

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารโดย
กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

BIOGAS PRODUCTION FROM ICE-CREAM WASTEWATER AND
FOOD WASTE USING ANAEROBIC FERMENTATION PROCESS



T117307



บุญรัตน์ พงษ์อนุวัฒน์
ศิริลักษณ์ ตังจิตพิทักษ์กุล
เสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์

เลขที่.....
เลขทะเบียน 117307
วันเดือนปี 20 ก.ค. 2554

12338588
b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2553 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BIOGAS PRODUCTION FROM ICE-CREAM WASTEWATER AND
FOOD WASTE USING ANAEROBIC FERMENTATION PROCESS**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

Biogas Production from Ice-cream Wastewater and Food Waste using Anaerobic Fermentation Process

ชื่อนักศึกษา นางสาวบุษรัตน์ พงษ์อนุวัฒน์ รหัสนักศึกษา 50050464

นางสาวศิริลักษณ์ ตั้งจิตพิทักษ์กุล รหัสนักศึกษา 50050507

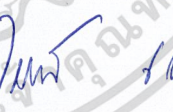
นางสาวเสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์ รหัสนักศึกษา 50050518

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
กรรมการ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
กรรมการ ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหาร โดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ
นักศึกษา	นางสาวบุญรัตน์ พงษ์อนุวัฒน์ รหัสนักศึกษา 50050464 นางสาวศิริลักษณ์ ตั้งจิตพิทักษ์กุล รหัสนักศึกษา 50050507 นางสาวเสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์ รหัสนักศึกษา 50050518
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ	ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหาร โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ที่อุณหภูมิ 37 °C และใช้เชื้อผสมจากน้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหาร โดยการเติมอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเติมคือ 10% ของปริมาณน้ำหมัก และระยะเวลาในการเติมอาหารที่เหมาะสมคือ 24 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จากน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารมีค่าเท่ากับ 47.18 mL/gCOD และ 5.32 mL/gCOD ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง GC-TCD พบว่า ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมากกว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากเศษอาหาร

คำสำคัญ : การหมักแบบไร้อากาศ, ก๊าซชีวภาพ, น้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม, เศษอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biogas Production from Ice-cream Wastewater and Food Waste using Anaerobic Fermentation Process	
Students	Bunyarat Ponganuwat	50050464
	Siriluk Tangjitpithakkul	50050507
	Sauwalak Sangpitak	50050518
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Resource Chemistry	
Academic Year	2010	
Advisor	Asst.Prof. Dr Suwannee Junyapoon	

ABSTRACT

This special project studies biogas production from ice-cream wastewater and food waste from cafeteria using anaerobic fermentation process in 1 L duran bottle at 37 °C. Mixed organisms from food waste fermentation process for biogas production were used as seed in the reactor. Substrate was feed in semi-continuous. It was found that 20% substrate feed and 24 hours retention time were the optimum conditions for anaerobic fermentation of ice-cream wastewater while food waste substrate, the optimum feed rate was 10%. The biogas production rate of 47.18 ml/gCOD and 5.32 ml/gCOD were detected in the reactors of ice-cream wastewater and food waste, respectively. The analysis of methane using GC-TCD showed that biogas produced from ice-cream wastewater contained higher concentration of methane than that of food waste.

Keywords : anaerobic fermentation, biogas, ice-cream wastewater, food waste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจแก้งานวิจัยเล่มนี้ ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ ผศ.ดร.ชมพูนุช ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำและช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้งานวิจัยเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.มงคล เพ็ญสายใจ อาจารย์ประจำสาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำและให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อเชื้อจุลินทรีย์ผสมและมาตรฐานก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งให้คำแนะนำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาของงานวิจัยเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ โรงงานผลิตไอศกรีม จอมธนา จังหวัดปทุมธานี ที่เอื้อเฟื้อน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ นักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อเศษอาหารจากการรับประทาน ซึ่งนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือ อำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดามารดาและบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อนๆ ทุกคนและพี่ๆ ชั้นปริญญาโททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

บุญรัตน์ พงษ์อนุวัฒน์
ศิริลักษณ์ ตั้งจิตพิทักษ์กุล
เสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สัญลักษณ์และคำย่อ	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ก๊าซชีวภาพ	3
2.1.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	4
2.1.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	5
2.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ	5
2.2.1 แบคทีเรียกลุ่ม Fermentative bacteria	5
2.2.2 แบคทีเรียกลุ่ม Hydrogen-producing acetogenic bacteria	5
2.2.3 แบคทีเรียกลุ่ม Homoacetogenic bacteria	6
2.2.4 แบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic bacteria	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน	7
2.3.1 อุณหภูมิ	7
2.3.2 พีเอช	7
2.3.3 กรดไขมันระเหยและสภาพต่าง	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.3.5 สารพิษที่ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน	10
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน	13
2.5.1 ก๊าซออกซิเจน	13
2.5.2 อุณหภูมิ	13
2.5.3 ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมัก	13
2.5.4 ระบบการหมักก๊าซชีวภาพ	13
2.5.5 ระยะเวลาการพักตัวของการเกิดก๊าซ	14
2.5.6 การคลุกเคล้า	14
2.5.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและความเข้มข้นของกรดระเหย	14
2.5.8 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน	15
2.5.9 สารเคมีและยาปฏิชีวนะ	15
2.6 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	19
3.1.1 อุปกรณ์	19
3.1.2 สารเคมี	19
3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	19
3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 วิธีการทดลอง	20
3.2.1 วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสีย	20
3.2.2 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	21
3.2.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมอาหาร	22
3.2.4 ศึกษาปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเติม	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและ เศษอาหารจากโรงอาหาร	24
4.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	25
4.2.1 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซ	25
4.2.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมอาหาร	27
4.2.3 ศึกษาปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเติม	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 7 อันดับของกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ	4
2.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	4
2.3 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	5
2.4 ปฏิกริยาการเกิดมีเทนจากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ	6
2.5 ปฏิกริยาการย่อยสลายที่เกิดจากจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจนได้ก๊าซชีวภาพ	12
3.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย	20
3.2 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-เทอร์มอลคอนดักทีวิตีดีเทคเตอร์ (GC-TCD)	23
4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหาร ก่อนการทดลอง	24
ก-1 ช่วงของค่า BOD กับวิธีการเจือจางต่างๆของตัวอย่าง	39
ก-2 แสดงความสัมพันธ์ปริมาณอินทรีย์ใน โดโรเจนกับปริมาณน้ำตัวอย่าง	53
ข 1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม	55
ข 1.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหารจากโรงอาหาร	56
ข 2.1 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม และเศษอาหาร 10% เป็นแหล่งอาหาร โดยการเติมแบบวันเว้นวัน	57
ข 2.2 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ 10% ของน้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีมเป็นแหล่งอาหาร	59
ข 2.3 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ 10% ของเศษอาหารเป็นแหล่งอาหาร	61
ข 2.4 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ 20% ของน้ำเสียจาก โรงงานผลิต ไอศกรีมเป็นแหล่งอาหาร	62
ข 2.5 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ 20% ของเศษอาหารเป็นแหล่งอาหาร	63
ข 3.1 ค่าพีเอชของน้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม	64
ข 3.2 ค่าพีเอชของเศษอาหาร	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน	11
3.1 ชุดหมักก๊าซชีวภาพ	22
4.1 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ผลิตได้ เมื่อเติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และน้ำเสียเศษอาหาร (ข) และชุดควบคุมไม่มีการเติมอาหาร (ค)	26
4.2 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ผลิตได้ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และเศษอาหาร (ข) เป็นแหล่งอาหาร	27
4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่มีผลต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ 10%น้ำเสียจากโรงงานผลิต ไอศกรีม (ก) และ 10 % เศษอาหาร (ข) เป็นแหล่งอาหาร	28
4.4 ปริมาตรก๊าซสะสม เมื่อใช้น้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และเศษอาหาร (ข) เป็นแหล่งอาหาร	29
4.5 ลักษณะการติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และเศษอาหาร (ข)	30
4.6 โครมาโทแกรมของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) เศษอาหาร (ข) และมาตรฐานก๊าซชีวภาพ (ค)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์และคำย่อ

Mm^3/y	เมกะลูกบาศก์เมตรต่อปี
MJ/m^3	เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร
cm/s	เซนติเมตรต่อวินาที
$m^3 a/m^3 g$	ลูกบาศก์เมตรของอากาศต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซ
$kJ/m^3 \text{ } ^\circ C$	กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร องศาเซลเซียส
kg/m^3	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$^\circ C$	องศาเซลเซียส
MW	เมกะวัตต์
Mtonne	เมกะตัน
ppm	หนึ่งในล้านส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน โลกมีแนวโน้มประสบกับวิกฤตการณ์พลังงาน อันเนื่องมาจากความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลมีจำนวนจำกัด ส่งผลให้ราคาน้ำมันดิบสูงขึ้น การหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อตอบสนองความต้องการพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ปัจจุบันได้มีการศึกษาหาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ ได้แก่ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) จัดเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่มีความสนใจมาก (สุเมธ, 2522) เกิดจากกระบวนการหมักสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศ โดยมีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและค่าใช้จ่ายไม่สูง นอกจากจะได้ก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงแล้ว การผลิตก๊าซชีวภาพยังสามารถใช้ของเสียอินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสารตั้งต้น ซึ่งช่วยลดปัญหาการปล่อยสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียจากกระบวนการผลิต

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไอศกรีม ประกอบด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการผลิตไอศกรีมใช้นมหรือหางนม (Skim milk) เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไอศกรีมมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และยังคงกลิ่นเหม็น ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาหอบหืดผู้ที่อาศัยอยู่โดยรอบ โครงการพิเศษนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารเพื่อนำสถานะที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม และจากเศษอาหารในโรงอาหาร โดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารในโรงอาหารโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารก่อนกระบวนการหมักแบบไร้อากาศตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ pH, BOD, SCOD, TKN, TDS, TSS และ $T-PO_4^{3-}$

1.3.2 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและจากเศษอาหารในโรงอาหาร ด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศโดยการเติมอาหารแบบกึ่งต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ $37^{\circ}C$

1.3.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมอาหารในถังหมัก

1.3.4 ศึกษาอัตราการเติมอาหารที่เหมาะสมในถังหมัก

1.3.5 วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph – Thermal Conductivity Detector (GC-TCD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหาร

1.4.2 ช่วยลดปริมาณของเสียและเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตและการใช้พลังงานทางด้านอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ ซากสิ่งมีชีวิต ทั้งซากพืช ซากสัตว์ และของเสียจากสัตว์ รวมถึงขยะมูลฝอยที่เป็นขยะอินทรีย์ โดยการทำงานของจุลินทรีย์ ชนิดต่างๆ ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติถ้ามีสภาวะที่เหมาะสม หรือเกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สร้างขึ้น

(<http://teenet.chiangmai.ac.th/btc/introbiogas.php>)

ก๊าซชีวภาพถูกค้นพบครั้งแรกในศตวรรษที่ 17 ได้ค้นพบโดย Robert Boyle และ Stephen Hale โดยการกวนตะกอนในลำธารและทะเลสาบแล้วมีก๊าซที่สามารถติดไฟได้ลอยขึ้นมา ในปี ค.ศ. 1859 Sir Humphrey Davy พบก๊าซมีเทนที่เกิดจากขี้วัวและมีการสร้างถังหมักก๊าซในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digester) ขึ้นเป็นครั้งแรกในประเทศอินเดีย และต่อมาในปี ค.ศ. 1985 ประเทศอังกฤษได้มีการคิดค้นนวัตกรรมใหม่ขึ้นมาโดยใช้ถังสิ่งปฏิกูลผลิตก๊าซแล้วนำก๊าซไปจุดไฟส่องสว่างตามถนน ในปี ค.ศ. 1907 ได้มีการออกสิทธิบัตรสำหรับถังหมักก๊าซชีวภาพในเยอรมนี ในช่วงทศวรรษที่ 1930 ได้มีการวิจัยค้นคว้าและพบจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพและมีการศึกษาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ (<http://th.wikipedia.org/wiki/Biogas>)

ปัจจุบันได้มีแนวโน้มการใช้พลังงานจากก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในชนบทของประเทศไทยกำลังพัฒนา นิยมผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุทางการเกษตรหรือเศษอาหารจากครัวเรือน นอกจากนี้ ยังนิยมใช้ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง (ตารางที่ 2.1) สำหรับในประเทศไทยแล้ว ได้มีการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทน นอกจากนี้จะได้พลังงานแล้ว ยังเป็นการลดการปล่อยมลพิษรวมถึงก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมและยังเกิดปุ๋ยอินทรีย์เป็นผลพลอยได้ ปัจจุบันรัฐบาลไทยได้มีการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อช่วยลดวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 7 อันดับของกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ประทิน, 2550)

โรงงานอุตสาหกรรม	ปริมาณกากของเสีย (Mm ³ /y)	ก๊าซชีวภาพ (Mm ³ /y)	Kilotonne oil equivalent	Ca. electricity (MW)
แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch,pulp)	34.4 (3.9Mtons)	344 (388)	167 (141)	44 (37)
เอทานอล (Ethanol)	5.99	150	97	26
น้ำมันปาล์ม (Palm oil)	2.50	84	39	10
ปลาทูน่ากระป๋อง (Canned tuna)	18.8	21	12	3
สับประรดกระป๋อง (Canned Pineapple)	4.8	13	6	2
น้ำตาล (Sugar)	7.90	4.2	0.73	0.2
โรงฆ่าสัตว์ (Slaughterhouse)	2.1	0.60	0.21	0.1

2.1.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่และมีก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Hohl feld *et al.*, 1986)

ชนิดของก๊าซ	ปริมาณ
ก๊าซมีเทน (CH ₄)	ประมาณ 50-70%
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	ประมาณ 30-50%
ก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	ประมาณ 0.5-3.0%
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ประมาณ 0.5-1.5%
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	ประมาณ 0.01-0.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ (<http://www.efe.or.th/home.php>)

คุณสมบัติ	
ค่าความร้อนประมาณ	21 MJ/m ³ (ที่ปริมาณมีเทน 60 %)
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อัตรา A/F ในทางทฤษฎี	6.19 m ³ a / m ³ g
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
อุณหภูมิจุดติดไฟของก๊าซมีเทน	600 °C
ค่าความจุความร้อน (Cp)	1.6 kJ/m ³ °C
ความหนาแน่น (P)	1.15 kg/m ³

2.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ

จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทน สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม (ศาลิสา, 2549) ดังนี้

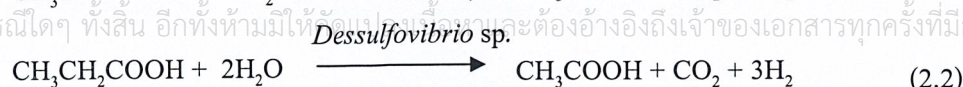
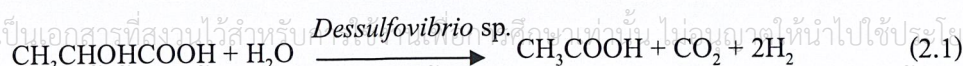
2.2.1 แบคทีเรียกลุ่ม Fermentative bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ได้แก่ เซลลูโลส แป้ง โปรตีน ไขมัน ด้วยเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ จนได้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน และสารต่าง ๆ สารเหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์และถูกเปลี่ยนไปเป็น อะซิเตท โพรพิอเนท แลคเตท บิวทิเรท และเอทานอล ผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น และสภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์เจริญเติบโต ในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนต่ำ จุลินทรีย์จะผลิตสารอินทรีย์พวกอะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน แต่ในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนสูง จุลินทรีย์จะผลิตโพรพิอเนท แลคเตท และเอทานอล

2.2.2 แบคทีเรียกลุ่ม Hydrogen-producing acetogenic bacteria

จุลินทรีย์กลุ่มนี้ ได้แก่ *Dessulfovibrio* sp. ทำหน้าที่ย่อยสลายโพรพิอเนท เอทานอล และกรดอินทรีย์อื่น ๆ ได้เป็น กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่

2.1 และ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อ่าน... ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แบคทีเรียที่เรียกลุ่ม Homoacetogenic bacteria

แบคทีเรียที่เรียกลุ่มนี้ ได้แก่ *Butyribacterium methylolicum* เป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นกรดอะซิติก ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น แลคเตท ไพรูเวท และเฮกโซส ผลผลิตที่ได้เป็นกรดอะซิติก และกรดบิวทิริก ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4



2.2.4 แบคทีเรียที่เรียกลุ่ม Methanogenic bacteria

เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นพวก Obligate anaerobes สามารถเจริญได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจนได้เท่านั้น จุลินทรีย์เหล่านี้จะย่อยสลายอะซิเตท ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นก๊าซมีเทน สามารถเจริญได้ทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (35-40 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิสูง (55-60 องศาเซลเซียส) ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการเจริญและการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.8-7.2 เกลือแร่ และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งที่จุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องการมาก ส่วนแอมโมเนียและซัลไฟด์ หรือซิสเตอีน (cysteine) เป็นสิ่งที่ต้องการเพิ่มเติม

