะหนัก โดยการเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปโลหะซัลไฟด์ สารประกอบของ

ซัลไฟด์อีกตัวหนึ่งที่สำคัญคือ ซัลเฟต (sulfate ion,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) โดยซัลเฟตไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยตรง แต่จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิง มีการแข่งขันกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในการรับอิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ดังสมการ (2.28) และ (2.29)

แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน



แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิง



จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิง ซึ่งมีการนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้โดยก๊าซไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน การมีซัลเฟตภายในระบบจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ คือ ระบบบำบัดแบบไร้อากาศทั่วไป หรือถึงผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิง ซึ่งจะมีการนำแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นเพื่อป้องกันการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้ ระบบควรที่จะมีอัตราส่วนของค่าซีไอดีที่เข้าระบบต่อปริมาณซัลเฟต ( $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ ) มากพอที่จะให้มีอิเล็กตรอนเหลือสำหรับใช้ในการผลิตก๊าซมีเทน

### 5) ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ทั้ง Fermentative และ Acetogenic bacteria ต่างก็ผลิตไฮโดรเจนและทำให้เกิดความดันไฮโดรเจนซึ่งมีผลต่อ Biochemical Pathways จากรายงานของ McCarty (1964) พบว่า จุลินทรีย์พวก Fermentative bacteria ผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติก ที่ความดันไฮโดรเจนต่ำ และผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ เอทานอล กรดไพรไพโอนิก และกรดบิวทริก ที่ความดันไฮโดรเจนสูง สารเอทานอล กรดไพรไพโอนิก และกรดบิวทริก จะถูก Acetogenic Bacteria เปลี่ยนไปเป็นมีเทน ถ้าความดันไฮโดรเจนไม่สูงจนเกินไปการเปลี่ยนรูปของกรดไพรไพโอนิกจะเกิดขึ้นที่ความดันไฮโดรเจนต่ำ

กว่า  $9 \times 10^{-5}$  บรรยากาศ แสดงว่าถ้าความดันไอสูง กรดไพรไพอินิก และกรดบิวทริกจะเกิดขึ้นและไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นมีเทน ไฮโดรเจนจะถูกใช้ไปโดย Methanogenic และ Sulphate-reducing bacteria แต่ถ้ากิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ใช้ไฮโดรเจนลดลงจะทำให้ความดันไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์โดยเฉพาะกรดไพรไพอินิก

#### 6) สารอินทรีย์ (Organic Material)

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไร้อากาศอิสระสารพวกนี้ เช่น กลุ่มแอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เป็นต้น ดังตารางที่ 2.14 ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ (Continuous Feed) เพื่อให้แบคทีเรียคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษสูงถึง 10,000 มก./ล. ก็ตาม หรืออาจแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

ตารางที่ 2.14 สารอินทรีย์บางชนิดที่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาของแบคทีเรียเมทาโนเจน

ชนิดของสารอินทรีย์	ความเข้มข้นที่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาร้อยละ 50 (มก./ล.)
Acetaldehyde	440
Acrolien	10
Bacitracin	20
Bromoethanesulfonate	20
Chloroform	15
Creolin (ส่วนผสมของ creosote, phenol และ resins)	1
Dinitrophenol	40
Dettol ( <i>p</i> -chlorometaxyleneol, terpinol และ isopropanol)	10
Ethylbenzene	340
Fluorinated hydrocarbon (CCl <sub>3</sub> F, CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	1
Formaldehyde	70
Long-chain fatty acids	5000
Monensin	2
Nitrobenzene	10
Tannins	700
Virgiamycin	10

ที่มา : Perkin และ Owen (1986)

#### 7) พิษจากสารอื่น ๆ

สารพิษอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำและอาจทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทน ได้แก่

(1) ออกซิเจน เป็นพิษอย่างมากแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เพราะจะทำการแตกของโมเลกุลของเอนไซม์ F420 Dehydrogenase

(2) สารรับอิเล็กทรอนิกส์อื่น เช่น ไนเตรท หรือซัลเฟต ถ้ามีอยู่ในปริมาณมากจะทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้ลดลง เนื่องจากเส้นทางการไหลของอิเล็กทรอนิกส์จะเปลี่ยนไปทั้งนี้เพราะแบคทีเรียที่ใช้ไนเตรทหรือซัลเฟตได้พลังงานมากกว่าจากการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่า ทำให้สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มอื่น แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงใช้สารอินทรีย์ได้ลดลง

## 2.4.2 ปัจจัยทางด้านการเดินระบบ (operational factor)

### 2.4.2.1 ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) และเวลากัก พักตะกอน (Solid Retention Time, SRT)

ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุม ประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ อัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักอินทรีย์สาร จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลง แต่ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้อยเกินไปจะมีผลทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้มาก จนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบในอัตราที่เร็วกว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลว นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสี้ยวอยู่ในถังหมัก สามารถหาได้โดยการหาปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสี้ยวที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา

เวลากักพักตะกอนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid Retention Time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวันในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ภายในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสี้ยว ( $SRT = HRT$ ) โดยปกติจะกำหนด SRT มีค่ามากกว่า 20 วันสำหรับระบบที่ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบผสมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  และในระบบบำบัดน้ำเสี้ยวแบบไร้อากาศแบบใหม่ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นอาจมีค่า SRT สูงมากกว่า 100 วัน และถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาพักตะกอนนานขึ้น และในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ภายในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสี้ยว ( $SRT > HRT$ ) ซึ่งสาเหตุที่สำคัญที่ระบบบำบัดน้ำเสี้ยวแบบไร้อากาศต้องการค่า SRT สูงเนื่องจากการสูญเสียแบคทีเรียหรือมวลชีวภาพในรูปของแข็งแขวนลอยออกจากถังปฏิกรณ์ เนื่องจากมวลชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะอยู่ในลักษณะกระจายตัวไม่รวมตัวกันเป็นฟล็อก

เมื่อระบบเอเอส ทำให้ในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบสูงถึงประมาณ 100 – 200 มก./ล.

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

สิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบเวลาเก็บกักคือ ความซับซ้อนของน้ำเสียหรือของเสียที่ทำการบำบัด ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ (เชื้อบริสุทธิ์/เชื้อผสม) และสภาพแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

#### 2.4.2.2 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR)

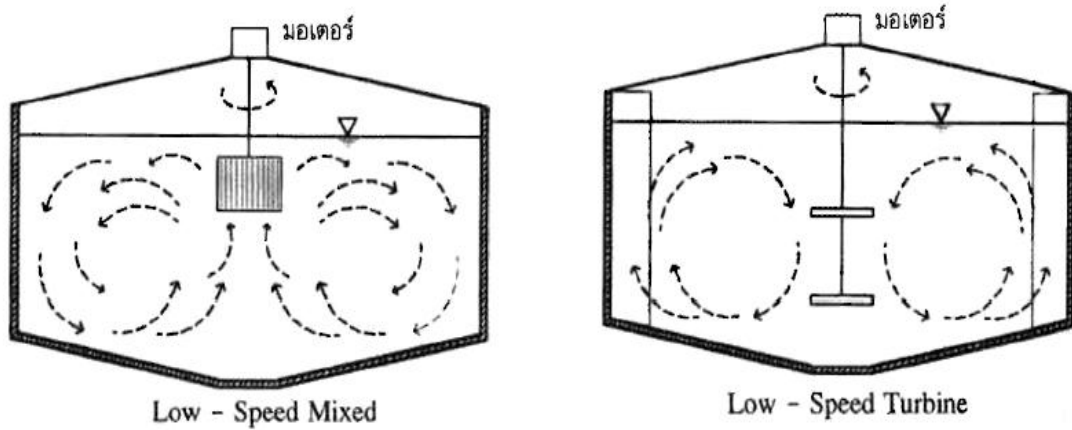
เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีความแตกต่างกันทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของเสียที่ไหลผ่านถังหมักหรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บ

#### 2.4.2.3 การกวน (Mixing)

การกวนผสมให้ของเสียและจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาผสมกันอย่างทั่วถึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อให้ปฏิกิริยาชีวเคมีในระบบเกิดสมบูรณ์มากที่สุด แต่ก็ก็เป็นสิ่งที่ยากมากที่จะทำให้เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม หากระบบบำบัดหรือถังปฏิกิริยามีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับของเสียหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดสูงขึ้น การกวนผสมของเสียในถังปฏิกิริยามีอยู่หลายวิธี แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่การกวนผสมจะต้องไม่ก่อให้เกิดสภาวะที่มีการเติมออกซิเจนเข้าสู่ระบบ การกวนผสมที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังนี้

##### 1) การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical mixing)

เป็นการกวนผสมโดยการใช้เครื่องมือกล เช่น ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่จะเลือกใช้ก็จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ใบพัดแบบ Puddle หรือ Turbine อย่างไรก็ตามในการกวนผสมให้น้ำเสียผสมเป็นเนื้อเดียวกันจะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง หากถังมีขนาดใหญ่มากจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นมากขึ้นเพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5

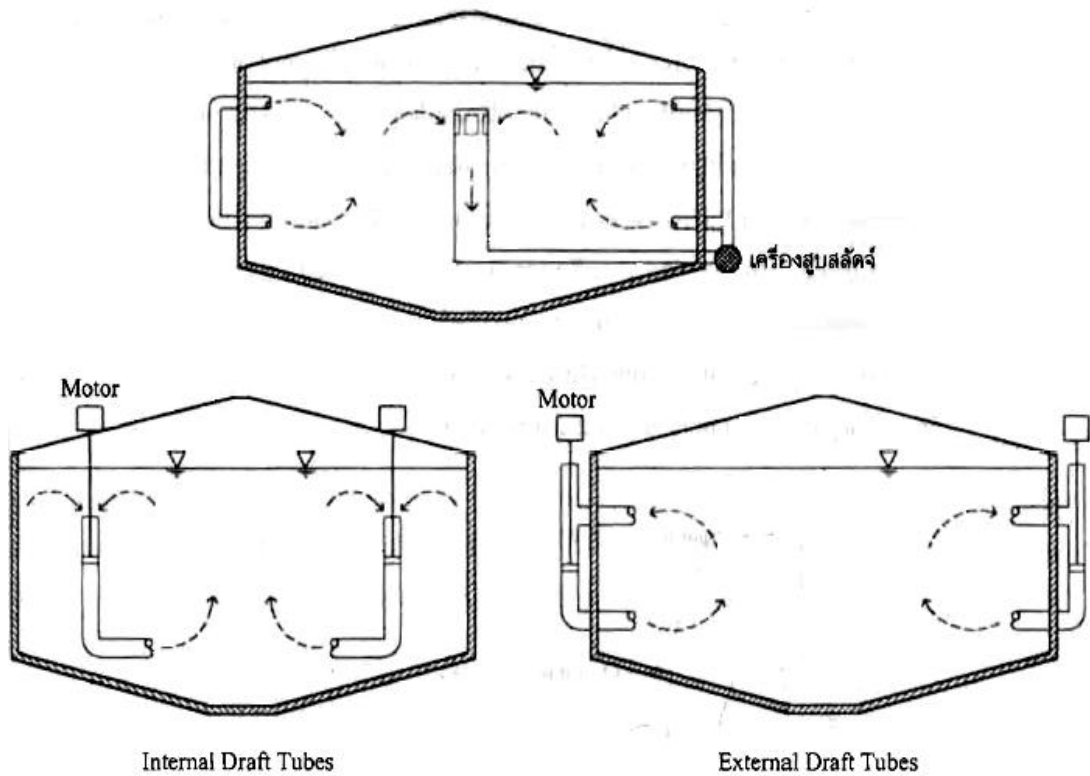


ภาพที่ 2.5 ถังกวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม

ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2552)

2) การกวนผสมโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater)

วิธีการนี้จะง่ายมากและใช้พลังงานไม่สูงนัก แต่ประสิทธิภาพในการกวนผสมจะไม่สูงมากนัก โดยเป็นการตั้งเครื่องสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ และป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการหมุนเวียนและกวนผสมของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ไปช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ และป้องกันการสูญเสียจุลินทรีย์ที่จะออกจากระบบ ดังแสดงภาพที่ 2.6



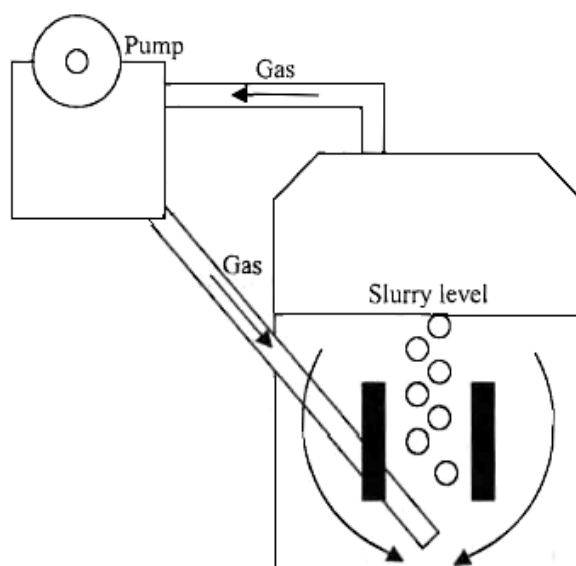
ภาพที่ 2.6 ถังกวนผสมที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกริยา

ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2552)

3) การกวนผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกริยามาใช้ในการกวนผสม (Mixing by producing gas)

วิธีการกวนผสมแบบนี้จะอาศัยก๊าซซึ่งเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีทั้ง  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  และก๊าซอื่นๆ เป็นตัวช่วยให้เกิดการกวนผสม โดยจะเป็นการดึงก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาบางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกริยา ทำให้เกิดการแปรปรวนหรือการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งวิธีการนี้น่าจะได้ผลดีที่จะเป็นการรักษาสภาพไร้อากาศในถังหมักได้อย่างดีวิธีหนึ่ง





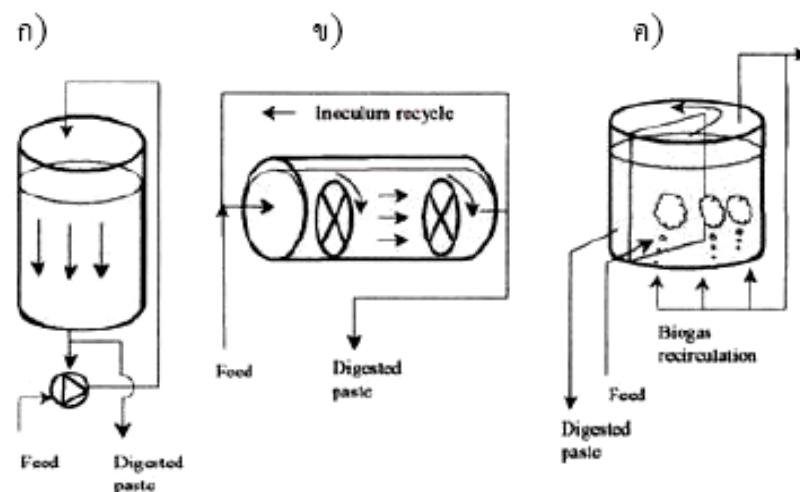
ภาพที่ 2.7 ถังกวนผสมที่อาศัยก๊าซที่เกิดขึ้นภายในถังเป็นตัวกวนผสม  
ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบุลย์ (2552)

## 2.5 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง (Dry anaerobic digestion)

### 2.5.1 ระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง

เป็นระบบที่ทำการหมักโดยไม่มีการเจือจางมูลฝอยด้วยน้ำ สามารถรับปริมาณของแข็งในของเหลวได้อยู่ในช่วงร้อยละ 20-40 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมูลฝอยทำให้กระบวนการจัดการ การกวน และการ pre-treatment จะแตกต่างกับระบบแบบเปียกที่สามารถรับปริมาณของแข็งในถังหมักไม่เกินร้อยละ 15 โดยมีการเติมน้ำเพื่อเจือจาง จึงมีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดมูลฝอยที่มีสัดส่วนของแข็งค่อนข้างสูงจากโรงอาหารได้โดยตรง การส่งผ่านมูลฝอยจะทำด้วยสกรู หรือสายพานคอนเวเยอร์ และใช้ป้อนกำลังสูง การ Pre-treatment ต้องการเพียงการแยกวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า 40 มิลลิเมตร ออกไม่จำเป็น ต้องกำจัดวัตถุพวกเศษแก้วและหิน ที่ผ่านการกรองและบดแล้ว มูลฝอยในถังหมักจะมีความหนืดสูงซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการกวนผสม ดังนั้นการเคลื่อนที่ของมูลฝอยในถังหมักจะเป็นไปแบบ plug flow โดยอาศัยการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์แบบไร้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในมูลฝอยให้มีขนาดเล็กลงกลายเป็นน้ำหมักชีวภาพและผลผลิตหลักที่ได้เป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนประมาณ 50 – 60% สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในการหุงต้ม (พาทีนี, 2552) ตัวอย่างการออกแบบถังหมักในขนาดอุตสาหกรรมมีอย่างน้อยสามแบบ (Vandevivere et al., ,1985) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 Dranco Process จะมีการกวนผสมโดยวิธี

Recirculate มูลฝอยที่แยกจากกันถึงหมักผสมด้วยมูลฝอยสดโดยอัตราส่วน 6:1 แล้วป้อนเข้าสู่ ด้านบนของถังหมัก ส่วน Kompogas Process มีการทำงานในลักษณะเดียวกันแต่เป็นถังแบบ ปลั๊กโฟลววางในแนวนอน ถังหมักมีการหมุนอย่างช้าๆ ด้วยโรเตอร์ ช่วยให้มีการผสมกันเป็นเนื้อ เดียว (Homogenization) เกิดการแยกก๊าซ (Degassing) และทำให้ของแข็งที่ตกตะกอนกลับมา แขนวนลอย ในระบบนี้จำเป็นต้องรักษาปริมาณของแข็งภายในถังหมักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 23 เพราะที่ปริมาณของแข็งต่ำกว่านี้จะเกิดการจมตัวของพวกทรายและแก้ว และสะสมอยู่ในถังหมัก ขณะที่ปริมาณของแข็งสูงกว่านี้จะทำให้เกิดความต้านทานต่อการไหล และ Valorga System แตกต่างจากสองระบบแรกคือ จะมีการไหลของมูลฝอยเป็นวงกลมและมีการกวนผสมโดย ฉีดก๊าซ ชีวภาพความดันสูงที่ก้นถังหมักทุก 15 นาที ซึ่งระบบที่ทำการวิจัยเป็นระบบหนึ่งที่มีลักษณะแบบ แนวนอนโดยมีการเวียนตะกอนกลับมาที่หัวถัง ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาการกวนและการ เวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง ซึ่งการกวนเป็นขั้นตอนที่ทำให้ อินทรีย์สารและจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ระบบ เกิดภาวะเสถียร และทำให้ไม่เกิดฝ้า (Scum) ที่ระดับผิว ที่จะกั้นไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้นไหลผ่านสะดวก (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551) ส่วนการเวียนตะกอนกลับมาผสมกับเศษอาหารที่ส่ง เข้ามาที่หัวถังจะทำให้มีการผสมระหว่างจุลินทรีย์กับเศษอาหารได้ดีขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการเลือกใช้เวลาการกวนและการเวียนตะกอนก็เป็นเงื่อนไขการ ทำงานที่มีความสำคัญ และจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเลือกใช้ให้เหมาะสม



ภาพที่ 2.8 รูปแบบถังหมักแบบแห้ง (ก:Dranco process, ข:Kompogas process, ค: Valorga process)

ที่มา: Vandevivere *et al.*, (1985)

Vandevivere *et al.*, (1985) พบว่าไม่เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาจากแอมโมเนียใน Dranco Process ที่สภาวะ thermophilic สำหรับการหมักมูลฝอยที่มี C/N สูงกว่า 20 ส่วน Valorga Proces ดำเนินระบบที่ 40 องศาเซลเซียส สามารถรับภาระสารอินทรีย์สูงได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นแอมโมเนียถึง 3 ก./ล. ซึ่งอาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ภายในถังหมักแบบแห้งจะไม่สัมผัสกับพิษเนื่องจากไม่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ภายในถังหมัก การล้มเหลว (Shock Loads) จะเกิดขึ้นชั่วคราวและจำกัดอยู่ในโซนหนึ่งของถังหมักเท่านั้น

## 2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง

ข้อดีของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง ได้แก่

- เป็นระบบที่ประหยัดพื้นที่มากกว่าระบบถังหมักแบบเปียกถึง 3-4 เท่า
- เหมาะกับวัตถุดิบที่ปริมาณของแข็งสูง ทำให้ไม่สิ้นเปลืองน้ำในการเจือจางวัตถุดิบ
- การออกแบบและการทำงานไม่ซับซ้อน
- ปริมาตรที่เกิดการหมักต่อปริมาตรใช้งานสูง
- เป็นระบบที่มีการพัฒนาออกแบบรูปทรงถังหมักเป็นแบบทรงกระบอกแนวนอนที่มีถังเก็บก๊าซชีวภาพอยู่ด้านบน ทำให้มีการกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับขยะอินทรีย์ในถังหมักได้ดีขึ้น
- มีการหมุนเวียนตะกอนกลับมากวนผสมกับขยะอินทรีย์ที่ส่งเข้ามาที่หัวถัง ทำให้มีการกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับขยะอินทรีย์ได้ดีขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น

ข้อเสีย

- ตะกอนที่ระบายออกจากระบบจะมีแบคทีเรียปนออกไปด้วยเป็นจำนวนมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนลดลง
- ต้องการ Pre-treatment วัตถุดิบก่อนหมัก

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วุฒิกัณฑ์ คุมมินทร์ (2544) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหารที่ความเข้มข้นสูง โดยการหมักแบบชั้นกรองไร้อากาศ 2 ชั้นตอนร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก โดยการวนน้ำหมักระหว่าง 2 ถึง ถึงใบที่ 1 บรรจุกขยะเศษอาหารเพื่อผลิตกรดอินทรีย์และหมุ่หมุ่กรดอินทรีย์ป้อนเข้าถังใบที่ 2 ซึ่งมีการบรรจุตัวกลางพลาสติก น้ำหมักที่ผ่านการย่อยสลายจะถูกหมุ่หมุ่กลับเข้าถังผลิตกรดในอัตราเท่ากัน เริ่มอัตรา Circulate น้อยๆ ก่อน ในช่วงแรกเป็นแบบช่วงๆ ที่อัตรา 1, 2 และ 5 ลิตร ตามลำดับโดยการ Circulation แบบไม่ต่อเนื่องทุกวัน และค่อยๆ เพิ่มปริมาตรขึ้นเป็นแบบต่อเนื่องทุกวันโดยการ Circulate วันละครั้งในอัตรา 2, 2.5, 6.5, 23 และ 60 ลิตร/วัน จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.26 ลบ.ม./กก.ซีไอดี ที่อัตราการหมุ่หมุ่ 1.0 กก.ซีไอดี/ลบ.ม./วัน หรือ 6.5 ลิตรต่อวัน

สุพินดา อรุระเจน (2544) ศึกษาการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะขยะ โดยถังหมักมีขนาด 125 ลิตร สูง 1 เมตร ทำจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 นิ้ว หนา 10.3 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะขยะกลับแตกต่างกันที่ 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับถังหมักตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 200 วัน โดยใช้ขยะตลาดสดประเภทผักและผลไม้จากตลาดขายส่งสี่มุมเมืองเป็นวัตถุดิบ ผสมกับกากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศ ที่มีน้ำหนักรวม 45 กิโลกรัม จากผลการทดลองพบว่าหากเพิ่มอัตราการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะขยะมากขึ้น การผลิตก๊าซชีวภาพจะมากขึ้น ด้วยคือ 25.74 ลิตร 156.2 ลิตร และ 129.14 ลิตร ตามลำดับ และม็องค์ประกอบที่เป็นก๊าซมีเทนเฉลี่ยในแต่ละช่วงก็สูงขึ้นตามไปด้วยคือ 40.88, 48.61 และ 52.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงอาจสรุปได้ว่าการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะขยะกลับทำให้กระบวนการเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทน เกิดขึ้นสมบูรณ์กว่าในระบบที่ไม่มีการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะขยะกลับ

อุบลวรรณ นนทพันธุ์ (2543) ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายมูลฝอยที่ย่อยสลายง่าย ได้แก่ เศษอาหาร เศษผัก เศษผลไม้ และเศษกระดาษ ด้วยระบบถังหมักไร้อากาศ แบบชั้นตอนเดียวอัตรามาตรฐานและทำการป้อนมูลฝอยครั้งเดียว การเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาการย่อยดำเนินการโดยลดขนาดของมูลฝอยก่อนการหมัก ผสมมูลฝอยกับกากตะกอนน้ำทิ้งและหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะมูลฝอย โดยกำหนดความถี่ในการหมุ่หมุ่เวียนน้ำชะมูลฝอยที่แตกต่างกัน คือ ถังหมักที่ 1 หมุ่หมุ่เวียนน้ำชะมูลฝอย 15 ครั้งต่อเดือน ด้วยปริมาตรน้ำชะมูลฝอย 2.2 ลิตรต่อครั้ง ถังหมักที่ 2 หมุ่หมุ่เวียนน้ำชะมูลฝอย 8 ครั้งต่อเดือน ด้วยปริมาตรน้ำชะมูลฝอย 4.0 ลิตรต่อครั้ง ถังหมักที่ 3 หมุ่หมุ่เวียนน้ำชะมูลฝอย 4 ครั้งต่อเดือน ด้วยปริมาตรน้ำชะมูลฝอย 8.1 ลิตรต่อครั้ง ดำเนินการ

ทดลองในระยะเวลาทั้งสิ้น 245 วัน จากผลการทดลองพบว่า ถังหมักที่มีความถี่ของการหมุนเวียน น้ำชะมูลฝอย 15 และ 8 ครั้ง ต่อเดือน มีปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกันคือ 493 และ 496 ลิตร และสูงกว่าถังหมักที่มีความถี่ของการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอย 4 ครั้งต่อเดือน ที่มีปริมาณ ก๊าซมีเทนสะสม 376 ลิตร เนื่องจากการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอยที่ความถี่ 15 และ 8 ครั้งต่อเดือน ส่งผลให้มีความชื้นเฉลี่ยสูงกว่าถังหมักที่มีการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอย 4 ครั้งต่อเดือนและพบว่า การหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอยในถังหมักไม่ส่งผลต่อขั้นตอนการสร้างกรดในถังหมัก

Ahn และคณะ (2009) ศึกษาการประเมินค่าของความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักไร้ออกซิเจนแบบแห้งของหญ้า Switchgrass กับมูลสัตว์ผสมกัน ที่มีค่าปริมาณ ของแข็งทั้งหมด 15 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะมีการผสมของมูลสัตว์ที่ แตกต่างกันคือ หมู เป็ดไก่ และวัวนม กับหญ้า Switchgrass ซึ่งในการย่อยสลายจะใช้ถึงปฏิกรณ์ ขนาด 1 ลิตร ระหว่างทำการทดลอง 62 วันพบว่ามูลหมูจะมีการกำจัดของแข็งระเหยได้ 52.9 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่มูลเป็ดไก่ และวัวนมจะมี 9.3 และ 20.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากการ หมัก 62 วัน จะมีปริมาณมีเทนสูงสุดที่ 0.337 ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย ของมูลหมู ในขณะที่ มูลไก่และวัวจะมีปริมาณมีเทน 0.028 และ 0.002 ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

Arthur (1999) รวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผสมของเหลวใน กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยสามารถสรุปได้เป็น 3 พารามิเตอร์ดังนี้

1. ค่าอัตราการพลิก (Turnover rate) คือ อัตราการพลิกของน้ำด้วยก๊าซชีวภาพที่มีการ หมุนเวียนลงในระบบต่อเวลา จากการศึกษาพบว่าควรใช้ค่าอัตราการพลิกของน้ำเป็น 20 นาทีต่อ ครั้ง สำหรับการย่อยสลายน้ำเสียที่มีสลัดจ์หนาแน่น และใช้ค่าอัตราการพลิกเป็น 30 นาทีต่อครั้ง สำหรับการย่อยสลายน้ำเสียที่มีสลัดจ์ไม่หนาแน่น

2. ค่าความลาดชันความเร็ว (G: Velocity Gradient) คือค่ารากที่สองของกำลังการ ทำงานของเครื่องกวนผสมของเสียหารด้วยความหนืดของของเหลวและปริมาตรน้ำเสียภายใน ระบบบำบัดนั้นๆ จากการศึกษาพบว่าค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำ เสีย ควรีค่าอยู่ในช่วง 50 – 85 ต่อวินาที

3. ค่ากำลังการหมุนของเครื่องกวนผสมต่อปริมาตรของของเสียที่ต้องการกำจัด (Hp/1000 cu ft) คือค่ากำลังการทำงานต่อปริมาตรของเสีย กำหนดโดย US EPA โดยระบุค่าที่ เหมาะสม สำหรับการบำบัดน้ำเสียทั่วไปควรอยู่ในช่วง 0.20 – 0.30 HP/1000 cu ft

Bonzonella และคณะ (2005) ศึกษาการหมักไร้อากาศแบบแห้งของมูลฝอยอินทรีย์จากขยะชุมชนโดยทำการทดลองในระดับปฏิบัติจริง (full scale) ซึ่งมีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เมตร พบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนจำเพาะได้ 0.4 ลบ.ม.มีเทน/กก.ของแข็งระเหย โดยมีต้นทุน 29 ยูโร ต่อตันของขยะ

Fernandez และคณะ (2008) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ขยะชุมชนต่อการหมักไร้ออกซิเจนแบบแห้งที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก โดยตั้งปฏิกรณ์ความจุ 1.7 ลิตร ระหว่างการทดลอง 85 – 95 วัน ศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันคือ 931.1 มก.ดีไอซี/ลิตร (20 เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด) และ 1423.4 มก.ดีไอซี/ลิตร (30 เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด) จากผลการทดลองพบว่าตั้งปฏิกรณ์ที่มีการหมักสารอินทรีย์ขยะชุมชนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 20 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดในวันที่ 14 จะมีการกำจัดดีไอซี ไป 67.53 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตั้งปฏิกรณ์ที่มีการหมักสารอินทรีย์ขยะชุมชนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 30 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดในวันที่ 28 จะมีการกำจัดดีไอซี ไป 49.18 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ทั้งหมดจะเท่ากับ 7.01 ลิตร ของปริมาณของแข็งทั้งหมด 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมากกว่าของปริมาณของแข็งทั้งหมด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่มีปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ทั้งหมด 5.53 ลิตร

Forster-Carneiro และคณะ (2008) ศึกษาการหมักไร้อากาศแบบแห้งของขยะชุมชนที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ถังหมักขนาด 5 ลิตร และมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการหมักขยะชุมชน 2 ประเภทคือ เศษอาหาร และ ขยะชุมชนที่เป็นของแข็ง (solid waste) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส พบว่า เศษอาหารจะมีการกำจัดของแข็งระเหยได้ 45 เปอร์เซ็นต์ และมีการผลิตก๊าซชีวภาพได้ 120 ลิตร จะมากกว่าขยะชุมชนที่เป็นของแข็งที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพได้ 82 ลิตร หลังจากการทดลอง 60 วัน

Kaparaju และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกวนต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศของมูลสัตว์ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีการกวนแบบต่อเนื่อง (ควบคุม) การกวนในระดับต่ำ (กวน 10 นาทีก่อนการเติมอาหาร) และการกวนแบบครั้งคราว (กวน 2 ชั่วโมงก่อนการเติมอาหาร) ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในตั้งปฏิกรณ์ที่มีการกวนต่อเนื่อง พบว่าที่การกวนในระดับต่ำสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 11.28 มล./มล. และมีค่ามีเทนยี่ลด์มากที่สุดเท่ากับ 0.245 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหย ซึ่งในการกวนระดับต่ำมีการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเนื่องมาจากแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนสามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนได้มากซึ่งสังเกตจากค่า VFA มีค่าลดลงมากที่สุด คือเท่ากับ 0.076 กรัมต่อลิตรในรูปอะซิติก

Karim และคณะ (2005) ศึกษาผลของการกวนผสมของของเหลวสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศของของเสียจากสัตว์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 10 ถัง ใช้วิธีการกวนผสมของเหลวที่แตกต่างกันได้แก่ การกวนผสมด้วยแก๊สชีวภาพ การกวนผสมด้วยใบพัดและการกวนผสมด้วยการหมุนวนน้ำเสียภายในถัง โดยในการกวนแต่ละแบบจะศึกษาที่ระดับความเข้มข้นน้ำเสียของของแข็ง 2 ระดับคือที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความเข้มข้นของแข็ง 3.08 และ 6.2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่าระยะเวลาที่หักทางชลศาสตร์เป็น 16.2 วัน ผลการทดลองพบว่า การกวนผสมน้ำเสียไม่มีความจำเป็นสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกับปฏิกรณ์ที่มีการกวนด้วยวิธีต่างๆ โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.84 – 0.94 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูงขึ้น เป็น 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการกวนผสมมีความจำเป็นเนื่องจากในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ การกวนผสมด้วยพัด และการกวนผสมด้วยการหมุนวนน้ำ พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าถังที่ไม่มีการกวนผสมคิดเป็นร้อยละ 29, 22 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการกวนผสมจึงจำเป็นสำหรับระบบบำบัดที่มีความเข้มข้นของของแข็งในน้ำเสียในปริมาณที่สูงๆ

