

การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง  
โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

นายประสิทธิ์ ศรีนคร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP CULTURE  
POND SEDIMENT BY ANAEROBIC DIGESTION**

**Prasit Srinakorn**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Doctor of Philosophy of Engineering in Mechanical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2012**

การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง  
โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ชัยฤษะ เกียรติวัฒน์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ



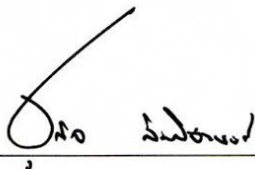
(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

กรรมการ



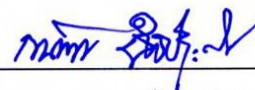
(ผศ. ดร.วีรชัย อ่างหาญ)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประสิทธิ์ ศรีนคร : การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อย  
สลายแบบไร้ออกซิเจน (BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP CULTURE POND  
SEDIMENT BY ANAEROBIC DIGESTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์  
เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 225 หน้า.

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเลที่มีค่า BOD มากกว่า 500 mg/l ค่า COD มากกว่า 3,000 mg/l และมีค่าการนำไฟฟ้าของเกลือสูงกว่า 8 ms/cm คุณสมบัติทางชีวเคมีของตะกอนเลนนั้นมีปริมาณสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพของการเลี้ยงกุ้งและเป็นของเหลวข้นสีดำ เมื่อปล่อยลงสู่ธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะระบบนิเวศป่าชายเลน ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้เป็นพลังงานทดแทน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแบดจ์ ซึ่งได้ทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักตะกอนเลนปกติ การหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% การหมักตะกอนเลนผสมยูเรีย 10% การหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วน 4%, 8% และ 12% การหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วน 5%, 10% และ 20% การหมักตะกอนเลนแบบกวนผสมและไม่กวนผสม และการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน ผลการศึกษาวิจัย การหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ได้ก๊าซชีวภาพมากที่สุดมีค่า 0.00415 m<sup>3</sup>/kg หรือ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.01 l/g COD ที่ถูกกำจัด มีปริมาณก๊าซมีเทน 68.89% คิดเป็นพลังงานค่าความร้อน 30.23 MJ/kg และระบบสามารถกำจัดค่า BOD และ COD ลดลงได้ 84.76% และ 45.36% การหมักตะกอนเลนปกติแบบไม่กวนผสมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าแบบกวนผสมมีค่าเท่ากับ 0.000227 m<sup>3</sup>/kg และ 0.000163 m<sup>3</sup>/kg และการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งผสมมูลสุกร 20% เพื่อใช้งานในครัวเรือนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00427 m<sup>3</sup>/kg ซึ่งมีปริมาณมากเพียงพอที่จะใช้เป็นพลังงานทดแทนในครัวเรือนของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งที่มีสมาชิกประมาณ 3-4 คน ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.54 m<sup>3</sup>/d

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

PRASIT SRINAKORN : BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP  
CULTURE POND SEDIMENT BY ANAEROBIC DIGESTION. THESIS  
ADVISOR : ASSOC. PROF. FLT. LT. KONTORN CHAMNIPRASART,  
Ph.D., 225 PP.

MASS BALANCE EQUATION, ANAEROBIC DIGESTION, BIOGAS PROCESS,  
SYSTEM IDENTIFICATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Shrimp culture pond sediment is waste in marine shrimp cultures which produce BOD, COD and Electric Conductivity higher than 500 mg/l, 3,000 mg/l and 8 ms/cm, respectively. Biochemical properties of the sediment have different organic matter quantities depending on the shrimp cultures which is generally black sludge. This sediment can affect the environment when discharged into the surrounding areas, especially in mangrove areas. In this study, the shrimp culture pond sediment was used as a renewable energy and to reduce effects of the environment. The sediment was used to produce biogas by anaerobic digestion system in a batch bioreactor. The experiments were including, the normal sediment fermentation, the co-fermented sediment with 10% molasses, the co-fermented sediment with 10% urea, the different ratio of co-fermented sediment with 4%, 8% and 12% molasses, the different ratio of co-fermented sediment with 5%, 10% and 20% pig manures, the fermentation with and without stirring, and the biogas production for using in a household. The results showed that the co-fermented with 20% pig manure could produce the highest amount of biogas at 0.00415 m<sup>3</sup>/kg or 1.01 l/g COD removal and the methane yield was 68.89%, the heating value was 30.23 MJ/kg . The system could reduce BOD and COD at 84.76% and 45.36%, respectively. The non-stirring system could produce biogas

higher than in the stirring system which were  $0.00027 \text{ m}^3/\text{kg}$  and  $0.000163 \text{ m}^3/\text{kg}$ , respectively. The biogas production from the co-fermented with 20% pig manure for using in a household could produce biogas at  $0.00427 \text{ m}^3/\text{kg}$  that were sufficient for a farmer household which has members about 3-4 people using biogas about  $0.54 \text{ m}^3/\text{d}$ .