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่

- 1) Methanotrophic bacteria ใช้อะซิเตท เมทานอล และ เมทิลเลทเอมีน
- 2) Non-methylotrophic bacteria ใช้ไฮโดรเจน คาร์บอน ไดออกไซด์ และฟอร์เมท

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนของสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนจากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ (ตาลีสา, 2549)

Substrate	Reaction	ΔG ⁰ (kJ/mole CH ₄)
1. ไฮโดรเจน	4H ₂ +CO ₂ → CH ₄ +2H ₂ O	-130.4
2. ฟอร์มิก	4HCOOH → CH ₄ +3CO ₂ +2H ₂ O	-119.5
3. เมทานอล	4CH ₃ OH → 3CH ₄ +CO ₂ +2H ₂ O	-103
4. โมโนเมทิลามีน	4CH ₃ NH ₃ ⁺ +2H ₂ O → 3CH ₄ +CO ₂ +4NH ₄ ⁺	-74
5. ไดเมทิลามีน	2(CH ₃) ₂ NH ₂ ⁺ +2H ₂ O → 3CH ₄ +CO ₂ +2NH ₄ ⁺	-74
6. ไตรเมทิลามีน	4(CH ₃) ₃ NH ⁺ +6H ₂ O → 9CH ₄ +3CO ₂ +4NH ₄ ⁺	-74
7. อะซิติก	CH ₃ COOH → CH ₄ +CO ₂	-32.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ซ้ำโดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Werner *et al.*, 1989)

ประกอบด้วย

2.3.1 อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการไร้ออกซิเจนมีอยู่ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิระหว่าง 30-40 °C เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophilic bacteria) อุณหภูมิระหว่าง 45-55 °C เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophilic bacteria)

โดยทั่วไปแล้ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้น อัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์จะถูกทำลายจนไม่สามารถกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโต และการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว

2.3.2 พีเอช

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่ง ๆ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5-10 เพราะสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ที่พีเอชต่ำกว่า 5 เรียกว่า acidophiles เช่น ราและแบคทีเรียบางชนิด ส่วนพวกที่เจริญเติบโตได้ที่พีเอช 10-11 เรียกว่า alkaliphiles พีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนอยู่ระหว่าง 6.8-7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.3.3 กรดไขมันระเหยและสภาพต่าง

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรดปกติ ควรมีค่าประมาณ 200-400 มิลลิกรัม กรดอะซิติกต่อลิตร กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม สังเกตได้จากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้น สภาพต่างจึงแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบซึ่งจะรักษาระบบให้มีพีเอชค่อนข้างคงที่และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไป กระบวนการไร้ออกซิเจนควรมีสภาพต่างประมาณ 1,500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (as CaCO₃) นอกจากจะดูสภาพต่างแล้ว ยังต้อง

พิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อสภาพต่าง (as CaCO₃) ด้วย โดยค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์หรือเผยแพร่ในรูปแบบใดก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างสูงกว่า 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (as CaCO_3) แล้ว แสดงว่าระบบมีบัพเฟอร์ต่ำ ควรหาสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนสูงขึ้นและแก้ไข เพราะพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนระบบอาจล้มเหลวได้

2.3.4 ธาตุอาหาร

แม้ว่าเซลล์ของแบคทีเรียที่สร้างขึ้นในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน แต่จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 จึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่น้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสอย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (McCarty, 1964) สำหรับกระบวนการไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ ยังมีธาตุบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการเป็นปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์

2.3.4.1 เหล็ก

เหล็กเป็นธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้น้อย และสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบแยกตัวออกจากน้ำ ตกตะกอนผลึกในรูปของเหล็กซัลไฟด์ ทำให้อาจเกิดปัญหาการกำจัดของเหล็กได้ ส่วนโคบอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่า แต่ก็อาจเกิดปัญหาเดียวกันได้

2.3.4.2 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญของโคเอนไซม์ F_{430} ซึ่งเป็นหนึ่งในโคเอนไซม์สำคัญต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ได้แก่ โคเอนไซม์ F_{420} , F_{430} และ 2-mercaptoethane sulfonic acid โดยปกติแล้วนิกเกิลเป็นสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่ในสารสกัดจากยีสต์ และในเกลือแร่อื่นๆ ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนได้รับนิกเกิลจากการปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม นิกเกิลอาจรวมกับซัลไฟด์ และตกผลึกได้เช่นเดียวกับผลึกเหล็ก จึงอาจมีความจำเป็นต้องเติมนิกเกิลบ้างในกรณีที่ไม่มีหรือมีนิกเกิลไม่เพียงพอ

2.3.4.3 ซัลไฟด์

บทบาทของซัลไฟด์ที่มีต่อระบบไร้ออกซิเจนมีทั้งเชิงบวกและเชิงลบ ซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนเนื่องจากสามารถตกผลึกเหล็ก นิกเกิล และ โลหะหนักที่จำเป็นต่างๆ นอกจากนี้ซัลไฟด์ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่อย่างไรก็ตาม ซัลไฟด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เป็นสารที่จำเป็น และขาดไม่ได้สำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อวิเคราะห์เซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนปรากฏว่าพบซัลไฟด์สูงถึง 2.6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด ในขณะที่โคเอนไซม์ 2-mercaptoethane sulfonic acid มีซัลไฟด์เพียง 4 เปอร์เซ็นต์ของที่พบทั้งหมด ดังนั้น ซัลไฟด์ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เปอร์เซ็นต์นี้ ต้องเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของแบคทีเรีย ความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเทนอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 1-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่แบคทีเรียนำไปใช้ได้ จะถูกกำหนดโดยพีเอช และความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบรรยากาศเหนือน้ำของถังปฏิกรณ์

2.3.5 สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้อากาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีอยู่หลายชนิด ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้

2.3.5.1 ไอออนบวก

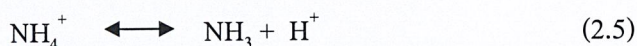
ไอออนบวกในน้ำเสียที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ โซเดียม ไอออน โพแทสเซียม ไอออน แมกนีเซียม ไอออน และแคลเซียม ไอออน ไอออนเหล่านี้ถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะเริ่มเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยเฉพาะไอออนบวกที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ซึ่งพิษจากไอออนของแมกนีเซียม และแคลเซียมมีมากกว่าโซเดียม และโพแทสเซียมถึง 10 เท่า ดังนั้น พิษของไอออนบวกจึงเพิ่มขึ้น เมื่อวาเลนซ์สูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนยังไม่เป็นที่แน่นอนว่าเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเท่าใด มีรายงานถึงความเข้มข้นของโซเดียมที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยค่าความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 6-40 กรัมต่อลิตร

2.3.5.2 โลหะหนัก

โลหะหนักที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคลเมียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปไอออน พบว่าลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือ ทองแดง เหล็ก แคลเมียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้

2.3.5.3 แอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมาจากการย่อยสลายสารพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ดังสมการที่ 2.5



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้น ที่พีเอชสูงขึ้นไปก็จะมีแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้น แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อไม่ว่าแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่าแอมโมเนียมไอออนต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.4 ซัลไฟด์

ถ้าปริมาณของซัลไฟด์ในระบบมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่ง ซัลไฟด์จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ไม่ว่าซัลไฟด์นั้นจะมาจากน้ำเสียที่เข้าระบบหรือการย่อยสลายของซัลเฟตก็ตาม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอ็อกซิเจนในระบบด้วย เพราะถ้าในระบบมีโลหะหนัก ซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักแล้วตกตะกอนผลึกลงมา ทำให้ความเข้มข้นของซัลไฟด์ลดลงได้

2.4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

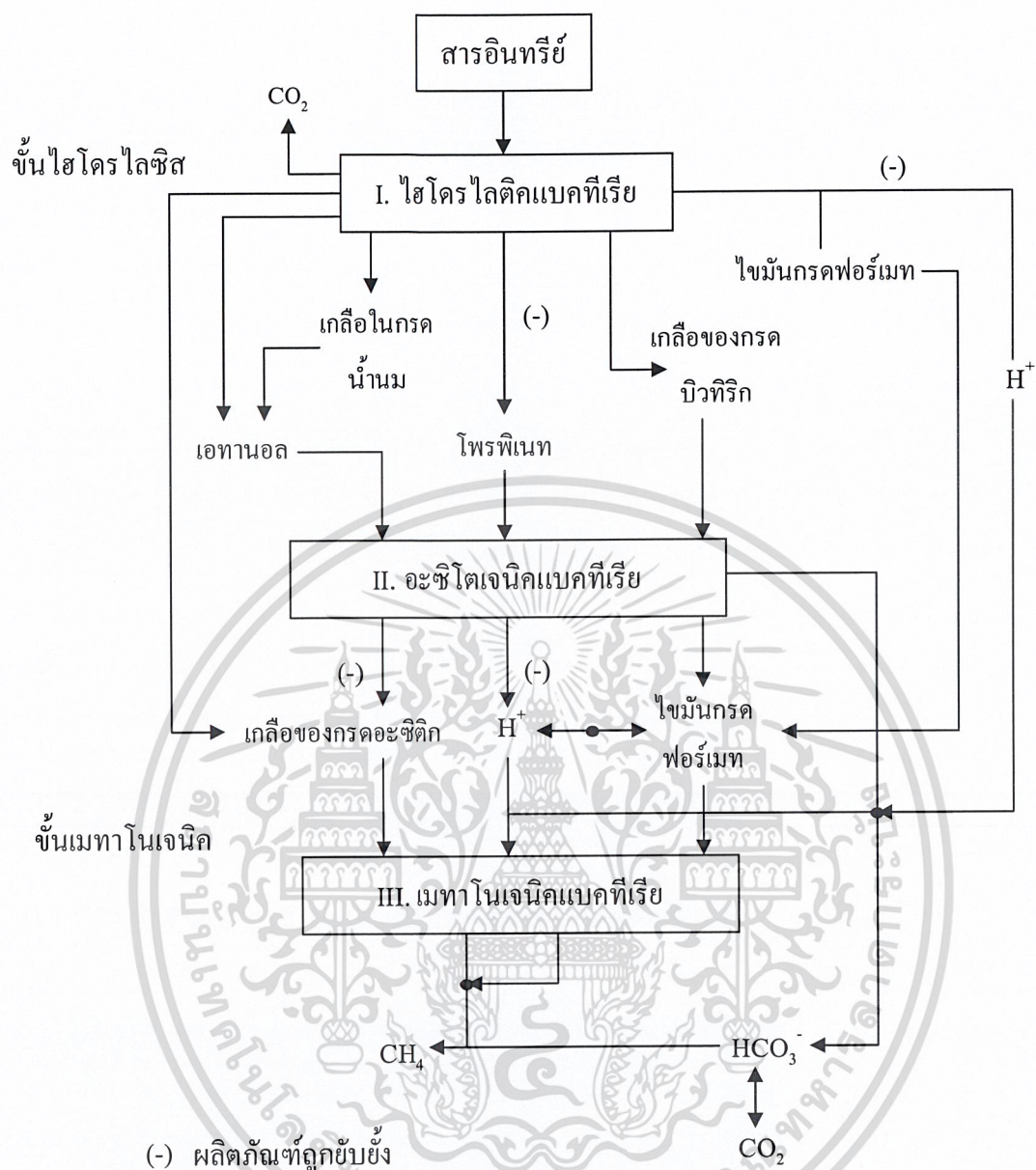
กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Hohl field *et al.*, 1986)

ขั้นตอนที่ 1 Hydrolysis ขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ยังอยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถจะย่อยสลายได้ทันทีจำเป็นต้องทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก โดยแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์มาช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุล แบคทีเรียกลุ่มนี้จะได้รับสารอาหารบางชนิดจากสารอินทรีย์ผ่านการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง

ขั้นตอนที่ 2 Acidogenesis แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำการย่อยสลายโมเลกุลที่แตกตัวแล้วจากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ (organic acids) ได้แก่ กรดอะซิติก (CH_3COOH), น้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า Acid Forming Bacteria เป็นแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน

ขั้นตอนที่ 3 Methanogenesis ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียที่เรียกว่า Methanogens หรือ Methane Forming Bacteria จะทำการเปลี่ยนกรดอะซิติก และไฮโดรเจน (H_2) เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แบคทีเรียพวกนี้เป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Obligate Anaerobic Bacteria) ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดอะซิติกจากปฏิกิริยาก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (ศาลิศา, 2549)

จากนั้นก๊าซต่างๆที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำ และกระจายสู่บรรยากาศหรือถูกรวบรวมนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทน สำหรับปฏิบัติการย่อยสลายสารชนิดต่าง ๆ จากจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มแสดงดังตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เกิดจากจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจนได้ก๊าซชีวภาพ (Thiele and Zeikus, 1988)

Reaction	G, kJ/reaction
A. Fermentative reactions:	
(1) $C_6H_{12}O_6 + 3H_2O \longrightarrow 3CH_4 + 3HCO_3^- + 3H^+$	-403.6
(2) $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow 2\text{ethanol} + 2HCO_3^- + 2H^+$	-225.4
(3) $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\text{lactate} + 2H^+$	-198.1
(4) $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow \text{butyrate} + 2HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$	254.4
(5) $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 3\text{acetate} + 3H^+$	-310.6
(6) $3\text{lactate} \longrightarrow 2\text{propionate} + \text{acetate} + HCO_3^- + H^+$	-164.8
B. Syntrophic acetogenic reactions:	
(7) $\text{lactate} + 2H_2O \longrightarrow \text{acetate} + 2H_2 + HCO_3^- + H^+$	-3.96
(8) $\text{ethanol} + 2HCO_3^- \longrightarrow \text{acetate} + 2\text{formate} + H_2O + H^+$	+7.0
(9) $\text{ethanol} + 2H_2O \longrightarrow \text{acetate} + 2H_2 + H^+$	+9.6
(10) $\text{butyrate} + 2H_2O \longrightarrow 2\text{acetate} + 2H_2 + H^+$	+48.1
(11) $\text{benzoate} + 7H_2O \longrightarrow 2\text{acetate} + 3H_2 + HCO_3^- + 2H^+$	+53.0
(12) $\text{propionate} + 3H_2O \longrightarrow \text{acetate} + 3H_2 + HCO_3^- + H^+$	+76.1
C. Methanogenic reactions:	
(13) $\text{acetate} + H_2O \longrightarrow \text{methane} + HCO_3^-$	-31.0.
(14) $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \longrightarrow \text{methane} + H_2O$	-135.6
(15) $4\text{formate} + H^+ + H_2O \longrightarrow \text{methane} + 3HCO_3^-$	130.4
D. Sulfidogenic reactions:	
(16) $2\text{lactate} + SO_4^{2-} \longrightarrow 2\text{acetate} + 3HCO_3^- + 2HS^- + H^+$	-161.1
(17) $2\text{lactate} + 3SO_4^{2-} \longrightarrow 6HCO_3^- + 3HS^- + H^+$	-225.3
(18) $4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow 4H_2O + HS^-$	-152.2
(19) $\text{acetate} + SO_4^{2-} \longrightarrow 2HCO_3^- + HS^-$	-47.6
(20) $4\text{propionate} + 3SO_4^{2-} \longrightarrow 4\text{acetate} + 4HCO_3^- + 3HS^-$	-150.6
(21) $2\text{butyrate} + SO_4^{2-} \longrightarrow 4\text{acetate} + HS^- + H^+$	-28.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

เนื่องจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดเกี่ยวข้องกัน การที่จะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซได้ดีนั้นจะต้องสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Werner *et al.*, 1989) ได้แก่

2.5.1 ก๊าซออกซิเจน

ต้องไม่มีก๊าซออกซิเจนในบ่อหมัก จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนเป็นจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ หากมีก๊าซออกซิเจนอยู่ในระบบ จะทำให้แบคทีเรียนี้หยุดการเจริญเติบโต

2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในบ่อหมักมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากความเร็วของปฏิกิริยาทางเคมีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 3-70 °C แบคทีเรียที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนในช่วงอุณหภูมินี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง และช่วงอุณหภูมิสูง อุณหภูมิในแต่ละช่วงจะมีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพจะเร็วขึ้น ทำให้สามารถสร้างบ่อก๊าซขนาดเล็กลงได้ (แต่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซที่ควรจะมีผลผลิตได้ทั้งหมดจากสารอินทรีย์นั้น ซึ่งจะเป็ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์)