Stabnikova และคณะ (2008) ศึกษาการย่อยสลายเศษอาหารที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 20 เปอร์เซ็นต์ในสภาวะไร้อากาศกับการหมุนเวียนน้ำชะขยะจากถังหมักกรด โดยใช้ระบบหมักผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวไร้ออกซิเจน ที่มีปริมาตรถังหมัก 5.4 ลิตร ซึ่งมีปริมาณอาหาร 200 กรัม และมีการเวียนน้ำชะขยะจากถังหมักกรดทั้งหมด 21 ครั้ง เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเวียนน้ำชะขยะ ทำการทดลอง 14 วัน พบว่าในการเวียนน้ำชะขยะจากถังหมักกรดเข้าไปในระบบหมักไร้ออกซิเจนที่มีการหมักเศษอาหารจะทำให้มีการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทน 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

Stafford (1982) ได้ทำการศึกษาผลของการกวนผสมในระบบหมักไร้อากาศของการหมักกากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้ใบพัดที่มีความเร็วระหว่าง 140 และ 1000 รอบต่อนาที ที่มีระยะเวลาที่เก็บ (HRT) 10 วัน พบว่า ที่ความเร็วรอบสูงจะทำการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเนื่องจากการเกิดแรงเฉือนซึ่งจะไปทำลายเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

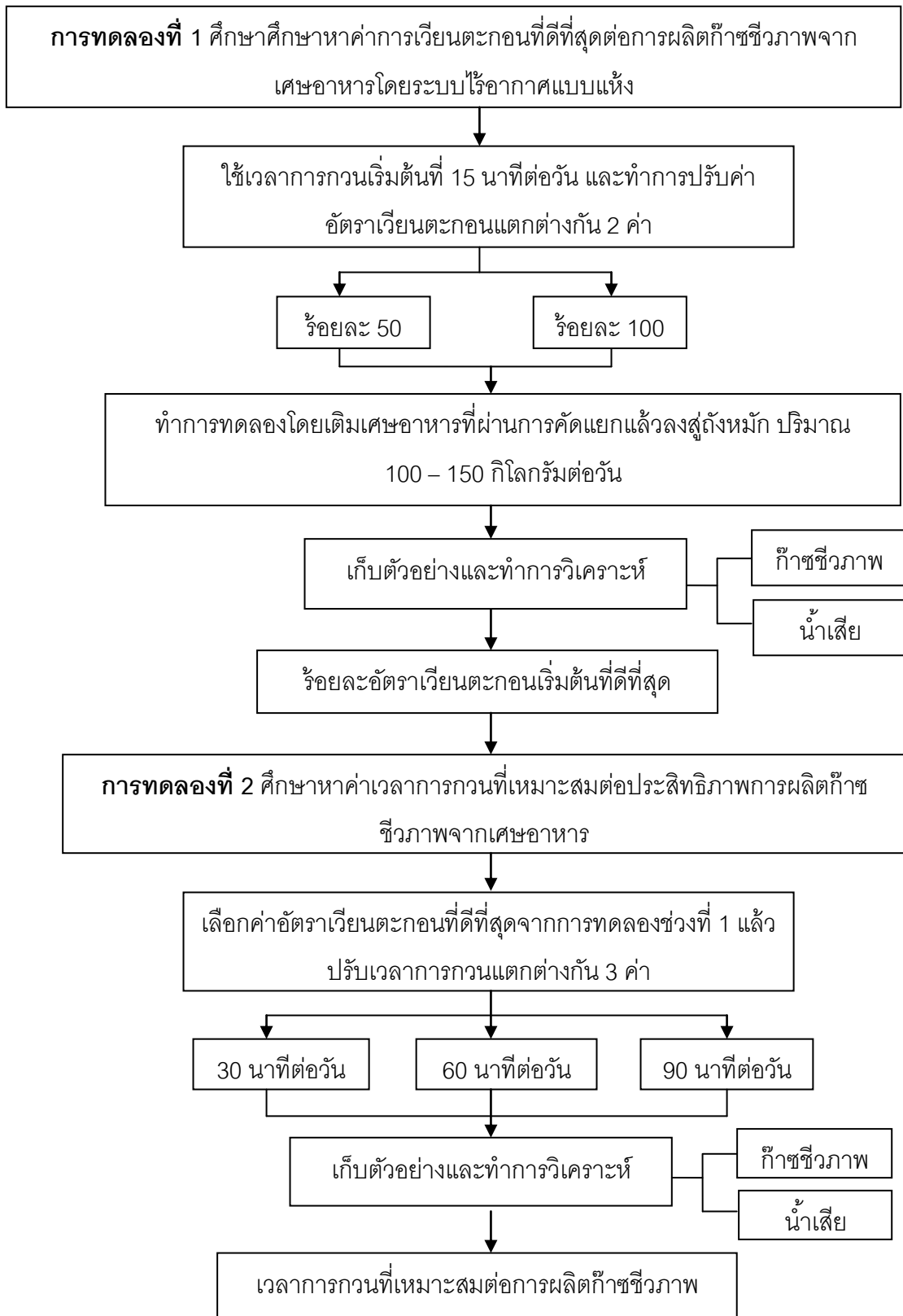
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาการกวนและอัตราเวียนตะกอนต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริงและทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิมีโซฟิลิค ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการทดลองจากโรงอาหารของหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงดังนี้

1) ช่วงการทดลองที่ 1 ศึกษาหาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยใช้เวลาการกวนเริ่มต้นที่ 15 นาทีต่อวัน และทำการปรับค่าการเวียนตะกอนแตกต่างกันที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ)

2) ช่วงการทดลองที่ 2 ศึกษาหาค่าเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยเลือกค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 แล้วปรับเวลาการกวนแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

สำหรับระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนถังหมักเศษอาหารสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพรูปทรงกระบอกแนวนอน และส่วนเก็บก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอย (floating drum) และเศษอาหารที่ใช้สำหรับการทดลองจะนำเศษอาหารจากโรงอาหารของหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นเศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานส่วนใหญ่เป็นข้าว ก๋วยเตี๋ยว ผักและน้ำแกง โดยจะต้องทำการคัดแยกของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น กระดุก พลาสติก ไม้เสียบ ชั่งข้าวโพด เปลือกหอยลาย เป็นต้น โดยเศษอาหารที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะนำไปใส่ในช่องบ่อนวัตถุดิบที่ถังหมักทุกวัน ในช่วงปริมาณ 100 - 150 กิโลกรัม ซึ่งในระยะเริ่มแรกจะมีการเพิ่มหัวเชื้อมาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศของร้านอาหารปริมาณ 100 ลิตร แล้วให้เชื้อจุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับเศษอาหารเป็นเวลา 2 เดือน แล้วถึงทำการทดลอง โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในภาพที่ 3.1





ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรต้น ตัวแปรคงที่ และตัวแปรตาม โดยการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแต่เริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวดังแสดงในตารางที่ 3.1

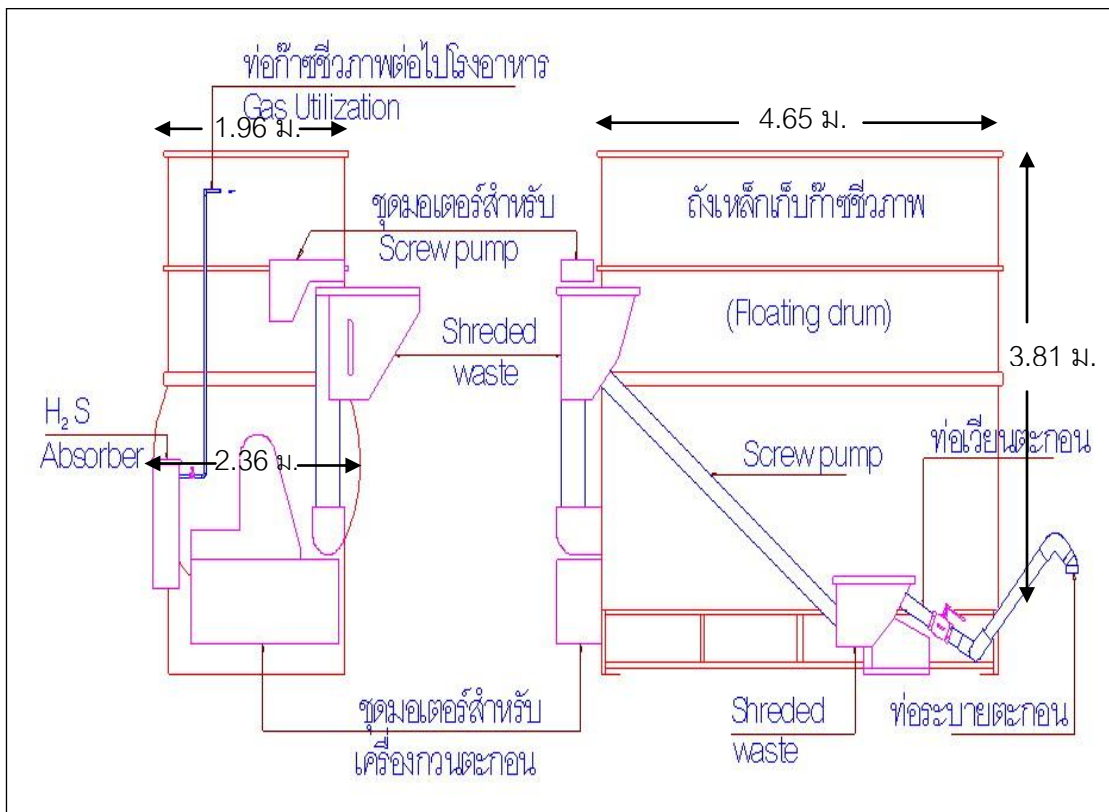
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

การทดลองที่	ตัวแปรต้น	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1	การศึกษาหาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยใช้เวลาการกวนเริ่มต้นที่ 15 นาทีต่อวัน และทำการปรับค่าอัตราเวียนตะกอนแตกต่างกันที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์	ปริมาณทำงานของถังหมักไร้อากาศแบบแห้งเท่ากับ 12 ลบ.ม.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าซีไอดีทั้งหมด</li> <li>- ของแข็งทั้งหมด</li> <li>- ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด</li> <li>- ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด</li> <li>- สภาพต่างทั้งหมด</li> <li>- ปริมาณก๊าซชีวภาพ</li> <li>- องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ</li> </ul>
2	การศึกษาหาค่าเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยเลือกค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 แล้วปรับเวลาการกวนแตกต่างกัน 3 ค่า ดังนี้ <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 30 นาทีต่อวัน</li> <li>2) 60 นาทีต่อวัน</li> <li>3) 90 นาทีต่อวัน</li> </ol>	ปริมาณทำงานของถังหมักไร้อากาศแบบแห้งเท่ากับ 12 ลบ.ม.	<ul style="list-style-type: none"> <li>ชีวภาพ</li> <li>- ค่าพีเอช</li> <li>- อุณหภูมิ</li> </ul>

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 ระดับขนาดการใช้งานจริง (full scale)

ถังหมักในระดับขนาดใช้งานจริง (full scale) เป็นแบบระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง (dry anaerobic digestion) แสดงดังภาพที่ 3.2 - 3.4 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนถังหมักเศษอาหาร และส่วนเก็บก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอปลอย (floating drum)



ภาพที่ 3.2 ไดอะแกรมด้านซ้ายและด้านหน้าของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง



ภาพที่ 3.3 ด้านหน้าของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง



ภาพที่ 3.4 ด้านข้างของระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง

### 3.3.1.1 ถังหมักเศษอาหาร

ถังหมักเศษอาหารที่ใช้มีปริมาตร 12 ลูกบาศก์เมตร ปริมาตรความจุ 9 ลูกบาศก์เมตร ลักษณะเป็นถังหมักทรงกระบอกแนวนอนทำมาจากเหล็กเคลือบ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.36 เมตร ประกอบด้วย ช่องป้อนเศษอาหาร ช่องวัดระดับเศษอาหาร ท่อลำเลียงเศษอาหารเข้าระบบ ท่อเวียนตะกอนเข้า ท่อระบายตะกอนออกจากระบบ ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ท่อเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ และท่อก๊าซชีวภาพต่อไปยังโรงอาหาร ในส่วนของใบพัดสำหรับกวนของเสียภายในถังหมักกวนสมบูรณ์ติดตั้งใบกวนแบบใบพาย (paddle) จำนวน 4 ใบ โดยเชื่อมต่อส่วนของใบพัดและก้านใบพัดสำหรับกวนกับมอเตอร์ในแนวนอน

### 3.3.1.2 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บภายในถังเก็บก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอย (floating drum) ที่มีความกว้าง 1.96 เมตร และ ความยาว 4.65 เมตร ทำมาจากเหล็กเคลือบ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่สามารถขึ้นลงตามปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น และวัดปริมาณก๊าซโดยใช้ก๊าซมิเตอร์ซึ่งต่ออยู่กับท่อซึ่งเชื่อมมาจากถังเก็บก๊าซ (ภาพที่ 3.5) ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเก็บไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยการต่อสายยางจากท่อที่ทำารเชื่อมต่อกับถังเก็บก๊าซไปยังถังเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร และพันด้วยพาราฟินอีกครั้ง ก่อนจะนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ที่มีคอลัมน์เป็น Thermal Conductivity Detector (TDC) ต่อไป



ภาพที่ 3.5 ก๊าซมิเตอร์ที่เชื่อมต่อด้านข้างของถังหมัก

### 3.3.1.3 มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้มี 2 ชุด คือ สำหรับกวนของเสียภายในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณ์ และ สำหรับ screw pump ที่มีการนำเศษอาหารจากช่องบ้อนเศษอาหารด้านล่างเข้าสู่ระบบ ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า (Adapter) เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ เพื่อนำมาใช้กับมอเตอร์ดังกล่าว

### 3.3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

ประกอบไปด้วยเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

## 3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

### 3.4.1 การเริ่มต้นระบบ

#### 3.4.1.1 เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการเดินระบบ

เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้สำหรับการเดินระบบสำหรับการทดลองครั้งนี้ ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่โรงพยาบาลศิริราชพยาบาล กรุงเทพมหานคร ปริมาณ 100 ลิตร แล้วให้เชื้อจุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับเศษอาหารโดยมีการบ้อนเศษอาหารเข้าระบบทุกวันโดยมีความถี่ 2 ครั้งต่อวัน เป็นเวลา 2 เดือน หรือระบบจะดำเนินถึงสภาวะสมดุล (Steady state) แล้วถึงทำการทดลองต่อไป

#### 3.4.1.2 เศษอาหาร

นำเศษอาหารจากโรงพยาบาลศิริราชพยาบาล กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นเศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานส่วนใหญ่เป็นข้าว ก๋วยเตี๋ยว ผักและน้ำแกง โดยจะต้องทำการคัดแยกของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น กระจุก พลาสติก ไม้เสียบ ชังข้าวโพด เปลือกหอยลาย เป็นต้น โดยเศษอาหารที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะนำไปใส่ในช่องบ้อนวัตถุดิบที่ถังหมักทุกวัน ขยะส่วนหนึ่งจะมีการนำไปวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติทางเคมีและกายภาพโดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ คือ ซีไอดีทั้งหมด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และค่าพีเอช

### 3.4.2 การดำเนินการทดลอง

#### 3.4.2.1 ช่วงการทดลองที่ 1

1) ทำการศึกษาเพื่อหาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยทำการทดลองในถังหมักไร้อากาศแบบแห้ง โดยนำขยะเศษอาหารที่คัดแยกแล้วมาใส่ในช่องป้อนวัตถุดิบที่ถังหมักทุกวัน ในช่วงปริมาณ 100 - 150 กิโลกรัมต่อวัน โดยใช้เวลาการกวนเริ่มต้นที่ 15 นาทีต่อวัน และทำการปรับค่าอัตราเวียนตะกอนแตกต่างกันที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ) ซึ่งในการเวียนตะกอนจะทำหลังจากที่มีการนำเศษอาหารขึ้นสู่ด้านบนที่หัวถังหมัก จากนั้นจึงมีการเวียนตะกอนน้ำหมักที่ผ่านจากการหมักในสภาวะสมดุลกลับมาที่ช่องป้อนวัสดุตามอัตราที่ทำการทดลองแล้วปั้มน้ำหมักขึ้นไปด้านบนที่หัวถังหมัก ซึ่งในการทำการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 30 วันต่อการศึกษ้อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

2) เก็บข้อมูลโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักจากจุดเก็บตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดีทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพต่างทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ และทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

#### 3.4.3.2 ช่วงการทดลองที่ 2

1) ทำการศึกษาเพื่อหาค่าเวลาการกวนกับการเวียนตะกอนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยเลือกค่าการเวียนตะกอนที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 โดยนำขยะเศษอาหารที่คัดแยกแล้วมาใส่ในช่องป้อนวัตถุดิบที่ถังหมักทุกวัน ในช่วงปริมาณ 100 - 150 กิโลกรัมต่อวัน แล้วมาปรับเวลาการกวนแตกต่างกันที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน ทำการทดลองเดินระบบจนระบบคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 30 วันต่อการศึกษาค่าการกวนต่างๆ

2) เก็บข้อมูลโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักจากจุดเก็บตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดีทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและองค์ประกอบ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพต่างทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ และทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

### 3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล

#### 3.5.1 การเก็บตัวอย่าง

##### 3.5.1.1 การเก็บตัวอย่างน้ำหมักจากถังหมัก

การเก็บตัวอย่างน้ำหมักจะทำการเก็บตัวอย่างจากช่องป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักปริมาตรประมาณ 100 มิลลิลิตร โดยในการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำหมักนี้

##### 3.5.1.2 การเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ

ทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยดูจำนวนที่ก๊าซมิเตอร์ซึ่งต่ออยู่กับท่อซึ่งเชื่อมมาจากถังเก็บก๊าซ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเก็บไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยการต่อสายยางจากท่อที่ทำการเชื่อมต่อจากถังเก็บก๊าซไปยังถังเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร และพันด้วยพาราฟินอีกครั้ง และจากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซมีเทน

#### 3.5.2 การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ข้อมูลทำโดยบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน นำตัวอย่างก๊าซชีวภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ส่วนตัวอย่างน้ำหมัก นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ โดยความถี่ในการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำหมักและก๊าซชีวภาพสามารถแสดงดังตารางที่ 3.2



**ตารางที่ 3.2** วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ความถี่ และวิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
พีเอช (pH)	pH Meter	A
อุณหภูมิ (temperature)	Thermometer	A
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux , Titration Method	B
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS)	อบที่ 105 °C	B
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS)	เผาที่ 550 °C	B
ของแข็งแขวนลอย (SS)	กรองด้วยกระดาษ GF/C อบที่ 105 °C	B
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA)	Direct Titration Method	B
สภาพด่างทั้งหมด (alkalinity)	Direct Titration Method	B
ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ใช้ไปในแต่ละวัน	Gas meter	A
เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน	GC (Gas Chromatography)	C

**หมายเหตุ:** A คือพารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์ทุกวัน

B คือพารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 3 วัน

C คือพารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 วัน

วิธีการและเทคนิคในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard methods for examination of water and wastewater (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ, 2545; American Public Health Association, 1995)

### 3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบในการทดลองครั้งนี้จะประเมินจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือ การประเมินประสิทธิภาพจากประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษ โดยในที่นี้จะประเมินจากความสามารถในการกำจัดซีโอดี การกำจัดของแข็งทั้งหมด การกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด และสุดท้ายคือ การประเมินในส่วนของปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและการดูสัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในก๊าซชีวภาพ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร สิ่งที่ต้องพิจารณาผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลองในครั้งนี้ จะแบ่งส่วนของการแสดงผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ 1 คือ การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ของระบบทั้งหมด ส่วนที่ 2 คือ การพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด เป็นต้น และส่วนที่ 3 คือ การพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ สำหรับลำดับของการแสดงผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง จะแสดงตามลำดับขั้นตอนของการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย 2 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาหาค่าอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ช่วงที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4.1 การเริ่มต้นระบบ (start-up)

การศึกษาในครั้งนี้ได้เริ่มต้นระบบครั้งแรกโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงอาหารหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริมาณ 100 ลิตร โดยมีการเติมเศษอาหารเข้าสู่ระบบในความเร็ว 2 ครั้งต่อวัน เพื่อให้เชื้อคุ้นเคยกับเศษอาหาร ซึ่งจะใช้เวลาในการปรับสภาพประมาณ 2 เดือน หรือระบบจะดำเนินถึงสภาวะสมดุล (Steady state) ซึ่งพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำหมักภายในระบบ ดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจะเห็นว่าค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.1 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ ปกติควรอยู่ในช่วงพีเอช 6.5 – 7.2 และก๊าซชีวภาพที่เกิดมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 53 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogenic bacteria หลังจากนั้นจะทำการเวียนตะกอนกลับไปให้หัวถัง โดยในช่วงแรกจะเวียนที่ละน้อยและค่อยๆ เพิ่มปริมาตรขึ้นช้าๆ เพื่อเป็นการช่วยปรับค่าพีเอชที่หัวถังให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น และทำการศึกษาหาอัตราเวียนตะกอนที่เหมาะสมต่อไป

**ตารางที่ 4.1** ลักษณะสมบัติของน้ำหนักในถังหมักที่ได้จากการ Acclimatization ของจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ลักษณะสมบัติ	ผลการวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	8,319±363
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (มก./ล.)	4,492±291
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล.)	5,387±118
กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.)	4,011±692
ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)	64,750±6,457
ค่าพีเอช	7.1±0.24

**4.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของเศษอาหาร**

การทดลองนี้เป็นการใช้เศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานและการประกอบอาหารจากโรงอาหารของหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยข้าว เนื้อสัตว์ และพืชผักต่าง ๆ ซึ่งล้วนแต่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ โดยที่องค์ประกอบเหล่านั้นมีความแตกต่างกันไป โดยจะต้องทำการคัดแยกของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น กระดูกสัตว์ พลาสติก ไม้เสียบ ชั่งข้าวโพด ก้างปลา เป็นต้น ซึ่งเศษอาหารที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะนำไปเข้าสู่ระบบถังหมักทุกวัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะเศษอาหาร พบว่ามีค่าต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 76.6 และส่วนที่เหลือจะเป็นของแข็งโดยพบว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 23.4 ในส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมดนี้มีส่วนที่เป็นของแข็งระเหยได้เท่ากับร้อยละ 22.3 เมื่อคิดเป็นสัดส่วนของสารอินทรีย์พบว่ามีค่าสูงโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.14 นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าซีไอดีทั้งหมดเท่ากับ 267,326 มก./ล. และปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับร้อยละ 0.27 ร้อยละ 0.11 และต่ำกว่าร้อยละ 0.001 ตามลำดับ (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก) ซึ่งจากการที่เศษอาหารมีสัดส่วนของสารอินทรีย์สูงและมีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ 23.40 จึงคาดว่าน่าจะมี ความเหมาะสมต่อระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้งนี้ โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของเศษอาหารแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเศษอาหาร

ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ	ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก
ปริมาณความชื้น	76.60±1.05
ของแข็งทั้งหมด	23.40±2.18
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	22.30±1.78
สัดส่วนของสารอินทรีย์ <sup>1</sup>	95.14±1.25
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.27±0.03
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	0.11±0.04
ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์	≤0.001
ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)	267,326±47,795
ค่าพีเอช	5.7±0.45

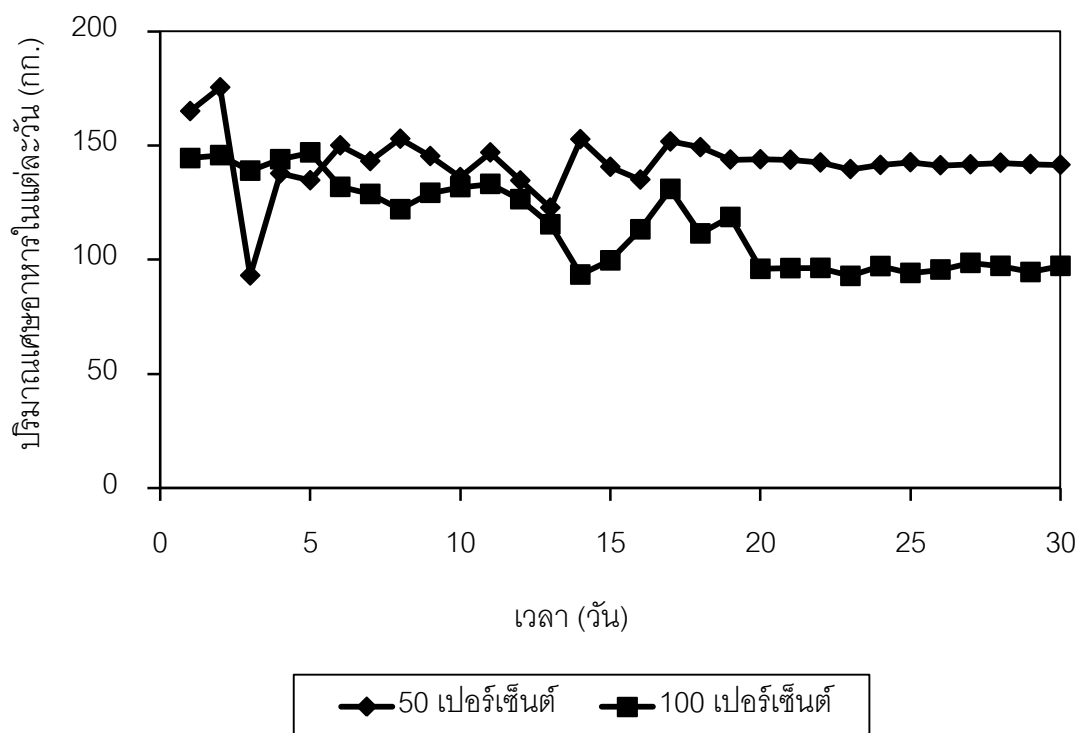
หมายเหตุ: <sup>1</sup>(ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ของแข็งทั้งหมด)\*100

#### 4.3 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบ

##### 4.3.1 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบในช่วงการทดลองที่ 1

จากการเก็บข้อมูลปริมาณเศษอาหารจากโรงอาหารหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเก็บหาปริมาณเศษอาหารโดยชั่งน้ำหนักเศษอาหารคิดเป็นกิโลกรัม การทำการเก็บตัวอย่างครั้งนี้กระทำในช่วงเดือนช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม โดยการเก็บข้อมูลทุกวันเป็นเวลา 2 เดือน และในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบทำให้ปริมาณเศษอาหารที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าตามความเป็นจริงทำให้เศษอาหารที่เกิดขึ้นแต่ละวันมีปริมาณไม่เท่ากันซึ่งจะมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยดังภาพที่ 4.15 พบว่าที่อัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ) จะมีปริมาณเศษอาหารอยู่ในช่วง 93 – 175.4 กิโลกรัม หรือเฉลี่ยประมาณ 142.43 กิโลกรัม ซึ่งมากกว่าที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าอยู่ในช่วง 92.8 – 145.7 กิโลกรัม หรือเฉลี่ยประมาณ 115 กิโลกรัม แสดงภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณเศษอาหารมีแนวโน้มลดลงอาจเนื่องมาจากในการทดลองอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ) จะทำการทดลองในเดือนมีนาคมอาจ

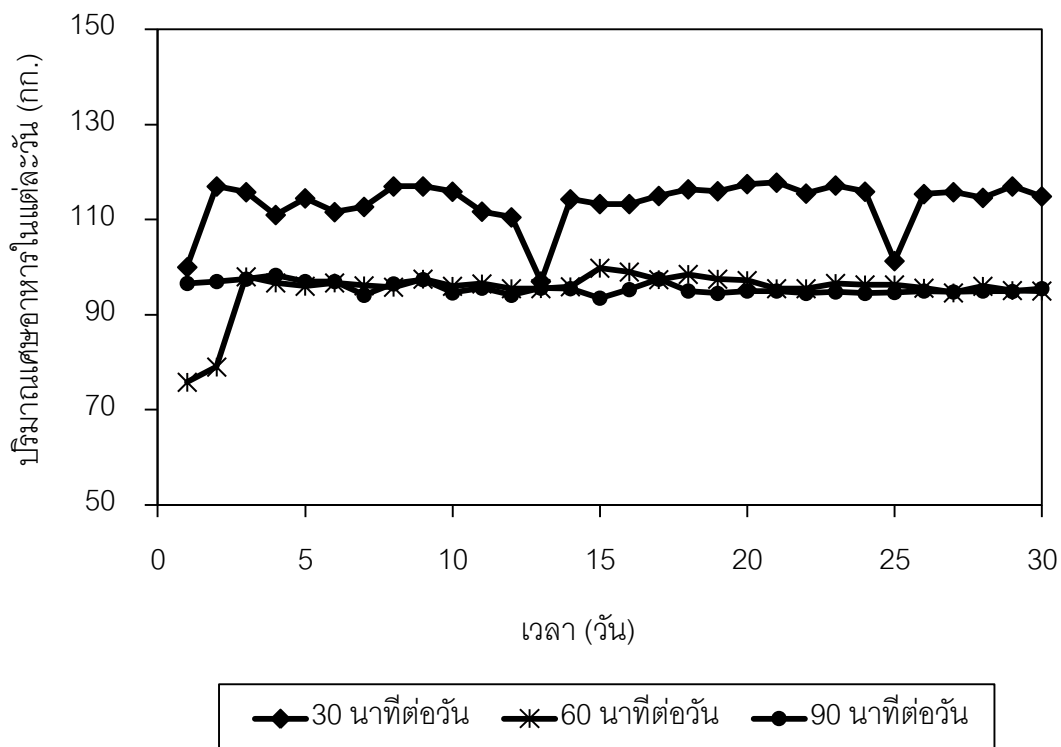
อยู่ในช่วงของการใกล้ปิดภาคการศึกษาทำให้จำนวนนิสิตที่จะมาใช้บริการลดลงส่งผลต่อปริมาณเศษอาหารที่ลดลงไปด้วย



ภาพที่ 4.1 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบในแต่ละวันที่อัตราส่วนเวียนตะกอนต่าง ๆ ของการทดลองครั้งที่ 1

#### 4.3.2 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบในช่วงการทดลองที่ 2

สำหรับปริมาณเศษอาหารในช่วงการทดลองที่ 2 นี้ไม่ได้ควบคุมปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบเช่นกัน ทำให้ปริมาณเศษอาหารที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าตามความเป็นจริงทำให้เศษอาหารที่เกิดขึ้นแต่ละวันมีปริมาณไม่เท่ากันซึ่งจะมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยดังภาพที่ 4.35 พบว่าที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีปริมาณเศษอาหารอยู่ในช่วง 97 – 117 , 75.8 – 99.8 และ 94.1 – 98.3 กิโลกรัมต่อวัน และมีค่าเฉลี่ยปริมาณเศษอาหารเท่ากับ  $113.43 \pm 5.17$ ,  $95.23 \pm 5.00$  และ  $95.54 \pm 1.22$  กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าปริมาณเศษอาหารมีแนวโน้มลดลงซึ่งที่เวลาการกวน 60 และ 90 มีค่าปริมาณเศษอาหารมีค่าใกล้เคียงกันอาจเนื่องมาจากในการทดลองที่ 60 และ 90 มีการนำเศษอาหารบางส่วนไปเลี้ยงสัตว์และจำนวนของผู้ที่มาบริโภคอาหารในโรงอาหารแห่งนี้มีจำนวนน้อยลง ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบในแต่ละวันที่เวลาการกวนต่างๆ

#### 4.4 ผลการทดลองช่วงที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาหาอัตราเวียนตะกอนที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