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature Prasit.

Advisor's Signature Kon Chit

Co-advisor's Signature Suifol J.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาทางการศึกษา ให้ความรู้ อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ ในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำในการทำงานวิจัย ช่วยแก้ปัญหา ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย ตลอดจนสละเวลา ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา เกียรติวัฒน์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจฉาญ กรรมการ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธานี อาจารย์ประจำสาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา คุณกัศกร ต่อชีพ คุณสายฝน สิบพลกรัง คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร และคุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน

คุณอรุณีโรจน์ เขียวนาค คุณขวัญตา ดันดีกำธน และพี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ประสิทธิ์ ศรีนคร

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	4
2.1.1 คำจำกัดความของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	4
2.1.2 ผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้งทะเล.....	5
2.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	6
2.2.1 กลุ่มแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	6
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	8



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 การหมักแบบแบคทีเรีย.....	9
2.2.5 การย่อยสลาย.....	9
2.3 ก๊าซชีวภาพ.....	10
2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ.....	10
2.3.2 การใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพในรูปแบบพลังงานทดแทน.....	14
2.3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	14
2.3.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	15
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	15
2.4.1 ทฤษฎีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	17
2.4.2 อิทธิพลของปัจจัยทางด้านชีววิทยาที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์.....	21
2.5 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์.....	25
2.5.1 แนวคิดในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ.....	26
2.5.2 พื้นฐานการระบุเอกลักษณ์.....	27
2.5.3 เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์.....	29
2.5.4 วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์.....	30
2.6 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม.....	31
2.6.1 การทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม.....	31
2.6.2 จินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย.....	32
2.7 สรุป.....	39
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>40</b>
3.1 วิธีวิจัย.....	40
3.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	40
3.1.2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 ระบบตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	41
3.1.4 ระบบบันทึกข้อมูล.....	41
3.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	41
3.1.6 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	42
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	44
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	45
3.3.1 การทดลองหมักตะกอนเลนปกติ.....	45
3.3.2 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลน ผสมยูเรีย.....	47
3.3.3 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	49
3.3.4 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	51
3.3.5 การทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม.....	53
3.3.6 การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	54
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
<b>4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>59</b>
4.1 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ.....	59
4.1.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน.....	59
4.1.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	59
4.1.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	63
4.2 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย.....	67
4.2.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน.....	67
4.2.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	67
4.2.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	71
4.3 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน.....	75
4.3.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	75
4.3.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	79
4.4 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	93
4.4.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน.....	93
4.4.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	94
4.4.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	97
4.5 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม.....	107
4.6 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	109
4.6.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	109
4.6.2 การใช้ก๊าซชีวภาพปรุงอาหารในครัวเรือน.....	111
4.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงประมาณการกับมูลสัตว์ชนิดอื่น.....	111
4.7.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทน.....	112
4.7.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD.....	112
4.7.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด.....	112
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>113</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ.....	121
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอน เลนผสมยูเรีย.....	125

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่ แตกต่างกัน.....	130
ภาคผนวก ง. ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่ แตกต่างกัน.....	137
ภาคผนวก จ. ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่ กวนผสม.....	144
ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	146
ภาคผนวก ช. วิเคราะห์วัตถุประสงค์และประเมินศักยภาพของระบบ.....	148
ภาคผนวก ซ. แผนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	181
ภาคผนวก ฅ. โปรแกรมที่ใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์.....	184
ภาคผนวก ฉ. การใช้งานโปรแกรม MATLAB ส่วนของ Toolbox GA.....	187
ภาคผนวก ฎ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	193
ประวัติผู้เขียน.....	225

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	15
2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	15
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	40
3.2 คุณสมบัติของตะกอนเลนปกติก่อนหมักก๊าซชีวภาพ.....	45
3.3 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและผสมยูเรียก่อนหมักก๊าซชีวภาพ.....	47
3.4 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลก่อนหมักก๊าซชีวภาพ.....	49
3.5 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมมูลสุกรก่อนหมักก๊าซชีวภาพ.....	51
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนปกติ.....	63
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10%.....	71
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	79
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	83
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	88
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%.....	97
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%.....	102
4.8 การเปรียบเทียบเชิงประมาณการของการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ชนิดอื่น.....	112
ก.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ.....	122
ก.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ.....	123
ก.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	124
ก.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	124
ข.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ.....	126
ข.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย.....	128