2.5.3 ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมัก

เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักแบบมีการเติมสารอินทรีย์อย่างสม่ำเสมอควรมีค่าระหว่าง 5-10 % และควรมีค่าประมาณ 25 % สำหรับบ่อหมักแบบเติมสารอินทรีย์เพียงครั้งเดียว ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักมีมากไปหรือน้อยไปก็จะเกิดผลเสีย คือ ถ้าความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดเพิ่มขึ้น (pH ต่ำลง) ทำให้กระบวนการหมักหยุดชะงัก เป็นผลทำให้ไม่มีการผลิตก๊าซ แต่ถ้าความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักน้อยเกินไป ก็จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรของบ่อไม่มากเท่าที่ควร ทำให้ได้ก๊าซน้อย

2.5.4 ระบบการหมักก๊าซชีวภาพ

การหมักก๊าซชีวภาพ สามารถแบ่งตามวิธีการเติมสารหมัก (สารอินทรีย์และน้ำ) ออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

1. แบบเติมครั้งคราว (Batch operation) โดยการเติมอินทรีย์สารครั้งเดียวแล้วปล่อยให้อินทรีย์สารถูกย่อยสลายจนหมดแล้วจึงเอาออก และเติมสารอินทรีย์ลงใหม่ ข้อดีของระบบนี้คือทำให้ประสิทธิภาพการเกิดก๊าซต่ำ และปริมาณก๊าซไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi - continuous operation) โดยการเติมอินทรีย์สารเป็นประจำ วันเว้นวัน หรือวันเว้นสองวัน ขึ้นอยู่กับสภาพสารอินทรีย์ที่มี และขนาดของบ่อหมัก ทำให้การเกิดก๊าซมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแรก และปริมาณก๊าซที่ได้ค่อนข้างคงที่

3. แบบต่อเนื่อง (Continuous operation) เป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าและเอาสารอินทรีย์ที่ถูกล่อยสลายแล้วออกอยู่ตลอดเวลาด้วยอัตราการไหลเข้าและออกคงที่ ประสิทธิภาพของระบบนี้จะสูงสุด เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่อยู่ตลอดเวลา

2.5.5 ระยะเวลาการพักตัวของกาเกิดก๊าซ

ระยะเวลาการพักตัวของกาเกิดก๊าซ (Retention time) เป็นระยะเวลาที่ให้สารอินทรีย์ถูกผสมอยู่ในบ่อหมักก๊าซ เพื่อให้แบคทีเรียได้ย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้เป็นอาหารในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ให้มากขึ้นก่อนที่จะถูกถ่ายเทออกจากบ่อหมัก ปกติจะใช้เวลา 20-50 วัน ระยะเวลาการพักตัวของกาเกิดก๊าซ สำหรับบ่อหมักก๊าซที่มีการเติมสารอินทรีย์ตลอดเวลาหรือเป็นระยะๆ สามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยได้ ดังสมการที่ 2.6

$$\text{ระยะเวลาการพักตัว} = \frac{\text{ปริมาตรบ่อก๊าซ}}{\text{ปริมาตรการเติมสารหมักต่อวัน}} \quad (2.6)$$

ถ้าระยะเวลาการพักตัวสั้นเกินไป การชะล้างของแบคทีเรียในบ่อหมักจะมีอัตราเร็วว่าการสร้างแบคทีเรียใหม่ ปฏิกริยาการย่อยสลายก็จะหยุดชะงัก เนื่องจากปริมาณแบคทีเรียในบ่อหมักลดลงหรือหมดไป แต่ถ้าให้ระยะเวลาพักตัวนานเกินไป บ่อหมักจะต้องมีปริมาตรมากขึ้น

2.5.6 การคลุกเคล้า

การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และสารอินทรีย์ เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง เพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ ยังป้องกันการตกตะกอน และตะกอนลอย (scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง

2.5.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และความเข้มข้นของกรดระเหย

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย (pH) เมื่อกระบวนการหมักเข้าสู่สภาพคงที่แล้ว ก็จะทำให้เกิดความสมดุลของความเป็นกรดและด่าง เนื่องจากเกิดคาร์บอนไดออกไซด์-ไบคาร์บอเนต ($\text{CO}_2\text{-HCO}_3$) และเกิดแอมโมเนีย-แอมโมเนียม ($\text{NH}_3\text{-NH}_4$) ทำให้สารละลายในบ่อหมักมีค่า pH ระหว่าง 7.0 ถึง 8.5 ซึ่งเป็นค่า pH ที่วัดได้ในสารละลายในบ่อหมักก๊าซชีวภาพที่ทำงานเป็นปกติ ถ้าค่า pH ของสารละลายในบ่อหมักลดลงต่ำกว่า 6.2 จะหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน เป็นผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงหรือไม่มีการผลิตเลย สำหรับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการหมักปกติ ความเข้มข้นของกรดระเหยได้ ซึ่งวัดในรูปของกรดอะซิติก ควรจะต้องต่ำกว่า 2,000 ppm ถ้ากรดระเหยมีค่าสูงกว่านี้ ก็จะไปหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

2.5.8 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ควรอยู่ระหว่าง 30 : 1 ถึง 10 : 1 เนื่องจากแบคทีเรียต้องใช้ทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนในการเจริญเติบโต ถ้าปริมาณไนโตรเจนมากเกินไปจะเกิดการสร้างแอมโมเนียมากขึ้น เป็นผลทำให้สภาพในบ่อหมักมีความเป็นด่างซึ่งจะไปหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

2.5.9 สารเคมีและยาปฏิชีวนะ

สารเคมีและยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการรักษาสัตว์ ส้างคอกและอื่นๆ อาจมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากสารเคมีและยาปฏิชีวนะบางชนิดเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อยลงหรือไม่เกิดเลย ดังนั้นบ่อหมักก๊าซชีวภาพจะต้องระวังไม่ให้มีการปนเปื้อนของสารเคมีและยาปฏิชีวนะเข้าไปในบ่อ

2.6 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ข้อดีของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

1. เนื่องจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศทำงานด้วยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและพลังงานที่ใช้ในการดำรงชีวิตของมัน ทำให้เซลล์เกิดน้อยมาก และช่วยลดปัญหาการบำบัดตะกอนได้
2. ให้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง
3. สามารถรับภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน (shock load) ได้โดยไม่ทำให้ระบบล้มเหลว แต่ต้องใช้เวลาในการปรับตัวเล็กน้อย
4. ต้องการอาหารเสริมน้อยกว่าระบบชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน
5. ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน เพราะไม่ต้องการใช้ออกซิเจนในการทำงานของจุลินทรีย์
6. สามารถทำงานได้ดี หลังจากที่มีการหยุดทำงานไปชั่วขณะหนึ่ง โดยไม่ต้องทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ใหม่
7. ตะกอนจุลินทรีย์มีความคงตัวสูง

ข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

1. เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น
2. การใช้งานในทางปฏิบัติจริง ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบระบบการกระจายของน้ำ

ยังไม่ดีพอ ซึ่งทำให้เกิดการไหลล้นควงจรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. น้ำออกจากระบบยังมีสารอินทรีย์อยู่สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ทางราชการกำหนด จึงจำเป็นต้องมีระบบแบบใช้อากาศมาบำบัดต่อ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang et al. (2010) ศึกษาผลกระทบของสารอาหารที่มีต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพในน้ำเสียจากระบบการผลิตนม ซึ่งพบในการย่อยสลายแบบ batch ภายใต้สภาวะ mesophilic ที่อุณหภูมิ 35°C และศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพจากสารอาหารจากนมที่ไม่ได้ผ่านการกรองและจากเศษอาหาร ทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ระหว่างนมกับเศษอาหารแบบจำลองจุลศาสตร์อันดับหนึ่ง ถูกนำไปใช้คำนวณหาปริมาณมีเทนที่ได้จากสารอาหารต่างๆในเศษอาหารและนม ปริมาณมีเทนที่ได้้อย่างหยابและอย่างละเอียดของสารอาหารที่ทำกรกรองกับไม่ได้กรอง หลังจากผ่านไปเป็นเวลา 30 วัน พบปริมาณดังนี้ 302, 228 และ 241 L/kgVS ปริมาณมีเทนที่ได้มีค่าประมาณ 93%, 83% และ 90% ตามลำดับ หลังจากการย่อยสลายได้ 20 วัน เกิดก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณมีเทนเฉลี่ย 69%, 57% และ 66% ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณสมมูลมวลการแยกส่วนอย่างหยابของสารอาหารได้เป็นพลังงานออกมาประมาณ 32% ปริมาณมีเทนที่ได้จากเศษอาหารเท่ากับ 353 L/kgVS หลังจากการย่อยสลายผ่านไป 30 วัน สารอาหาร 2 ชนิด จากสารอาหารที่ไม่ได้กรองกับเศษอาหาร ปริมาณ 68/32% กับ 52/48% ผลิตมีเทนได้ 282 และ 311 L/kgVS ตามลำดับ หลังย่อยได้ 30 วัน และหลังจากที่ย่อยได้ 20 วัน จะได้มีเทนเป็นปริมาณ 90% และ 95%ตามลำดับ ดังนั้นควรมี HRT เป็นระยะเวลา 20 วัน สำหรับการย่อยสลายแบบต่อเนื่อง ปริมาณมีเทนเฉลี่ย คือ 62% และ 59% ของสารอาหาร ในแบบแรกและแบบที่สองตามลำดับ ผลที่คาดว่าได้รับจากแบบจำลองนั้นแสดงถึงการเติมเศษอาหารเข้าสู่ระบบย่อยอาหารที่ระดับมากกว่า 60% ขึ้นไปของของแข็งระเหยในช่วงเริ่มต้นจะทำให้เกิดปริมาณมีเทนเพิ่มมากขึ้น ในการย่อย 20 วัน

Liu et al. (2009) ศึกษาก๊าซชีวภาพและมีเทนที่ผลิตได้จากขยะเศษอาหารและผัก และการผสมของขยะเหล่านี้ โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเติมอาหารแบบครั้งคราว ที่อุณหภูมิปานกลาง (35-37°C) และอุณหภูมิสูง (50-52°C) การผสมประกอบด้วยเศษอาหาร 50% และผัก 50% ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) เริ่มต้นที่เข้าสู่ถังหมัก การทดสอบการย่อยสลายที่อุณหภูมิปานกลางได้ดำเนินการที่อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อ 4 อัตราส่วน ได้แก่ 1.6, 3.1, 4.0 และ 5.0 และการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงได้ดำเนินการที่ 1 อัตราส่วน คือ 3.1 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนระหว่างอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการทดสอบที่ 4 อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

และปริมาณเชื้อพบว่า หลังจาก 25 วันของการย่อยสลายที่อุณหภูมิปานกลางพบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 778, 742, 784 และ 396 mL/gVS สำหรับขยะเศษอาหาร ตามลำดับ และ 631, 529, 524 และ 407 mL/gVS สำหรับผัก ตามลำดับ และ 716, 613, 671 และ 555 mL/gVS สำหรับขยะผสม ตามลำดับ และพบ 80% ของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้อย่างต่อเนื่องจาก 10 วันแรกของการย่อยสลาย ส่วนที่อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อ เท่ากับ 3.1 พบว่า ก๊าซชีวภาพและมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงของขยะเศษอาหาร ผัก และขยะผสม มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่ได้จากการย่อยสลายที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าเป็น 430, 372 และ 358 mL/gVS ตามลำดับ และมีปริมาณมีเทนเท่ากับ 245, 206 และ 185 mL/gVS ตามลำดับ

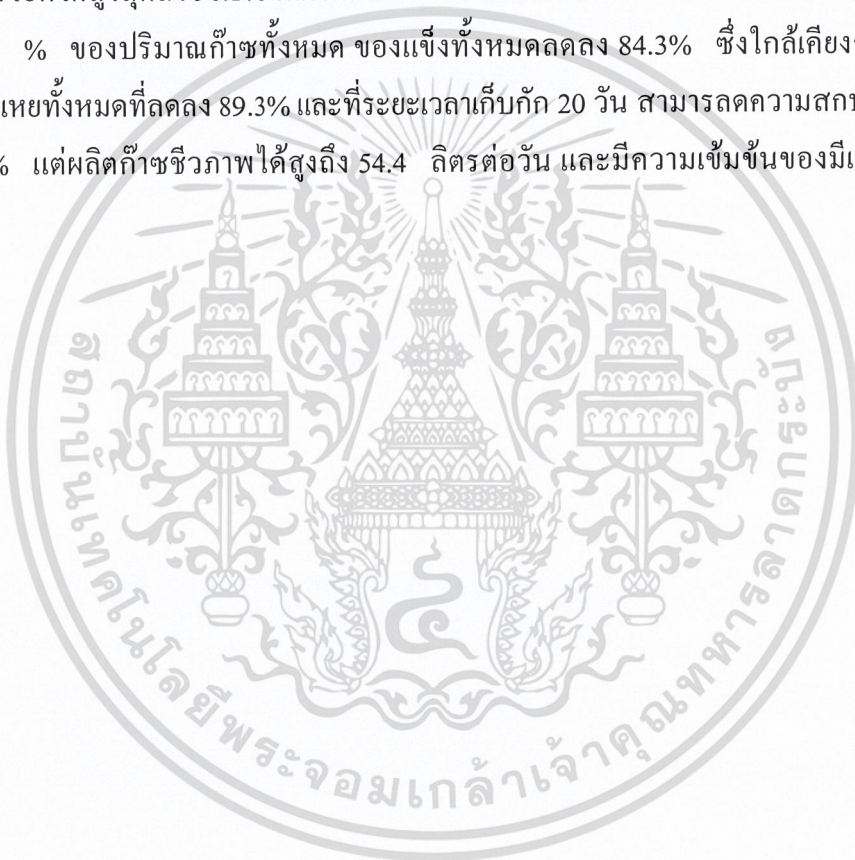
Giger - Reverdin et al. (2003) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณองค์ประกอบสารอาหารจำพวกไขมัน ในการเกิดก๊าซมีเทนจากนมวัว ซึ่งประเมินจากงานวิจัยสำรวจที่เกี่ยวข้องกับอาหาร 37 ชนิด จากข้อมูลพื้นฐานของสัตว์ที่มีสมรรถนะในช่วงกว้างและองค์ประกอบสารอาหารจำพวกไขมัน ซึ่งพบว่าก๊าซมีเทน (แสดงในหน่วย I/kgDMI) ที่ผลิตได้จากสัตว์นั้นลดลง และปริมาณเอสเทอร์ที่สกัดมีปริมาณลดลง ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลจากการวิเคราะห์หึ่งมุ่งเน้นถึงการลดลงของปริมาณมีเทนที่เกี่ยวข้องกับส่วนของกรดไขมันของการสกัดเอสเทอร์ และส่งเสริมในการหาปริมาณทางสถิติของการลดลงนี้ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับดัชนีของกรดไขมันไม่อิ่มตัว การรวบรวมการทดลองนี้เป็นผลให้เกิดการเสนอดัชนีตัวเลขของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพื่อที่จะประเมินหาก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากภายในตัวสัตว์เคี้ยวเอื้อง นอกจากนี้พบว่าในการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นที่น่าสนใจว่าจะทำให้การเกิดก๊าซมีเทนลดลง แต่ก็ทำให้ผลในทางตรงกันข้าม เช่น การเพิ่มขึ้นของ feed refusals หรือการลดลงของการย่อยสลายเซลล์ูลอส

Borja et al. (1995) ศึกษากระบวนการหมักแบบAFB ที่อุณหภูมิ 35 °C ซึ่งใช้ในการบำบัดน้ำเสียไฮสทรีมที่มี COD ขาเข้าเท่ากับ 5.2 g/L และดำเนินระบบเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้ระบบที่มีชั้นของการเพิ่ม COD และการเกิดก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ และเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อ COD ลดลง 94.4% ที่อัตราบำบัดสารอินทรีย์ 15.6 g/L/day (HRT = 8 h) ซึ่งอัตราดังกล่าว ก่อนข้างไว้กว่าผลการศึกษาค้างก่อนๆ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช และอัตราการไหลขาเข้า และค่า COD ทุกๆช่วงเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง ระบบมีปริมาณความสกปรกของน้ำเสียขาออกต่อการไหลเข้าระบบมากกว่าปกติอย่างกะทันหันแต่สามารถกลับคืนสู่สภาวะคงที่ได้ภายในเวลา 6-16 ชั่วโมง อีกทั้งมีการศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะของกระบวนการที่ไม่เป็นไปตามคาดการณ์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