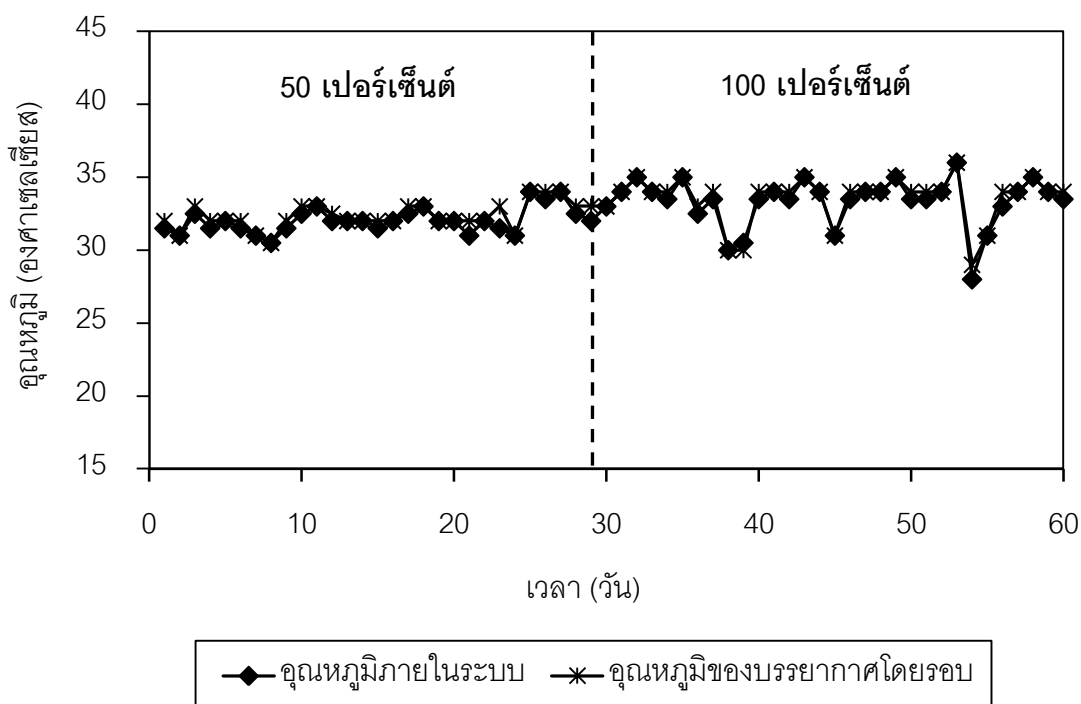
##### 4.4.1 สภาวะการทำงานของระบบต่อเนื่องแบบขั้นตอนเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่มีอัตราเวียนตะกอนแตกต่างกัน

ในระหว่างการทดลองจะมีการนำเศษอาหารและน้ำหมักไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิ ค่าพีเอช ปริมาณซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย สภาพต่างทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.4.1.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยมีความจำเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ภายในระบบเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบคทีเรียมีแนวโน้มที่จะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ไร้อากาศอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic range) คือช่วงอุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส สำหรับประเทศไทยอุณหภูมิส่วนมาก

อยู่ในช่วง 28-31 องศาเซลเซียส และในถังปฏิกริยาอุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 3 – 5 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งการทดลองนี้ถังปฏิกรณ์จะตั้งอยู่ที่ด้านข้างของโรงอาหารหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาค่าอุณหภูมิของระบบ ในการทดลองนี้ใช้วิธีการเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำหมักกับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบบริเวณที่ติดตั้งถังหมักโดยไม่มีการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของเศษอาหารที่เข้าระบบ เนื่องจากการป้อนเศษอาหารเข้าสู่ระบบในการทดลองนี้จะมีการป้อนเป็นครั้งคราว 2 รอบ/วัน (13.00 และ 21.00 น.) โดยมีการเปลี่ยนเศษอาหารที่เข้าระบบทุกวัน ทำให้มีระยะเวลาระหว่างการป้อนเศษอาหารและเวลาที่น้ำหมักออกจากถังหมักค่อนข้างนานซึ่งในระหว่างนั้นอาจมีปัจจัยอื่นๆรวมทั้งอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลต่อค่าอุณหภูมิในระบบได้ จากการทดลองอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบกับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบมีค่าอัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (โดยอัตราส่วนของปริมาตรตะกอนที่เวียนกลับต่อปริมาตรของเศษอาหารที่ใส่เข้าระบบ) พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบมีค่าใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิภายในระบบโดยในการทดลองค่าการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าอยู่ในช่วง 30.5 – 34.0 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ค่าการเวียนตะกอนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าอยู่ในช่วง 28.0 – 36.0 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าอุณหภูมิของน้ำหมักที่ออกจากระบบในการทดลองที่ 2 มีค่าสูงกว่าในการทดลองแรกเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคมซึ่งตรงกับฤดูร้อน ถึงแม้อุณหภูมิจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่ก็ยังคงอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือช่วง มีโซฟิลิก (Mesophilic rage) ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิของน้ำหมักภายในระบบและอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

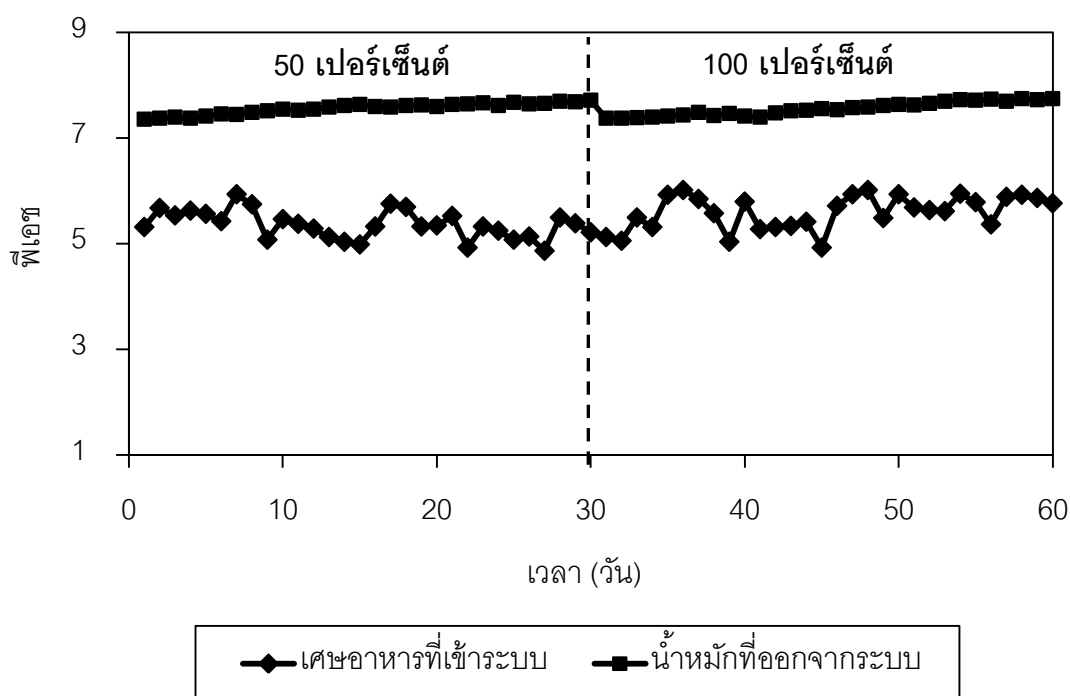
#### 4.4.1.2 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของกระบวนการ และเป็นตัวสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในกรณีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศอื่นๆ ซึ่งระบบเป็นแบบกวนผสมแบบ ค่าพีเอชควรอยู่ในช่วง 6.5 – 7.8 เพื่อให้ระบบมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในกรณีของระบบหมักแบบที่มีค่าของแข็งค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นการกวนแบบไม่ผสม ค่าพีเอชอาจจะไม่สามารถบอกความล้มเหลวของระบบได้ เพราะระบบมี Buffering Capacity มากกว่า (Metcalf and Eddy, 1991) ทำให้ระบบไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าพีเอชด้วยสารเคมี

ค่าพีเอชของเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบตลอดการทดลองจะอยู่ในช่วง 4.92 – 6.01 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานต่อจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากการทดลองอัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.35 – 7.71 และ 7.37 – 7.74 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนและการที่พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากองค์ประกอบของเศษ



อาหารเป็นสารอินทรีย์ปริมาณมากที่ย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศได้ง่าย ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเปลี่ยนเป็นคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตทำให้ค่าพีเอชของระบบสูงขึ้นซึ่งจะเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบได้ รวมทั้งจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนทำงานได้ดี ดึงกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้ได้และระบบปรับสมดุลทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถปรับเข้าสู่สมดุลได้เองโดยไม่ต้องทำการปรับค่าพีเอชของเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบ แม้ว่าพีเอชของเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบจะอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนก็ตาม ระบบก็ยังสามารถทำงานได้ตามปกติและเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองพบว่ามีความน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่สูงพอ



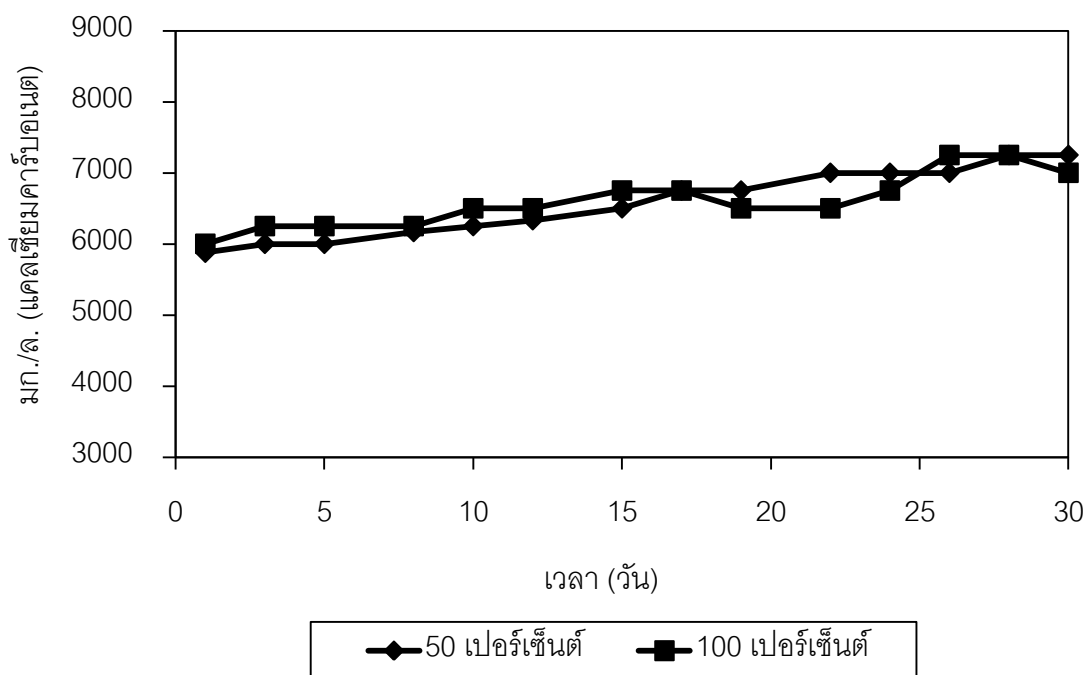
ภาพที่ 4.4 พีเอชของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบจากอัตราเวียเนตะคอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

#### 4.4.1.3 สภาพต่างทั้งหมด

สภาพต่างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงปริมาณ Buffering Capacity ของระบบซึ่งจะเป็นการป้องกันการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของพีเอช ซึ่งในถังหมักแบบไร้อากาศไม่ควรมีสภาพต่างทั้งหมดน้อยกว่า 1,500 – 2,000 มก./ล.นินปุ่น (มันลิน, 2545) และไม่มีค่า

เหมาะสมตายตัวเนื่องมาจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในระบบ

เมื่อเดินระบบพบว่าสภาพต่างทั้งหมดของทุกการทดลองมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งสภาพต่างทั้งหมดที่วิเคราะห์นี้คิดในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) พบว่าที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำหมักที่ออกจากระบบจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 5,875 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จนสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 7,250 และ 7,000 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 สภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนต่างๆ

เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่ได้มีการปรับพีเอชโดยการเติมสารเคมีใดๆ ให้แก่ระบบแต่จะมีการเวียนตะกอนกลับแทนเพื่อเป็นการเติมบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ จากภาพที่ 4.7 พบว่าสภาพต่างทั้งหมดในน้ำหมักของทุกอัตราเวียนตะกอนที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งการที่ปริมาณสภาพต่างทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะเกิดแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) ขึ้นในระบบ เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์และแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยถูกใช้ไปเป็นสารอาหารของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนทำให้แอมโมเนียเหลือมากขึ้นและเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เมื่อละลายน้ำจะได้กรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อกรดคาร์บอนิกแตกตัวจะให้  $\text{H}^+$  และ  $\text{HCO}_3^-$  เมื่อ  $\text{HCO}_3^-$  รวมกับ  $\text{NH}_4^+$  จะเกิดเป็นแอมโมเนียม

ไบคาร์บอเนต หรือสภาพต่างไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) สภาพต่างทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้น (สุชัญญาทองเครือ, 2547) แสดงให้เห็นว่าในถังหมักนั้นมีความเป็นบัพเฟออร์เกิดขึ้นในระบบ โดยจะช่วยป้องกันแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนให้สามารถทนต่อกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้

สภาพต่างทั้งหมดมีข้อดีคือ แม้ระบบนี้มีค่ากรดอินทรีย์สูงถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก ก็จะไม่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย ถ้ามีสภาพต่างทั้งหมดเพียงพอ ซึ่งระบบในการทดลองนี้ไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าสภาพต่างทั้งหมด แต่ถ้ามีมากเกินไป จะทำให้ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียได้ อันเนื่องมาจากความเป็นพิษของแอมโมเนีย McCarty (1964) กล่าวไว้ว่า อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดสูงกว่า 0.8 จะทำให้เกิดพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ต้องกังวลกับผลดังกล่าว โดยที่ค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.34 - 0.63 ตลอดการทดลอง

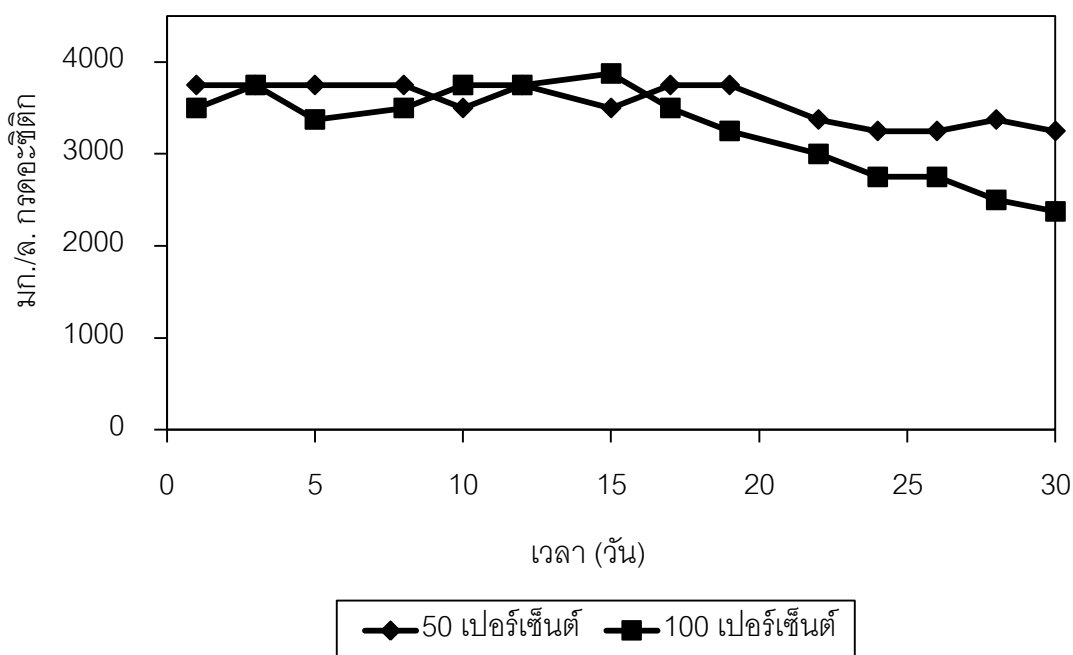
#### 4.4.1.4 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

กรดอินทรีย์ระเหยเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสภาวะการทำงานของกระบวนการได้เป็นอย่างดีเพราะถ้าปฏิกริยาการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยไปเป็นก๊าซมีเทน ไม่สมดุลกับอัตราการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งปกติปฏิกริยาสร้างกรดอินทรีย์ระเหยจะเกิดได้ดีกว่าเสมอ ทำให้เกิดสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหย เป็นผลให้ความเข้มข้นในระบบสูงขึ้น และถ้าไม่มีการควบคุมที่ดีพอ จะทำให้พีเอชลดลงจนระบบทำงานล้มเหลว (Metcalf and Eddy, 1991)

เมื่อเดินระบบพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของทุกการทดลองมีแนวโน้มลดลงขึ้นดังภาพที่ 4.6 ซึ่งค่ากรดอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์นี้คิดในรูปของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) พบว่าที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำหมักที่ออกจากระบบจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 3,750 และ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จนสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 3,250 และ 2,375 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะเห็นว่าจากอัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่มีการหมุนเวียนตะกอนกลับน้อยกว่าที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แบคทีเรียมีการนำกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้ได้น้อยจึงมีการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกริยามากกว่าที่อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสังเกตได้จากก๊าซที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 60.9 และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดในช่วงนี้ด้วย (จากตารางที่ 4.6 ที่ค่าอัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 56.33) จึงอาจสรุปได้ว่าที่อัตราการเวียนตะกอนที่ 100 เปอร์เซ็นต์มีผลทำให้เกิด Methanogenesis ได้ดีกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการเวียนตะกอนยังเป็นการเพิ่มจำนวนและ

การกระจายตัวของจุลินทรีย์เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ด้วยเหตุนี้ กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย (Acid Formation) ที่อัตราความเร็ว 50 เปอร์เซ็นต์ จึงเกิดขึ้นได้ค่อนข้างน้อยกว่าที่อัตราความเร็ว 100 เปอร์เซ็นต์ จึงมีกรดอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทนเหลือมากกว่า ดังนั้นการหมุนเวียนตะกอนในอัตราที่สูงขึ้นทำให้กระบวนการเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยมากขึ้น

จากการที่มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงทุกอัตราส่วนการเวียนตะกอน เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซมีเทน ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ลดลง (Mtz.-Vituria *et al.*, 1995) และจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในการทดลองที่อัตราความเร็ว 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำให้ไม่มีผลไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์พวก Methanogen bacteria (Schober *et al.*, 1999)



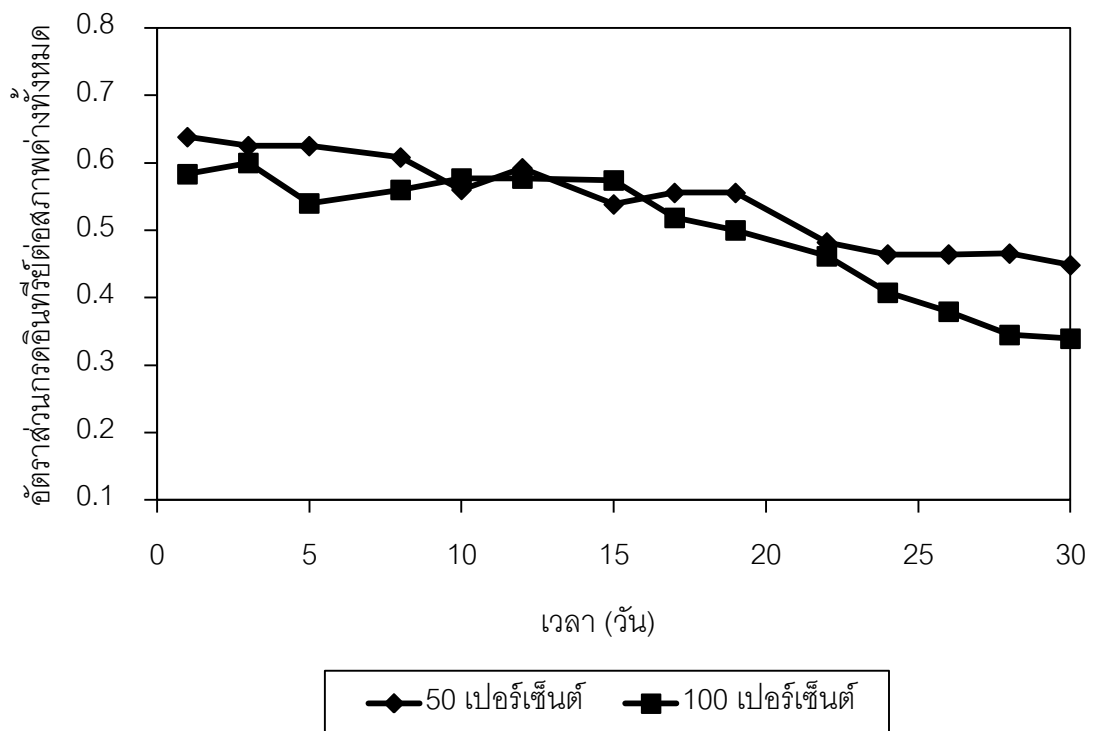
ภาพที่ 4.6 กรดอินทรีย์ระเหยของน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนต่างๆ

#### 4.4.1.5 อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมด

อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสมดุลของระบบซึ่งจะบอกถึงสภาวะการทำงานของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้

เป็นอย่างดี WPCF (Water Pollution Control Federation) ได้ยอมรับค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อค่าความเป็นด่างทั้งหมด ให้เป็นตัวควบคุมระบบ โดยกล่าวว่า ในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ เมื่อค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดมากกว่า 0.8 จะทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากพิษของกรดอินทรีย์ (Metcalf and Eddy, 1991)

จากการทดลองอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.7 พบว่า เมื่อเริ่มต้นจะมีค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดเท่ากับ 0.63 และ 0.58 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า มีแนวโน้มลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.45 และ 0.34 จะเห็นได้ว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีแนวโน้มอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดสูงกว่าที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์สะสมในระบบสูงกว่า ซึ่งอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพีเอช กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดมีค่ามากพีเอชจะน้อยเมื่ออัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดน้อยพีเอชจะมาก

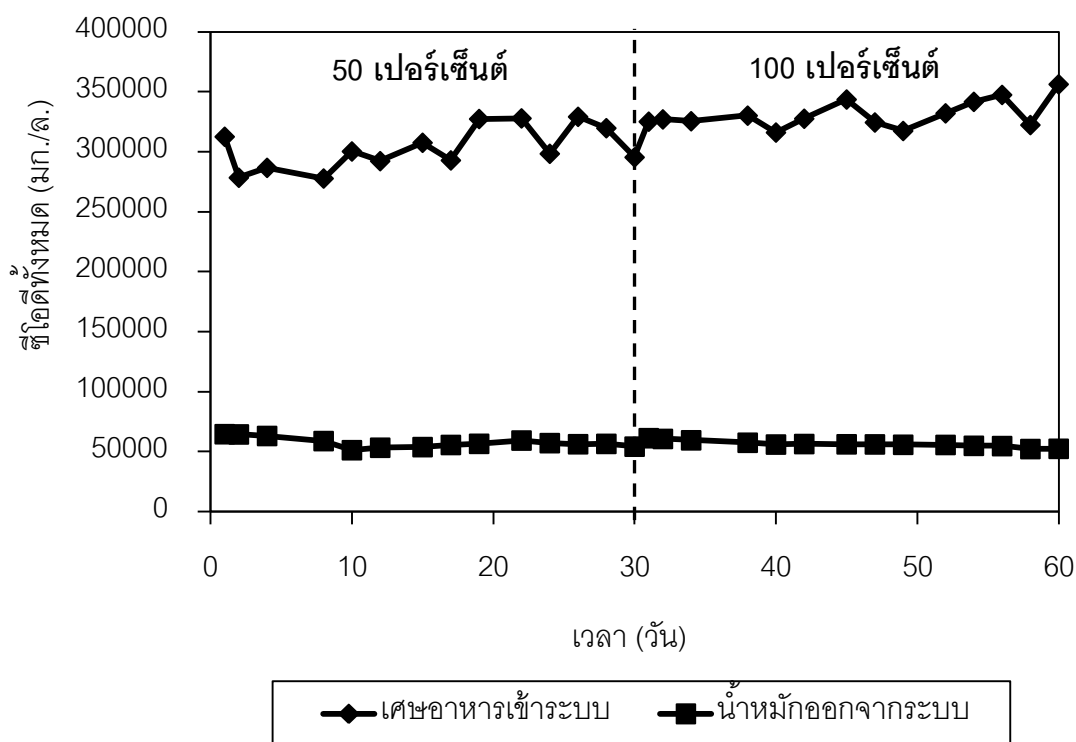


ภาพที่ 4.7 อัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อสภาพด่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนต่างๆ

#### 4.4.1.6 ซีไอดีทั้งหมด

ซีไอดีทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถของระบบในการบำบัดของเสียในระบบ โดยค่าซีไอดีทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบของการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 277,840 – 380,472 และ 316,160 – 356,352 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังภาพที่ 4.8

เมื่อพิจารณาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเศษอาหารในระบบที่อยู่ในสภาพสมดุลของสภาวะที่มีจุลินทรีย์ที่ปรับตัวให้เข้ากับลักษณะเศษอาหารได้แล้ว ทำให้การเปลี่ยนแปลงของซีไอดีทั้งหมดค่อนข้างน้อย จากการทดลองที่ค่าอัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าซีไอดีทั้งหมดของน้ำหมักที่ได้จากการย่อยสลายเศษอาหารคือ 64,750 และ 61,413 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจากการหมุนเวียนตะกอนกลับ ช่วยให้ซีไอดีละลายตัวออกมาได้มากขึ้น และยังเพิ่มการกระจายตัวของจุลินทรีย์เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น เมื่อเดินระบบครบ 30 วัน พบว่าอัตราเวียนตะกอนต่างๆ มีแนวโน้มของค่าซีไอดีทั้งหมดลดลง ซึ่งค่าสุดท้ายของแต่ละอัตราส่วนเท่ากับ 54,363 และ 52,565 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ในระดับหนึ่ง เพื่อนำไปผลิตก๊าซมีเทนในขั้นสุดท้ายแต่ปริมาณค่าซีไอดียังคงมีค่าสูงอยู่ดังนั้นถ้าต้องการลดปริมาณซีไอดีลงอีกควรที่จะต้องมีการใช้ระบบบำบัดแบบอื่นมาร่วมด้วย เช่น ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เป็นต้น

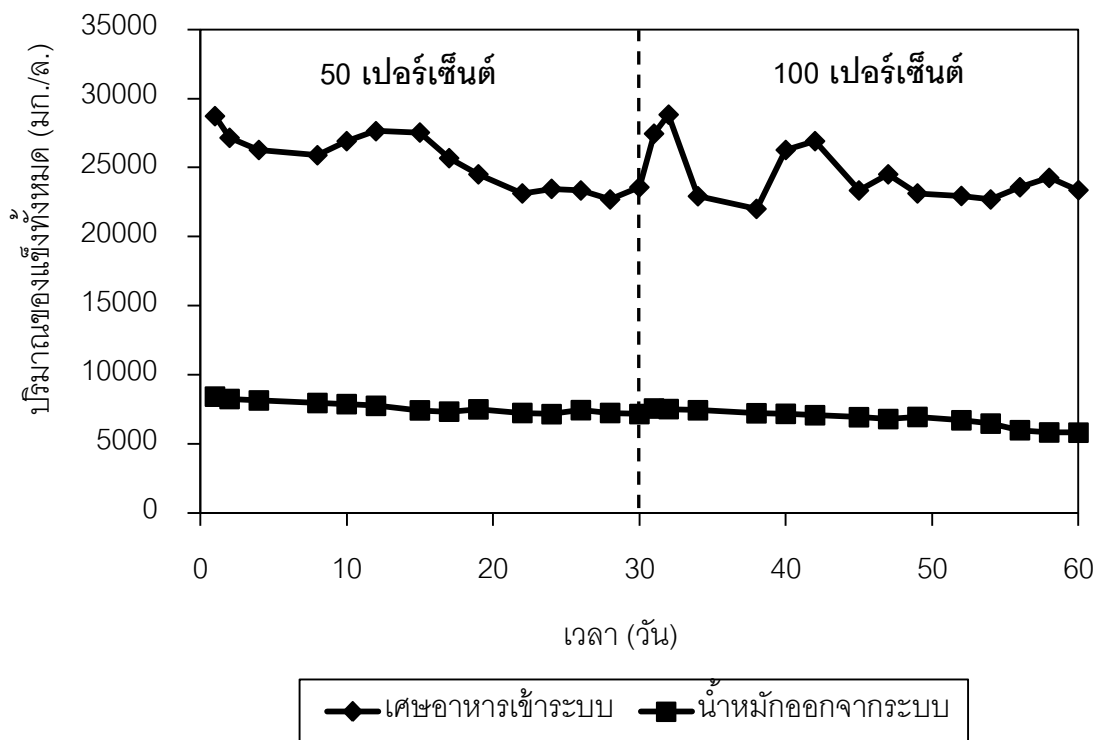


ภาพที่ 4.8 ซีไอดีทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปรอร์เซ็นต์

#### 4.4.1.7 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบตลอดการทดลองที่อัตราส่วนเวียนตะกอน 50 และ 100 เปรอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 22,703 – 28729 และ 22,022 – 28,837 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งค่าของปริมาณของแข็งทั้งหมดจะมีค่าผันแปรขึ้นอยู่กับคุณลักษณะองค์ประกอบของเศษอาหารที่เข้าระบบในแต่ละวันเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองของอาริยา (2546) พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารอยู่ในช่วง 27,000 - 48,240 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับค่าปริมาณของแข็งในน้ำหมักที่ได้จากการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปรอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองจะมีค่าคือ 8,443 และ 7,583 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อเดินระบบครบ 30 วัน พบว่าที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปรอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับกับ 7,182 และ 5,836 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจากภาพที่ 4.6 ที่มีค่ากรดอินทรีย์

ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้ายของการเดินระบบเนื่องจากถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนต่อไป



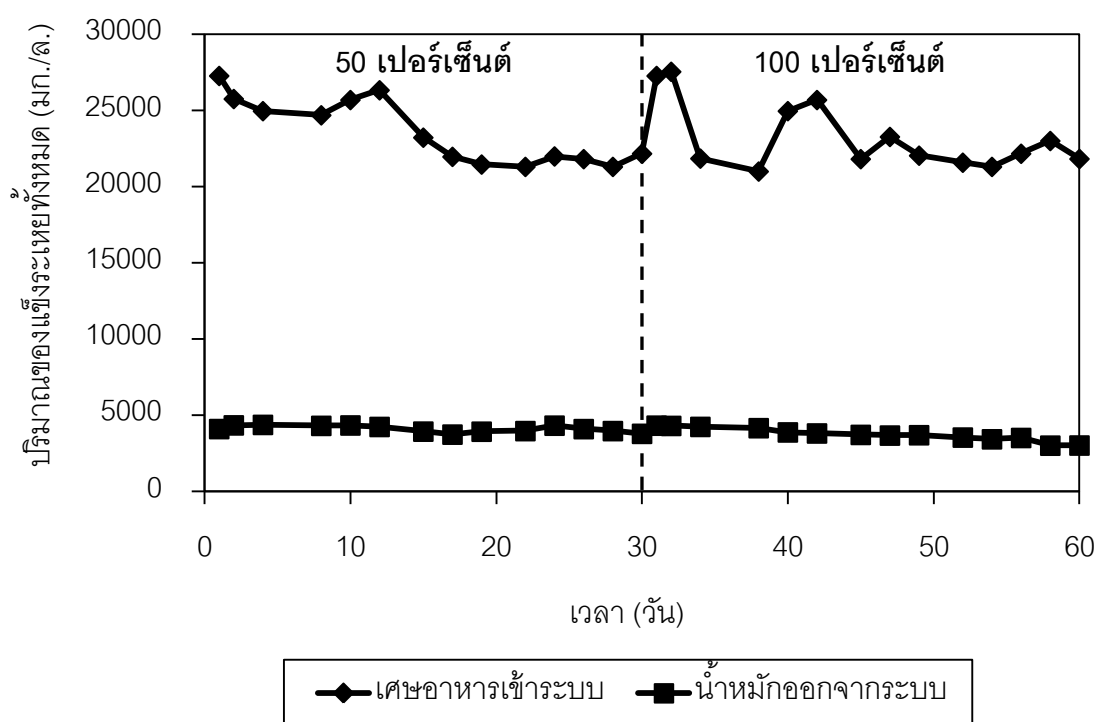
ภาพที่ 4.9 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

#### 4.4.1.8 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด

ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 21,304 – 22,727 และ 20,998 – 27,543 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งค่าของปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดจะมีค่าผันแปรขึ้นอยู่กับคุณลักษณะองค์ประกอบของเศษอาหารที่เข้าระบบในแต่ละวันเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอาริยา (2546) พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารอยู่ในช่วง 24,720 – 46,080 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับค่าปริมาณของแข็งระเหยในน้ำหมักที่ได้จากการทดลองที่ค่าอัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อเริ่มต้นการทดลองจะมีค่าคือ 4,102 และ 4,324 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อเดินระบบครบ 30 วัน พบว่าอัตราเวียนตะกอนต่างๆ มี



แนวโน้มของค่าปริมาณของแข็งระเหยลดลง โดยค่าสุดท้ายของแต่ละอัตราส่วนเท่ากับ 3,789 และ 3,021 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในองค์ประกอบของเศษอาหารจะมีสารอินทรีย์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศจนกลายเป็นกรดอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะทำให้ค่าของแข็งระเหยทั้งหมดลดลง แสดงว่าระบบสามารถลดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายลงได้