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 ผลการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	129
ข.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	129
ค.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ.....	131
ค.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	133
ค.3 ผลการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	135
ค.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	136
ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ.....	138
ง.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	140
ง.3 ผลการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	142
ง.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	143
จ.1 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม.....	145
ฉ.1 ข้อมูลผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	147

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเล.....	4
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทน.....	7
2.3 ระบบถังข่อยอัตรามาตรฐาน.....	10
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S).....	22
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH).....	23
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T).....	24
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q).....	25
2.8 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	26
2.9 ระบบเปิด.....	27
2.10 แผนภาพบล็อกการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ.....	28
2.11 การค้นหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองระบบด้วยการระบุเอกลักษณ์.....	28
2.12 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์.....	31
2.13 แสดงลักษณะของโครโมโซม.....	32
2.14 แผนภูมิสายงานแสดงกระบวนการจีนเนติกอัลกอริทึม.....	33
2.15 โครโมโซมยาว 8 บิต ใช้แทนคำตอบของปัญหา.....	34
2.16 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทน.....	35
2.17 แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling.....	36
2.18 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุด โดยที่หัวของลูกศร คือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์.....	37
2.19 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 2 จุด โดยที่หัวของลูกศร คือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์.....	37
2.20 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์ม.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 การกลายพันธุ์ของโครโมโซมเลขฐานสองการกลายพันธุ์โดยการกลับปิดของ ข้อมูล.....	39
3.1 ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	41
3.2 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ.....	46
3.3 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมสมยูเรีย.....	48
3.4 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล.....	50
3.5 ชุดการทดลองหมักตะกอนผสมมูลสุกร.....	52
3.6 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบมีการกวนผสมและไม่กวนผสม.....	53
3.7 ชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน.....	54
3.8 ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	55
3.9 ถังเก็บก๊าซชีวภาพ.....	55
3.10 แท็งก์เก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มความดัน.....	56
3.11 เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ.....	57
3.12 หัวเตาแก๊สหุงต้ม.....	57
4.1 อุณหภูมิ (T).....	60
4.2 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง pH.....	61
4.3 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	62
4.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	62
4.5 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง.....	64
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S).....	64
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็น กรดเป็นด่าง (pH).....	65
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T).....	66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q).....	66



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 อุณหภูมิ (T).....	68
4.11 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH).....	69
4.12 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	70
4.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	70
4.14 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง.....	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S).....	72
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็น กรดเป็นด่าง (pH).....	73
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T).....	74
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q).....	74
4.19 อุณหภูมิ (T).....	76
4.20 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH).....	77
4.21 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	78
4.22 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	78
4.23 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอน เลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	80
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	80
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	81
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับอุณหภูมิ (T) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	82
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%.....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอน เลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	84
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	85
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	86
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับอุณหภูมิ (T) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	87
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%.....	88
4.33 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอน เลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	89
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	90
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	91
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับอุณหภูมิ (T) ของ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	92
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%.....	93
4.38 อุณหภูมิ (T).....	94
4.39 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH).....	95
4.40 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	96
4.41 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอน เลนผสมมูลสุกร 10%.....	98
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของ ตะกอนเลนมูลสุกร 10%.....	99
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%.....	100
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับอุณหภูมิ (T) ของ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%.....	101
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%.....	102
4.47 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอน เลนผสมมูลสุกร 20%.....	103
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของ ตะกอนเลนมูลสุกร 20%.....	104
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%.....	105
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับอุณหภูมิ (T) ของ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%.....	106
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับกับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%.....	107
4.52 อุณหภูมิ (T).....	108
4.53 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	108
4.54 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	109
4.55 อุณหภูมิ (T).....	110
4.56 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	110

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม.....	111
ญ.1 แผนภาพแสดงหน้าตาต่างของ GAT.....	188
ญ.2 แผนภาพแสดงการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนสัมประสิทธิ์.....	189
ญ.3 แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size.....	189
ญ.4 แผนภาพแสดงการเลือก Selection.....	190
ญ.5 แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและค่าตลาดเคลื่อนของการทำงานของ GA.....	190
ญ.6 แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟการทำงานของ GA.....	191
ญ.7 แผนภาพแสดงการเริ่ม โปรแกรม.....	191
ญ.8 แผนภาพแสดงการเก็บค่าสัมประสิทธิ์.....	192
ญ.9 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์.....	192