117307

ปราโมทย์ (2551) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารของโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีเศษอาหารเหลือวันละประมาณ 58 กิโลกรัม องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ คือ ข้าว ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ตามลำดับ มีค่าความชื้นทั้งหมดเฉลี่ย 74.21 เปอร์เซ็นต์ และค่าของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย 25.79 เปอร์เซ็นต์ โดยการย่อยสลายในถังหมักแบบต่อเนื่องสองขั้นตอน ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ถังใบแรกมีปริมาตร 27.7 ลิตร และใบที่สองมีปริมาตร 52.8 ลิตร โดยการเติมสารละลายเศษอาหารที่มีค่าของแข็งทั้งหมด 4 % (w/v) ที่ระยะเวลาเก็บกัก 35, 30, 25 และ 20 วัน คิดเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 5.77, 6.39, 8.3 และ 10.27 กรัมซีโอดี/ลิตร.วัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกัก 35 วันระบบสามารถลดปริมาณความสกปรกคิดเป็นค่าซีโอดีได้สูงสุดถึง 90.1% และผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวมเท่ากับ 31.2 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนมีเทน 57.3 % ของปริมาณก๊าซทั้งหมด ของแข็งทั้งหมดลดลง 84.3% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดที่ลดลง 89.3% และที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน สามารถลดความสกปรกค่าซีโอดีได้ 82.1% แต่ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 54.4 ลิตรต่อวัน และมีความเข้มข้นของมีเทน เท่ากับ 61.3%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-เทอร์มอลคอนดักทีวิตีเทคเตอร์ (Gas Chromatograph – Thermal Conductivity Detector) รุ่น CP-3800 บริษัท Varian Analytical Instrument, ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) รุ่น 827 pH Lab บริษัท Metrohm ประเทศสวิตซ์เซอร์แลนด์
3. อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส (water bath shaker) ยี่ห้อ Memmert
4. เครื่องปั่น ยี่ห้อ Moulinex
5. ขวดแก้วดูแรน ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
6. กระบอกตวง ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
7. สายยาง Tygon
8. ท่อแก้วงอ
9. พาราฟิล์ม (Parafilm)
10. จุกยาง
11. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
3. ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ UN 1066 บริษัทแพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท จอมธนา จังหวัดปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์ผสมจากน้ำหมักในถังหมักก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร มีลักษณะเป็นสีดำเข้ม ได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสีย

วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้นจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหาร โดยใช้วิธีมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
อุณหภูมิ (Temperature)	เทอร์โมมิเตอร์
ความดันบรรยากาศ (Pressure)	บารอมิเตอร์
พีเอช (pH)	pH meter
ค่าของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS)	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995)
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS)	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995)
ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (Volatile Suspended Solids, VSS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 20 นาที ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995)
ค่าไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil)	Soxhlet Extraction Method ตามวิธีมาตรฐาน APHA (1995)
ค่าซีโอดีที่ละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD)	วิธี Close Reflux, Titrimetric Method ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995)
ค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl and Organic Nitrogen Digestion)	Total Kjeldahl and Organic Nitrogen Digestion ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995)
ค่าฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟต (Phosphorus, P) (mg/L as PO ₄ ³⁻)	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method ตามวิธีมาตรฐาน APHA (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลองศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหาร โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองที่ 1 เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม ชุดทดลองที่ 2 เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้เศษอาหาร และชุดทดลองที่ 3 เป็นถังควบคุมที่ไม่มีการเติมอาหาร ใช้สภาวะการหมักที่ 37°C (ปราโมทย์, 2551) โดยวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ มีรายละเอียดดังนี้

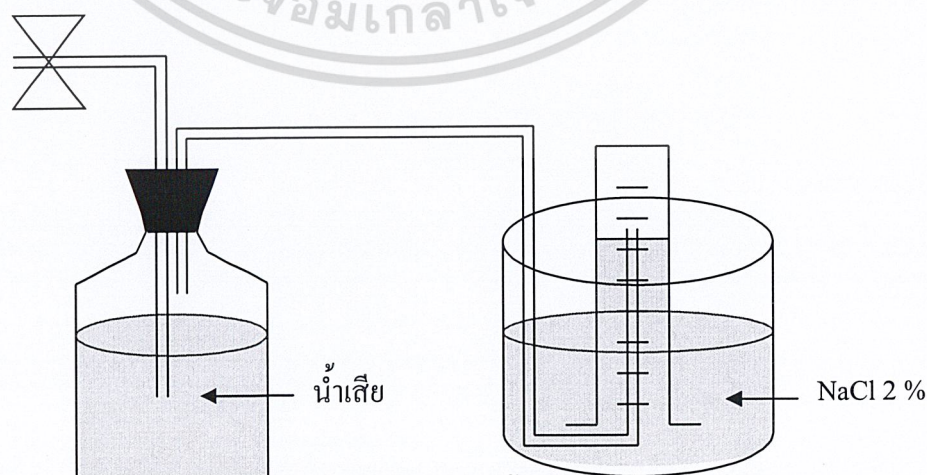
1. นำน้ำหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ผสมได้จากถังหมักก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร 700 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วดูเรนขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมปริมาณ 70 มิลลิลิตร (10%) โดยบรรจุกระบอกตวงคักก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนเต็มแล้วคว่ำลงภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อป้องกันการละลายของก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

2. ไล่อากาศในขวดดูเรนออกโดยพ่นก๊าซในโตรเจน เป็นเวลา 2-3 นาที

3. หมักที่อุณหภูมิ 37°C โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ บันทึกปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นโดยวิธีแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 นาที แล้ววัดต่อไปอีกทุก ๆ 60 นาที จนปริมาตรที่เกิดขึ้นคงที่ พร้อมกับบันทึกอุณหภูมิและความดันบรรยากาศขณะทำการทดลอง แล้วคำนวณหาปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน 25°C , 1 atm

4. ชุดทดลองที่ 2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมเป็นเศษอาหารจากโรงอาหารปริมาณ 70 มิลลิลิตรแทน

5. ชุดทดลองที่ 3 ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 โดยไม่เติมน้ำเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปที่ 3.1 ชุดหมักก๊าซชีวภาพเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมอาหาร

1. ทำการเติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมให้กับจุลินทรีย์โดยเติม 10% ของปริมาณเชื้อผสม จากนั้นบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 นาทีและทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง
2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 จากนั้นบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 นาทีและทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 แต่เปลี่ยนน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมเป็นเศษอาหารจากโรงอาหารแทน

3.2.4 ศึกษาปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเติม

1. ทำการเติมน้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีมให้กับจุลินทรีย์โดยเติม 10% ของปริมาณเชื้อผสม จากนั้นบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 นาทีและทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3
2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นอาหาร 20% ของปริมาณเชื้อ
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 แต่เปลี่ยนน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมเป็นเศษอาหารจากโรงอาหารแทน
4. ทดสอบการติดไฟของก๊าซชีวภาพโดยพ่นก๊าซชีวภาพไปบนเปลวไฟ
5. วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่อง GC-TCD โดยทำการฉีดตัวอย่างก๊าซปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ที่สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.2
6. คำนวณความเข้มข้นจากพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากก๊าซมาตรฐานผสมของก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (GC-TCD)

พารามิเตอร์	สภาวะในการเดินระบบ
Gas Chromatograph (GC)	Varian Model GC-CP3800
Column	HP-Moleculesieve (15 m × 0.535 mm × 50 μ m)
Injector temperature	200 °C
Oven temperature	Isothermal temperature at 40 °C for 30 mins
Carrier gas	Helium, flow rate 4.3 mL/min
Column flow	1.6 mL/min
Split program	Splitless
Detector	Thermal Conductivity Detector (TCD)
Detector temperature	250 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหาร

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหารก่อนการหมักก๊าซชีวภาพ แสดงดังตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 1.1-1.2, ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหารก่อนการทดลอง

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม	เศษอาหารจากโรงอาหาร
พีเอช (pH)	4.80	3.73 ± 0.01
ค่าของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) (mg/L)	5,317.54 ± 22.18	416,701.67 ± 6.84
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS) (mg/L)	10,496.44 ± 14.63	903,015.73 ± 40.06
ค่าไขมันและน้ำมัน (Grease and oil) (mg/L)	103,019.85 ± 21.53	42,642.06 ± 39.26
ค่าซีโอดีที่ละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) (mg/L)	13,865.88 ± 14.17	320,008.29 ± 11.73
ค่าบีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD) (mg/L)	2,134.16 ± 22.33	8,491.07 ± 14.09
ค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl and Organic Nitrogen Digestion) (mg/L)	321.12 ± 11.20	311.22 ± 11.03
ค่าฟอสฟอรัสในรูปออร์โทฟอสเฟต (Phosphorus, P) (mg/L as PO ₄ ³⁻)	20.55 ± 0.92	39.78 ± 1.57
C/N ratio	43.2	1,028.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

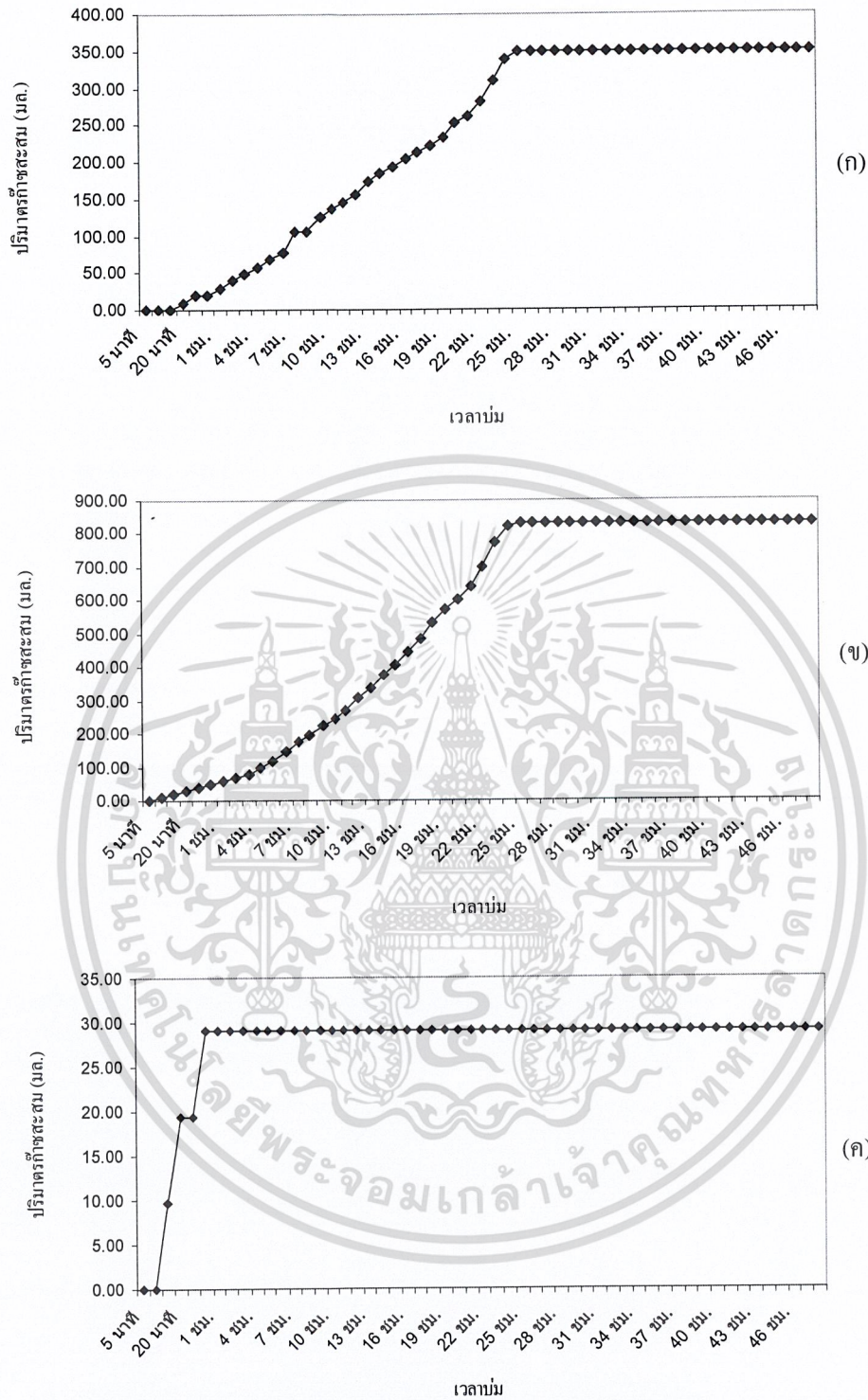
จากตารางที่ 4.1 พบว่า เศษอาหารจากโรงอาหารมีค่า TDS, TSS, SCOD, BOD และ P สูงกว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม แต่น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมจะมีค่าไขมันและน้ำมันสูงกว่าเศษอาหาร ส่วนค่าไนโตรเจนของน้ำเสียทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าใกล้เคียงกัน จากค่า COD:N:P พบว่าน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีค่าเท่ากับ 675:16:1 ส่วนเศษอาหารมีค่าเท่ากับ 8,045:8:1 ซึ่งพบว่า มีค่า COD สูงกว่าสัดส่วน COD:N:P ที่เหมาะสมที่ 100:10:1 สำหรับ C/N ratio ของน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารมีค่าเท่ากับ 43.2 และ 1,028.2 ตามลำดับ ซึ่งค่า C/N ratio ของน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ ส่วน C/N ratio ของเศษอาหารมีค่าคาร์บอนสูงมาก (Werner *et al.*, 1989)

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.2.1 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซ

ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหารเป็นแหล่งอาหาร โดยเติมอาหาร 10% ของเชื้อจุลินทรีย์ผสมเริ่มต้นที่ได้จากน้ำหมักในถังหมักก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C (ปราโมทย์, 2551) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ปริมาตรก๊าซสะสมที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 24 ปริมาตรก๊าซเริ่มคงที่ทั้งในถังหมักน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหาร สำหรับน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมจะเริ่มผลิตก๊าซเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ส่วนน้ำเสียจากเศษอาหารจะเริ่มผลิตก๊าซเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 2.1, ภาคผนวก ข)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมอาหารแต่มีเพียงเชื้อจุลินทรีย์ผสมในน้ำหมักจากถังหมักก๊าซชีวภาพสามารถผลิตก๊าซได้ 30 มิลลิลิตร และจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ส่วนชุดที่เติมน้ำเสียจากโรงงานไอศกรีมและชุดที่เติมเศษอาหารสามารถผลิตก๊าซใน 24 ชั่วโมงได้ 349 mL และ 833 mL ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าประมาณ 10 เท่าและ 30 เท่า ของแหล่งอาหารเดิม แสดงว่า จุลินทรีย์สามารถผลิตก๊าซจากแหล่งอาหารเดิมจากน้ำหมักอาหารที่ใช้เป็นแหล่งเชื้อจุลินทรีย์ได้เพียงเล็กน้อย และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารได้มากกว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมเนื่องจากเศษอาหารมีแหล่งคาร์บอนสูงกว่าน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม นอกจากนี้ ในน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมยังมีค่าไขมันและน้ำมันซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายยากอยู่สูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1

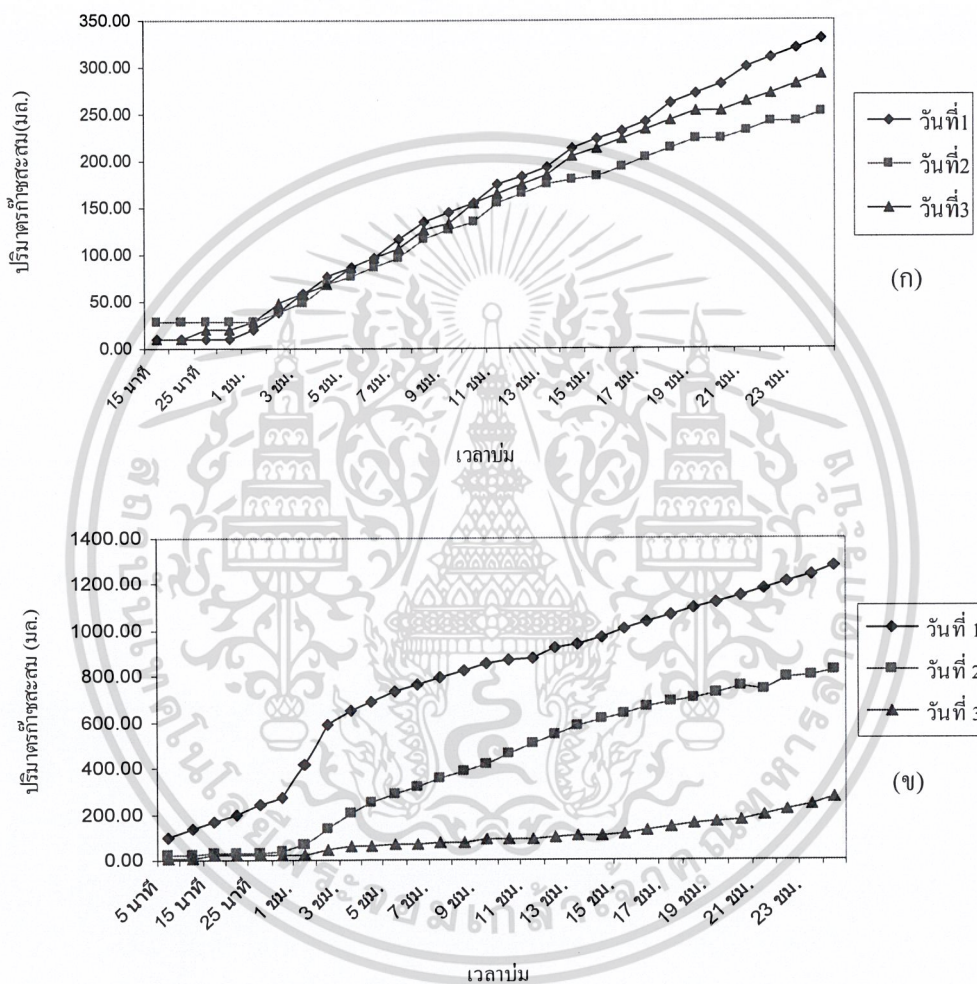


รูปที่ 4.1 ปริมาณก๊าซสะสมที่ผลิตได้ เมื่อเติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และน้ำเสียเศษอาหาร (ข) และชุดควบคุมไม่มีการเติมอาหาร (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมอาหาร

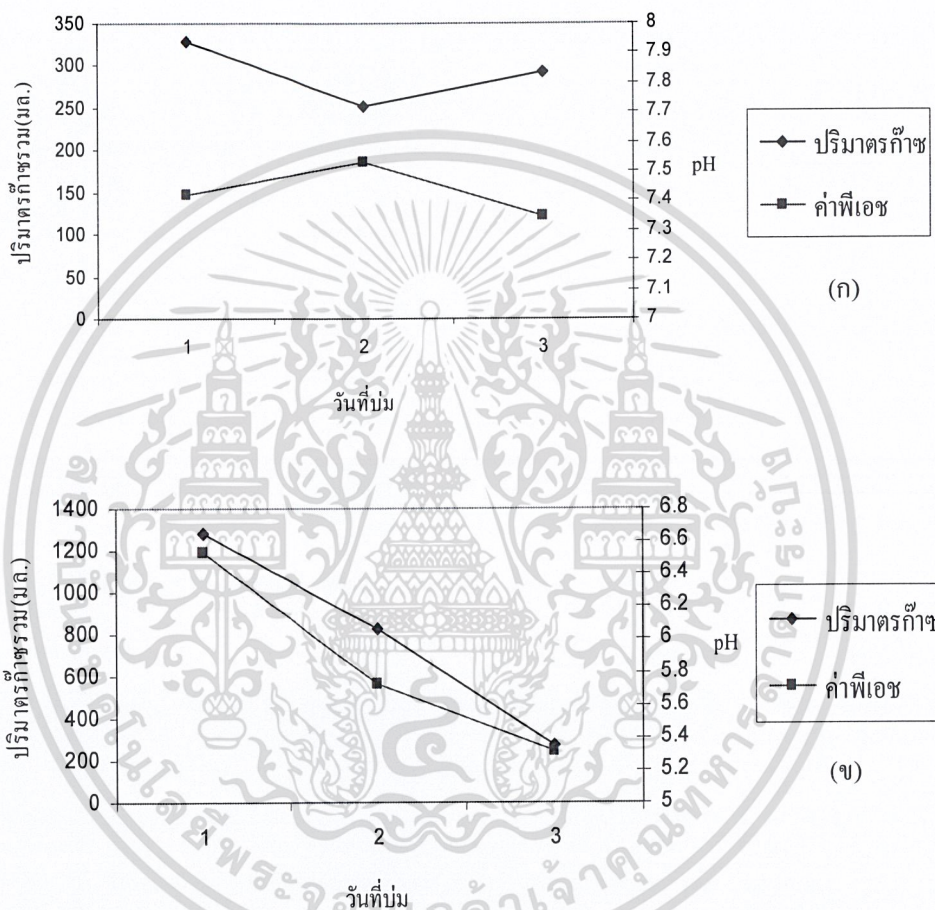
ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อใช้ 10% ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม และเศษอาหารเป็นแหล่งอาหารเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1) พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง อัตราการผลิตก๊าซเริ่มคงที่ ดังนั้นจึงเปลี่ยนเวลาเติมอาหารเป็นทุกวัน เพื่อให้มีการผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.2 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ผลิตได้ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม 10% (ก) และเศษอาหาร 10% (ข) เป็นแหล่งอาหาร โดยการเติมทุกวัน

จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการผลิตก๊าซของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนอัตราการผลิตก๊าซของเศษอาหารมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 2.2-2.3, ภาคผนวก ข) ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ในเศษอาหารถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีค่าพีเอชลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 3.1-3.2, ภาคผนวก ข) ทั้งนี้การเติมอาหารทุกวันจะช่วยให้ค่าพีเอชคงที่และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้น

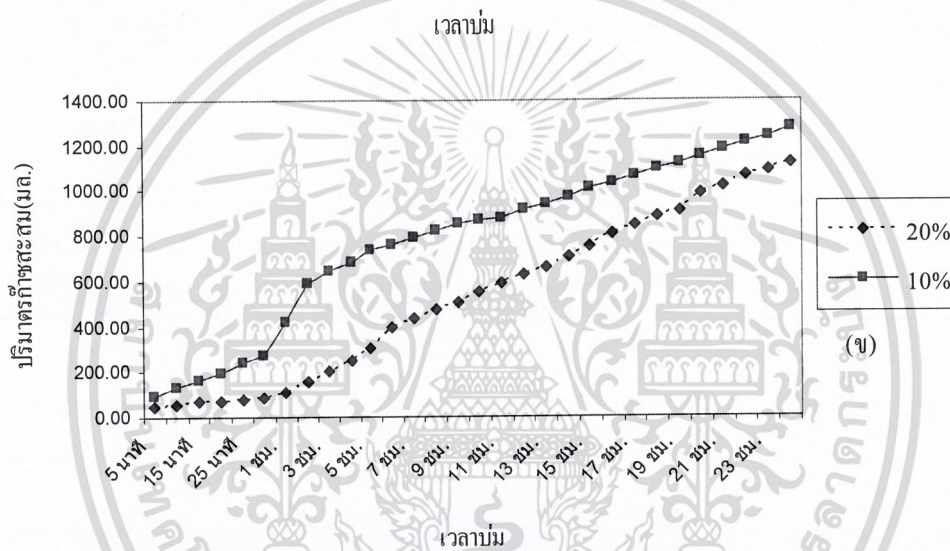
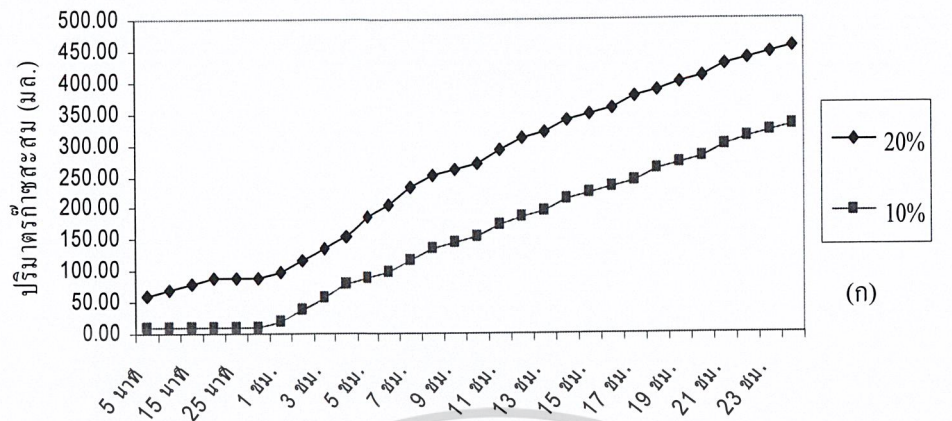
ภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Werner และคณะ (1989) ที่พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ มีค่าเท่ากับ 6.8-7.2 ถ้าพีเอชสูงหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงและส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ดังนั้น การหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้เศษอาหารจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชให้เหมาะสม ส่วนน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมไม่จำเป็นต้องปรับพีเอช



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เมื่อเติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม 10% (ก) และเศษอาหาร 10% (จ) เป็นแหล่งอาหารทุกวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ศึกษาอัตราการเติมอาหารที่เหมาะสม



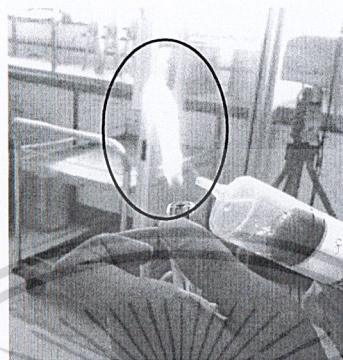
รูปที่ 4.4 ปริมาณก๊าซสะสม เมื่อใช้น้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และเศษอาหาร (ข) 10% และ 20% เป็นแหล่งอาหาร

จากรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 2.2-2.5, ภาคผนวก ข) พบว่า เมื่อเติมน้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม 20% เป็นแหล่งอาหาร จุลินทรีย์จะผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าเมื่อเติมน้ำเสีย 10% ส่วนการเติมเศษอาหาร 10% จะมีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการเติมอาหาร 20% นั่นคือ เมื่อเติม อาหาร 10% และ 20% มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 47.18 mL/gCOD และ 59.90 mL/gCOD สำหรับน้ำเสียจากโรงงานไอศกรีม ส่วนน้ำเสียจากเศษอาหารจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 5.32 mL/gCOD และ 4.44 mL/gCOD (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค) ทั้งนี้เนื่องจากเศษอาหารมีปริมาณ คาร์บอนสูงมาก และเป็นแหล่งอาหารที่จุลินทรีย์ย่อยสลายง่ายกว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม

(ตารางที่ 4.1) การที่จุลินทรีย์ในถังหมักที่เติมเศษอาหารมีปริมาณก๊าซชีวภาพลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารอาจเป็นเพราะมีการผลิตกรดอินทรีย์สูง ทำให้สภาพพีเอชไม่เหมาะสมต่อการเจริญของ จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน

ผลการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิต ไอศกรีมและเศษอาหารเป็นแหล่งอาหาร แสดงดังรูปที่ 4.5 – 4.6



(ก)

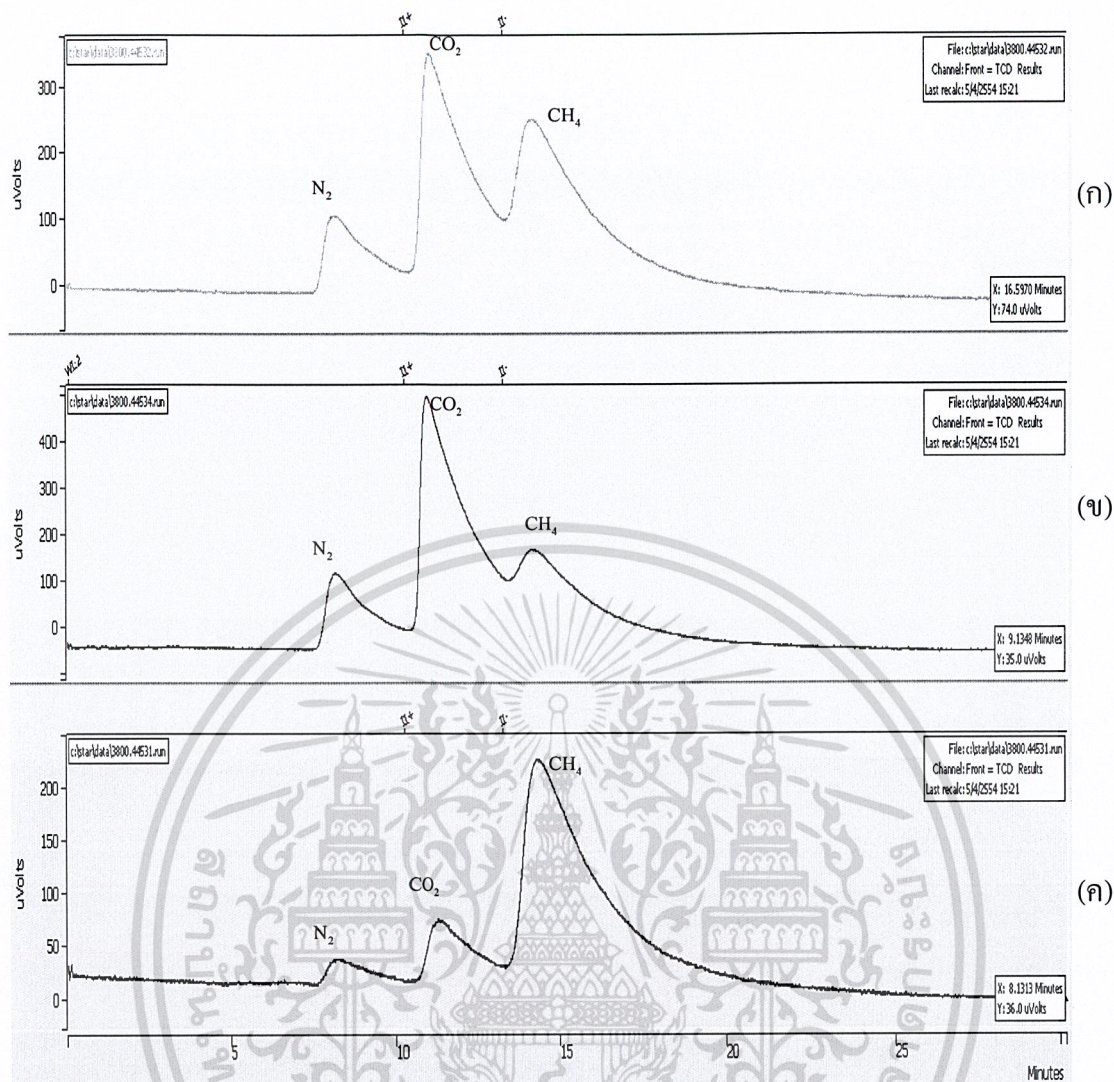


(ข)

รูปที่ 4.5 ลักษณะการติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) และเศษอาหาร (ข)

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมไม่มีกลิ่นและทำให้เปลวไฟมีความสว่างมากกว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักเศษอาหาร และก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารยังมีกลิ่นเหม็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครมาโตแกรมของก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม (ก) เศษอาหาร (ข) และมาตรฐานก๊าซชีวภาพ (ค)

จากรูปที่ 4.6 แสดงโครมาโตแกรมที่เกิดขึ้นจากการฉีดตัวอย่างก๊าซชีวภาพ 0.1 มิลลิลิตร พบก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) พื้นที่ใต้กราฟของ CO_2 ของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียโรงงานไอศกรีมและจากเศษอาหาร มีค่าเท่ากับ 10,449 counts•sec และ 3,806 counts•sec ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมีเทน มีค่าเท่ากับ 14,184 counts•sec และ 7,049 counts•sec ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมากกว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากเศษอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ได้ทำการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศที่อุณหภูมิ 37 °C โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมซึ่งมีค่า COD:N:P เท่ากับ 675:16:1 เปรียบเทียบกับการใช้เศษอาหารจากโรงอาหารซึ่งมีค่า COD:N:P เท่ากับ 8,045:8:1 เป็นแหล่งอาหาร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพ คือ อัตราการเติมอาหารเท่ากับ 20% สำหรับน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม และ 10% สำหรับเศษอาหาร โดยเศษอาหารควรมีการเติมค้างเพื่อปรับพีเอชให้เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ส่วนน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมไม่จำเป็นต้องปรับพีเอช ระยะเวลาในการเติมอาหารทุก 24 ชั่วโมง ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม 10% และการหมักเศษอาหาร 10 % สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 47.18 mL/gCOD และ 5.32 mL/gCOD ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีค่ามากกว่าเศษอาหาร โดยเทียบจากพื้นที่ใต้กราฟจากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-TCD และจากการสังเกตลักษณะการติดไฟของก๊าซชีวภาพที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานผลิต ไอศกรีมจะมีเปลวไฟสูงกว่าและไม่มีกลิ่น ส่วนก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารจะมีเปลวไฟน้อยและมีกลิ่นเหม็น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเติมอาหารแบบต่อเนื่อง
2. ควรตรวจสอบความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทุกครั้ง โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-TCD
3. ควรเติมบัฟเฟอร์ในเศษอาหาร เพื่อควบคุมสภาพต่าง
4. ควรวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันระเหยก่อนและหลังทำการหมัก
5. ควรบันทึกความสูงของน้ำในกระบอกตวงทุกครั้งก่อนทำการดูดก๊าซออก เพื่อคำนวณหาปริมาตรก๊าซที่ความดันก๊าซเหนือน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ประทีน กุลละวณิชย์. 2550. ภาพรวมเชิงสถานภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทย. สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปราโมทย์ สิริโรจน์. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร. ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ฉालิศา ยูวอมรพิทักษ์. 2549. เทคโนโลยีชีวภาพกับพลังงาน. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- วารุณี บัวลา. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากแบคทีเรียที่แยกได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตมหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุเมธ ชวเดช. 2522. การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์โดยถังหมักแบบบรรจุด้วยตัวกลาง. ฝ้ายวิจัยสิ่งแวดล้อมและนิเวศวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
- APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edition. USA : American Public Health Association.
- Borja R., Charles J. Banks. 1995. Response of an anaerobic fluidized bed reactor treating ice-cream wastewater to organic, hydraulic, temperature and pH shocks. Journal of Biotechnology 39, 251-259
- Hohl feld, J. *et al.* 1986. Production and Utilization of Biogas in Rural Areas of Industrialized and Developing Countries. GTZE Schbirn.
- Kullavanijaya, P., Paepatung O., Loapitinan N., Songkasiri W., Nopharatana A. and Chaiprasert, P. 2007. An Overview of Status and Potential of Biomethanation Technology in Thailand. KMUTT Research and Development Journal, Special Issue. 30(4), 693-700.
- Giger-Reverdin S., Morand-Fehr P. and Tran G. 2003. Literature survey of the influence of dietary fat composition on methane production in dairy cattle. Livestock Production Science 82, 73-79.
- Liu G., Zhang R., Hamed M., El-Mashad and Dong R. 2009. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. Bioresource Technology 100, 5103-5108.
- McCarty P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals : part one, part three and part four.