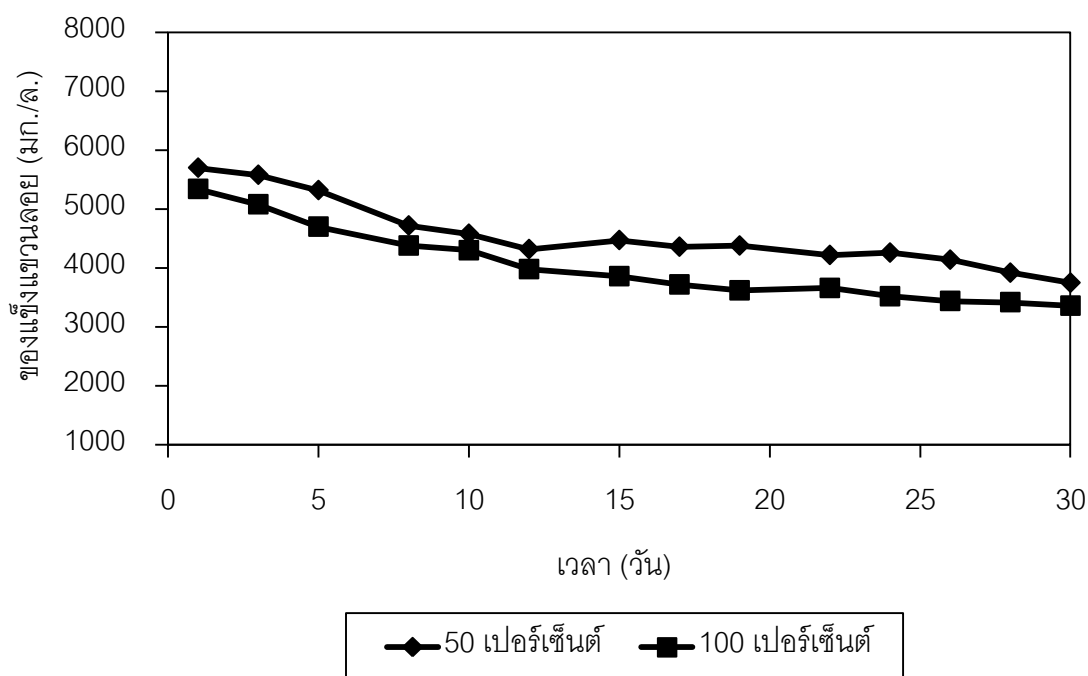


ภาพที่ 4.10 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

#### 4.4.1.9 ปริมาณของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอย เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำแต่จะปนอยู่ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วย สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดรวมทั้งจุลินทรีย์ที่เกิดและตาย และเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงค่าความสกปรกของน้ำเสียนั้น ตลอดจนบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนในการบำบัด ซึ่งน้ำหมักที่ได้จากการหมักเศษอาหารส่วนใหญ่จะมีอนุภาคเป็นพวกที่ย่อยสลายได้ง่าย ทำให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่ออกมาปริมาณมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีที่ยังมีค่ามากอยู่ ซึ่งจะแสดงถึงความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีค่ามากด้วยเช่นกัน

จากการทดลองพบว่า ค่าของปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำหมักที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 3,920 – 5,700 และ 3,360 - 5,340 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ  $4,551.64 \pm 590.17$  และ  $4,027.14 \pm 639.98$  มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ (ภาพที่ 4.11 ) จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนอัตราการเวียนตะกอนเพิ่มขึ้นค่าของแข็งแขวนลอยก็ลดลงเนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มการเวียนตะกอนทำให้เพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในตอนต้นทำให้ช่วยย่อยสลายเศษอาหารที่เพิ่งเข้าระบบได้มากขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบลดลง แสดงให้เห็นว่าสามารถลดสารอินทรีย์และลดการสูญเสียจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบที่จะทำให้ระบบล้มเหลวได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำหมักที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพและความสัมพันธ์ต่างๆ ภายในระบบ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบไร้อากาศแบบแห้งช่วงการเพิ่มอัตราเวียนตะกอนพบว่า มีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งภาพรวมของพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 4.4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)

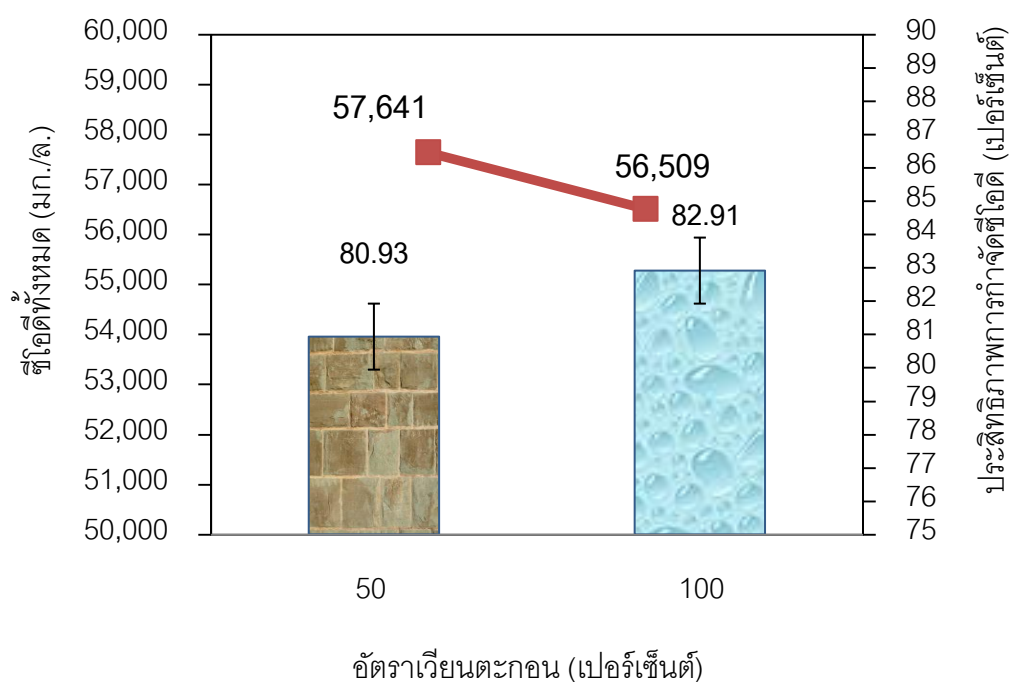
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนต่างๆ จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.12 พบว่า ที่อัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซนต์ ลดค่าซีโอดีจาก  $303,392 \pm 17,765.46$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $57,641 \pm 4,134.85$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดซีโอดีได้  $80.93 \pm 1.96$  เปอร์เซนต์ ส่วนที่อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซนต์ ลดค่าซีโอดีจาก  $331,280 \pm 11,767.97$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $56,509 \pm 2,667.18$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดซีโอดีได้  $82.91 \pm 1.16$  เปอร์เซนต์ แสดงว่าระบบสามารถลดความสกปรกได้ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ โดยใช้สถิติ พบว่า ที่ค่าอัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซนต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งที่อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซนต์ จะเป็นการเพิ่มจุลินทรีย์กลับเข้าสู่ระบบจำนวนมาก และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยในการทดลองนี้ลดลง ซึ่งทำให้ค่าซีโอดีลดลงและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในช่วงนี้สูงมากกว่าอัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซนต์ ด้วยเหตุนี้จึงอาจจะสรุปได้ว่าการเวียนตะกอนกลับในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้น

สอดคล้องกับการทดลองของ Sanphoti (2006) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการเวียนน้ำชะขยะและการเติมน้ำต่อการผลิตก๊าซมีเทนและการย่อยสลายของเสียในหลุมฝังกลบแบบจำลอง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเวียนน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบและมีการเวียนน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 3, 4 และ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเวียนตะกอนและที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 3, 4 และ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีค่าเท่ากับ 65.62, 79.31 และ 89.54 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่มีการเวียนตะกอนและที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 3, 4 และ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน จะมีค่าเท่ากับ 67.45, 81.20 และ 91.02 เปอร์เซนต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้นและมีการเวียนน้ำชะขยะทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้มากขึ้นและทำให้ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้มากขึ้นจึงทำให้สามารถเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

อัตราเวียนตะกอน (ร้อยละ)	ค่าซีไอดีทั้งหมดเฉลี่ย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	เศษอาหารที่เข้า ระบบ	น้ำหมักที่ออกจาก ระบบ	
50	303,392±17,765.46	57,641±4,134.85	80.93±1.96 <sup>a</sup>
100	331,280±11,767.97	56,509±2,667.18	82.91± 1.16 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ



ภาพที่ 4.12 ค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

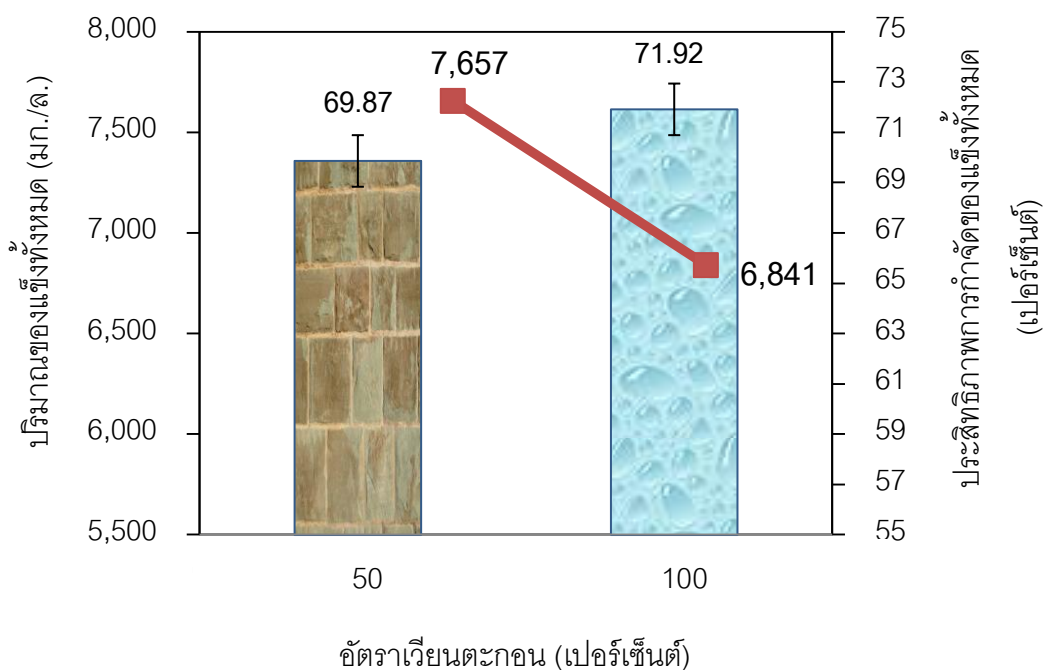
#### 4.4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด

เมื่อทำการทดลองที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.13 พบว่า ที่อัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าของแข็งทั้งหมดจาก  $25,474 \pm 1,990.58$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $7,657 \pm 429.45$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดได้  $69.87 \pm 1.45$  เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าของแข็งทั้งหมดจาก  $24,453 \pm 2,077.25$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $6,841 \pm 595.46$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดได้  $71.92 \pm 2.65$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ โดยใช้สถิติ พบว่า ที่ค่าอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าการเวียนตะกอนกลับในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดได้เพิ่มขึ้นและทำให้ช่วยลดความเข้มข้นของน้ำหมักที่ออกจากระบบได้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

อัตราเวียนตะกอน (ร้อยละ)	ค่าของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	เศษอาหารที่เข้า ระบบ	น้ำหมักที่ออกจาก ระบบ	
50	$25,474 \pm 1,990.58$	$7,657 \pm 429.45$	$69.87 \pm 1.45^a$
100	$24,453 \pm 2,077.25$	$6,841 \pm 595.46$	$71.92 \pm 2.65^b$

หมายเหตุ: อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ



ภาพที่ 4.13 ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

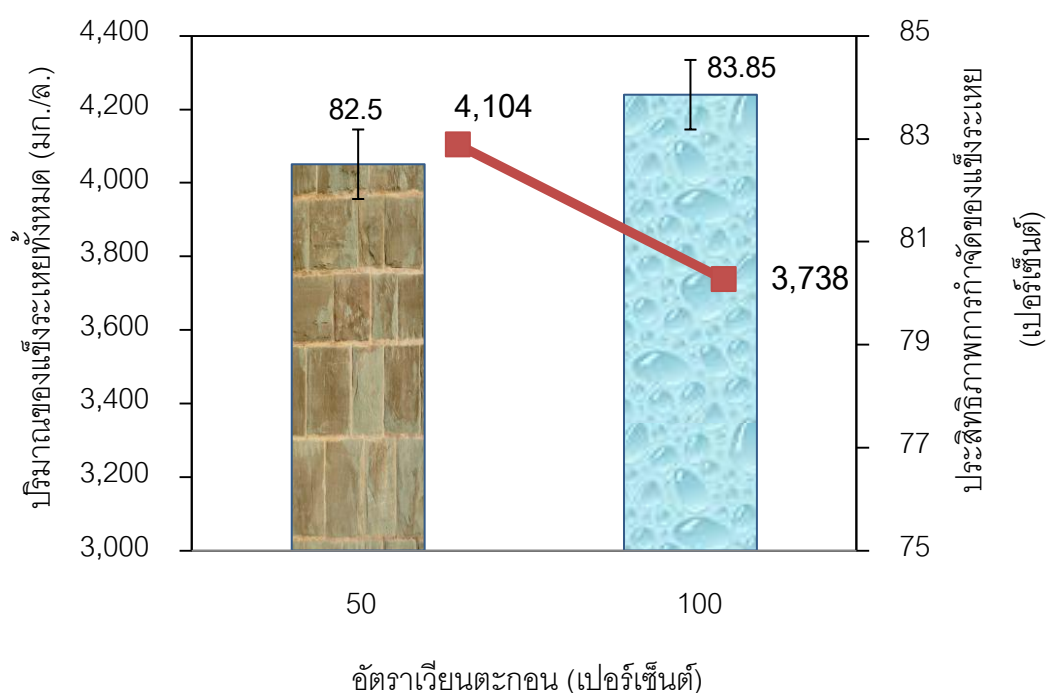
#### 4.4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด

เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนต่างๆ จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14 พบว่า ที่อัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าของแข็งระเหยทั้งหมดจาก  $23,565 \pm 2,126.51$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $4,104 \pm 219.08$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดของแข็งระเหยได้  $82.50 \pm 1.21$  เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าของแข็งระเหยทั้งหมดจาก  $23,236 \pm 2,216.96$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $3,738 \pm 425.69$  มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือสามารถกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดได้  $83.85 \pm 1.81$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ โดยใช้สถิติ พบว่า ที่ค่าอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าการเวียนตะกอนกลับในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดได้เพิ่มขึ้นและทำให้ช่วยลดความเข้มข้นของน้ำหมักที่ออกจากระบบได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

อัตราเวียนตะกอน (ร้อยละ)	ค่าของแข็งระเหยทั้งหมดเฉลี่ย (มก./ล.)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	เศษอาหารที่เข้า ระบบ	น้ำหมักที่ออกจาก ระบบ	
50	23,565±2,126.51	4,104±219.08	82.50±1.21 <sup>a</sup>
100	23,236±2,216.96	3,738±425.69	83.85±1.81 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ



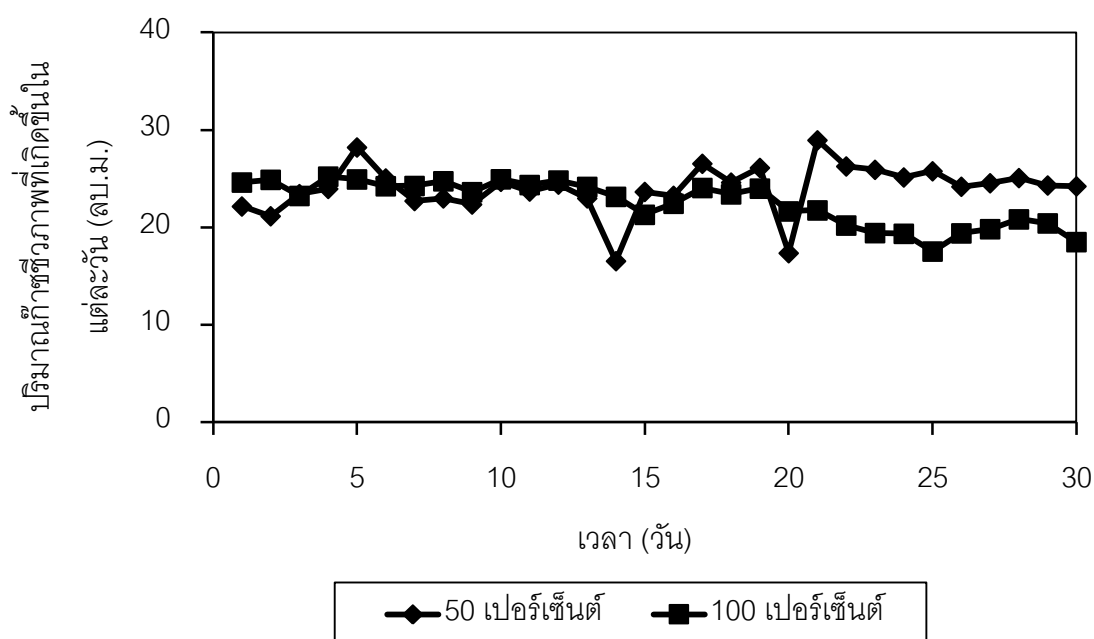
ภาพที่ 4.14 ค่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบ ตลอดการทดลองที่อัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์

#### 4.4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนมากจะประกอบด้วย ก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของของเสียที่เข้าระบบรวมถึงความสมดุลและเสถียรภาพของระบบด้วย ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบ

##### 4.4.3.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น

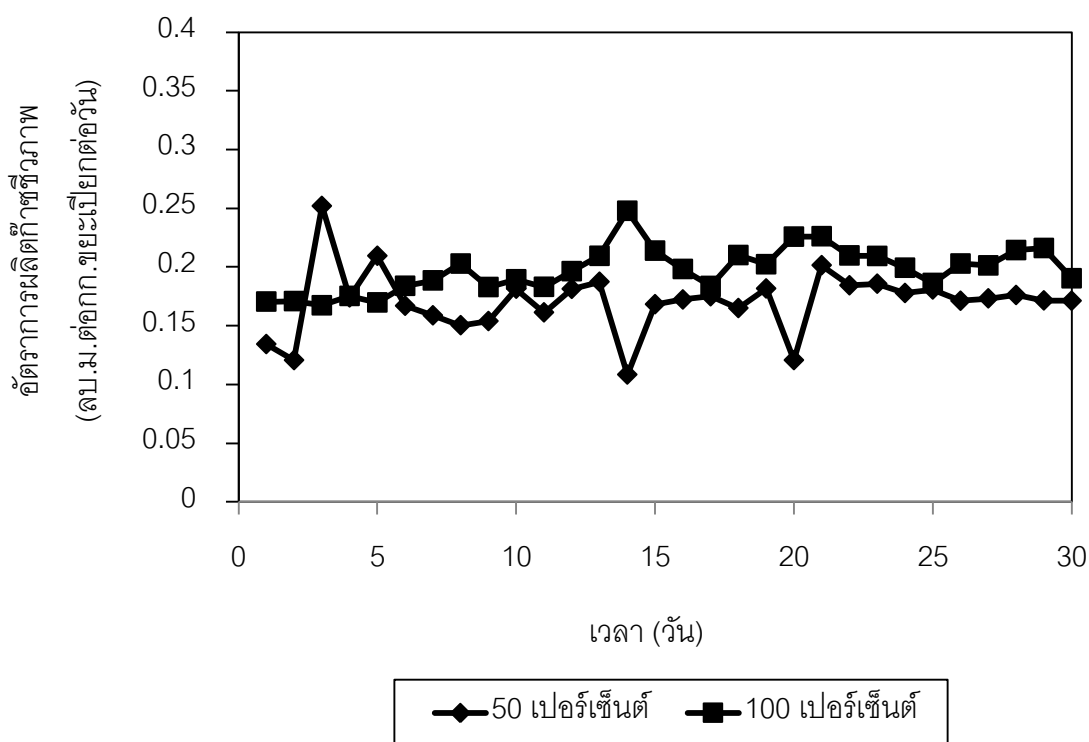
เนื่องจากระบบแบบไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระบบจริงทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการวัดผ่านมิเตอร์จึงมีปริมาณมาก พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีค่าเฉลี่ยของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่อัตราการเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซนต์ คือ  $24.00 \pm 2.55$  และ  $22.50 \pm 2.29$  ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังภาพที่ 4.15 ซึ่งที่ 50 เปอร์เซนต์มีค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณมีแนวโน้มลดลงกว่าในช่วงแรกอาจเนื่องมาจากปริมาณเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบที่อัตราการเวียนตะกอน 50 เปอร์เซนต์มีมากกว่า ดังภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ที่เข้าระบบก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพภายในระบบ



ภาพที่ 4.15 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่อัตราการเวียนตะกอนต่างๆ



เมื่อมาพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบที่อัตราการเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ คือ  $0.17 \pm 0.02$  และ  $0.20 \pm 0.01$  ลบ.ม.ต่อ กก.ขยะเปียก-วัน ซึ่งดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.16 พบว่าที่อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในเรื่องประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ  $82.91 \pm 1.16$  เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการเวียนตะกอนทำให้สามารถเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้นจึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น ถึงแม้ภาพรวมของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้อาจจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบก็ตาม



ภาพที่ 4.16 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

ซึ่งสอดคล้องกับสุพินดา ชูระเจน (2544) ได้ทำการทดลองการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมუნเวียนน้ำชะขยะแตกต่างกันที่ 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 200 วัน พบว่าหากเพิ่มอัตราการหมუნเวียนน้ำชะขยะมากขึ้น การผลิตก๊าซชีวภาพจะมากขึ้นด้วยคือ 25.74, 156.2 และ 129.14 ลิตร ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงอาจสรุปได้ว่าการหมუნเวียนน้ำชะขยะกลับทำให้กระบวนการ

เปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นสมบูรณ์มากกว่าในระบบที่ไม่มี การหมუნเวียนน้ำชะขยะ

สอดคล้องกับชยันต์ กิมยงค์ (2545) ได้ทำการศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพ จากมูลสุกรในถังปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนที่มีการไหลวนกลับของน้ำเสียที่ 2, 4 และ 6 ลิตรต่อวัน ที่ความหนาชั้นมูลสุกร 10 เซนติเมตร หรือปริมาณมูลสุกรบรรจุ 8.4 กิโลกรัม พบว่าการเพิ่ม ปริมาณน้ำในการไหลวนจะช่วยเพิ่มให้มีการพาสารอินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ไป กำจัดในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น ทำให้เกิดก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ได้มากขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40 วันแรก และความสามารถ ในการกำจัดซีโอดีทั้งหมดที่อัตราการไหลวนน้ำ 2, 4 และ 6 ลิตรต่อวัน เป็น 3.1, 3.0 และ 3.3 กิโลกรัม ตามลำดับ และผลิตก๊าซชีวภาพได้ 38, 52 และ 135 ลิตร ตามลำดับ

#### 4.4.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทน

การวิเคราะห์หาองค์ของก๊าซชีวภาพด้วยก๊าซโครมาโทกราฟีเมื่อคิดเป็น เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน ( $\% \text{CH}_4$ ) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 4.6 พบว่า ที่อัตรา เวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $56.33 \pm 4.70$  เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราเวียน ตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $60.90 \pm 1.18$  เปอร์เซ็นต์ซึ่ง ที่ อัตรา เวียน ตะกอน 100 จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากที่ อัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเป็นการคืนชีพเฟอร์กัลกลับมาที่ต้นระบบจึงทำให้พีเอช เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจึงทำให้สามารถย่อยสลายเศษอาหารได้มากซึ่งเป็นอาหาร ของแบคทีเรียนำไปใช้ในการสร้างมีเทนทำให้เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ได้มีปริมาณมากกว่าแต่ก็ไม่ แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ สุพินดา ฐระเจน (2544) ได้ทำการทดลองการ เพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมუნเวียนน้ำชะขยะ แตกต่างกันที่ 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 200 วัน พบว่าเมื่ออัตรา การหมუნเวียนน้ำชะขยะเพิ่มขึ้นมีผลให้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นด้วยคือ 40.88, 48.61 และ 52.45 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของ substrate ที่ใช้ ในการทดลอง จึงอาจสรุปได้ว่าการหมუნเวียนน้ำชะขยะกลับในอัตราสูงขึ้น ทำให้ระบบมีอัตราการ ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 4.6** แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบและ เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนเฉลี่ย ตลอดจนการทดลองที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

อัตราการเวียน ตะกอน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย		
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อ ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบ (ลบ.ม.ต่อกก.ขยะเปียก-วัน)	ก๊าซมีเทน (เปอร์เซ็นต์)
50	24.00±2.55 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>a</sup>	56.33±4.70 <sup>a</sup>
100	22.50±2.29 <sup>b</sup>	0.20±0.01 <sup>b</sup>	60.90±1.18 <sup>b</sup>

หมายเหตุ อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

#### 4.4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์พิจารณาเป็นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ (gas production per organic weight addition) และก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas production per organic weight removal)

##### 4.4.4.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ (gas production per organic weight addition)

1) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ

ผลจากการศึกษาของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.54 \pm 0.06$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม,  $6.88 \pm 0.9$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติมและ  $7.45 \pm 1.05$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม เมื่อทำการศึกษาของค่าอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.59 \pm 0.05$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม,  $7.99 \pm 1.11$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติมและ  $8.44 \pm 1.25$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

2) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ

ผลจากการศึกษาของอัตราเวียนตะกอนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.30 \pm 0.01$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม,  $3.80 \pm 0.92$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติมและ  $4.10 \pm 1.01$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม เมื่อทำการศึกษาของค่าอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.35 \pm 0.02$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม,  $4.78 \pm 0.95$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม และ  $5.03 \pm 1.12$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 4.7 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

อัตราเวียนตะกอน	50 เปอร์เซนต์	100 เปอร์เซนต์
อัตราผลิตก๊าซชีวภาพต่อ		
กก.ซีโอดีที่เติม (ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม)	0.54±0.06 <sup>a</sup>	0.59±0.05 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม)	6.88±0.93 <sup>a</sup>	7.99±1.11 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม)	7.45±1.05 <sup>a</sup>	8.44±1.25 <sup>b</sup>
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อ		
กก.ซีโอดีที่เติม (ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เติม)	0.30±0.01 <sup>a</sup>	0.35±0.02 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม)	3.80±0.92 <sup>a</sup>	4.78±0.95 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เติม)	4.10±1.01 <sup>a</sup>	5.03±1.12 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

#### 4.4.4.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas production per organic weight removal)

1) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

ผลจากการศึกษาของอัตราการเวียนตะกอนที่ 50 เปอร์เซนต์ พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย 0.66±0.11 ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด, 9.86±1.45 ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดและ 9.04±1.36 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด

เมื่อทำการศึกษาของค่าอัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.71 \pm 0.06$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด,  $11.15 \pm 1.71$  ลิตร/กรัม ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดและ  $10.07 \pm 1.54$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัดแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

## 2) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

ผลจากการศึกษาของอัตราการเวียนตะกอนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.34 \pm 0.01$  ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด,  $5.43 \pm 1.22$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดและ  $4.98 \pm 1.23$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัดเมื่อทำการศึกษาของค่าอัตราการเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.43 \pm 0.04$  ลิตร/กรัม ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด,  $6.59 \pm 1.31$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด และ  $5.95 \pm 1.28$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัดแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และจะเห็นได้อีกว่าค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราเวียนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับมีเทนยิลด์ตามทฤษฎีคือปริมาณก๊าซมีเทนที่ควรผลิตได้ตามทฤษฎี คือ 1 กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตรที่ STP (Metcalf and Eddy, 1991)

สอดคล้องกับการทดลองของสุพินดา ชูระเจน (2544) ได้ทำการทดลองการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมუნเวียนน้ำชะขยะแตกต่างกันที่ 10 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 200 วัน พบว่าเมื่ออัตราการหมუნเวียนน้ำชะขยะเพิ่มขึ้นจาก 10 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ Methane Yield เพิ่มขึ้นด้วยคือ 0.192 ลิตรต่อกรัมซีโอดี 0.329 ลิตรต่อกรัมซีโอดี และ 0.576 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงอาจสรุปได้ว่าการหมუნเวียนน้ำหมักกลับในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้ระบบมี Methane Yield เพิ่มขึ้น

แต่ที่การทดลองของพิมพีใจ นามศรี (2552) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและพัลพ์สับปะรดโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศโดยมีการหมუნเวียนน้ำหมักที่ปริมาณ 20 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรถังหมัก ที่ปริมาณของแข็ง 4 เปอร์เซ็นต์ HRT 10 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการเวียนน้ำหมักจาก 20 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรถัง

หมัก ค่า Biogas Yield และ Methane Yield จะเพิ่มขึ้นจาก 0.43 เป็น 0.48 ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด และ 0.17 เป็น 0.21 ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มการหมุนเวียนน้ำหมักเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า Biogas Yield และ Methane Yield ต่ำลงเนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์และค่า pH ที่ทำยถึงหมักลดลงเหลือเพียง 5.5 ซึ่งสภาวะนี้เกิดความเป็นพิษต่อ Methanogen bacteria ทำให้อัตราการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพต่ำลง

**ตารางที่ 4.8** อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

อัตราเวียนตะกอน	50 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์
อัตราผลิตก๊าซชีวภาพต่อ		
กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)	0.66±0.11 <sup>a</sup>	0.71±0.06 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	9.86±1.45 <sup>a</sup>	11.15±1.71 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	9.04±1.36 <sup>a</sup>	10.07±1.54 <sup>b</sup>
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อ		
กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)	0.34±0.01 <sup>a</sup>	0.43±0.04 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	5.43±1.22 <sup>a</sup>	6.59±1.31 <sup>b</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	4.98±1.23 <sup>a</sup>	5.95±1.28 <sup>b</sup>

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราเวียนตะกอนต่างๆ

จากความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบและที่ถูกรำจัด พบว่าอัตราเวียนตะกอน 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าเมื่อมีการเวียนตะกอนเพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์และเพิ่มสภาพของบัพเพอร์เพื่อควบคุมพีเอชของถังหมักให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น

#### 4.5 ผลการทดลองครั้งที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ

##### 4.5.1 สภาวะการทำงานของระบบต่อเงื่อนไขแบบขั้นตอนเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่มีเวลาการกวนแตกต่างกัน

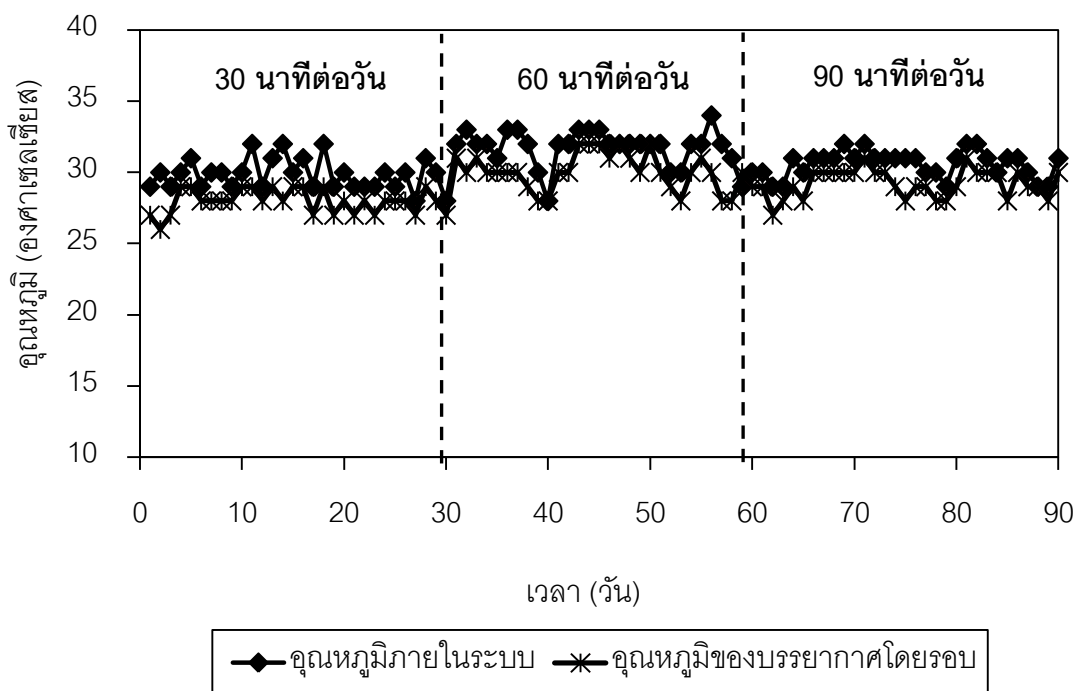
ในระหว่างการทดลองจะมีการนำเศษอาหารและน้ำหมักที่จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิ ค่าพีเอช ปริมาณซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย และสภาพต่างทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.5.1.1 อุณหภูมิ

การทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศจำเป็นต้องมีอุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งอุณหภูมิในประเทศไทยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงนี้จะมีค่าอยู่ที่ 30 – 38 องศาเซลเซียส โดยส่วนใหญ่แล้วในถังปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิมากกว่า 0.6 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกระบบเนื่องมาจากภายในถังปฏิกรณ์มีการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้อุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองเกี่ยวกับการกวนก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ได้ จากการทดลองเวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวันพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหมักที่ออกจากระบบกับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบพบว่ามีค่าอุณหภูมิของของบรรยากาศมีค่าใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิภายในระบบโดยในการทดลองค่าเวลาการกวน 30 นาทีต่อวัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 26.0 – 32.0 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ค่าเวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 28.0 – 34.0 องศาเซลเซียส และการทดลองที่ค่าเวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 27.0 – 32.0 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง



อุณหภูมิที่เหมาะสมคือช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic rage) ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

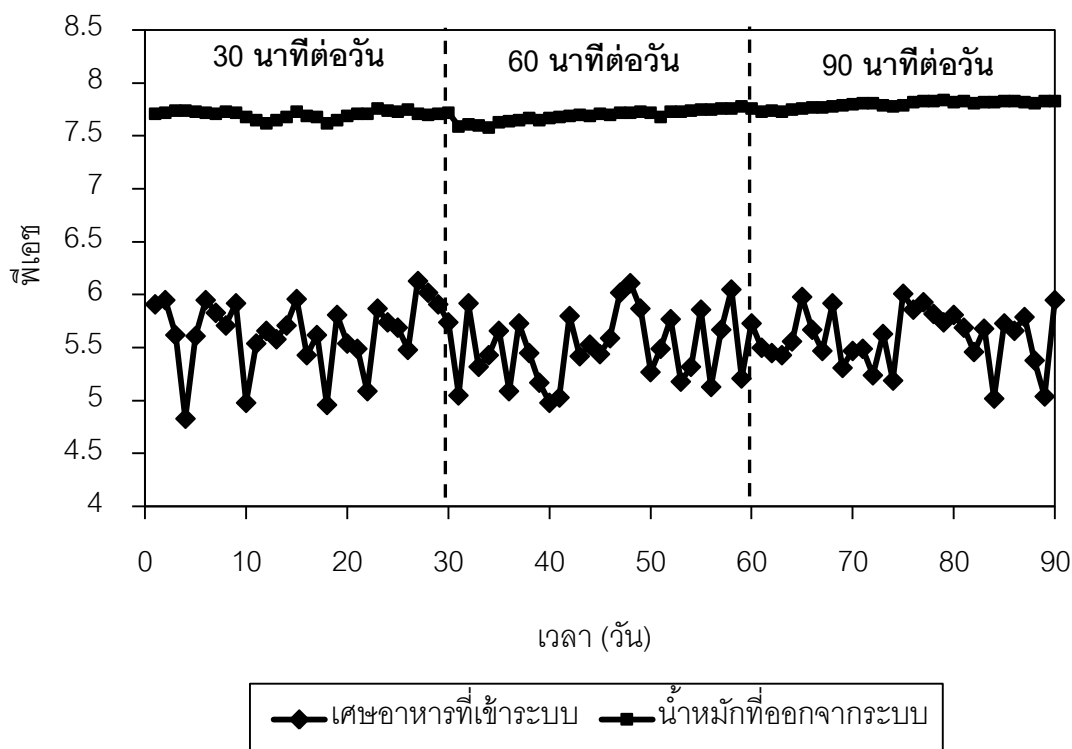


ภาพที่ 4.17 อุณหภูมิของน้ำหมักภายในระบบและอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

#### 4.5.1.2 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบแบบไร้อากาศซึ่งช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogen bacteria) ประมาณ 6.0 – 8.0 ซึ่งถ้าค่าพีเอชต่ำหรือสูงกว่านี้จะมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง โดย Seagren *et al.* (1991) ได้กล่าวว่า การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะหยุดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 8.0 เนื่องจากเมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนจะทำให้เกิดแอมโมเนียไอออนหรือก๊าซแอมโมเนียเมื่อพีเอชมากกว่า 8.0 จะมีการเปลี่ยนรูปมาเป็นก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งจะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดไร้อากาศมากกว่า  $\text{NH}_4^+$  (แอมโมเนียไนโตรเจน) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย

จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบตลอดการทดลอง เวลาการกรวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวันจะอยู่ในช่วง 4.83 – 6.13, 4.98 – 6.11 และ 5.02 – 6.01 ซึ่งค่าพีเอชที่ได้จะมีค่าขึ้นๆลงๆ เนื่องจากในแต่ละวันมีสัดส่วนองค์ประกอบของเศษอาหารที่เข้าระบบแตกต่างกันไป ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากการทดลองเวลาการกรวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.62 – 7.74 , 7.59 – 7.78 และ 7.73 – 7.83 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งการที่พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำเพิ่มความเป็นด่าง และไบคาร์บอเนตให้กับระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ระดับพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ช่วยให้พีเอชเพิ่มขึ้นแล้วยังมีแอมโมเนียเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากมีอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ด้วย ซึ่งย่อยสลายได้แอมโมเนียเป็นผลผลิตแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมตัวเป็นแอมโมเนียไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มสภาวะความเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบด้วย (พัทธนันท์ และคณะ, 2547) พีเอชจึงมีแนวโน้มมากกว่า 7.5 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรับเข้าสู่สมดุลได้เองโดยไม่ต้องทำการปรับค่าพีเอชของเศษอาหารที่เข้าสู่ระบบ แม้ว่าพีเอชของเศษอาหารที่เข้าระบบจะอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์สร้างมีเทนก็ตาม ระบบก็ยังสามารถทำงานได้ตามปกติและเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองพบว่ามีย่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ที่สูงพอ

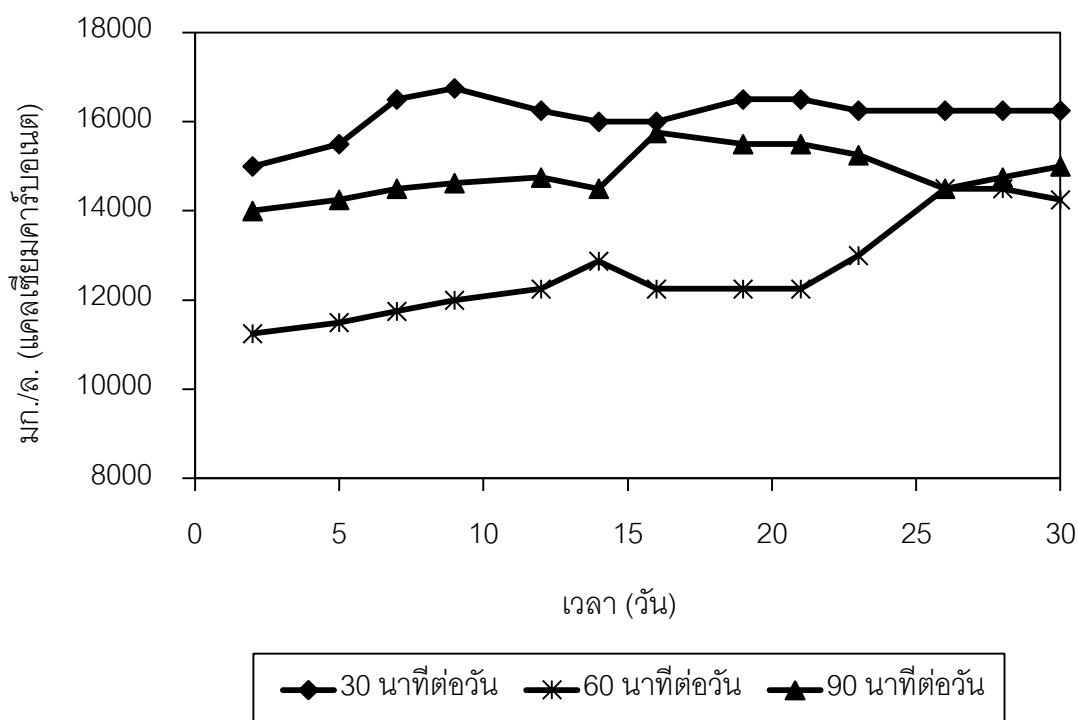


ภาพที่ 4.18 พีเอชของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

#### 4.5.1.3 สภาพต่างทั้งหมด

สภาพต่างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงปริมาณ Buffering Capacity ของระบบซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมพีเอชภายในระบบ โดยให้มีสภาพต่างและไบคาร์บอเนตอย่างน้อย 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (Lettinga *et al.*, 1980) เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ เมื่อมีกรดอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นตามอัตราการรับสารอินทรีย์

เมื่อเดินระบบพบว่าปริมาณความเป็นต่างทั้งหมดของทุกการทดลองมีแนวโน้มสูงขึ้นดังภาพที่ 4.19 ซึ่งความเป็นต่างทั้งหมดที่วิเคราะห์นี้คิดในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) พบว่าที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน ในน้ำหมักที่ออกจากระบบ จะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 15,000, 11,250 และ 14,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จนสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 16,250, 14,250 และ 15,000 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19 สภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการรดน้ำต่างๆ

จากภาพที่ 4.19 พบว่าสภาพต่างทั้งหมดในน้ำออกของทุกเวลาการรดน้ำต่างๆ ที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งการที่ปริมาณความเป็นต่างทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะเกิดแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) ขึ้นในระบบ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์และแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยถูกใช้ไปเป็นสารอาหารของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนทำให้แอมโมเนียมเหลือมากขึ้นและเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เมื่อละลายน้ำจะได้กรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อกรดคาร์บอนิกแตกตัวจะให้  $\text{H}^+$  และ  $\text{HCO}_3^-$  เมื่อรวม  $\text{HCO}_3^-$  ร่วมกับ  $\text{NH}_4^+$  จะเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต หรือสภาพต่างไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) ปริมาณความเป็นต่างทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้น (สุชัญญา ทองเครือ, 2547) แสดงให้เห็นว่าในถังหมักนั้นระบบเกิดความเป็นบัฟเฟอร์ โดยจะช่วยป้องกันแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนให้สามารถทนต่อกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้ โดยMcCarty (1964) กล่าวไว้ว่า อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดสูงกว่า 0.8 จะทำให้เกิดพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ต้องกังวลกับผลดังกล่าว โดยที่ค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.04 - 0.15 ตลอดการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูงพอ

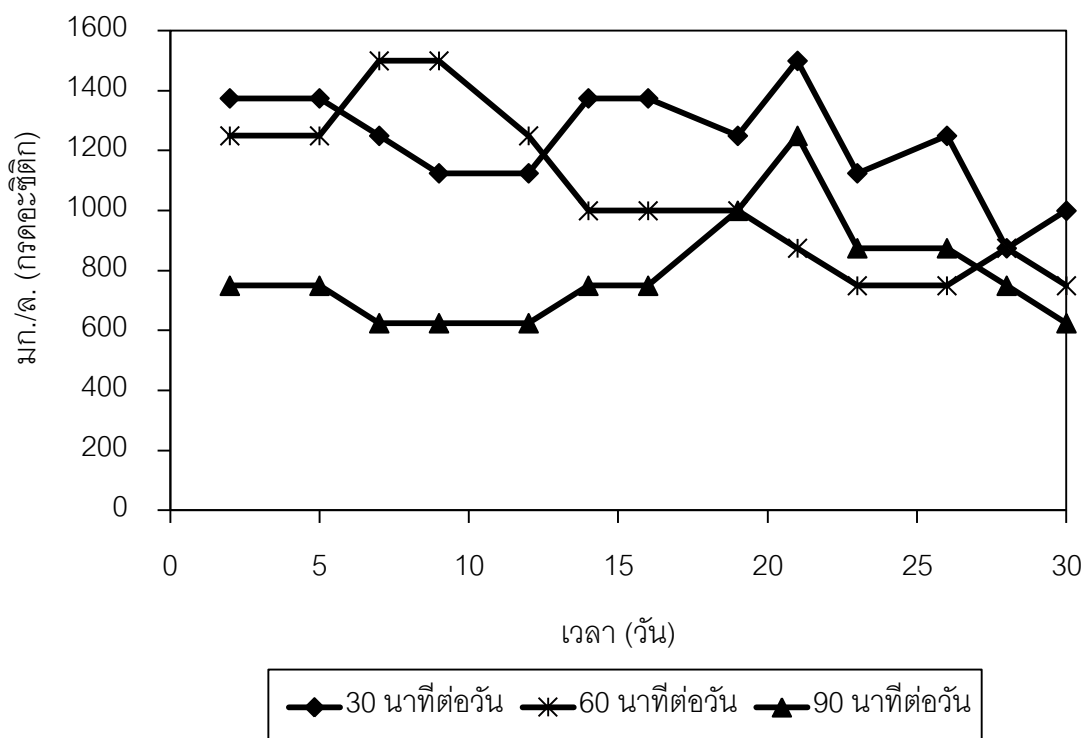
#### 4.5.1.4 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

##### 1) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

กรดอินทรีย์ระเหยเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสภาวะการทำงานของกระบวนการได้เป็นอย่างดีเพราะถ้าปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยไปเป็นก๊าซมีเทน ไม่สมดุลกับอัตราการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งปกติปฏิกิริยาสร้างกรดอินทรีย์ระเหยจะเกิดได้ดีกว่าเสมอ ทำให้เกิดสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหย เป็นผลให้ความเข้มข้นในระบบสูงขึ้น และถ้าไม่มีการควบคุมที่ดีพอ จะทำให้พีเอชลดลงจนระบบทำงานล้มเหลว (Metcalf and Eddy, 1991)

เมื่อเดินระบบพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของทุกการทดลองมีแนวโน้มลดลงขึ้นดังภาพที่ 4.20 ซึ่งค่ากรดอินทรีย์ระเหยที่วิเคราะห์นี้คิดในรูปของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) พบว่าที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน ในน้ำหมักที่ออกจากระบบจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1,375, 1,250 และ 750 มิลลิกรัมต่อลิตร จนสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 1,000 750 และ 625 ตามลำดับ จะเห็นว่าจากเวลาการกวน 30 นาทีต่อวัน มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยลดลงเล็กน้อยเนื่องจากระยะเวลาที่สัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์อาจยังไม่เพียงพอและการกวนผสมอาจยังไม่ทั่วถึงพอทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนยังเกิดขึ้นไม่ได้มากนักซึ่งแค่นี้ก็เริ่มมีการนำกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้ได้บ้างจึงมีการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยามากกว่าที่เวลาการ 60 นาทีต่อวัน ซึ่งมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยลดลงมากเนื่องจากปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้กรดอินทรีย์ที่สะสมไว้และส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาลดลง

จากการที่มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงทุกเวลาการกวนเนื่องมาจากกรดอินทรีย์ระเหยที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซมีเทน ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ลดลง (Mtz.-Vituria *et al.*, 1995) และจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในทุกการทดลอง มีค่าไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำให้ไม่มีผลไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์พวก Methanogen bacteria (Schober *et al.*, 1999)

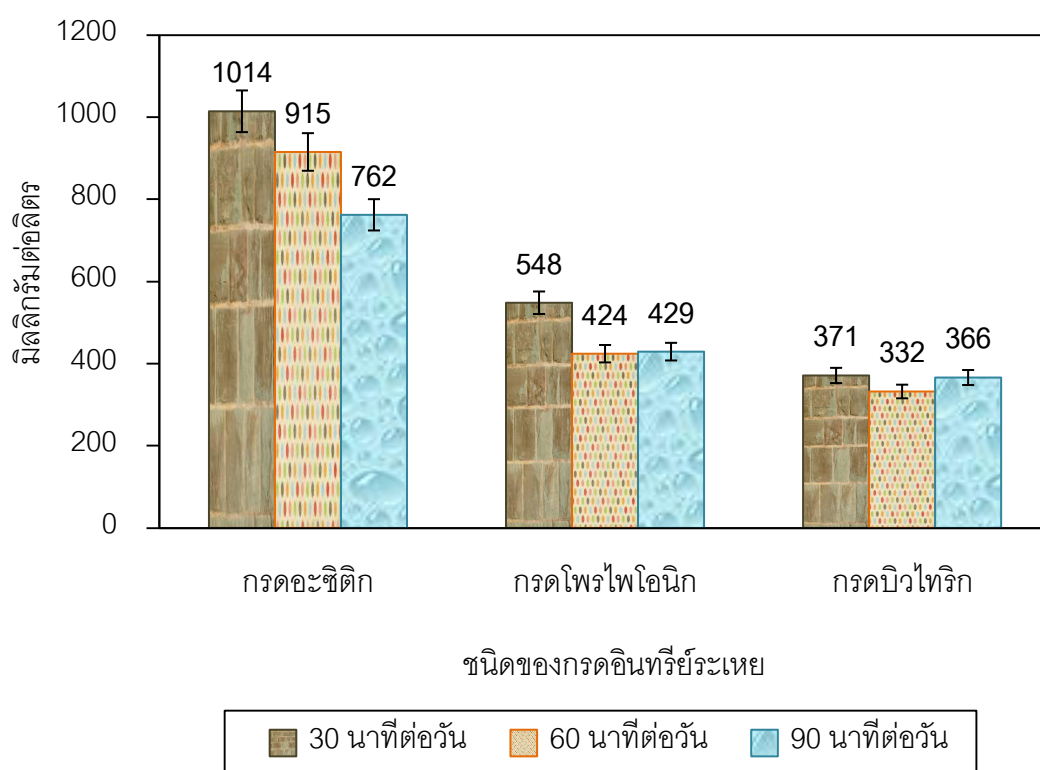


ภาพที่ 4.20 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการกวนต่างๆ

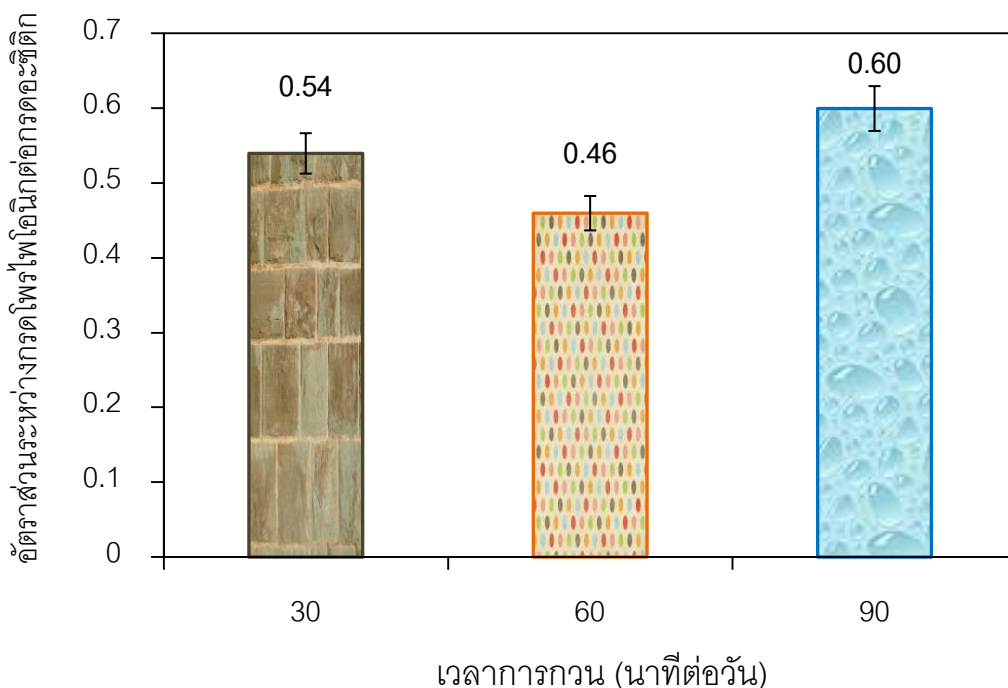
## 2) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิด

การศึกษาองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิดจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการสร้างกรดและผลิตภัณฑ์ชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น จากผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทริก ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้เป็น substrate ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ จากการศึกษาเวลาการกวนต่างๆ พบว่าในน้ำหมักจะมีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในกรดอินทรีย์ระเหยโดยที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน จะมีค่ากรดอะซิติกเท่ากับ 1,014, 915 และ 762 มก./ล. ตามลำดับ รองลงมาคือกรดโพรไพโอนิกเท่ากับ 548, 424 และ 429 มก./ล.ตามลำดับ และกรดบิวไทริกเท่ากับ 371, 332 และ 336 มก./ล.ตามลำดับ(ภาพที่ 4.21) ซึ่งการที่พบองค์ประกอบของกรดอะซิติกเป็นจำนวนมากนั้นอาจเนื่องมาจากน้ำหมักที่ได้จากการหมักเศษอาหารประกอบไปด้วยส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายและยาก ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดอะซิติกดังผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในขณะเดียวกันยังมีส่วนที่ย่อยสลายได้ยากหรือมีโมเลกุลที่ซับซ้อนที่มีจำนวนของคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไปอยู่ด้วยแต่ปริมาณไม่มากนัก โดยทั้งนี้อาจจะมีส่วนที่อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ระเหยชนิดอื่นที่นอกเหนือจากกรดอินทรีย์ระเหยทั้ง 3 ชนิดนี้ทั้งที่ไม่ได้

มีการตรวจวัดอีกด้วยและอาจมีอยู่ในรูปปริมาณมากกว่ากรดอะซิติกที่ตรวจพบก็เป็นไปได้ และ ความเข้มข้นของกรดโพไพโอติกและกรดบิวไทริกไม่มีผลยับยั้งการใช้กรดอะซิติกเนื่องจากกรด โพไพโอติกและกรดบิวไทริกเมื่อถูกย่อยสลายจะได้กรดอะซิติก ซึ่งที่ความเข้มข้นของกรดที่เท่ากัน กรดบิวไทริกถูกย่อยสลายได้เร็วที่สุด ตามด้วยกรดอะซิติกและกรดโพไพโอติกตามลำดับ ซึ่งการที่ กรดบิวไทริกถูกย่อยสลายเกิดได้เร็วกว่าการใช้กรดอะซิติก ทำให้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก เพิ่มขึ้นและมีผลต่อการย่อยสลายกรดอะซิติกเอง (จงกล พูนทวี, 2537) โดยอัตราส่วนระหว่างกรด โพไพโอติกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้นเหลวได้เนื่องจากจะส่งผลต่อ ปริมาณพีเอชที่ต่ำลงจนส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน (Marchaim and Krause, 1993) ซึ่งจากการทดลองที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวันพบว่าจะมีอัตราส่วน ระหว่างกรดโพไพโอติกต่อกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับ  $0.54 \pm 0.02$ ,  $0.46 \pm 0.13$  และ  $0.60 \pm 0.03$  ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวันมีค่ามากที่สุดอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนที่ผลิตได้น้อยที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ที่ 55.9 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.21 ปริมาณของกรดอะซิติก กรดโพไพโอติกและกรดบิวไทริกที่เวลาการกวนต่างๆ



ภาพที่ 4.22 อัตราส่วนระหว่างกรดไพโรไฟโอนิกต่อกรดอะซิติกที่เวลาการกวนต่างๆ

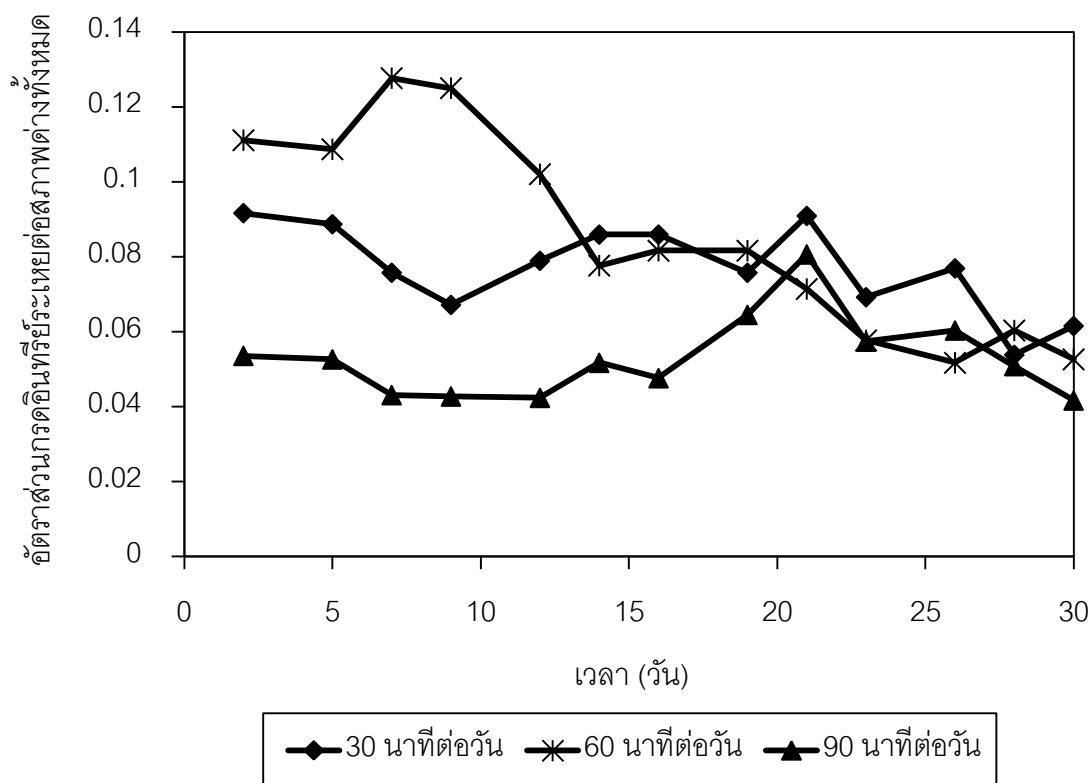
#### 4.5.1.5 อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อค่าความเป็นด่างทั้งหมด

อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมด (TVA/ T-ALK) เป็นพารามิเตอร์ที่มีถึงความสมดุลของระบบซึ่งจะบอกถึงสภาวะการทำงานของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้เป็นอย่างดี WPCF (Water Pollution Control Federation) ได้ยอมรับค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดให้เป็นตัวควบคุมระบบ โดยกล่าวว่า ในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ เมื่อค่าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดมากกว่า 0.8 จะทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากพิษของกรดอินทรีย์ (Metcalf and Eddy, 1991)

จากการทดลองเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาที่ต่อวัน ดังภาพที่ 4.23 พบว่า เมื่อเริ่มต้นจะมีค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อค่าความเป็นด่างทั้งหมดเท่ากับ 0.09, 0.11 และ 0.05 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีแนวโน้มลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.06, 0.05 และ 0.04 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็น  $0.08 \pm 0.01$ ,  $0.09 \pm 0.03$  และ  $0.05 \pm 0.01$  ตามลำดับ ซึ่งที่เวลาการกวน 30 และ 60 นาที่ต่อวันมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดมีค่ามากพิเศษจะน้อย เมื่ออัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดน้อยพิเศษจะ



มาก และค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อสภาพต่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังบำบัดเพอร์สูงปรับลดกรดอินทรีย์ระเหยได้ดี



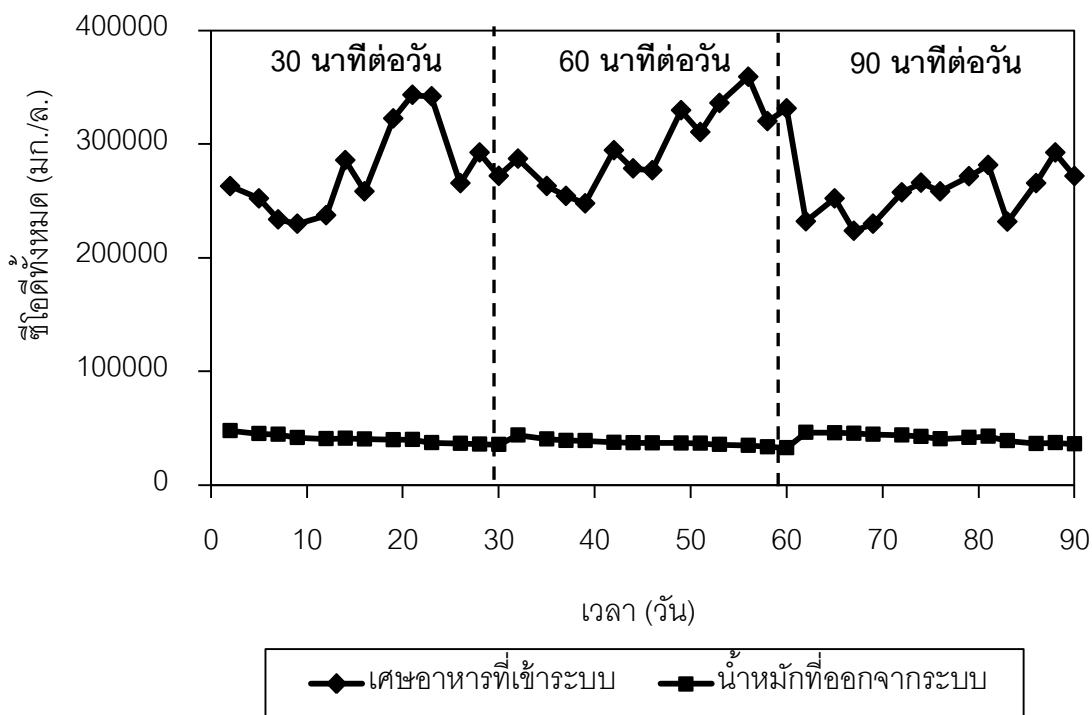
ภาพที่ 4.23 ค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของน้ำหมักที่ออกจากระบบจากเวลาการกวนต่างๆ

#### 4.5.1.6 ซีโอดีทั้งหมด

ผลการศึกษาค่าซีโอดีทั้งหมดในการทดลองเวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่า ค่าซีโอดีมีปริมาณลดลงจากปริมาณซีโอดีของเศษอาหารที่เข้าระบบโดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 229,749 – 343,184, 247,640 – 359,040 และ 223,530 – 292,413 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ภาพที่ 4.24

เมื่อพิจารณาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเศษอาหารในระบบที่อยู่ใสภาพสมดุลของสภาวะที่มีจุลินทรีย์ที่ปรับตัวให้กับลักษณะเศษอาหารได้แล้ว ทำให้การเปลี่ยนแปลงของซีโอดีค่อนข้างน้อย จากการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่า มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 35,520 – 47,680, 32,666 – 43,801 และ 36,091 – 46,187 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบผลิตก๊าซมีเทนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ของ

ระบบได้ในระดับหนึ่ง เพื่อนำไปผลิตก๊าซมีเทนในขั้นสุดท้ายแต่ปริมาณค่าซีโอไอดียังคงมีค่าสูงอยู่ ดังนั้นถ้าต้องการลดปริมาณซีโอไอดีลงอีกควรที่จะต้องมีการใช้ระบบบำบัดแบบอื่นมาร่วมด้วย เช่น ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เป็นต้น

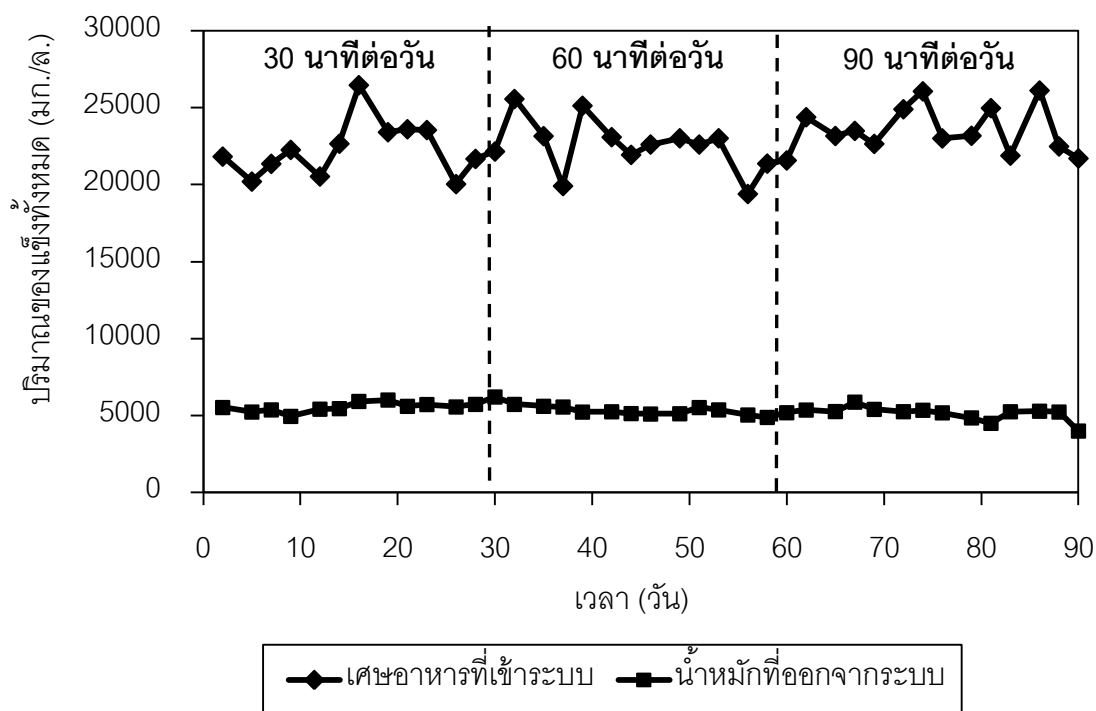


ภาพที่ 4.24 ซีโอไอดีทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

#### 4.5.1.7 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบตลอดการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน แสดงดังภาพที่ 4.25 พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 20,045 – 26,475 , 19,920 – 25,577 และ 19,942 – 26,129 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งค่าของปริมาณของแข็งทั้งหมดจะผันแปรขึ้นอยู่กับคุณลักษณะองค์ประกอบของเศษอาหารที่เข้าระบบในแต่ละวัน สำหรับค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักที่ได้จากการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 4,944 – 6,205 , 4,877 – 5,723 และ 3,990 – 5,871 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะแสดงให้เห็นว่าที่เวลาการกวนต่างๆ มีแนวโน้มของค่าปริมาณของแข็งลดลง เนื่องจากมีการย่อยสลายสารอินทรีย์กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งจากภาพที่ 4.20 ที่มี

ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้ายของการเดินระบบเนื่องจากถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนต่อไป

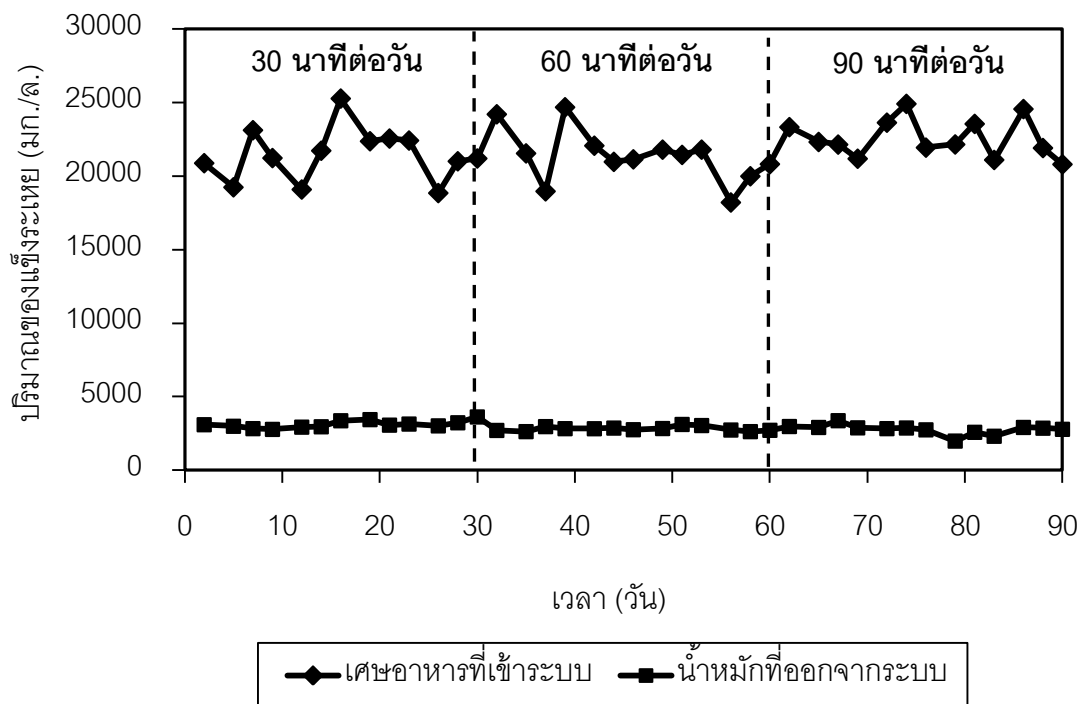


ภาพที่ 4.25 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

#### 4.5.1.8 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด

ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบตลอดการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน แสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 18,848 – 25,469 , 18,964 – 24,202 และ 18,441 – 24,908 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งค่าของปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดจะผันแปรขึ้นอยู่กับคุณลักษณะองค์ประกอบของเศษอาหารที่เข้าระบบในแต่ละวัน สำหรับค่าปริมาณของแข็งระเหยในน้ำหมักที่ได้จากการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่ามีค่าของแข็งระเหยทั้งหมดอยู่ในช่วง 2,784 – 3,629 , 2,632 – 3,118 และ 1,989 – 2,979 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะแสดงให้เห็นว่าที่เวลาการกวนต่างๆ มีแนวโน้มของค่าปริมาณของแข็งลดลง เนื่องจากในองค์ประกอบของเศษอาหารจะมีสารอินทรีย์ง่ายต่อการย่อยสลายทาง

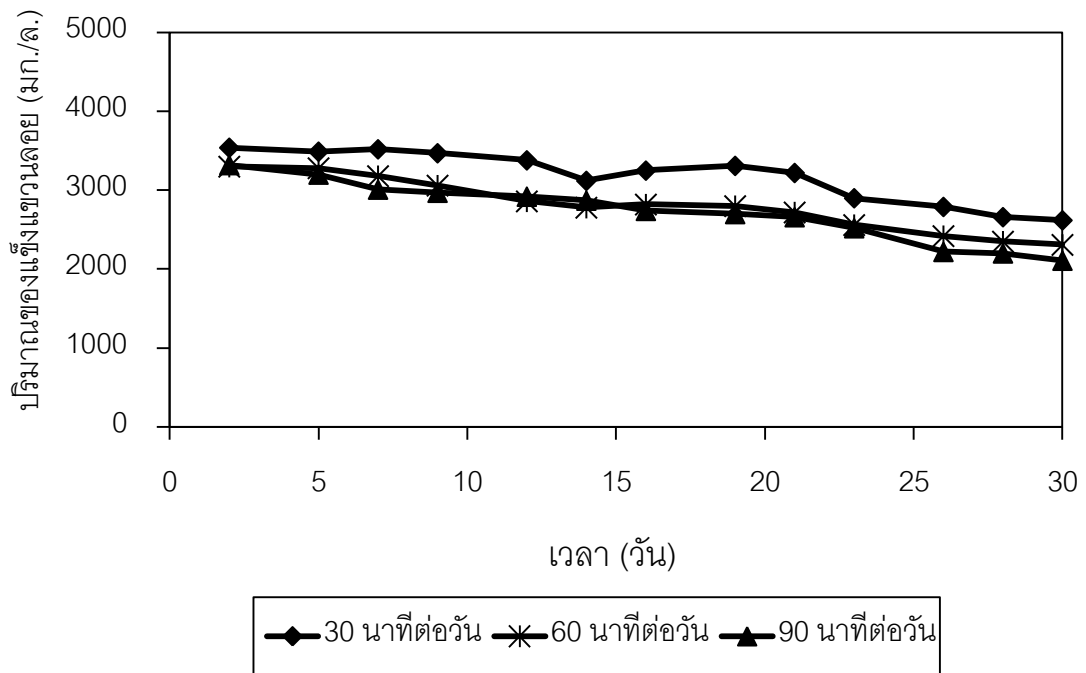
ชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศจนกลายเป็นกรดอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ค่าของแฉิ่งระเหยทั้งหมดลดลง แสดงว่าระบบสามารถลดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายลงได้



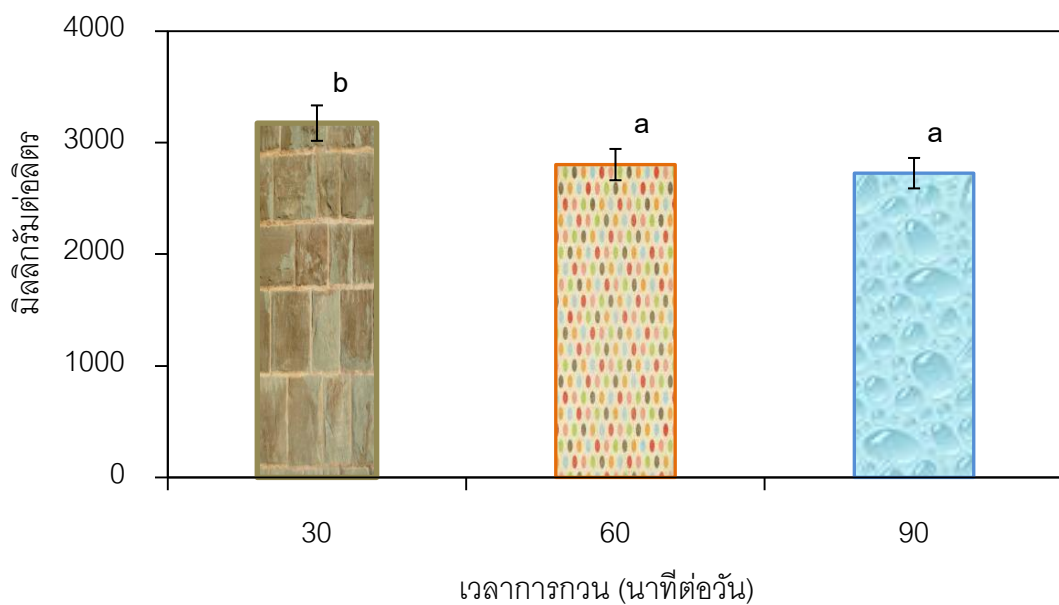
ภาพที่ 4.26 ปริมาณของแฉิ่งระเหยของเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

#### 4.5.1.9 ปริมาณของแฉิ่งแขวนลอย

ปริมาณของแฉิ่งแขวนลอยของน้ำหมักที่ออกจากระบบตลอดการทดลองที่เวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน แสดงดังภาพที่ 4.27 พบว่าปริมาณของแฉิ่งระเหยทั้งหมดของเศษอาหารที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 2,620 – 3,540 , 2,309 – 3,300 และ 2,109 – 3,320 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะแสดงให้เห็นว่าที่เวลาการกวนต่างๆ มีแนวโน้มของค่าปริมาณของแฉิ่งแขวนลอยมีแนวโน้มลดลง โดยที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน สามารถลดปริมาณของแฉิ่งแขวนลอยได้มากที่สุดเหลือเพียง 2,109 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลค่าเฉลี่ยปริมาณของแฉิ่งแขวนลอยมีค่าเท่ากับ  $3,174.62 \pm 329.97$ ,  $2803.00 \pm 335.24$  และ  $2,726.15 \pm 380.59$  มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สถิติพบว่าที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวันมีสามารถลดปริมาณของแฉิ่งแขวนลอยมากที่สุดและไม่แตกต่างกันกับที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ภาพที่ 4.28)



ภาพที่ 4.27 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำหมักที่ออกจากระบบของเวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน



หมายเหตุ: อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอยที่เวลาการต่างๆ

จากการเปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เวลาการกวนต่างๆ พบว่า เมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นจะสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้มากขึ้น เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ใช้ใบกวนแบบพายสำหรับกวนสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดความผสมผสานระหว่างสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองกับจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งในการกวนจะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นระหว่างสารอินทรีย์กับใบกวนที่ใช้ในการกวน ซึ่งเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นซึ่งมีส่วนในการทำให้ของแข็งแขวนลอยอนุภาคใหญ่ที่เกิดจากการย่อยสลายไม่สมบูรณ์แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆมากขึ้น เมื่ออนุภาคที่ใหญ่เหล่านี้แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ทำให้มีการแพร่กระจายภายในระบบได้ดีขึ้น (Lanting, 2003)

#### 4.5.2 ประสิทธิภาพและความสัมพันธ์ต่างๆ ภายในระบบ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบไร้อากาศแบบแห้งช่วงการเพิ่มเวลาการกวนพบว่ามีความเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งภาพรวมของพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ที่การกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

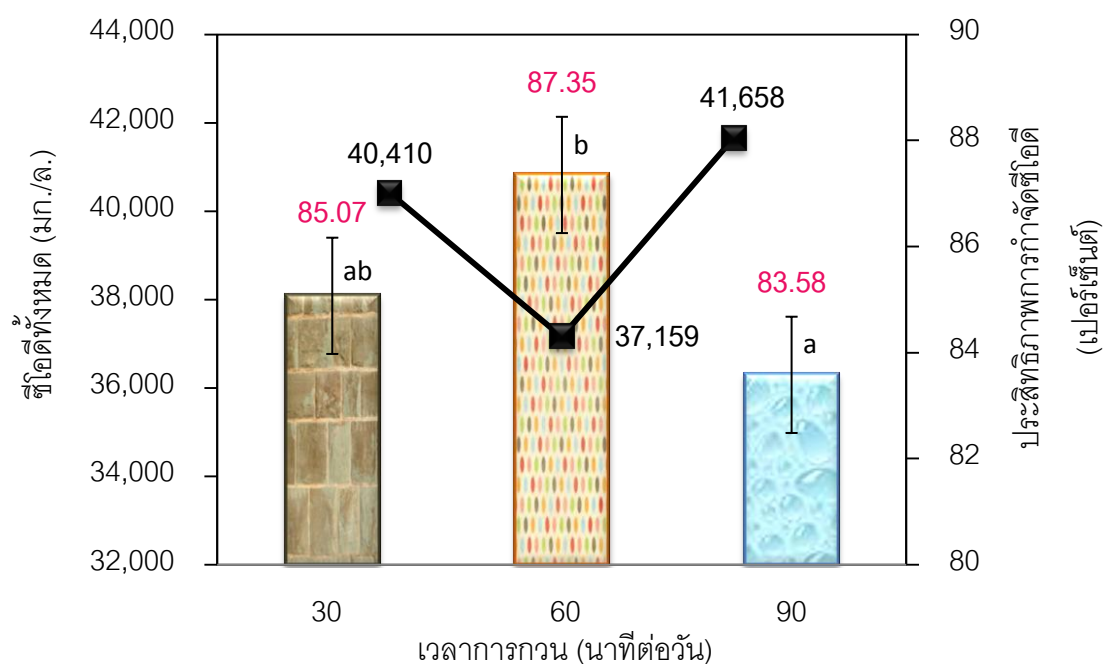
##### 4.5.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD removal)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่เวลาการกวนต่างๆ แสดงตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.29 พบว่า ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเป็น  $85.07 \pm 2.86$ ,  $87.35 \pm 2.25$  และ  $83.58 \pm 2.48$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยวันที่ 26 ของการทดลองที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด 90.33 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันมีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดและไม่แตกต่างกันกับที่เวลา 30 นาทีต่อวันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 4.9 ปริมาณเฉลี่ยของค่าซีไอดีในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ

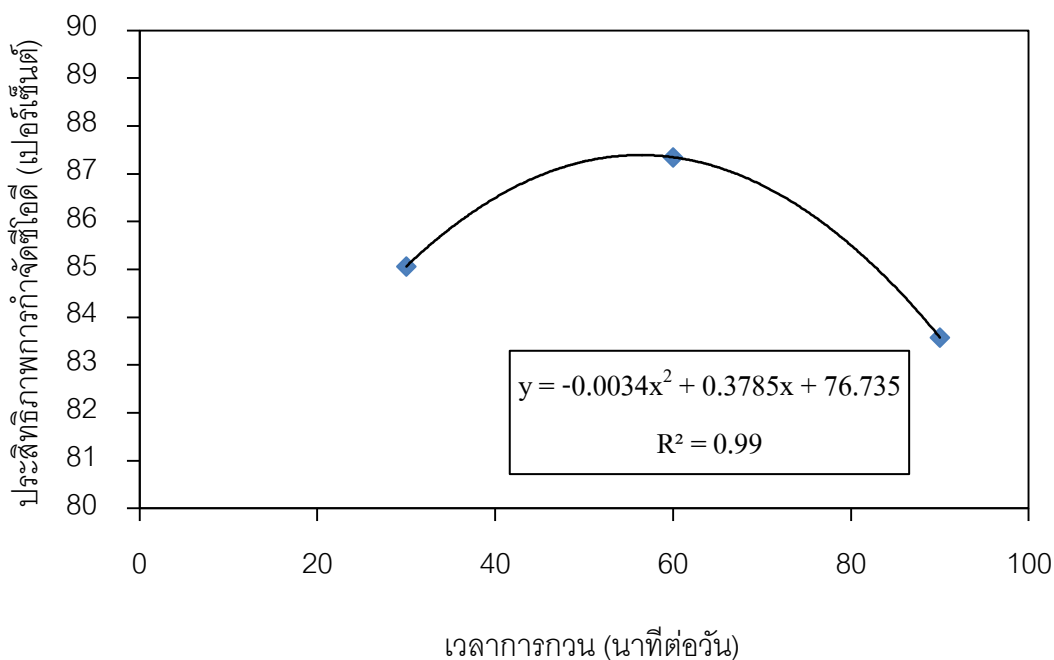
เวลาการกวน (นาที่ต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยค่าซีไอดี		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการ กำจัดซีไอดีของระบบ (เปอร์เซ็นต์)
	เศษอาหารเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหมักออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
30	276,639.20±38,733.70	40,410.25±3,710.88	85.07±2.86 <sup>ab</sup>
60	299,051.80±34,818.53	37,159.15±2,944.99	87.35±2.25 <sup>b</sup>
90	256,349.00±21,579.61	41,658.92±3,589.43	83.58±2.48 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ



หมายเหตุ : อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยที่เวลาการกวนต่างๆ



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกับเวลาการกวนต่างๆ

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่เวลาการกวนต่างๆ ซึ่งการกวนนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำจัดซีไอดี เนื่องจากระบบเป็นระบบแบบแวนอนซึ่งมีการแบ่งโซนเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างกลุ่มที่สร้างกรดซึ่งจะพบได้ในตอนหัวถังและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนซึ่งส่วนใหญ่จะสามารถพบได้ที่ท้ายถังหมัก และเมื่อมีการกวนเกิดขึ้นทำให้สารอินทรีย์สัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ทั่วถึงขึ้น และทำให้เกิดการผสมระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบ ถ้าระบบมีการกวนที่นานมากเกินไปจะทำให้ระบบปั่นป่วนซึ่งจะเกิดการผสมระหว่างเชื้อจุลินทรีย์มากเกินไป จึงส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน มีค่าเท่ากับ 55.9 (ภาพที่ 4.38) และเมื่อนำประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีที่ได้มาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับเวลาการกวน พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟพาราโบลาคว่ำ สามารถแสดงดังภาพที่ 4.30 โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ  $y = -0.0034x^2 + 0.3785x + 76.735$



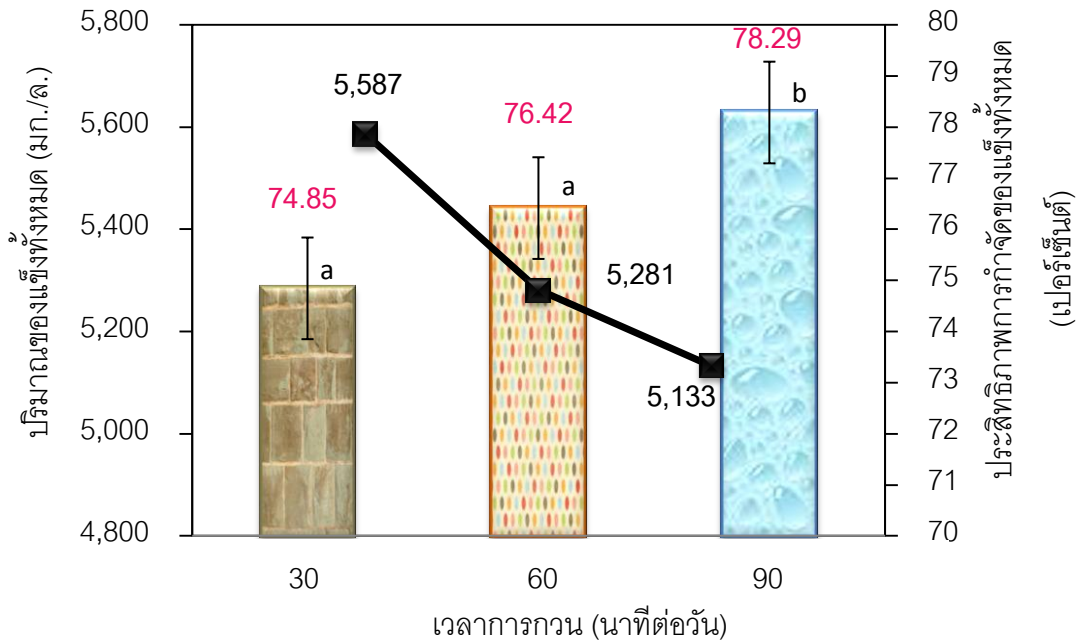
#### 4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลาการกวนต่างๆ แสดงตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.31 พบว่า ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งเฉลี่ยเป็น  $74.85 \pm 1.81$ ,  $76.42 \pm 1.80$  และ  $78.29 \pm 2.12$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นโดยวันที่ 21 ของการทดลองที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดสูงสุด  $82.01$  เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูล ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน โดยใช้สถิติพบว่าที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวันมี ประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

**ตารางที่ 4.10** ปริมาณเฉลี่ยของค่าของแข็งทั้งหมดในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ

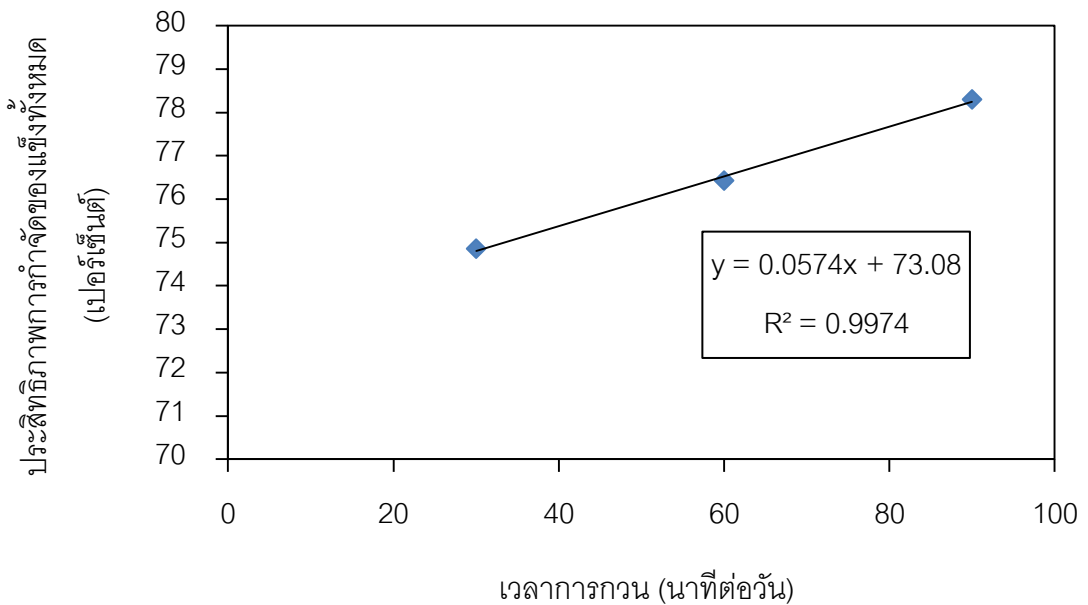
เวลาการกวน (นาทีต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยค่าของแข็งทั้งหมด		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการ กำจัดของแข็งทั้งหมด ของระบบ(เปอร์เซ็นต์)
	เศษอาหารเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหมักออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
30	$22,295.41 \pm 1,736.29$	$5,587.69 \pm 335.37$	$74.85 \pm 1.81^a$
60	$22,499.23 \pm 1,742.96$	$5,281.80 \pm 251.14$	$76.42 \pm 1.80^a$
90	$23,703.19 \pm 1,469.79$	$5,133.65 \pm 463.78$	$78.29 \pm 2.12^b$

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ



หมายเหตุ: อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.31 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยที่เวลาการกวนต่างๆ



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดกับเวลาการกวนต่างๆ

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลาการกวนต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.32 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้น เมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เกิดขึ้นมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับเวลาการกวน พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงโดยมีสมการความสัมพันธ์คือ  $y = 0.0574x + 73.08$

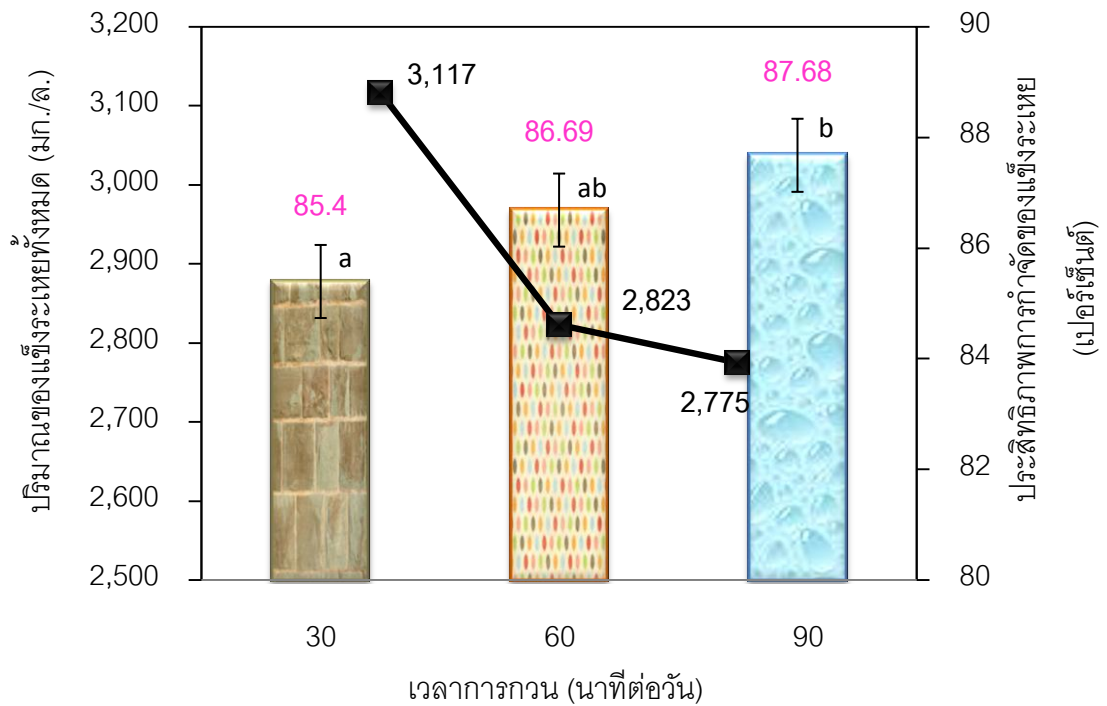
#### 4.4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยที่เวลาการกวนต่างๆ แสดงตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.33 พบว่า ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยเฉลี่ยเป็น  $85.40 \pm 1.38$ ,  $86.69 \pm 1.29$  และ  $87.68 \pm 1.54$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นโดยวันที่ 19 ของการทดลองที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยสูงสุด 91.02 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าที่เวลาการกวน 90 นาที มีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดและไม่แตกต่างกับที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

**ตารางที่ 4.11** ปริมาณเฉลี่ยของค่าของแข็งระเหยในเศษอาหารที่เข้าระบบและน้ำหมักที่ออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยของระบบที่เวลาการกวนต่างๆ

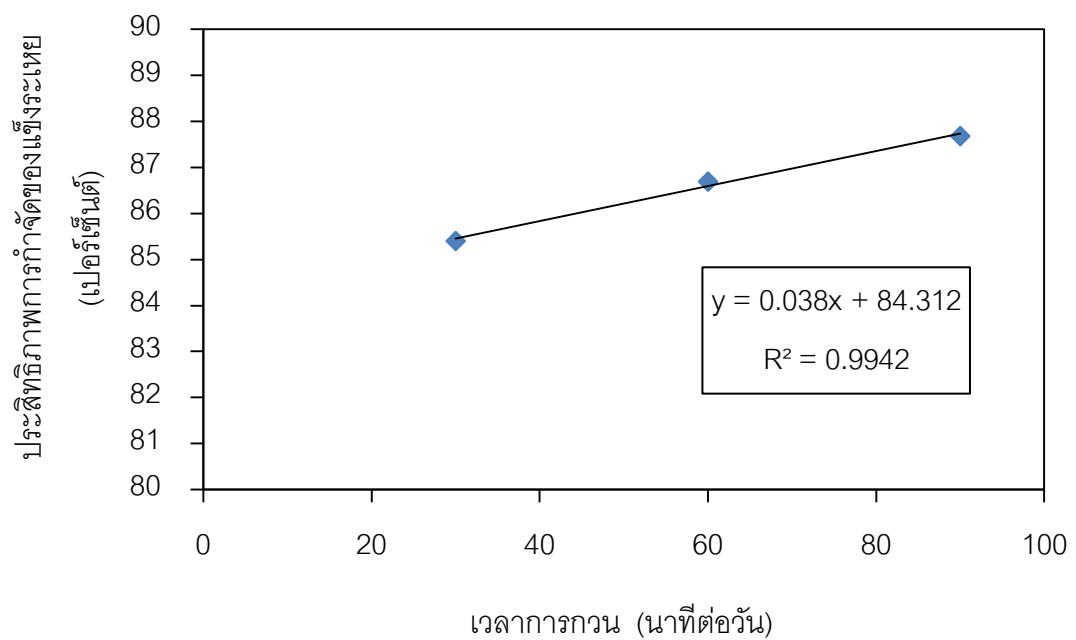
เวลาการกวน (นาทีต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยค่าของแข็งระเหย		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการ กำจัดของแข็งระเหย ของระบบ(เปอร์เซ็นต์)
	เศษอาหารเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหมักออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
30	21,456.27±1,787.10	3,117.86±245.52	85.40 ±1.38 <sup>a</sup>
60	21,354.16±1,781.19	2,823.45±149.32	86.69±1.29 <sup>ab</sup>
90	22,577.04 ±1,309.32	2,775.58±334.05	87.68±1.54 <sup>b</sup>

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ



หมายเหตุ: อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.33 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของไอน้ำทั้งหมดที่เวลาการกวนต่างๆ



ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดของไอน้ำทั้งหมดกับเวลาการกวนต่างๆ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหย พบว่าเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นระบบสามารถกำจัดของแข็งได้มากขึ้นเนื่องมาจากการกวนซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมักสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และตะกอนจุลินทรีย์ให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบได้ทั่วถึงทั้งระบบ และในการกวนจะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นระหว่างสารอินทรีย์กับไบโกลวนที่ใช้ในการกวนสารอินทรีย์ ซึ่งเมื่อเวลาการกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นซึ่งมีส่วนในการทำให้ของแข็งต่างๆที่ย่อยสลายยากเช่น เศษผัก เป็นต้น ลดขนาดลงได้และเนื่องจากเศษอาหารที่เข้าระบบไม่ได้มีการบดละเอียดก่อนเข้าระบบดังนั้นเมื่อมีการกวนเกิดขึ้นทำให้สามารถลดขนาดของเศษอาหารที่มีขนาดใหญ่และสารอินทรีย์บางส่วนที่เกิดจากการย่อยสลายไม่สมบูรณ์แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆมากขึ้น เมื่ออนุภาคที่ใหญ่เหล่านี้แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆก็จะทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบย่อยแบบไร้อากาศสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้นแต่ถ้ากวนนานเกินไปก็จะส่งผลต่อความสามารถการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้นที่เวลาการกวน 90 นาทีต่อวันสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้มากที่สุด ส่วนที่เวลาการกวน 30 นาทีต่อวันมีการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยน้อยที่สุดเนื่องมาจากลักษณะการกวนที่เวลาน้อยทำให้ระยะเวลาที่สารอินทรีย์สัมผัสกับไบโกลวนที่ทำให้เกิดแรงเฉือนมีน้อยทำให้ขนาดของแข็งยังอยู่ในอนุภาคที่ไม่เล็กมากเท่าที่ควรส่งผลต่อการย่อยสลายที่ค่อนข้างน้อย

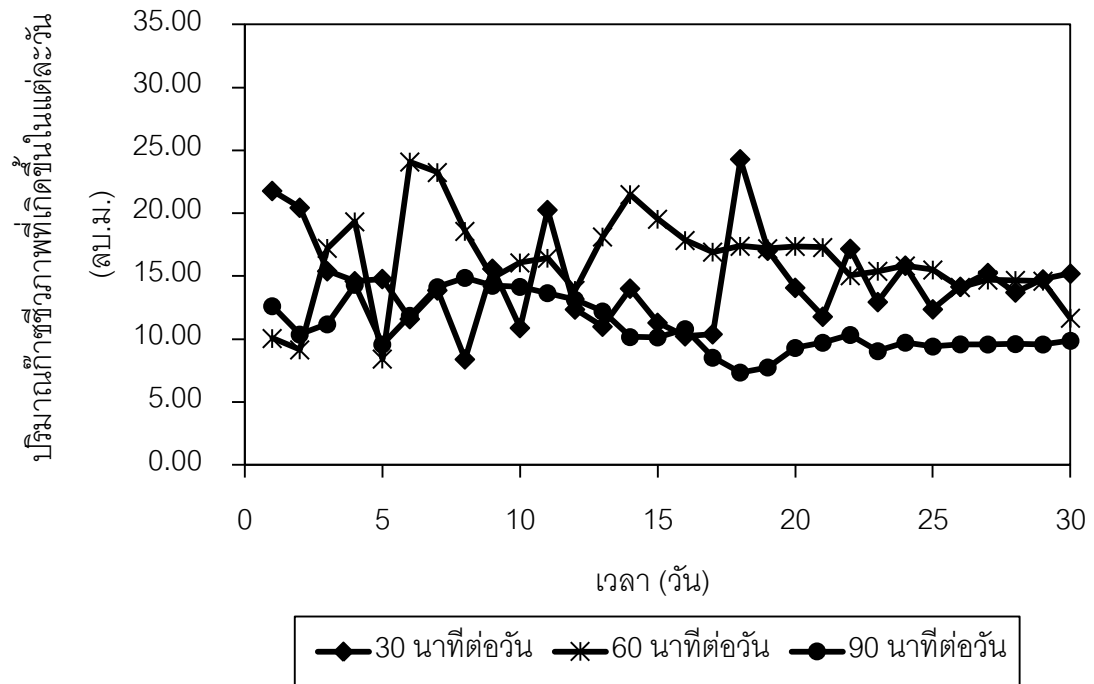
เมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยที่เกิดขึ้นมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับเวลาการกวน พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงแสดงดังภาพที่ 4.34 โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ  $y = 0.038x + 84.312$