- Sreethawong T., Chatsiriwatana S., Rangsunvigit P., and Chavadej S. 2010. Hydrogen production from cassava wastewater using an anaerobic saquening batch reactor: Effects of operational parameters, COD:N ratio, and organic acid composition. *International journal of hydrogen energy* 35, 4092-4102.
- Thiele, J. H. and Zeikus, J. G. 1988. The Anion-Exchange Substate Shuttle Process : A New Approach to Two-Stage Biomethenation of Organic and Toxic Waste. *Biotechnology and Bioengineering*. 31(2), 521-535.
- Werner, l' *et al.* 1989. Biogas Plant in Animal Husband , GTZ / GATE Eschborn Buren, A .V . A Chinese Biogas Manual , London 19.
- Zhang R., Hamed M. El-Mashad. 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology* 101, 4021–4028.
- [Online].Available : <http://teenet.chiangmai.ac.th/btc/introbiogas.php>
- [Online].Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/Biogas>
- [Online].Available : <http://www.effe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=cMS7s93gtBdrFxPI&doc=D3WECAvwtJ4ZOeN0>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

ก 1 การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen : DO)

ก 1.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ขวด BOD ขนาด 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกแก้วที่เป็น ground joint
2. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
4. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
5. ปิเปต ขนาด 1 มิลลิลิตร
6. ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
7. กระจกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร
8. กรวยกรอง
9. กระดาษกรอง
10. เต้าไฟฟ้าที่กวนได้ พร้อมแม่เหล็ก
11. เครื่องพ่นอากาศ และสายยาง
12. Incubator ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$

สารเคมี

1. แมงกานีสซัลเฟต (MnSO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท SD Fine-Chem Limited
3. โซเดียมไอโอไดด์ (NaI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
4. โซเดียมเฮไลด์ (NaN_3) เกรด Lab บริษัท Italmar
5. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
6. แป้งมันสำปะหลัง
7. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
8. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรด Lab บริษัท Italmar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 1.2 การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต : ละลาย $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 480 กรัม หรือ $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 400 กรัม หรือ $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 364 กรัม ในน้ำกลั่น กรองแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
2. การเตรียมสารละลาย alkali-iodine : ละลาย NaOH 500 กรัม และ NaI 135 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร
3. การเตรียมสารละลาย alkali-iodine azide : ละลาย NaN_3 10 กรัม ในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วเติมลงในสารละลาย alkali-iodine
4. การเตรียมน้ำเป็ง : ละลายแป้งมันสำปะหลัง 5 กรัมในน้ำต้ม แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
5. การเตรียมสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.025 N : ละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 6.205 กรัม ในน้ำกลั่น ต้มเดือด ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
6. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.025 N : ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1.226 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

ก 1.3 วิธีการทดลอง

1.3.1 Standardization

เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

1. ละลาย KI 2 กรัมด้วยน้ำกลั่น 100-120 มิลลิลิตร
2. เติม H_2SO_4 (1+9) 10 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 20 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 5 นาที
3. จากนั้นนำมาไทเทรต I_2 ที่ถูกขับออกมาด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมไว้
4. เติมน้ำเป็งเมื่อใกล้ถึงจุดยุติ (end point) ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายเป็นสีฟางข้าว
5. ไทเทรตต่อจนถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นไม่มีสี จดปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไป
6. นำมาคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้สูตร

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

หมายเหตุ : ถ้าปริมาตรของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้มากกว่า 20 มิลลิลิตร แสดงว่าสารละลายนี้เจือจางเกินไป แต่ถ้าปริมาตรสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ได้น้อยกว่า 20 มิลลิลิตร แสดงว่าสารละลายนี้เข้มข้นกว่า

เอกสาร 0.025 N ต้องเจือจางลงสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 วิธี Winkler หรือ Iodometric Method

1. นำน้ำกลั่น 3000 มิลลิลิตร ฟนอากาศจนมีออกซิเจนอิ่มตัว ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง
2. เติมสารละลาย Phosphate buffer, สารละลาย $MgSO_4$, สารละลาย $CaCl_2$ และสารละลาย $FeCl_3$ ในอัตรา 1 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
3. ควบน้ำตัวอย่างใส่ขวด BOD จากนั้นถ่ายน้ำที่เราเตรียมไว้ในข้อ 1 ใส่ขวด BOD ให้เต็มโดยวิธีกักน้ำ (ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ)
4. เติมสารละลาย $MnSO_4$ และ alkali-iodine อย่างละ 2 มิลลิลิตรลงในขวด BOD ดังกล่าว โดยทุกครั้งให้ปิเปตจุ่มอยู่ใต้น้ำ ปิดจุกอย่าให้มีฟองอากาศ ผสมให้เข้ากัน
5. เขย่าแล้วปล่อยให้ตะกอนนอนกันจนได้น้ำใสประมาณ 1/3 ของขวด
6. เติม conc. H_2SO_4 2 มิลลิลิตรใต้ผิวน้ำ ปิดจุกเขย่าจนตะกอนละลายหมด
7. ไทเทรตตัวอย่างน้ำ 203 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายมาตรฐาน $Na_2S_2O_3$ จนสารละลายมีสีจางลงก่อน จึงค่อยเติมน้ำเป็งแล้วไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินจางหายไป
8. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับตัวอย่าง แต่ไม่เติมน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

$$DO, mg/l = \frac{ml \ Na_2S_2O_3 \times 0.025 \times 8 \times 1000}{ml \ \text{ของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการไทเทรต}}$$

หมายเหตุ : สารละลาย $Na_2S_2O_3$ 0.025 N 1 มิลลิลิตร สมมูลกับ DO 0.2 มิลลิกรัม ดังนั้น $Na_2S_2O_3$ 1 มิลลิลิตร จะสมมูลกับ DO 1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร แต่เนื่องจากการสูญเสียตัวอย่างน้ำจากขวด BOD โดยการแทนที่สารละลายเคมีที่เติมลงไป 4 มิลลิลิตร ดังนั้นปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการไทเทรตจึงควรเท่ากับ $\frac{200 \times 300}{(300-4)}$ = 203 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ช่วงของค่า BOD กับวิธีการเจือจางต่างๆของตัวอย่าง

Using Percent mixtures		By direct pipetting into BOD bottles	
%mixture	Range of BOD	ml	Range of BOD
0.01	20,000-70,000	0.02	30,000-105,000
0.02	10,000-35,000	0.05	12,000-42,000
0.05	4,000-14,000	0.10	6,000-21,000
0.1	2,000-7,000	0.20	3,000-10,500
0.2	1,000-3,500	0.50	1,200- 4,200
0.5	400-1,400	1.0	600-2,100
1.0	200-700	2.0	300-1,050
2.0	100-350	5.0	120-420
5.0	40-140	10.0	60-210
10.0	20-70	20.0	30-105
20.0	10-35	50.0	12-42
50.0	2-14	100	6-21
100	0-7	300	0-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 2 การวิเคราะห์หาความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (Biochemical Oxygen Demand : BOD)

ก 2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. เครื่องแก้วต่างๆเหมือนที่ใช้วิเคราะห์ DO
2. เครื่องมือเหมือนที่ใช้วิเคราะห์ DO
3. เครื่องวัดพีเอช รุ่น 827 pH Lab ยี่ห้อ Metrohm บริษัท Swiss made ประเทศสวิตซ์เซอร์แลนด์

สารเคมี

1. โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
2. ไดโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
3. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท APEX
5. แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เกรดLab บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
6. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท APEX
7. เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) เกรดLab บริษัท Italmar

ก 2.2 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลาย Phosphate buffer : ละลาย KH_2PO_4 8.5 กรัม, K_2HPO_4 21.75 กรัม $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 33.4 กรัม และ NH_4Cl 1.7 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี pH ประมาณ 7.2
2. สารละลาย MgSO_4 : ละลาย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 22.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร
3. สารละลาย CaCl_2 : ละลาย anhydrous CaCl_2 27.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร
4. สารละลาย FeCl_3 : ละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.25 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร
5. สารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์ DO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 2.3 วิธีการทดลอง

1. ปรับ pH ของน้ำให้อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ด้วยสารละลายกรดหรือด่าง 1 M
2. นำน้ำกลั่น 3000 มิลลิลิตร ฟนอากาศจนมีออกซิเจนอิ่มตัว ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง
3. เติมสารละลาย Phosphate buffer, สารละลาย MgSO₄, สารละลาย CaCl₂ และสารละลาย FeCl₃ ในอัตรา 1 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
4. เติมน้ำตัวอย่าง จากนั้นรินน้ำลงในขวด BOD จนเต็ม 3 ขวดต่อ 1 ตัวอย่างน้ำ ปิดจุกให้แน่น
5. เติมสารละลาย MnSO₄ และ alkali-iodine อย่างละ 2 มิลลิลิตรลงในขวด BOD ดังกล่าว โดยทุกครั้งให้บีบปั๊มอยู่ใต้น้ำ ปิดจุกอย่าให้มีฟองอากาศ ผสมให้เข้ากัน
6. เขย่าแล้วปล่อยให้ตะกอนนอนก้นจนได้น้ำใสประมาณ 1/3 ของขวด
7. เติม conc. H₂SO₄ 2 มิลลิลิตรใต้น้ำ ปิดจุกเขย่าจนตะกอนละลายหมด
8. นำ 1 ขวดมาวิเคราะห์ปริมาณ DO₀ อีก 2 ขวดแช่ไว้ใน incubator อุณหภูมิ 20 ± 1°C
9. เมื่อครบกำหนด 5 วัน นำตัวอย่างที่เหลือมาวิเคราะห์หาปริมาณ BOD
10. ทำแบลนด์ เช่นเดียวกับตัวอย่าง แต่ไม่เติมน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

$$BOD_5, \text{mg/l} = \frac{(DO_0 - DO_5)}{P}$$

เมื่อ DO₀ = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้เมื่อวัดทันที
 DO₅ = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้เมื่อบ่มเป็นเวลา 5 วัน
 P = สัดส่วนที่ใช้เจือจาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 3 การวิเคราะห์หาความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand :

COD) แบบ Close Reflux

ก 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร พร้อมจุก TFE
2. ตะแกรงที่ใส่หลอดทดลอง
3. เตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ $150 \pm 2^\circ\text{C}$
4. ปิเปต ขนาด 1 มิลลิลิตร
5. ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
6. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
7. ขวดรูปขมพู่ ขนาด 25 มิลลิลิตร
8. เตาไฟฟ้าที่กวนได้ พร้อมแม่เหล็ก

สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. เมอคิวรีซัลเฟต (HgSO_4) เกรด Lab บริษัท Italmar
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
4. ซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
5. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. 1-10 phenantroline monohydrate เกรด Lab บริษัท Italmar

ก 3.2 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลาย digestion reagent : ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4.913 กรัม ซึ่งอบแห้งที่ 103°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติม conc. H_2SO_4 167 มิลลิลิตร เติม HgSO_4 ลงไป 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
2. กรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม AgSO_4 : ละลาย AgSO_4 22 กรัมใน Conc. H_2SO_4 2.5 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติม conc. H_2SO_4 ลงไป 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบปริมาตร 1 ลิตร

สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย digestion reagent ดังนี้ คือ เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และสารละลาย digestion reagent 14 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ปิเปตค่อยๆ เติม Sulfuric Acid reagent ลงไป 14 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลาย Ferrous ammonium sulfate (FAS) โดยใช้ ferroin จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

$$\begin{aligned} \text{Normality of FAS solution} &= \frac{(\text{ml K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) (\text{N K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)}{\text{ml FAS used}} \\ &= \frac{(10)(0.25)}{\text{ml FAS used}} \approx 0.1 \end{aligned}$$

4. สารละลาย ferroin อินดิเคเตอร์ : ละลาย 1-10 phenantroline monohydrat 1.485 กรัม และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ก 3.3 วิธีการทดลอง

- ล้างหลอดทดลองและฝาจุกด้วยกรด H_2SO_4 20% ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
- ปิเปตตัวอย่างนำมา 2.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติม digestion reagent ลงไป 1.5 มิลลิลิตร และเติมกรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม AgSO_4 ลงไป 3 ml
- ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งอย่างทั่วถึงก่อนจะนำตัวอย่างไปรีฟลักซ์
- ทำแบลนด์โดยใช้ น้ำกลั่น แทนน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ น้ำตัวอย่าง ประมาณ 1-2 หลอด
- นำหลอดแก้วทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและแบลนด์วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง แล้วเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $150 \pm 2^\circ\text{C}$ เมื่อครบเวลา 2 ชม. ให้นำตัวอย่างออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น
- เทตัวอย่างจากหลอดใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลาย FAS จนกระทั่งถึงจุดยุติ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ
- อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : ภายหลังจากเติมกรดซัลฟิวริก ให้สังเกตสีของตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ถ้าได้สีเขียว แสดงว่าปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ เหลืออยู่มาก ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยเกินไปต้องเพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่างอีก
- ถ้าได้สีเขียวอมเหลือง แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างเหมาะสม สามารถนำตัวอย่างไปรีฟลักซ์ได้
- ถ้าได้สีเขียวอมฟ้า แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างมากเกินไป ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้

การคำนวณ

$$\text{COD, mg/L} = \frac{(a-b) \times N \times 8,000}{\text{ml sample}}$$

- เมื่อ
- a = ml ของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรตแบลนด์
 - b = ml ของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง
 - N = Normality ของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ ที่ใช้

ก 4 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในน้ำ (Determination of Solids)

ก 4.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ถ้วยกระเบื้อง
2. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร
3. กระบอกตวง ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
6. กระจกนาฬิกา
7. เครื่องอังไอน้ำ (water bath)
8. ตู้อบ (oven)
9. เตาไฟฟ้า (hot plate)
10. โถดูดความชื้น (desiccator)
11. กรวยบุชเนอร์ (Bucher's funnel)
12. เครื่องดูดสูญญากาศ
13. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีน้ำหนักคงที่แล้วจากโถดูดความชื้นมาชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ A กรัม
2. คนตัวอย่างน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงโดยใช้กระบอกตวง 100-200 มิลลิลิตร (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งในน้ำ) ใส่ในถ้วยกระเบื้องข้อ 1 แล้วนำไประเหยบนเครื่องอังไอน้ำจนแห้ง
3. นำถ้วยกระเบื้องที่ระเหยน้ำแห้งแล้วไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 °C เพื่อไล่ความชื้นนานประมาณ 1 ชม. แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้นและนำมาชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ B กรัม

การคำนวณ

$$\text{TS, mg/l} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

4.2.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS)

1. นำกระดาษกรอง GF/C มาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งละเอียด สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ C กรัม แล้วนำไปวางบนกระดาษฟิวส์
2. วางกระดาษกรองลงบนกรวยบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศโดยใช้ปากคิ๊บที่สะอาด ใช้น้ำกลั่นฉีดบนกระดาษกรองให้ทั่ว แล้วเปิดปั๊มดูดอากาศเพื่อให้กระดาษกรองแนบสนิทกับกรวยกรอง
3. คนตัวอย่างน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงโดยใช้กระบอกตวง 50-100 มิลลิลิตร (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นอยู่กับของแข็งแขวนลอยในน้ำ) ใส่ลงบนกระดาษกรองทีละน้อย พร้อมกับเปิดปั๊มดูดอากาศ พยายามให้ของแข็งกระจายไปทั่วๆกระดาษกรอง
4. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรองนกว่าจะแห้ง แล้วใช้ปากคิ๊บหยิบกระดาษกรองออกและนำไปวางบนกระดาษฟิวส์เช่นเดิม
5. นำไปอบแห้งในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105°C นานประมาณ 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ D กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\text{SS, mg/l} = \frac{(D - C) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