### 4.5.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

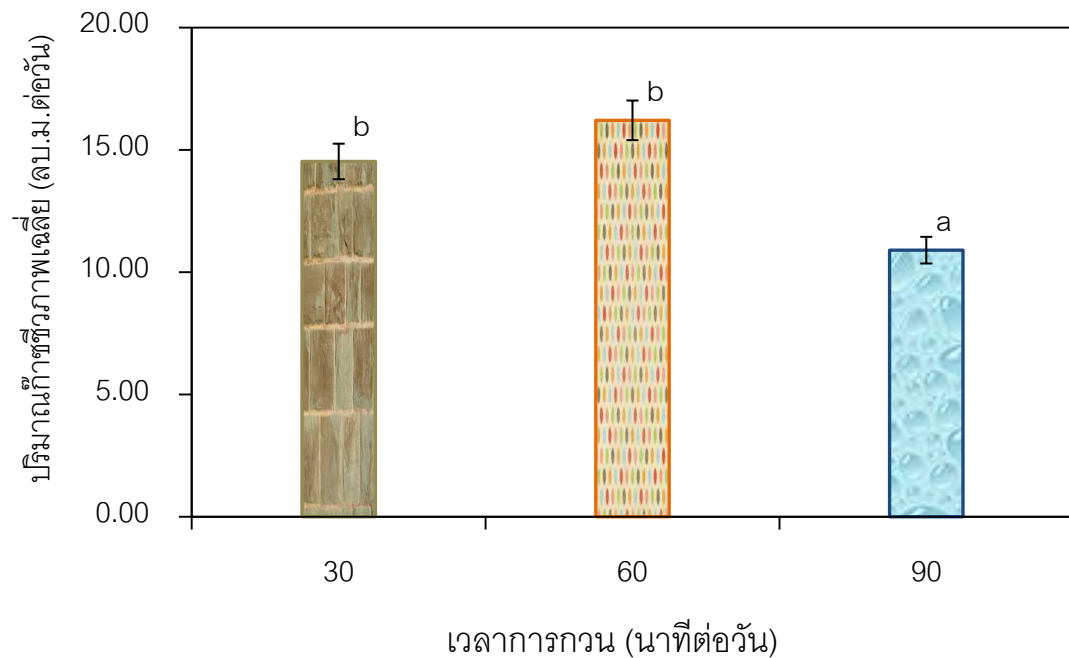
ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนมากจะประกอบด้วย ก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากระบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของของเสียที่เข้าระบบรวมถึงความสมดุลและเสถียรภาพของระบบด้วย ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบ

#### 4.5.3.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น

เนื่องจากระบบไร้อากาศแบบแห้งที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระบบจริงทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการวัดผ่านมิเตอร์จึงมีปริมาณมาก พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ที่เวลาการกวนต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีค่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน อยู่ในช่วง 8.40 – 24.30 , 9.15 – 24.09 และ 9.31 – 14.87 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของการเกิดก๊าซชีวภาพคือ  $14.52 \pm 3.59$ ,  $16.20 \pm 3.57$  และ  $10.90 \pm 2.11$  ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังภาพที่ 4.35 และภาพที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันสูงสุดและไม่แตกต่างกันกับที่เวลาการกวน 30 นาทีต่อวัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากในระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ โดยมีแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศเจริญเติบโตอยู่ภายในระบบ โดยที่เวลาการกวนที่ 60 นาทีต่อวันมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดนั้น แสดงว่าระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในเศษอาหารได้ ซึ่งสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกกำจัดและเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพ โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 87.35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเวลาการกวนที่ 90 นาทีต่อวันที่ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด อาจเกิดจากลักษณะการกวนที่นานเกินไปทำให้ระบบเกิดการปั่นป่วนภายในระบบจึงทำให้จุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลายไป (Vavilin and Angelidaki, 2004) และยังส่งผลให้เกิดการสะสมของสารพิษต่างๆ ในระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลงมากที่สุด



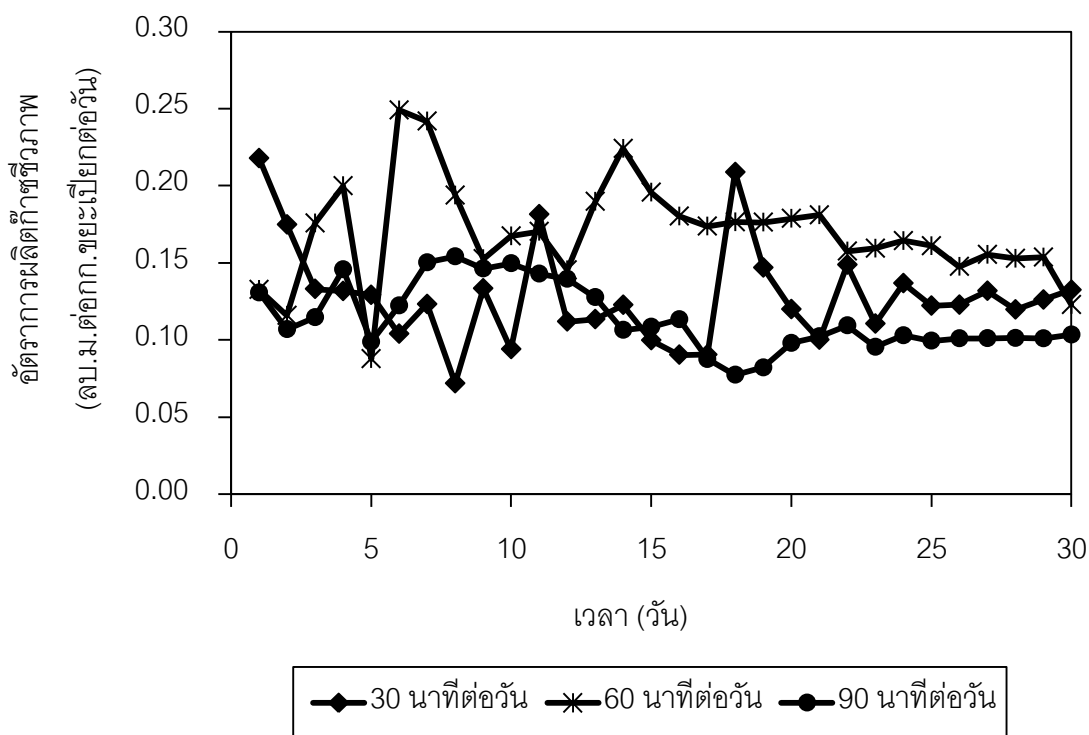
ภาพที่ 4.35 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่เวลาการกวนต่างๆ



หมายเหตุ: อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของปริมาณก๊าซชีวภาพที่เวลาการกวนต่างๆ

เมื่อมาพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบเฉลี่ยที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน คือ  $0.13 \pm 0.03$ ,  $0.17 \pm 0.03$  และ  $0.11 \pm 0.02$  ลบ.ม.ต่อกก.ขยะเปียก-วัน ดังตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.37 พบว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในเรื่องประสิทธิภาพของการกำจัดชีโอดีเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 87.35 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มเวลาการกวนทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น แต่ถ้ามีเวลาการกวนมากเกินไปอาจทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเนื่องจากระบบถูกรบกวนมากเกินไปจึงทำให้แบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายลงได้ ถึงแม้ภาพรวมของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ อาจจะขึ้นอยู่กับปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบก็ตาม



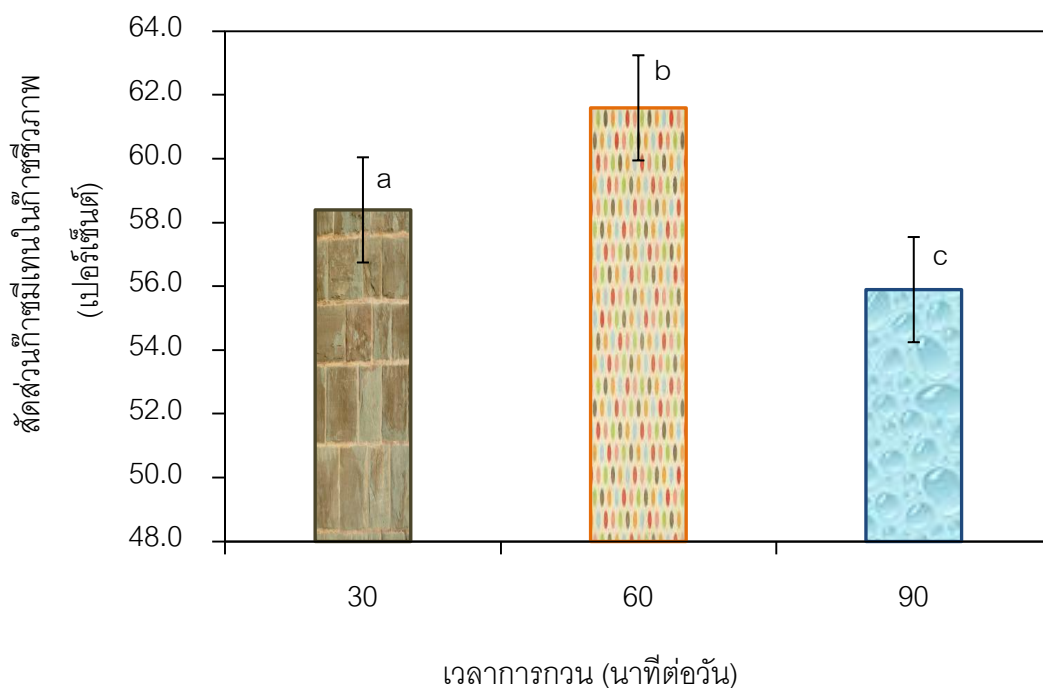
ภาพที่ 4.37 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักขยะเปียกที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่เวลาการกวนต่างๆ



Karim และคณะ (2005) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพของการกวนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้มูลวัวที่ 50, 100 และ 150 กรัมต่อลิตร หรือที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาพักเก็บ (HRT) 16.2 วัน ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีกวนและมีการกวนพบว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 5 เปอร์เซ็นต์จะมีการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 0.84 – 0.94 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ส่วนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์พบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 10 – 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีกวน

#### 4.5.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทน

การวิเคราะห์หาองค์ของก๊าซชีวภาพด้วยก๊าซโครมาโทกราฟีเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน ( $\% \text{CH}_4$ ) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังตาราง 4.12 และภาพที่ 4.38 พบว่า ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $58.4 \pm 1.12$ ,  $61.6 \pm 1.11$  และ  $55.9 \pm 1.15$  เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันมีเปอร์เซ็นต์ ก๊าซมีเทนมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 87.35 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้แล้วการกวนอย่างต่อเนื่องและตลอดเวลาในระบบที่มีของแข็งปริมาณสูงยังส่งผลให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพลดน้อยลงได้อีกด้วย เนื่องมาจากทำให้ระบบเกิดการปั่นป่วนจนจุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้จึงทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้มีปริมาณน้อยลง (Stroot และคณะ, 2001)



หมายเหตุ: อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างเวลาการกวนต่างๆ

ภาพที่ 4.38 สัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพกับเวลาการกวนต่างๆ

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนเฉลี่ย ตลอดจนการทดลองที่เวลาการกวนต่างๆ

เวลาการกวน (นาที่ต่อวัน)	ค่าเฉลี่ย		
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อ ปริมาณเศษอาหารที่เข้าระบบ (ลบ.ม.ต่อกก.ขยะเปียก-วัน)	ก๊าซมีเทน (เปอร์เซ็นต์)
30	14.52±3.59 <sup>b</sup>	0.13±0.03 <sup>b</sup>	58.40±1.12 <sup>b</sup>
60	16.20±3.57 <sup>b</sup>	0.17±0.03 <sup>c</sup>	61.60±1.11 <sup>c</sup>
90	10.90±2.11 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>	55.90±1.15 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ

#### 4.5.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์พิจารณาเป็นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ (gas production per organic weight addition) และก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas production per organic weight removal)

##### 4.5.4.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ (gas production per organic weight addition)

1) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ

ผลจากการศึกษาของเวลาการกวนที่ 30 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.45 \pm 0.08$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่เติม,  $5.46 \pm 1.06$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติมและ  $5.68 \pm 1.10$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เติมเมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 60 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.59 \pm 0.13$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่เติม,  $7.17 \pm 1.19$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม และ  $7.57 \pm 1.28$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เติม และเมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 90 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.44 \pm 0.10$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่เติม,  $4.70 \pm 0.88$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติมและ  $4.93 \pm 0.94$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เติมแสดงดังตารางที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันจะค่าสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

2) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ

ผลจากการศึกษาของค่าเวลาการกวน 30 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.26 \pm 0.03$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่เติม,  $3.17 \pm 1.10$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม และ  $3.29 \pm 1.21$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เติม เมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.36 \pm 0.05$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่เติม,  $4.43 \pm 1.31$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เติม และ  $4.67 \pm 1.35$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เติม และเมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวน 90 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.24 \pm 0.04$

ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เต็ม,  $2.62 \pm 1.01$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เต็ม และ  $2.75 \pm 1.05$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่เต็ม แสดงดังตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เต็มเข้าระบบที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันจะค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

ตารางที่ 4.13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เต็มเข้าระบบที่เวลาการกวนต่างๆ

เวลาการกวน	30 นาทีต่อวัน	60 นาทีต่อวัน	90 นาทีต่อวัน
อัตราผลิตก๊าซชีวภาพต่อ			
กก.ซีโอดีที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เต็ม)	$0.45 \pm 0.08^a$	$0.59 \pm 0.13^b$	$0.44 \pm 0.10^a$
กก.ของแข็งทั้งหมดที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เต็ม)	$5.46 \pm 1.06^a$	$7.17 \pm 1.19^b$	$4.70 \pm 0.88^a$
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เต็ม)	$5.68 \pm 1.10^a$	$7.56 \pm 1.28^b$	$4.93 \pm 0.94^a$
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อ			
กก.ซีโอดีที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่เต็ม)	$0.26 \pm 0.03^a$	$0.36 \pm 0.05^b$	$0.24 \pm 0.04^a$
กก.ของแข็งทั้งหมดที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่เต็ม)	$3.17 \pm 1.10^a$	$4.43 \pm 1.31^b$	$2.62 \pm 1.01^a$
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เต็ม (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เต็ม)	$3.29 \pm 1.21^a$	$4.67 \pm 1.35^b$	$2.75 \pm 1.05^a$

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ

#### 4.5.4.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas production per organic weight removal)

##### 1) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

ผลจากการศึกษาของค่าเวลาการกวน 30 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.53 \pm 0.10$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $7.32 \pm 1.50$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด และ  $6.65 \pm 1.33$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด เมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 60 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.69 \pm 0.17$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $9.38 \pm 1.53$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด และ  $8.73 \pm 1.49$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด และเมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 90 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้เฉลี่ย  $0.52 \pm 0.13$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $6.02 \pm 1.19$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด และ  $5.63 \pm 1.10$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด แสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### 2) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

ผลจากการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 30 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.30 \pm 0.02$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $4.23 \pm 1.12$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดและ  $3.85 \pm 1.13$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด เมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 60 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.42 \pm 0.03$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $5.80 \pm 1.25$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดและ  $5.40 \pm 1.23$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด และเมื่อทำการศึกษาของค่าเวลาการกวนที่ 90 นาทีต่อวัน พบว่า สามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย  $0.29 \pm 0.01$  ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด,  $3.34 \pm 1.13$  ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด และ  $3.14 \pm 1.16$  ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด แสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันจะค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และมีค่าใกล้เคียงกับมีเทนยิลด์ตามทฤษฎีคือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่ควรผลิตได้ตามทฤษฎี คือ 1 กรัมชีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตรที่ STP (Metcalf and Eddy, 1991)

ตารางที่ 4.14 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่เวลาการกวนต่างๆ

เวลาการกวน	30 นาทีต่อวัน	60 นาทีต่อวัน	90 นาทีต่อวัน
อัตราผลิตก๊าซชีวภาพต่อ			
กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)	0.53±0.10 <sup>a</sup>	0.69±0.17 <sup>b</sup>	0.52±0.13 <sup>a</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	7.32±1.50 <sup>a</sup>	9.38±1.53 <sup>b</sup>	6.02±1.19 <sup>a</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	6.65±1.33 <sup>a</sup>	8.73±1.49 <sup>b</sup>	5.63±1.10 <sup>a</sup>
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อ			
กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด)	0.30±0.02 <sup>a</sup>	0.42±0.03 <sup>b</sup>	0.29±0.01 <sup>a</sup>
กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	4.23±1.12 <sup>a</sup>	5.80±1.25 <sup>b</sup>	3.34±1.13 <sup>a</sup>
กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด (ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	3.85±1.13 <sup>a</sup>	5.40±1.23 <sup>b</sup>	3.14±1.16 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : อักษรมุมขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาการกวนต่างๆ

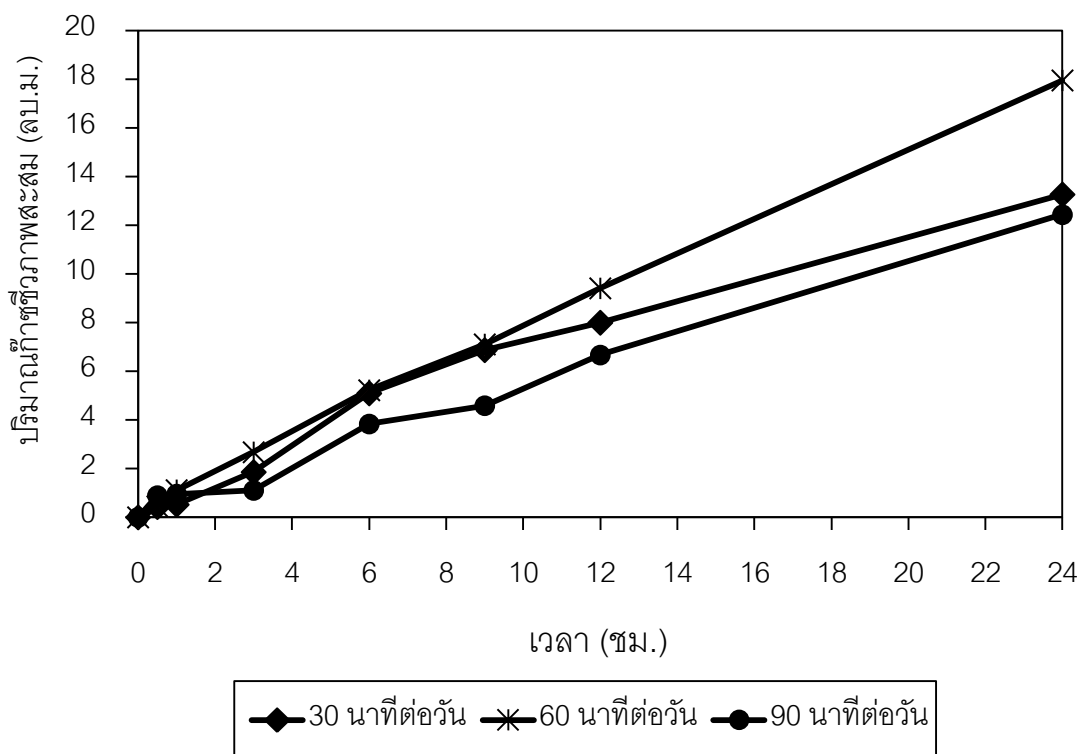
จากความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมวลสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบและที่ถูกกำจัด พบว่าเวลาการกวนมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนแตกต่างกันโดยที่เวลาการกวน 60 นาทีจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมากที่สุด รองลงมาคือ 30 และ 90 ตามลำดับ

#### 4.5.5 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพตามช่วงเวลา

การกวนเป็นปัจจัยหนึ่งในการช่วยเร่งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบให้ทำงานได้มากขึ้นเนื่องมาจากการกวนทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ภายในระบบทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้นจึงทำให้ต้องมีการศึกษาถึงอัตราในการเกิดก๊าซชีวภาพของเวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน โดยมีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพตามช่วงเวลาได้แก่ 0, 0.5, 1, 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าในช่วง 6 ชั่วโมงแรกมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไปหลัง 6 ชั่วโมงพบว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุดทุกช่วงเวลาและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ (ภาพที่ 4.39 และตารางที่ 4.15) รองลงมาคือที่เวลาการกวน 30 และ 90 นาทีต่อวัน

**ตารางที่ 4.15** ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระยะเวลา 24 ชม. ที่เวลาการกวนต่างๆ

เวลาที่ทำการวัด ปริมาณก๊าซ (ชม.)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (ลบ.ม.)			ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม(ลบ.ม.)		
	เวลาการกวน (นาทีต่อวัน)			เวลาการกวน (นาทีต่อวัน)		
	30	60	90	30	60	90
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.03	0.15	0.89	0.42	0.49	0.89
1	0.09	1.19	0.06	0.52	1.69	0.96
3	1.33	2.17	0.14	1.86	3.85	1.10
6	3.24	1.99	2.73	5.09	5.85	3.83
9	1.78	2.45	0.75	6.87	8.30	4.59
12	1.13	1.84	2.08	7.99	10.14	6.67
24	5.27	7.46	5.77	13.26	17.60	12.43



ภาพที่ 4.39 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ระยะเวลา 0, 0.5, 1, 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง ของเวลาการกวนที่ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน

เมื่อพิจารณาหาค่าอัตราเกิดก๊าซชีวภาพต่อเวลา 24 ชม. ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่าจะมีค่าเฉลี่ยคือ  $0.55 \pm 0.01$ ,  $0.75 \pm 0.02$  และ  $0.52 \pm 0.03$  ลป.ม.ต่อชม. พบว่าที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน มีค่าอัตราเกิดก๊าซชีวภาพต่อเวลา 24 ชม.มากที่สุด รองลงมาที่เวลาการกวน 30 และ 90 นาทีต่อวัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ 90 นาทีต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยที่สุดทุกช่วงเวลาอาจเนื่องมาจากถ้าเวลาการกวนนานเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์ในระบบถูกทำลายเนื่องจากการเกิดแรงเฉือนระหว่างไบปัดกับจุลินทรีย์ที่ผสมอยู่ในน้ำหมักได้หรือทำให้ระบบเกิดการปั่นป่วนซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพภายในระบบได้ ดังนั้นที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวันจะเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด



#### 4.6 ปริมาณการใช้ไฟฟ้า

จากการศึกษาอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะใช้เวลาการกวนอยู่ที่ 15 นาทีต่อวัน และการศึกษาเวลาการกวน คือ 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ามีปริมาณการใช้ไฟฟ้า อยู่ที่ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ หรือ 1,752, 3,504, 5,256 และ 7,008 กิโลวัตต์ต่อปี ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าและผลตอบแทนพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของแต่ละการทดลองที่เวลาการกวนต่างๆ

รายละเอียด	เวลาการกวน (นาทีต่อวัน)			
	15	30	60	90
พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชม./วัน)	0.2	0.4	0.6	0.8
คิดเป็นมูลค่า (บาทต่อเดือน)	16.58	33.15	49.73	66.43
คิดเป็นมูลค่า (บาทต่อปี)	198.96	397.8	596.76	797.16
ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เฉลี่ย (ลบ.ม./วัน)	23.25	14.52	16.20	10.90
คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า ((กิโลวัตต์-ชม./วัน)	27.90	17.42	19.44	13.08
คิดเป็นมูลค่า (บาทต่อเดือน)	2,312.46	1,443.83	1,611.26	1,084.12
คิดเป็นมูลค่า (บาทต่อปี)	27,749.52	17,325.96	19,335.12	13,009.44

หมายเหตุ : ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

: ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยหน่วยละ 2.76 บาท

จากตารางที่ 4.16 แสดงผลตอบแทนพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่า ที่การทดลองเวลาการกวน 15, 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าคิดเป็นมูลค่าได้ คือ 27,749.52, 17,325.96, 19,335.12 และ 13,009.44 บาทต่อปี ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า คิดเป็นมูลค่าทั้งหมดอยู่ที่ 77,420 บาทต่อปี ซึ่งในการทดลองจะมีปริมาณการลงทุนประมาณ 800,000 บาท ดังนั้นระยะเวลาในการคืนทุนจะอยู่ที่ 10 ปี 3 เดือน จะเห็นได้ว่าระยะเวลาคืนทุนจะ ใช้เวลานานแต่เมื่อคิดในด้านการรักษาสีสิ่งแวดล้อมถือว่าการคุ้มค่าน่ามากในการลงทุน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริงสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของอัตราเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระยะเวลา 60 วัน พบว่าลักษณะน้ำหมักที่ได้จากการหมักเศษอาหารจะมีสีดำสนิทและมีกลิ่นคล้ายกับกากตะกอนในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน โดยการเวียนตะกอนจะเป็นการเพิ่มสภาพต่างกลับไปให้หัวถังหมักซึ่งช่วยในการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมต่อแบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพและยังเป็นการช่วยลดเศษอาหารที่ตกค้างที่ช่องป้อนวัสดุเพื่อป้องกันการเกิดการเน่าเสียที่จะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคต่างๆ ซึ่งจากการทดลองอัตราเวียนตะกอนที่ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอัตราเวียนตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัดชีโอดีทั้งหมด ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมดได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 82.91, 71.92 และ 83.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.71 ลบ.ม.ต่อกก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเป็น 60.90 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าที่อัตราเวียนตะกอนยิ่งมากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบที่เป็นก๊าซมีเทนเฉลี่ยก็จะมากไปด้วย

จากการศึกษาเวลาการกวนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ในระยะเวลา 90 วัน ที่เวลาการกวน 30, 60 และ 90 นาทีต่อวัน พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการกวนมากขึ้นสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยทั้งหมดได้มากขึ้น ซึ่งที่เวลาการกวน 90 นาทีมีค่าเท่ากับ 78.29 และ 87.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 87.35 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.69 ลบ.ม.ต่อกก.ชีโอดีที่ถูกกำจัด โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเป็น

61.6 เปอร์เซนต์ ดังนั้นที่เวลาการกวน 60 นาทีต่อวัน เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริงมากที่สุด

ดังนั้นปัจจัยอัตราการเวียนตะกอนและเวลาการกวนก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพภายในระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งได้ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสามารถนำไปใช้ในโรงอาหารได้ แสดงให้เห็นว่าสามารถช่วยลดปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นและสามารถลดการเกิดก๊าซมีเทนเพื่อนำไปใช้ในการผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารซึ่งผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษพืชผลทางการเกษตรที่มีลักษณะใกล้เคียงกับขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำให้เป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยลดปริมาณเศษพืชผลทางการเกษตรที่เกิดขึ้นจำนวนมากได้

2. นำหมักชีวภาพที่ได้ออกมาจากระบบสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพได้เป็นอย่างดี

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2551. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2551. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2540. มูลฝอยชุมชน. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย 2540. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.
- จงกล พูนทวี. 2537. ผลของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรธรรมชาติและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชยันต์ กิมยงค์. 2545. การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรในถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่มีการไหลวนกลับของน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ทรงพล ครามโกมุท. 2544. การกำจัดสีจากน้ำเสียกากสาโดยใช้ระบบ UASB ที่ทำงานร่วมกับระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2552. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี.
- นพพร เจตน์ชัย. 2529. การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซชีวภาพอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิปานกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พัชรี หอวิจิตร. 2529. การจัดการขยะมูลฝอย. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. 2541. การผลิตพลังงานจากขยะชุมชน. เอกสารประกอบการเสวนาเรื่อง การนำขยะมาใช้ในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าและด้านการเกษตร (ครั้งที่ 2). จัดโดยคณะกรรมการการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน วุฒิสภา (24 กันยายน 2541): 20 หน้า.

พัทธนันท์ นางพินิจ, ปรีชา พลอยภักทรภิญโญ และเรวดี อนุวัฒนา. 2551. การพัฒนาเทคโนโลยีและต้นแบบผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและมีเทนจากของเสีย และวัสดุเหลือใช้การเกษตรแบบครบวงจร. รายงานโครงการวิจัย . สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

พัสดราภรณ์ จันทจำรัสปัญญา. 2547. การศึกษาปฏิสัมพันธ์ของจุลินทรีย์ *B. licheniformis*. Enriched EUB และ enriched MPB ในกระบวนการย่อยสลายกลูโคสไปเป็นก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พาทีณี สนั่นพานิชกุล .2552. ก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารในจุฬา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.ieat.go.th/escr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=396:2009-11-25-02-42-06&catid=12:2008-12-24-14-17-29](http://www.ieat.go.th/escr/index.php?option=com_content&view=article&id=396:2009-11-25-02-42-06&catid=12:2008-12-24-14-17-29). [2553, ธันวาคม 6]

พิมพ์ใจ นามศรี. 2552. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและพัลพ์สับปะรดในถังหมักแบบท่อไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2551. ถังหมักแบบไร้อากาศ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.effe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&doc=Jj2bGrxNqdVEeHX4>. [2553, ธันวาคม 7]

วุฒิกัณฑ์ คุณมินทร์. 2544. การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหารที่ความเข้มข้นสูงโดยการหมักแบบชั้นกรองไร้อากาศ 2 ชั้นตอนร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. 2554. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยและเคมีภัณฑ์ [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=634> [2554, สิงหาคม 21]

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. 2552. กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ พื้นฐานและการคำนวณออกแบบ. กรุงเทพมหานคร: สยามสเตชันเนอรีซ์ฟฟลายส์.

- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์.2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย:การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา.กรุงเทพมหานคร: ท้อป.
- สุ��ัญญา ทองเครือ. 2547. ผลของสัดส่วนอัตราไหลเข้าต่ออัตราไหลเวียนกลับและความเร็วไหลขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบอีจีเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- สุพินดา ธุระเจน. 2544. การเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สายวิชาเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรพล สายพานิช.2530. กระบวนการเร่งตะกอนคอนแทกที่สเตรปโตไลเซชันแบบแอนแอโรบิก. รายงานผลการวิจัย. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. 2543. บทสรุปการศึกษาส่วนที่ 3. นโยบาย และแผนงานพลังงาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงาน แห่งชาติ.
- สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2554. การคัดแยกขยะ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- สำนักนโยบายและแผน. 2541. ปริมาณมูลฝอยในกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร: สำนัก นโยบายและแผน.
- สำนักสิ่งแวดล้อม. 2552. การจัดการขยะ ของเสียอันตราย และสิ่งปฏิกูล. รายงานสถานการณ์ สิ่งแวดล้อม 2551-2552. กรุงเทพมหานคร: สำนักสิ่งแวดล้อม.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- อรัลดา บุญแสน. 2537. การศึกษาการสร้างเอนไซม์จากจุลินทรีย์อุณหภูมิแยกได้จากปุ๋ยหมักขยะ ชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อาริยา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้ สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาจุล- ชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุบลวรรณ นนทพันธุ์. 2543. การเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายมูลฝอยเศษอาหารในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม โครง การสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

### ภาษาอังกฤษ

Ahn, J-H and C.F. Forster. 2002. The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater. Process Biochemistry 37: 589-594.

Ahn, H.K., Smith, M.C., Kondrad, S.L., and White, J.W. 2009. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switch grass - animal manure mixtures. Applied Biochemistry and Biotechnology.

Arthur, C. 1999. Digester mixing system Can you properly mix with too little power?. Division of McNich Corporation. [online]. Available from: <http://www.walker-process.com/paper DIGMIX.pdf>. [2011, June 16]

Bajpai, R. K. and Iannotti, E. I. 1995. Product Inhibition in Handbook of an Anaerobic Fermentation, Edited by L. E. Ericksey and D. Y. C. Fang. New York: Marcel Dekket.

Bolzonella D., Innocenti L., Pavan P., Traverso P., Cecchi F. 2003. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solids waste: focusing on the start-up phase. Bioresource Technology 86 : 123-129.

Bonzonella, D., Pavan, P., Mace, S., and Cecchi, F., 2005. Dry Anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full scale experience. Water Science Technology 53: 23 – 32.

Cassery, C. and L. Erijman. 2003. Molecular monitoring of microbial diversity in an UASB reactor. International Biodeterioration & Biodegradation. 52: 7-12.