4.2.3 ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Dissolved Solids, TDS)

หาได้จาก นำน้ำส่วนที่กรองได้จากการหาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องและนำมาระเหยบนเครื่องอังไอน้ำ ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังจากระเหยน้ำไปแล้ว คือ ปริมาณของแข็งละลายน้ำ หรือคำนวณได้จาก

การคำนวณ

$$\text{TDS} = \text{TS} - \text{TSS}$$

4.2.4 ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total Volatile Solids, TVS)

1. นำถ้วยกระเบื้องหลังจากหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) แล้วซึ่งสมมติให้น้ำหนักเท่ากับ B กรัม มาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จนได้เถ้าสีขาว จากนั้นลดอุณหภูมิของถ้วยกระเบื้องลง โดยนำออกจากเตาเผาไปใส่ในตู้อบก่อน แล้วจึงนำไปทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. นำไปชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ E กรัม

การคำนวณ

$$\text{TVS, mg/l} = \frac{(B - E) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 5 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and oil) โดยวิธี Soxhlet Extraction Method

ก 5.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ขวดก้นกลม
2. เครื่องสกัด (Soxhlet)
3. กรวยบุชเนอร์ (Bucher's funnel)
4. เครื่องดูดสูญญากาศ
5. คอนเดนเซอร์
6. เต้าไฟฟ้า (Electric beating mantle)
7. ทิมเบิลสำหรับการสกัด (Extraction thimble)
8. โถดูดความชื้น
9. กระดาษกรอง Whatman No.40 ขนาด 11 เซนติเมตร
10. เศษกระเบื้อง
11. สายยาง

สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก, 1+1 เกรด Lab บริษัท Italmar
2. เฮกเซน เกรด Lab บริษัท Italmar

ก 5.2 วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่าง 1000 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปากกว้าง จากนั้นปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1+1 จนได้ประมาณ 2 หรือต่ำกว่า
2. กรองตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยใช้กระดาษกรองวางลงบนกรวยบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกรองดูดอากาศ และล้างด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร (กรองจนแห้ง) แล้วใช้ปากคีบกระดาษกรองวางลงบนกระจกนาฬิกา
3. ม้วนกระดาษกรองที่ได้ใส่ลงในทิมเบิล จากนั้นนำทิมเบิลไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C นานประมาณ 30 นาที
4. นำเฮกเซน 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมที่มีเศษกระเบื้องอยู่ แล้วนำไปตั้งน้ำหนักสมมติให้น้ำหนักเท่ากับ A กรัม จากนั้นจึงต่อเข้ากับทิมเบิลและคอนเดนเซอร์ และตั้งบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการสกัดด้วยเฮกเซนที่อัตรา 20 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้แห้งโดยการระเหยในอ่างไอน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกหมด แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
6. นำขวดกั่นกลมไปชั่งน้ำหนัก สมมติให้น้ำหนักเท่ากับ B กรัม

การคำนวณ

$$\text{Grease and oil, mg/l} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

ก 6 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส (Determination of Phosphorus)

ก 6.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. เครื่องแก้วที่ทำความสะอาดด้วยกรด (ห้ามใช้ผงซักฟอกล้าง เพราะผงซักฟอกมีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย)
3. ขวดเคลดหาลักษณะเล็กหรือขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
2. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO₃) เกรด Lab บริษัท Italmar
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล (6 N NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท SD Fine-Chem Limited
4. สารละลายผสมแวนาเดท-โมลิบเดต (Vanadate-Molybdate reagent) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (Standard phosphate solution) เกรด Lab บริษัท Italmar
6. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 6.2 การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายผสมแวนาเดท-โมลิบเดต (Vanadate-Molybdate reagent) เตรียมได้ดังนี้

1.1 ละลาย Ammonium molybdate ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 25 กรัม ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร

1.2 ละลาย Ammonium metavanadate (NH_4VO_3) 1.25 กรัม ในน้ำเดือด 300 มิลลิลิตร

เมื่อเย็นแล้วจึงเติม Conc.HCL 330 มิลลิลิตร

เมื่อสารข้อ 1.2 เย็นลงถึงอุณหภูมิห้องแล้ว จึงเทสารข้อ 1.1 ไปยังสารข้อ 1.2 แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (Standard phosphate solution) เตรียมได้โดยละลาย anhydrous KH_2PO_4 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร

$$\text{สารละลายนี้ } 1.00 \text{ มิลลิลิตร} = 50.0 \text{ } \mu\text{g PO}_4^{3-} \text{ - P}$$

ก 6.3 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตตั้งแต่ 0-14 มิลลิลิตร (หรือ 0-700 $\mu\text{g PO}_4^{3-} \text{ - P}$) ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร แต่ละอัน
2. ในแต่ละขวดเติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนเป็น 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที นำมาวัด % Transmission ที่ความยาวคลื่น 420 nm ค่า Standard phosphate solution ที่เป็น 0 เรียกว่า “reagent blank”
3. นำค่า % Transmission ของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตไปพล็อตกราฟกับค่าความเข้มขึ้นของฟอสเฟต จะได้กราฟเป็นเส้นตรง

ก 6.4 วิธีการทดลอง

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำประมาณ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวด Kjeldahl ขนาดเล็กหรือขวดเออร์เลนเมเยอร์ ซึ่งมีเศษกระเบื้องอยู่
2. เติม Conc. H_2SO_4 1 มิลลิลิตร และ Conc. HNO_3 5 มิลลิลิตร นำไปย่อยจนได้สารละลายที่ใส ไม่มีสี จนได้ปริมาตรเหลือประมาณ 2-5 มิลลิลิตร
3. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และเติมฟีนอล์ฟทาลิน 1-2 หยด แล้ว

ไทเทรตให้ถึงจุดยุติด้วย 6 N NaOH จะได้สีชมพูอ่อน จากนั้นนำสารละลายนี้ไปทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปรับสี ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำสารละลายในข้อ 3 มาใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 10 มิลลิลิตรของ Vanadate-Molybdate reagent ผสมให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนเป็น 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
5. นำไปวัด % Transmission ที่ความยาวคลื่น 420 nm ความกว้างเซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร อ่านค่าฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น

การคำนวณ

$$T - \text{PO}_4^{-3}, \text{ mg/l} = \frac{\mu\text{g PO}_4^{-3} - \text{P}}{\text{ml sample}}$$

ก 7 การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) โดยวิธีการกลั่น

ก 7.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ชุดกลั่น (Distillation apparatus)
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
3. ขวดเคลดดาห์ล ขนาด 800 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย
4. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ เกรควิเคราะห์ บริษัท APEX
5. สารละลายโซเดียมเตตระบอเรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล เกรควิเคราะห์ บริษัท SD Fine-Chem Limited
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม เกรควิเคราะห์ บริษัท APEX
8. สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ เกรควิเคราะห์ บริษัท APEX
9. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล เกรควิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 7.2 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ : เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล จำนวน 88 มิลลิลิตร ลงในสารละลายโซเดียมเตตระบอเรต 0.025 โมลาร์ (เตรียมจาก $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 9.5 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเจือจางเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล : ละลาย NaOH 240 กรัม ในน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย 1 ลิตร
3. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม : ละลายเมธิลเรด 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร และละลายเมธิลีนบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร แล้วนำทั้งสองมาผสมกัน
4. สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ : ละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 20 กรัม ในน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม 10 มิลลิลิตร เจือจางให้เป็น 1 ลิตร
5. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล : เจือจางกรดซัลฟูริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล 200 มิลลิลิตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น (ก่อนใช้ทุกครั้งควรไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต)

ก 7.3 วิธีการทดลอง

- 1.) การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในน้ำกลั่น
 1. ตวงน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนียประมาณ 400 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเคลดดาห์ลขนาด 500 มิลลิลิตร และเติมบอเรตบัฟเฟอร์ 20 มิลลิลิตร
 2. ปรับพีเอชให้เท่ากับ 9.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล พร้อมกับใส่เศษกระเบื้องลงในขวด แล้วนำไปกลั่นจนกระทั่งได้ส่วนที่กลั่นออกมาประมาณ 200-250 มิลลิลิตร
- 2.) การเตรียมน้ำตัวอย่าง
 1. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 400 มิลลิลิตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่างจะมากหรือน้อยกว่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำ ถ้าใช้ปริมาตรตัวอย่างน้อยกว่านี้ก็ให้เจือจางให้มีปริมาตรเป็น 400 มิลลิลิตร) ใส่ในขวดเคลดดาห์ล ขนาด 800 มิลลิลิตร
 2. เติบบอเรตบัฟเฟอร์ 25 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้เป็น 9.5 ด้วย NaOH 6 นอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำไปกลั่น โดยใช้ปลายของส่วนที่กลั่นออกมาจนอยู่ใต้สารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์แล้วปริมาณ 50 มิลลิลิตร กลั่นจนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 – 250 มิลลิลิตร
4. นำส่วนที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล จุดยุติสีจะเปลี่ยนจากเขียวเป็นม่วงอ่อน ซึ่งจะคำนวณหาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดังนี้

การคำนวณ

$$\text{NH}_3\text{-N (mg N / l)} = \frac{(A-B) \times 280}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง(ml)}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (ml)

B = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้กับแบลนด์ (ml)

ก 8 การวิเคราะห์หาปริมาณที่เคเอ็นไนโตรเจน (TKN)

ก 8.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. ขวดเคลดหัด ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เตาให้ความร้อน
3. ชุดกลั่น

สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
3. โปรทออกไซด์ (HgO red) เกรด Lab บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด วิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย
5. โซเดียมโซอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab-Scan Analytical Science ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 8.2 การเตรียมสารเคมี

1. น้ำย่าย่อยสลาย : ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆเติมปรอทซัลเฟต 25 มิลลิลิตร (เตรียมจาก HgO red 8 กรัม ในกรดซัลฟูริก 6 นอร์มอล จำนวน 100 มิลลิลิตร) เจือจางด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ ป้องกันการตกผลึก
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ - โซเดียมไทโอซัลเฟต : ละลาย $NaOH$ 500 กรัม และ $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 25 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

ก 8.3 วิธีการทดลอง

1. การเลือกน้ำตัวอย่าง (ขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนที่คาดว่าจะมีเจือปนในน้ำเสีย)

ตารางที่ ก-2 ความสัมพันธ์ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนกับปริมาณน้ำตัวอย่าง

Organic-N ในน้ำเสีย (มก./ล.)	ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

2. นำน้ำตัวอย่างซึ่งมีปริมาตรดังข้อ 1 เติมน้ำย่าย่อยสลาย 50 มิลลิลิตร ต้มจนสารละลายใสหรือมีสีเหลืองฟางข้าว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จึงเจือจางด้วยน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
3. หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไทโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตร จะเกิดเป็นชั้นต่างอยู่ที่ก้นขวด
4. นำไปต่อกับเครื่องกลั่นแล้วผสมให้เข้ากันดี สีของของผสมเป็นสีชมพูอ่อนๆ ถ้ายังไม่เกิดให้เติมน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไทโอซัลเฟต ลงไปอีก
5. นำตัวอย่างที่ย่อยสลายแล้วมาต่อกับเครื่องกลั่น โดยให้ส่วนที่กลั่นออกมาได้จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริกที่เติมอินดิเคเตอร์ 50 มิลลิลิตร กลั่นจนได้ปริมาตร 200-250 มิลลิลิตร

6. ทำแบลนด์เพื่อหาปริมาณไนโตรเจนในน้ำกลั่น โดยทำเช่นเดียวกับการหาในตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ยกเว้น ไม่ต้องนำไปย่อยสลาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำส่วนที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มอล เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากเขียวเป็นม่วงอ่อน การคำนวณเช่นเดียวกับการหาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

การคำนวณ

$$\text{TKN (mg/l)} = \frac{(A-B) \times 280}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง(ml)}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (ml)

B = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้กับแบลงค์ (ml)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข 1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจาก
โรงอาหาร

ตารางที่ ข 1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
พีเอช (pH)	4.80	4.80	4.80	4.80	0.00
ค่าของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) (mg/L)	5,310.15	5,300.00	5,342.47	5,317.54	22.18
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS) (mg/L)	10,510.04	10,480.96	10,498.31	10,496.44	14.63
ค่าไขมันและน้ำมัน (Grease and oil) (mg/L)	103,000.43	103,043.00	103,016.11	103,019.85	21.53
ค่าซีโอดีที่ละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) (mg/L)	13,867.26	13,851.07	13,879.30	13,865.88	14.17
ค่าบีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD) (mg/L)	2,154.33	2,110.16	2,138.00	2,134.16	22.33
ค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl and Organic Nitrogen Digestion) (mg/L)	330.02	308.54	324.81	321.12	11.20
ค่าฟอสฟอรัสในรูปออร์โธ ฟอสเฟต (Phosphorus, P) (mg/L as PO ₄ ³⁻)	20.75	21.35	19.54	20.55	0.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 1.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหารจากโรงอาหาร

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
พีเอช (pH)	3.73	3.75	3.76	3.75	0.01
ค่าของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) (mg/L)	416,700.41	416,709.05	416,695.54	416,701.67	6.84
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS) (mg/L)	903,000.36	902,985.62	903,061.20	903,015.73	40.06
ค่าไขมันและน้ำมัน (Grease and oil) (mg/L)	42,682.50	42,604.10	42,639.58	42,642.06	39.26
ค่าซีโอดีที่ละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) (mg/L)	320,000.00	320,021.71	320,003.15	320,008.29	11.73
ค่าบีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD) (mg/L)	8,475.41	8,502.72	8,495.08	8,491.07	14.09
ค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl and Organic Nitrogen Digestion) (mg/L)	308.00	323.50	302.15	311.22	11.03
ค่าฟอสฟอรัสในรูปออร์โธ ฟอสเฟต (Phosphorus, P) (mg/L as PO ₄ ³⁻)	40.00	41.23	38.12	39.78	1.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข 2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนิกโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารเป็นแหล่งอาหาร

ตารางที่ ข 2.1 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม และเศษอาหาร 10% เป็นแหล่งอาหาร โดยการเติมแบบวันเว้นวัน

เวลา	ไอศกรีม			เศษอาหาร		
	$V_{\text{อิน}}$	$V_{\text{จริง}}$	V_{STP}	$V_{\text{อิน}}$	$V_{\text{จริง}}$	V_{STP}
	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)
5 นาที	0	0	0.00	0	0	0.00
10 นาที	0	0	0.00	10	9.98	9.67
15 นาที	0	0	0.00	20	19.98	19.35
20 นาที	10	9.98	9.67	30	29.98	29.04
25 นาที	20	19.98	19.35	40	39.98	38.73
30 นาที	20	19.98	19.35	50	49.98	48.41
1 ชม.	30	29.98	29.04	60	59.98	58.10
2 ชม.	40	39.98	38.73	70	69.98	67.79
3 ชม.	50	49.98	48.41	80	79.98	77.47
4 ชม.	60	59.98	58.10	100	99.98	96.85
5 ชม.	70	69.98	67.79	120	119.98	116.22
6 ชม.	80	79.98	77.47	150	149.98	145.28
7 ชม.	110	109.98	106.53	180	179.98	174.34
8 ชม.	110	109.98	106.53	200	199.98	193.71
9 ชม.	130	129.98	125.91	230	229.98	222.77
10 ชม.	140	139.98	135.60	250	249.98	242.15
11 ชม.	150	149.98	145.28	280	279.98	271.21
12 ชม.	160	159.98	154.97	320	319.98	309.95
13 ชม.	180	179.98	174.34	350	349.98	339.01
14 ชม.	190	189.98	184.03	390	389.98	377.76
15 ชม.	200	199.98	193.71	420	419.98	406.82
16 ชม.	210	209.98	203.40	460	459.98	445.56
17 ชม.	220	219.98	213.08	500	499.98	484.31
18 ชม.	230	229.98	222.77	550	549.98	532.74
19 ชม.	240	239.98	232.46	590	589.98	571.49
20 ชม.	260	259.98	251.83	620	619.98	600.55
21 ชม.	270	269.98	261.52	660	659.98	639.30
22 ชม.	290	289.98	280.90	730	729.98	700.10
23 ชม.	320	319.98	309.95	800	799.98	774.91
24 ชม.	350	349.98	339.01	850	849.98	823.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2.1 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม และเศษอาหาร 10% เป็นแหล่งอาหาร โดยการเติมแบบวันเว้นวัน (ต่อ)

เวลา	ไอศกรีม			เศษอาหาร		
	$V_{\text{อ่าน}}$	$V_{\text{จริง}}$	V_{STP}	$V_{\text{อ่าน}}$	$V_{\text{จริง}}$	V_{STP}
	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)
25 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
26 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
27 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
28 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
29 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
30 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
31 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
32 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
33 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
34 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
35 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
36 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
37 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
38 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
39 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
40 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
41 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
42 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
43 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
44 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
45 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
46 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
47 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03
48 ชม.	360	359.98	348.70	860	859.98	833.03

หมายเหตุ : อุณหภูมิ 37 °C, 1.0076 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2.2 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจาก โรงงานผลิตไอศกรีม 10% เป็น แหล่งอาหาร

เวลา	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	V _{อ่าน} (มล.)	V _{จริง} (มล.)	V _{STP} (มล.)	V _{อ่าน} (มล.)	V _{จริง} (มล.)	V _{STP} (มล.)	V _{อ่าน} (มล.)	V _{จริง} (มล.)	V _{STP} (มล.)
5 นาที	10	9.98	9.67	20	19.98	19.35	0	0	0
10 นาที	10	9.98	9.67	20	19.98	19.35	0	0	0
15 นาที	10	9.98	9.67	30	29.98	29.04	10	9.98	9.70
20 นาที	10	9.98	9.67	30	29.98	29.04	10	9.98	9.70
25 นาที	10	9.98	9.67	30	29.98	29.04	20	19.98	19.43
30 นาที	10	9.98	9.67	30	29.98	29.04	20	19.98	19.43
1 ชม.	20	19.98	19.35	30	29.98	29.04	30	29.98	29.15
2 ชม.	40	39.98	38.73	40	39.98	38.73	50	49.98	48.6
3 ชม.	60	59.98	58.10	50	49.98	48.41	60	59.98	58.33
4 ชม.	80	79.98	77.47	70	69.98	67.79	70	69.98	68.05
5 ชม.	90	89.98	87.16	80	79.98	77.47	90	89.98	87.50
6 ชม.	100	99.98	96.85	90	89.98	87.16	100	99.98	97.22
7 ชม.	120	119.98	116.22	100	99.98	96.85	110	109.98	106.95
8 ชม.	140	139.98	135.60	120	119.98	116.22	130	129.98	126.39
9 ชม.	150	149.98	145.28	130	129.98	125.91	150	149.98	133.63
10 ชม.	160	159.98	154.97	140	139.98	135.60	160	159.98	155.57
11 ชม.	180	179.98	174.34	160	159.98	154.97	170	169.98	165.29
12 ชม.	190	189.98	184.03	170	169.98	164.65	180	179.98	175.01
13 ชม.	200	199.98	193.71	180	179.98	174.34	190	189.98	184.74
14 ชม.	220	219.98	213.09	185	184.98	179.18	210	209.98	204.19
15 ชม.	230	229.98	222.77	190	189.98	184.03	220	219.98	213.91
16 ชม.	240	239.98	232.46	200	199.98	193.71	230	229.98	223.63
17 ชม.	250	249.98	242.15	210	209.98	203.40	240	239.98	233.36
18 ชม.	270	269.98	261.52	220	219.98	213.09	250	249.98	243.08
19 ชม.	280	279.98	271.21	230	229.98	222.77	260	259.98	252.81
20 ชม.	290	289.98	280.89	230	229.98	222.77	260	259.98	252.81
21 ชม.	310	309.98	300.26	240	239.98	232.46	270	269.98	262.53
22 ชม.	320	319.98	309.95	250	249.98	242.15	280	279.98	271.79
23 ชม.	330	329.98	319.64	250	249.98	242.15	290	289.98	281.98
24 ชม.	340	339.98	329.32	260	259.98	251.83	300	299.98	291.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : ครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0076 atm

ครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0076 atm

ครั้งที่ 3 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0115 atm

การคำนวณ

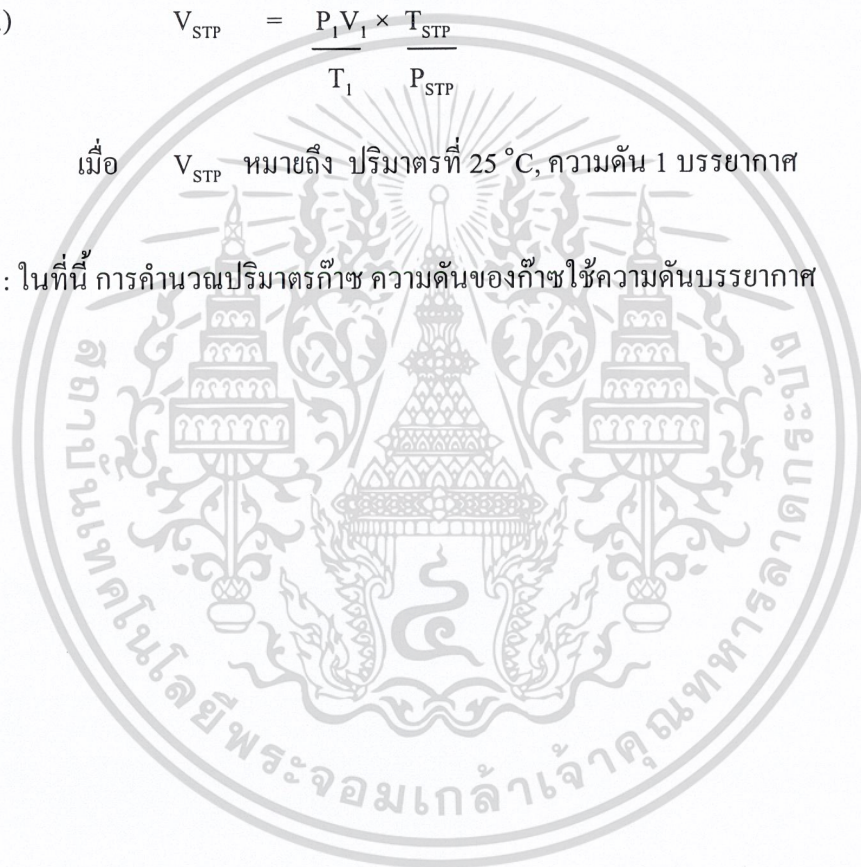
$$1.) \quad V_{\text{จริง}} = V_{\text{อ่าน}} - 0.02$$

เมื่อ $V_{\text{จริง}}$ เป็นการปรับปริมาตรก๊าซที่อ่านได้จากกระบอกตวง

$$2.) \quad V_{\text{STP}} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \times \frac{T_{\text{STP}}}{P_{\text{STP}}}$$

เมื่อ V_{STP} หมายถึง ปริมาตรที่ 25 °C, ความดัน 1 บรรยากาศ

หมายเหตุ : ในที่นี้ การคำนวณปริมาตรก๊าซ ความดันของก๊าซใช้ความดันบรรยากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2.3 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้เศษอาหาร10% เป็นแหล่งอาหาร

เวลา	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	V _{อ่าน}	V _{จริง}	V _{STP}	V _{อ่าน}	V _{จริง}	V _{STP}	V _{อ่าน}	V _{จริง}	V _{STP}
	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)	(มล.)
5 นาที	100.0	99.98	96.85	20	19.98	19.35	10	9.98	9.70
10 นาที	140.0	139.98	135.60	20	19.98	19.35	10	9.98	9.70
15 นาที	170.0	169.98	164.65	30	29.98	29.04	20	19.98	19.43
20 นาที	200.0	199.98	193.71	30	29.98	29.04	20	19.98	19.43
25 นาที	250.0	249.98	242.15	30	29.98	29.04	20	19.98	19.43
30 นาที	280.0	279.98	271.21	40	39.98	38.73	20	19.98	19.43
1 ชม.	430.0	429.98	416.50	70	69.98	67.79	20	19.98	19.43
2 ชม.	610.0	609.98	590.86	140	139.98	135.60	50	49.98	48.60
3 ชม.	670.0	669.98	648.98	210	209.98	203.40	60	59.98	58.33
4 ชม.	710.0	709.98	687.73	260	259.98	251.83	60	59.98	58.33
5 ชม.	760.0	759.98	736.16	300	299.98	290.58	70	69.98	68.05
6 ชม.	790.0	789.98	765.22	330	329.98	319.64	70	69.98	68.05
7 ชม.	820.0	819.98	794.28	370	369.98	358.38	80	79.98	77.77
8 ชม.	850.0	849.98	823.24	400	399.98	387.44	80	79.98	77.77
9 ชม.	880.0	879.98	852.40	430	429.98	416.50	90	89.98	87.50
10 ชม.	900.0	899.98	871.77	480	479.98	464.94	90	89.98	87.50
11 ชม.	910.0	909.98	881.46	520	519.98	503.68	90	89.98	87.50
12 ชม.	950.0	949.98	920.21	560	559.98	542.43	100	99.98	97.22
13 ชม.	970.0	969.98	939.58	600	599.98	581.18	110	109.98	106.95
14 ชม.	1000.0	999.98	968.63	630	629.98	610.24	110	109.98	106.95
15 ชม.	1040.0	1039.98	1007.39	660	659.98	639.30	120	119.98	116.67
16 ชม.	1070.0	1069.98	1036.44	690	698.98	668.36	130	129.98	126.40
17 ชม.	1100.0	1099.98	1065.51	710	709.98	687.73	150	149.98	145.84
18 ชม.	1130.0	1129.98	1094.57	730	729.98	707.10	160	159.98	155.57
19 ชม.	1160.0	1159.98	1123.62	750	749.98	726.47	170	169.98	165.29
20 ชม.	1190.0	1189.98	1152.68	780	779.98	755.53	180	179.98	175.07
21 ชม.	1220.0	1219.98	1181.74	800	799.98	744.19	200	199.98	194.46
22 ชม.	1250.0	1249.98	1210.80	820	819.98	794.28	230	229.98	223.17
23 ชม.	1280.0	1279.98	1239.86	830	829.98	803.97	250	249.98	243.08
24 ชม.	1320.0	1319.98	1278.61	850	849.98	823.34	280	279.98	272.25

หมายเหตุ : ครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0076 atm

ครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0076 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ครั้งที่ 3 อุณหภูมิ 37 °C, 1.0115 atm

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2.4 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม 20% เป็นแหล่งอาหาร

เวลา	ปริมาตรก๊าซสะสม		
	$V_{\text{อ่าน}}$	$V_{\text{จริง}}$	V_{STP}
	(มล.)	(มล.)	(มล.)
5 นาที	60	59.98	58.22
10 นาที	70	69.98	67.92
15 นาที	80	79.98	77.63
20 นาที	90	89.98	87.33
25 นาที	90	89.98	87.33
30 นาที	90	89.98	87.33
1 ชม.	100	99.98	97.04
2 ชม.	120	119.98	116.45
3 ชม.	140	139.98	135.86
4 ชม.	160	159.98	155.27
5 ชม.	190	189.98	184.39
6 ชม.	210	209.98	203.80
7 ชม.	240	239.98	232.92
8 ชม.	260	259.98	252.33
9 ชม.	270	269.98	262.04
10 ชม.	280	279.98	271.74
11 ชม.	300	299.98	291.16
12 ชม.	320	319.98	310.57
13 ชม.	330	329.98	320.27
14 ชม.	350	349.98	339.68
15 ชม.	360	359.98	349.39
16 ชม.	370	369.98	359.10
17 ชม.	390	389.98	378.51
18 ชม.	400	399.98	388.21
19 ชม.	420	419.98	407.62
20 ชม.	430	429.98	417.33
21 ชม.	450	449.98	436.74
22 ชม.	460	459.98	446.45
23 ชม.	480	479.98	465.86
24 ชม.	470	469.98	456.15

หมายเหตุ : อุณหภูมิ 37 °C, 1.0096 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2.5 ปริมาตรก๊าซสะสมที่ช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้เศษอาหาร 20% เป็นแหล่งอาหาร

เวลา	ปริมาตรก๊าซสะสม		
	$V_{\text{อ่าน}}$ (มล.)	$V_{\text{จริง}}$ (มล.)	V_{STP} (มล.)
5 นาที	50	49.98	48.51
10 นาที	60	59.98	58.22
15 นาที	70	69.98	67.92
20 นาที	70	69.98	67.92
25 นาที	80	79.98	77.63
30 นาที	90	89.98	87.33
1 ชม.	110	109.98	106.74
2 ชม.	160	159.98	155.27
3 ชม.	210	209.98	203.80
4 ชม.	260	259.98	252.33
5 ชม.	310	309.98	300.86
6 ชม.	410	409.98	397.92
7 ชม.	450	449.98	436.74
8 ชม.	490	489.98	475.57
9 ชม.	520	519.98	504.68
10 ชม.	570	569.98	553.21
11 ชม.	610	609.98	592.04
12 ชม.	650	649.98	630.86
13 ชม.	680	679.98	659.98
14 ชม.	730	729.98	708.51
15 ชม.	780	779.98	757.03
16 ชม.	830	829.98	805.56
17 ชม.	880	879.98	854.09
18 ชม.	920	919.98	892.92
19 ชม.	960	959.98	931.74
20 ชม.	1020	1019.98	989.97
21 ชม.	1070	1069.98	1038.50
22 ชม.	1120	1119.98	1087.03
23 ชม.	1150	1149.98	1116.15
24 ชม.	1200	1199.98	1164.68

หมายเหตุ : อุณหภูมิ 37 °C, 1.0096 atm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข 3 ค่าพีเอชของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและจากเศษอาหารหลังการหมัก

ตารางที่ ข 3.1 ค่าพีเอชของน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีม

ครั้งที่	ปริมาณก๊าซ (มิลลิลิตร/วัน)	pH
1	329.32	7.42
2	251.83	7.53
3	291.70	7.35

ตารางที่ ข 3.2 ค่าพีเอชของเศษอาหาร

ครั้งที่	ปริมาณก๊าซ (มิลลิลิตร/วัน)	pH
1	1,278.61	6.53
2	823.34	5.72
3	272.25	5.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตรต่อกรัมชีโอดี)

$$\text{อัตราการผลิตก๊าซ (mL/gCOD)} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซเฉลี่ย (mL)}}{(\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}})}$$

ตัวอย่าง ; 10% น้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม

$$\begin{aligned} \text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} \text{ (mg/L)} &= 13,865.88 - 4,800 \\ &= 9,065.88 \text{ mg/L} \\ 1,000 \text{ mL} \text{ มีค่า COD เท่ากับ } &9,065.88 \text{ mg} \\ 770 \text{ mL} \text{ มีค่า COD เท่ากับ } &770 \times 9,065.88 = 6,980.73 \text{ mg COD} \\ \text{อัตราการผลิตก๊าซ (mL/gCOD)} &= \frac{329.32 \text{ mL} \times 1,000 \text{ mg}}{6,980.73 \text{ mg COD} \cdot 1 \text{ g}} \\ &= 47.18 \text{ mL/gCOD} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง ; 20% น้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีม

$$\begin{aligned} \text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} \text{ (mg/L)} &= 13,865.88 - 4,800 \\ &= 9,065.88 \text{ mg/L} \\ 1,000 \text{ mL} \text{ มีค่า COD เท่ากับ } &9,065.88 \text{ mg} \\ 840 \text{ mL} \text{ มีค่า COD เท่ากับ } &840 \times 9,065.88 = 7,615.34 \text{ mg COD} \\ \text{อัตราการผลิตก๊าซ (mL/gCOD)} &= \frac{456.15 \text{ mL} \times 1,000 \text{ mg}}{7,615.34 \text{ mg COD} \cdot 1 \text{ g}} \\ &= 59.90 \text{ mL/gCOD} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ; 10% เศษอาหาร

$$\begin{aligned}
 \text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} \text{ (mg/L)} &= 320,008.29 - 8,800 \\
 &= 312,008.29 \text{ mg/L} \\
 1,000 \text{ mL มีค่า COD เท่ากับ} & 312,008.29 \text{ mg} \\
 770 \text{ mL มีค่า COD เท่ากับ} & \frac{770 \times 312,008.29}{1,000} = 240,246.38 \text{ mg COD} \\
 \text{อัตราการผลิตก๊าซ (mL/gCOD)} &= \frac{1,278.61 \text{ mL}}{240,246.38 \text{ mg COD}} \times \frac{1,000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\
 &= 5.32 \text{ mL/gCOD}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง ; 20% เศษอาหาร

$$\begin{aligned}
 \text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} \text{ (mg/L)} &= 320,008.29 - 8,800 \\
 &= 312,008.29 \text{ mg/L} \\
 1,000 \text{ mL มีค่า COD เท่ากับ} & 312,008.29 \text{ mg} \\
 840 \text{ mL มีค่า COD เท่ากับ} & \frac{840 \times 312,008.29}{1,000} = 262,086.96 \text{ mg COD} \\
 \text{อัตราการผลิตก๊าซ (mL/gCOD)} &= \frac{1,164.68 \text{ mL}}{262,086.96 \text{ mg COD}} \times \frac{1,000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\
 &= 4.44 \text{ mL/gCOD}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้