Fernandez, J., Perez, M., and Romero, L.I. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Bioresource Technology 99: 6075 – 6080.

- Forster-Carneiro, T., Perez, M., and Romero, L.I. 2008. Anaerobic digestion of municipal solid waste: Dry thermophilic performance. Bioresource Technology 99: 8180 – 8184.
- Garcia, J.L. 1982. Advances of Digestion Anaerobic. Symposium International Mexico. Mexico.
- Griffin, M.E., K.D. McMahon, R.I. Mackie and L. Raskin. 1998. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. Biotechnology and Bioengineering. 57 : 342-355.
- Hill, D. T. and Bolte, J. P. 1989. Digester Stress as Related to Iso-butyric and Iso-Valeric acid. Biological Wastes 28 : 33-37.
- John, G.H., R.K. Noel, H.A.S. Peter, T.S. James and T.W. Stanley. 1994. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. ninth edition. Williams and Wilkins. New York.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., and Angelidakia, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab – scale and pilot – scale studies. Bioresource Technology 99: 4919 – 4928.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., and Al-Dahhan, M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. Bioresource Technology 96: 1771 – 1781.
- Koga, Y.N., M.M. Hiroyuki and A.M Masayo. 1993. Ether polar lipids of methanogenic bacteria: structures, comparative aspects and biosynthesis. Microbiol Mol Biol Rev. 57: 164-182.
- Lane, A. G. 1984. Anaerobic Digestion of Solid Fruit Waste Supplemented with Poultry Manure in a Horizontal Plug-flow Reactor. Environment Technology 5 : 465-470.
- Lanting J. 2003. Optimization of biological activity for anaerobic sludge digestion. Los Angeles, CA: Water Environment Federation.
- Lawrence, A. W. 1971. Anaerobic Biological Waste Treatment System, Agricultural Waste :Principal and Guideline for Practical Solutions Proc. Cornell University Conference, Agricultural Waste Management.



- Lettinga, G., Van-Velsen A.F.M., Hobma, S.W., De-Zecuw, W. and Klapwijk, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering 22 : 699 - 734
- Macleod, F.A., S.R. Guiot and J.W. Costeron. 1990. Layered structure and bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor. Applied Environment Microbiology 55 : 1589-1607.
- Marchaim, U. and Krause, C. 1993. Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. Bioresource Technology 43 : 195 – 203.
- Marty, B. 1984. Microbiology of anaerobic digestion : Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Organic Agricultural Wastes. New York: Elsevier Applied Science Publisher.
- McCarty, P.L. and McKinney, R.E. 1961b. Volatile Acid Toxicity in Anaerobic Digestion . Water Pollution Control Fed 33 : 399-415.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamental Part 1, 2, 3, 4. Public Works 95: 107-115.
- Metcalf and Eddy. 1991. Waste Water Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. New York : McGraw-Hill.
- Morhan, S. V., Mahannakrishna, G., Goud, R. K. and Sarma, P. N. 2009. Acidogenic fermentation of vegetable based market waste to harness biohydrogen with simulation stabilization. Bioresource Technology 100 : 3061 - 3068
- Mousa, L. and C.F. Forster. 1998. The effect of trace organics on the inhibition of gas production by anaerobic sludges : batch studies. Water Resserch 32 : 3795-3798.
- Mtz-Viturtia, A., Llabres-Luengo, P., Cecchi, F. and Mata-Alvarez, J. 1995. Two-phase kinetic model fitting in a two-phase anaerobic digestion of highly biodegradable organic matter. Environmental Technology 16: 379 – 388.

- Mucha, H., Ingnes, F. and Trosch, W. 1988. Conversion of Propionate to Acetate and Methane by Syntrophic Consortia. Applied Microbiology and Biotechnology 27 : 581 - 586.
- Novaes, R.F.V.1986. Microbiology of Anaerobic Digestion. Water Science Technology. 18 : 1-14.
- Pagilla, K.R., H. Kim and T. Cheunbarn. 2000. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste. Water Research 34 : 2747-2753.
- Rao, M.S., Singh, S.P., Singh, A.K. and Sodha, M.S. 2000. Bioenergy Conversion Studies of the Organic Fraction of MSW: Assessment of Ultimate Bioenergy Production Potential of Municipal. Garbage Applied Energy 66 : 75-87.
- Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chaiprasert, P. and Nopharatana, A. 2006. The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. Environmental Management 81: 27 – 35.
- Seagren, E.A., Levine, A.B. and Dague, R.R.1991. High pH effects in anaerobic treatment of liquid industrial by products. 45 th. Purdue industrial waste conference : 377 – 385.
- Stabnikova, O., Liu, X-Y., and Wang, J-Y. 2008. Anaerobic digestion of food waste in a hybrid anaerobic solid-liquid system with leachate recirculation in an acidogenic reactor. Biochemical Engineering Journal 41: 198 – 201.
- Stafford, D.A. 1982. The effects of mixing and volatile fatty acid concentrations on anaerobic digestion performance. Biomass 2: 43 – 45.
- Stroot, P.G., McMahon, K.D., Mackie, R.I. and Raskin, L. 2001. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing condition-I. Water Resource 35: 1804 – 1816.
- Vandevivere, P., Debaere, L. and Verstraete, W. 1985. Biomethanization of OFMSW. New York. McGraw-Hill.

- Vavililin, V.A. and Angelidaki, I. 2004. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. Biotechnology and Bioengineering 89: 113 – 122.
- Vogel, G. D. 1987. Biochemistry of Methane Production. Biology of Anaerobic Microorganisms Wiley & Sons. : 139-142.
- Zinder, S.H. and T. Anguish. 1992. Carbondioxide, hydrogen and formate metabolism duringmethanogenesis from acetate by thermophilic culture of *Methanosarcina* and *Methanotrix* strains. Applied Environment Microbiology 58 : 3323-3329.
- Zupancic, G.D. and M. Ros. 2003. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. Renewable Energy 28: 2255-2267.

ภาคผนวก

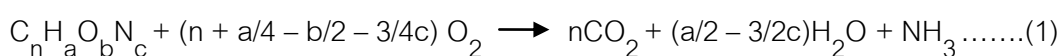
ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์

## ภาคผนวก ก

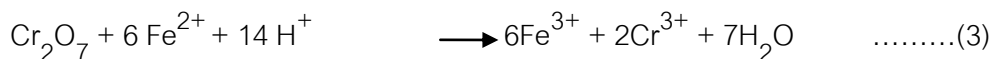
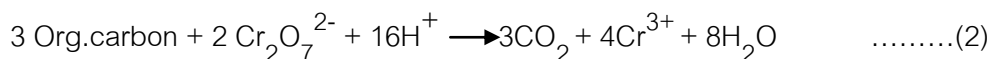
### การวิเคราะห์ค่า COD (Determination of Chemical Oxygen Demand)

ค่า COD หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการ Oxidize สารอินทรีย์ใน น้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100 %) จะถูก Oxidize โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong Oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการที่ 1



จะเห็นว่าสมการการเกิดปฏิกิริยาของ COD คล้ายกับ BOD คือสารอินทรีย์ในน้ำ จะถูก Oxidize จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ต่างกันตรงที่ BOD นั้นใช้แบคทีเรียในการย่อยสลายส่วน COD ใช้ตัวเติมออกซิเจน (Oxidizer) ดังกล่าวแล้ว โดยปกติค่า COD จะสูงกว่าค่า BOD ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก Oxidize อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการดูดซึมทางชีวะ (Biological Assimilation) ของสารเหล่านั้น เช่น กลูโคส ลิกนิน เซลลูโลส โดยเฉพาะถ้า น้ำเสียนั้นมีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูก Oxidize ทางชีวะปนอยู่ด้วย จะทำให้ค่า COD สูงกว่าค่า BOD มาก ในกรณีที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์บางพวก เช่น Straight - Chain Aliphatic Compound, Aromatic Hydrocarbon, Pyridine และ Betain ปะปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้จะไม่ถูก oxidize ทางเคมี ค่า COD จะน้อยกว่าค่า BOD อีออนของสารอินทรีย์บางตัว เช่น halogen ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ),  $NO_2^-$ ,  $S^{2-}$  และ  $Fe^{2+}$  มีผลทำให้ค่า COD มีค่ามากกว่าความเป็นจริง การหาค่า COD จะรู้ผลในเวลาไม่เกิน 3 ชม. ดังนั้นจึงเหมาะในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียเพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องได้ทันทั่วทั้งที่ และใช้ในการประเมินค่า BOD อย่างคร่าว ๆ

Strong Oxidizing Agent ที่ใช้ในการหาค่า COD มีด้วยกันหลายตัว คือ Potassium Permanganate, Ferric Sulfate, Potassium Iodate และ Potassium Dichromate การหาค่า COD โดยใช้โปแทสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอน หลักการของวิธีนี้ คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก Oxidized โดยใช้โปแทสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การ Reflux เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณโปแทสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วย Ferrous Ammonium Sulfate โดยใช้ Ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (2) และ (3)



มีการเติม  $\text{AgSO}_4$  เป็นตัว Catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์ของพวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ (Straight Chain Aliphatic) นอกจากนี้  $\text{AgSO}_4$  ที่ใส่ไปจะไปทำปฏิกิริยากับ  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  หรือ  $\text{I}^-$  ก็ได้ แต่  $\text{AgSO}_4$  เป็นตัว Catalyst ที่ไม่ได้ผลในการออกซิไดส์สารประกอบพวก Aromatic และ Pyridine สารรบกวนที่สำคัญ คือ  $\text{Cl}^-$  จึงต้องใส่  $\text{HgSO}_4$  ลงไปก่อนเพื่อจับกับ  $\text{Cl}^-$  ให้อยู่ในรูปของ Mercuric Chloride Complex โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่า COD ตั้งแต่ 50 มก./ล. ขึ้นไปได้และแน่นอน

การ Reflux มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Closed Reflux) ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และแบบปิดสารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดส์ได้นานกว่าการวิจัยในครั้งนี้เลือกวิเคราะห์ COD แบบ Closed Reflux ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

### การวิเคราะห์ COD แบบ Closed Reflux, Titrimetric Method

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 25 x 25 พร้อมจุก TFE
2. ที่ใส่หลอดทดลอง
3. เตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ  $150 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
4. ปิเปต ขนาด 1, 10 มิลลิลิตร
5. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
6. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

#### รีเอเจนต์

1. สารละลาย Digestion Reagent ละลาย  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  4.913 กรัม ซึ่งอบแห้งที่  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชม. ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ค่อย ๆ เติม conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  167 มล. เติม  $\text{HgSO}_4$  ลงไป 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม  $\text{AgSO}_4$  (Sulfuric Acid Reagent) ละลาย  $\text{AgSO}_4$  22 กรัม ใน conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ละลาย

3. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulfate (FAS) 0.1 N ละลาย  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  39 กรัมแล้วเติม Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ลงไป 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนมีปริมาตร 1 ลิตร

สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย Digestion Reagent ดังนี้ คือ เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร สารละลาย Digestion Reagent 14 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ปิเปตค่อย ๆ เติม Sulfuric Acid Reagent ลงไป 14 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาไตเตรทกับสารละลาย Ferrous Ammonium Sulfate (FAS) โดยใช้ Ferroin จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลาย จะเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลที่จุดยุติ

$$\text{Normality of FAS solution} = \frac{\text{ml K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{ml Fe (NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2} \times 0.10$$

4. สารละลาย Ferroin อินดิเคเตอร์ ละลาย 1-10 Phenantroline Monohydrate 1.485 กรัม และ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร

#### วิธีการทดลอง

1. ล้างหลอดทดลอง และฟาจุกด้วยกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์

2. ปิเปตตัวอย่างนำมา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติม Digestion Reagent ลงไป 6 มิลลิลิตร

3. ค่อย ๆ เติมกรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม  $\text{AgSO}_4$  ลงไป 14 มิลลิลิตร ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของน้ำตัวอย่างและ Digestion Reagent

หมายเหตุ ภายหลังจากการเติมกรดซัลฟูริก ให้สังเกตสีของตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ถ้าได้สีเขียว แสดงว่าปริมาณ  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  เหลืออยู่มาก ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยเกินไป ต้องเพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่างอีก

- ถ้าได้สีเขียวอมเหลือง แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างเหมาะสม สามารถนำไปรีฟลักซ์ได้



- ถ้าได้สีเขียวอมฟ้า แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างมากเกินไป ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้ โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่าง น้ำตัวอย่าง : น้ำกลั่น เท่าไรก็ได้ แต่ผลรวมของปริมาตรน้ำตัวอย่างต้องเท่ากับ 10 มิลลิลิตร

4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดไปมาหลาย ๆ ครั้ง อย่าทิ้งถึงก่อนจะนำตัวอย่างไปรีฟลักซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่ที่ก้นหลอด ซึ่งอาจแตกได้ในขณะทำการรีฟลักซ์

5. ให้ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่น แทนน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างประมาณ 1-2 หลอด

6. นำหลอดแก้วทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและ Blank วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง แล้วเข้าเตาอบที่ทำให้อุณหภูมิสูงถึง  $150 \pm 2$  °C ก่อนหน้านั้นแล้ว เมื่อเวลาครบ 2 ชั่วโมง ให้นำ ตัวอย่าง ออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น

7. เทตัวอย่างจากหลอดทดลองใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลาย FAS จนกระทั่งถึงจุดยุติจะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงในที่สุดที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

การคำนวณ

$$\text{COD, mg/L} = \frac{(a - b) \times N \times 8000}{\text{ml sample}}$$

a = ml  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ที่ใช้ไทเทรต Blank

b = ml  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง

N = Normality ของ  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ที่ใช้

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของตัวอย่างน้ำและ reagent ต่างๆ ในหลอดทดลอง

Digestion vessel	Sample (ml)	Digestion solution (ml)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> reagent (ml)	Total final volume (ml)
Culture Tube :				
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
Standard				
10- ml ampule	2.5	1.5	3.5	7.5

#### การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากสารตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนัก คงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Dessicator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะได้ปริมาณของของแข็งทั้งหมด

#### วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่จะใช้ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติ = A มิลลิกรัม
2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม
3. ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาของแข็งทั้งหมดใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำออกให้หมดบน Water Bath หรือ Hot Plate นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติ = B มิลลิกรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณ

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

### การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids, TVS)

ของแข็งระเหยทั้งหมด หมายถึง ปริมาณของสารที่ระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไป เรียกว่า ปริมาณของแข็งคงตัว (Fix Solids)

#### วิธีการวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่ได้จากการหาปริมาณของแข็งทั้งหมด แล้วนำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
2. ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fix Solids)

การคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร Fix Solid} = \frac{\text{มิลลิกรัม Fix Solid} \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

ดังนั้น มิลลิกรัม/ลิตร Total Volatile Solid = มิลลิกรัม/ลิตร total solid - มิลลิกรัม / ลิตร Fix Solid

### การวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid, TVS) และ ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity, TA)

วิธีนี้เป็นวิธีหยาบ ๆ ค่าที่ได้ ไม่แม่นยำนัก ไม่ควรนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียด แต่สามารถนำไปใช้ในการควบคุม ระบบเพื่อที่จะได้ทราบถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ใช้เวลาในการทดลองไม่เกิน 1 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. หาสภาพต่างทั้งหมดที่ pH 4.0 โดยวิธีการไตเตรทแบบโพเทนชิอเมตริก
2. ต้มไล่ก๊าซคาร์บอนิก
3. ไตเตรทกลับจาก pH 4.0 ไปเป็น 7.0 เพื่อหาสภาพต่างของกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Acid Alkalinity) และสภาพต่างของเบส (Base Alkalinity) แล้วจึงคำนวณหาค่ากรดอินทรีย์ระเหยต่อไป

#### สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 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 กรดคาร์บอนิกจะถูกไล่ออก

3. ปรับ pH ให้เป็น 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M จดปริมาตรสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการไทเทรตกลับตั้งแต่ 4.0 ถึง 7.0 ซึ่งจะเป็นสภาพต่างเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Acid Alkalinity) สมมติปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ สมมติ = B มิลลิลิตร

### การคำนวณ

$$\text{สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CaCO}_3\text{)} = \frac{A \times \text{Normality H}_2\text{SO}_4 \times 50 \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

$$\text{สภาพต่าง VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CaCO}_3\text{)} = \frac{B \times \text{Normality NaOH} \times 50 \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

ก) กรณีที่ 1 ถ้าสภาพต่าง VFA น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.0$$

ข) กรณีที่ 2 ถ้าสภาพต่าง VFA น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.5$$

## การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Gas Composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ คือ การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน

### เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) Shimadzu Model GC-14B ภายใต้สภาวะการทดลอง ดังนี้

- คอลัมน์ WG-100 SS เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 มิลลิเมตร ความยาว 1.8 เมตร
- เครื่องตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
- อุณหภูมิคอลัมน์ 70 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ Injection port 70 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ Detector 85 องศาเซลเซียส
- Carrier Gas ที่ใช้คือ ก๊าซฮีเลียม ที่อัตราการไหล 33 มิลลิลิตรต่อนาที
- Bridge Current ที่ใช้คือ 120 mA

### วิธีการวิเคราะห์

การฉีดตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยใช้ Syringe แบบ Gas Tight Syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดก๊าซชีวภาพจากถุงเก็บก๊าซชีวภาพที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพมา 1 ลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี คำนวณหาร้อยละของก๊าซมีเทนโดยเทียบจากร้อยละของพื้นที่ใต้พีค (Peak Area) ของก๊าซมีเทนมาตรฐาน 99.9 เปอร์เซ็นต์

## การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย คือ กรดอะซิติก โพรพิโอนิก และกรดบิวไทริก

### เครื่องมือและอุปกรณ์

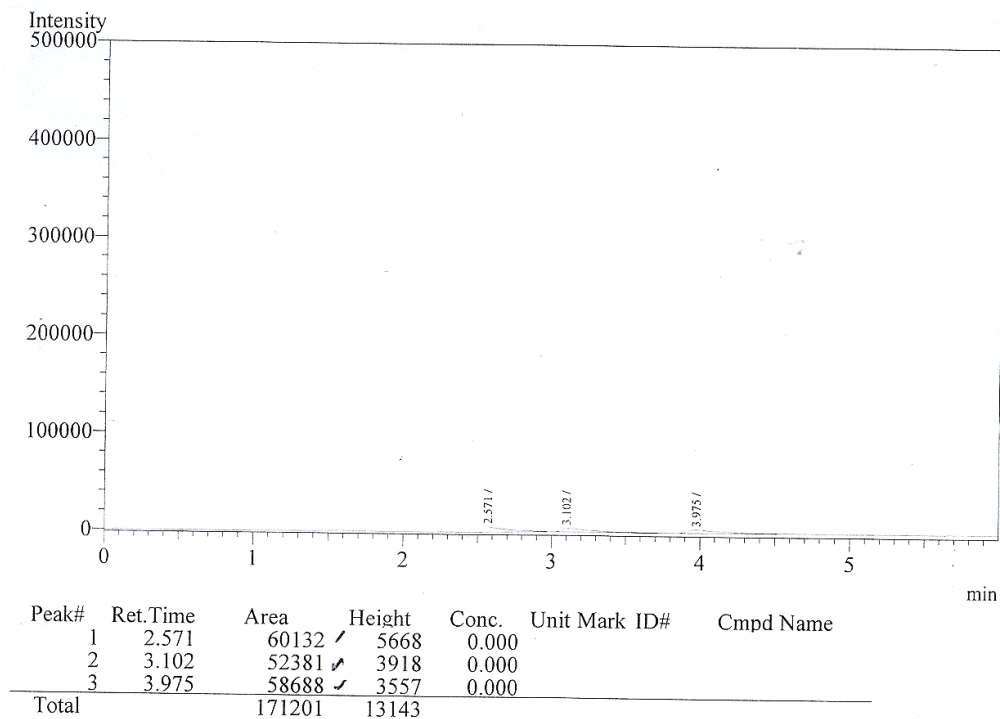
เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ภายใต้สภาวะการทดลอง ดังนี้

- คอลัมน์ชื่อ DB-WAX เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร
- แบบ Flame Ionization Detector (FID)
- อุณหภูมิคอลัมน์สูงสุด 245 องศาเซลเซียส
- Carrier Gas ที่ใช้คือ ก๊าซฮีเลียม ที่อัตราการไหล 1.56 มิลลิลิตรต่อนาที

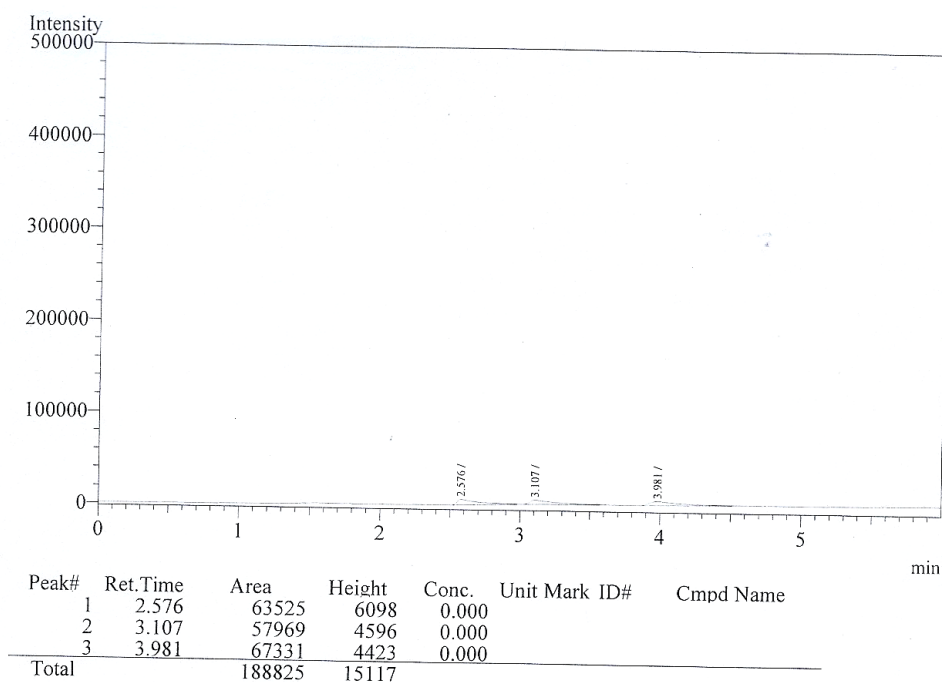
### วิธีการวิเคราะห์

เตรียม Standard กรดอินทรีย์ระเหยและน้ำหมักที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงและกรองใส่ขวด vial ขนาด 2 มิลลิลิตร นำไปฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี คำนวณหาความเข้มข้นขององค์ประกอบกรดอินทรีย์ระเหยโดยเทียบจากความเข้มข้นของพื้นที่ใต้พีค (Peak Area) (ดังภาพผนวกที่ ก 1-5)

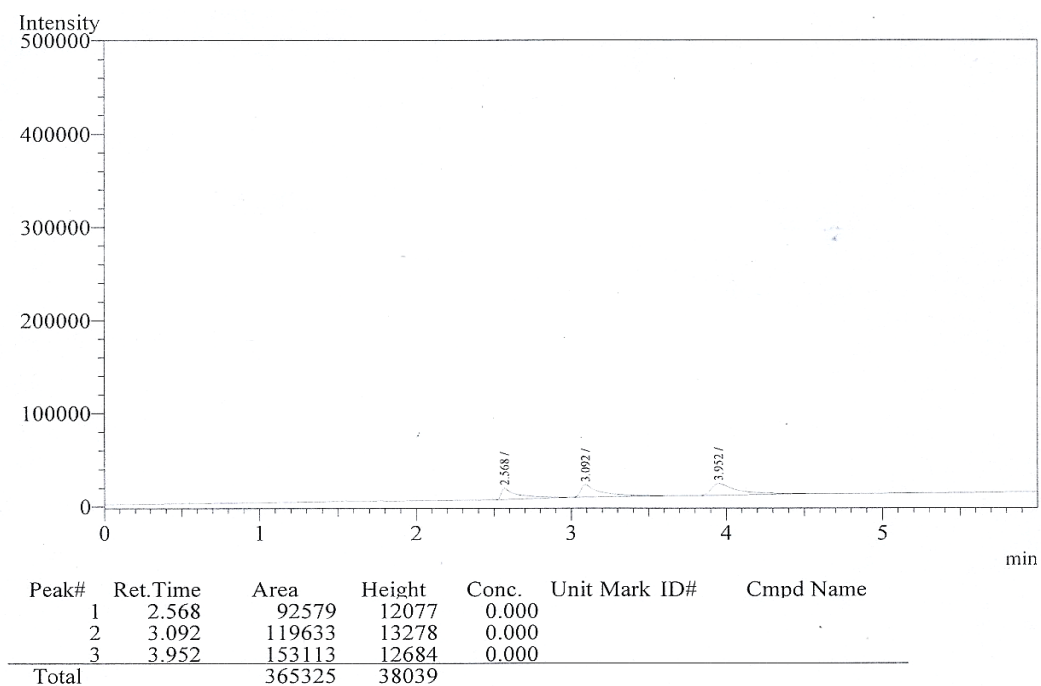
ผลการวิเคราะห์กรดอะซิติก โพรพิโอนิก และกรดบิวไทรริกของสารมาตรฐาน (Standard VFA)



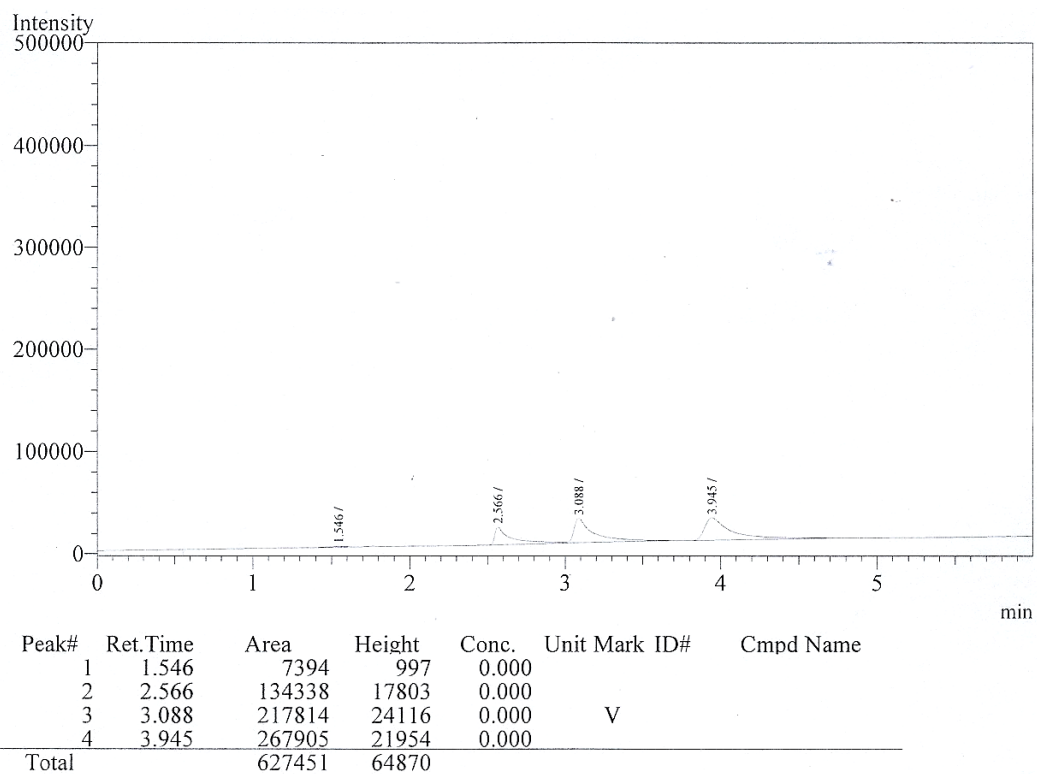
ภาพผนวกที่ ก 1 ตัวอย่างโครมาโตกราฟฟีของความเข้มข้นมาตรฐานที่ 1



ภาพผนวกที่ ก 2 ตัวอย่างโครมาโตกราฟฟีของความเข้มข้นมาตรฐานที่ 2

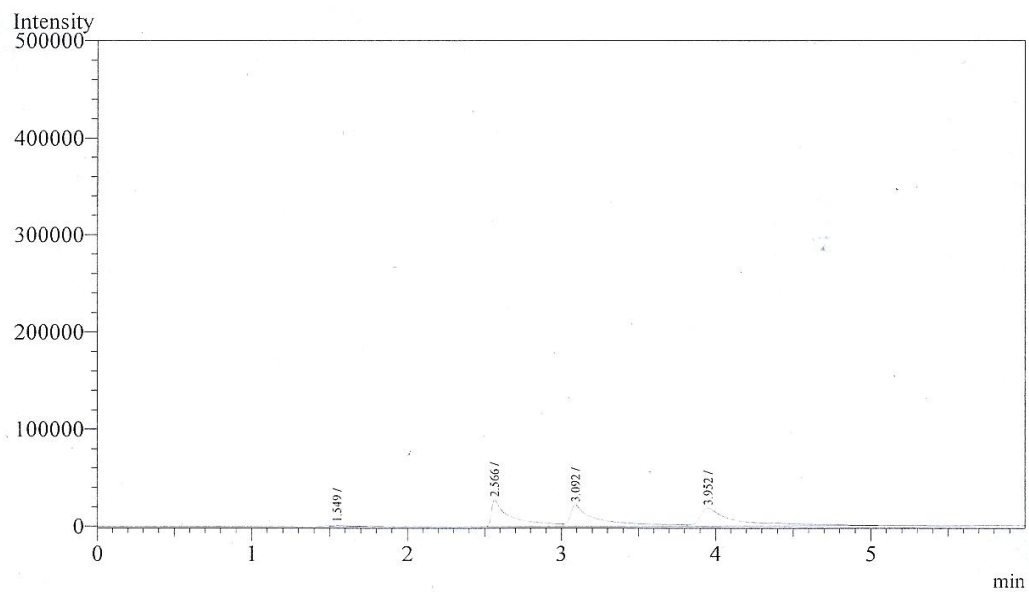


ภาพผนวกที่ ก 3 ตัวอย่างโครมาโตกราฟฟีของความเข้มข้นมาตรฐานที่ 3



ภาพผนวกที่ ก 4 ตัวอย่างโครมาโตกราฟฟีของความเข้มข้นมาตรฐานที่ 4





Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.549	11257	1491	0.000	V		
2	2.566	248522	28022	0.000			
3	3.092	271149	22185	0.000	V		
4	3.952	289512	18651	0.000	V		
Total		820440	70349				

ภาพผนวกที่ ก 5 ตัวอย่างโครมาโตกราฟฟีของความเข้มข้นมาตรฐานที่ 5

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

## ภาคผนวก ข

## 1. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

## ตัวอย่างการคำนวณ

ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบ (%) ที่อัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)

ซีโอดีที่เข้าระบบ = 312,649 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซีโอดีที่ออกจากระบบ = 64,750 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} &= \frac{(312,649 - 64,750) \times 100}{312,649} \\ &= 79.29 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของระบบ (%) ที่อัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)

ของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบ = 28,729 มิลลิกรัมต่อลิตร

ของแข็งทั้งหมดที่ออกจากระบบ = 8,443 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} &= \frac{(28,729 - 8,443) \times 100}{28,729} \\ &= 70.61 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดของระบบ (%) ที่อัตราเวียนตะกอน 50 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)

ของแข็งระเหยทั้งหมดที่เข้าระบบ = 27,271 มิลลิกรัมต่อลิตร

ของแข็งระเหยทั้งหมดที่ออกจากระบบ = 4,102 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} &= \frac{(27,271 - 4,102) \times 100}{27,271} \\ &= 84.96 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (I/d Organics Added)

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ} \\ &= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวัน (ลิตรต่อวัน)}}{\text{ของเหลวที่เข้าระบบ (ลิตรต่อวัน)} \times \text{ค่าสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (กรัมต่อลิตร)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ} \\ &= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวัน (ลิตรต่อวัน)} \times \% \text{CH}_4}{\text{ของเหลวที่เข้าระบบ (ลิตรต่อวัน)} \times \text{ค่าสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (กรัมต่อลิตร)}} \end{aligned}$$

## 3. การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (I/d Organics Removed)

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด} \\ &= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวัน (ลิตรต่อวัน)}}{Q (S_o - S)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด} \\ &= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวัน (ลิตรต่อวัน)} \times \% \text{CH}_4}{Q (S_o - S)} \end{aligned}$$

เมื่อ Q = ปริมาณของเหลวที่เข้าสู่ระบบโดยเฉลี่ยต่อวัน (ลิตรต่อวัน)

$S_o$  = ปริมาณมวลสารอินทรีย์ของของเหลวที่เข้าสู่ระบบโดยเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อลิตร)

S = ปริมาณมวลสารอินทรีย์ของของเหลวที่ออกจากระบบโดยเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อลิตร)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทวินนท์ สเลอาด เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2529 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และระหว่างการศึกษาก็ได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

ทวินนท์ สเลอาด และชวลิต รัตนธรรมสกุล “ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง” หนังสือนำเสนอผลการประชุมวิชาการ (Proceeding) ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวะกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3 จัดโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 14 – 15 มีนาคม 2554