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

V	=	ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อ (l)
X	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (g/l)
S	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (g/l)
$S_{in}$	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ไหลเข้า (g/l)
$F_{in}$	=	อัตราการไหลเข้า (l/d)
$F_{out}$	=	อัตราการไหลเข้า (l/d)
$k_1$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์
$k_2$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ
$\mu$	=	อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ( $d^{-1}$ )
D	=	คือปริมาณการเจือจาง ( $d^{-1}$ )
P	=	ความเข้มข้นของสารตั้งคราะห์ผลผลิต (ช่วงที่เป็นของเหลว) (l)
Q	=	อัตราการไหลออกของผลผลิตก๊าซจากถังหมัก (l/d)
v	=	อัตราการสร้างผลผลิต ( $l^2/g-d$ )
pH	=	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง
T	=	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
$\mu_{max}$	=	อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ( $day^{-1}$ )
$k_S, k_Q$	=	ค่าสัมประสิทธิ์
$k_{(S)}, k_{(Q)}, a, b, c, a_1, a_2, a_3$	=	ค่าคงที่
$E_1, E_2$	=	ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ (J/g.mole)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (J/g)
GA	=	จินเนติกอัลกอริทึม

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยมีมานานหลายสิบปี โดยเริ่มต้นเลี้ยงบริเวณภาคกลางที่จังหวัดสมุทรสาคร สมุทรสงครามและสมุทรปราการ ซึ่งมีอาณาเขตติดต่อกับอ่าวไทยตอนบน การเลี้ยงในระยะเริ่มแรกเป็นการเลี้ยงแบบธรรมชาติ ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบการเลี้ยงและมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากกุ้งเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ หลังจากนั้นการเลี้ยงกุ้งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบนล่มสลายลงเนื่องจากมีการเลี้ยงอย่างหนาแน่นมากเกินไป ทำให้คุณภาพของน้ำไม่เหมาะสมต่อการเลี้ยง เกิดโรคระบาดและราคากุ้งตกต่ำ การเลี้ยงกุ้งทะเลจึงได้ขยายไปยังภาคตะวันออกที่จังหวัดจันทบุรี ระยองและตราด ซึ่งในขณะนั้นน้ำทะเลยังคงมีคุณภาพดีแล้วจึงได้ขยายพื้นที่การเพาะเลี้ยงออกไปยังภาคใต้ฝั่งอ่าวไทยและขยายต่อไปยังภาคใต้ฝั่งทะเลอันดามัน (รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2543 : 76,77) การเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นอาชีพที่สามารถทำรายได้ให้กับเกษตรกรและกลายเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท

จากสถิติการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในปี พ.ศ. 2529 ประเทศไทยสามารถผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงได้ 13,900 ตัน และผลผลิตการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปี พ.ศ. 2539 ประเทศไทยสามารถผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้นเป็น 241,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 31,132.5 ล้านบาท และมีการขยายพื้นที่ของการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเพิ่มมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีฟาร์มเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล 33,444 ฟาร์ม พื้นที่การเพาะเลี้ยง 448,908 ไร่ สามารถผลิตกุ้งทะเลได้ทั้งหมด 401,300 ตัน คิดเป็นมูลค่า 46,634.9 ล้านบาท (กรมประมง สถิติการประมง, 2542, 2548 : 18, 24, 39)

เมื่อการขยายตัวเพิ่มขึ้นของกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งทะเล ได้มีผู้ที่เกี่ยวข้องทำการศึกษาดังผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้งทะเล พบว่าของเสียที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงกุ้งจะถูกถ่ายเทไปยังสภาพแวดล้อมชายฝั่งโดยผ่านทางน้ำและตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกมาจากบ่อ (สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2540 : 152) คุณภาพของน้ำในบ่อกุ้งมีสารอินทรีย์อยู่มากเนื่องจากการเลี้ยงกุ้งจะต้องมีการให้อาหารและอาหารบางส่วนถูกใช้ไม่หมดรวมถึงสิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง เมื่อหมกสลายตัวแล้วเกิดเป็นตะกอนตกค้างที่พื้นบ่อ ส่วนหนึ่งก็สลายตัวไปอย่างช้าๆ ทั้งหมดนี้รวมกันแล้วได้ปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมา (ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ, 2531 : 7-11) เกษตรกรมักปล่อยตะกอน

เลนออกจากบ่อระหว่างการเล่นหรือขนย้ายตะกอนเลนออกเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประกอบด้วยซากแพลงก์ตอน เศษอาหาร รวมถึงมูลกุ้ง ซึ่งมีปริมาณแอมโมเนียที่สูงและส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้สภาพแวดล้อมของระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและตื้นเขิน (คณิต ไชยาคำ และขงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537 : 3)

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคครัวเรือนขนาด 3-4 คน
2. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. การวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงประมาณการกับมูลสัตว์ชนิดอื่น

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้มาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรและฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง
2. ออกแบบและสร้างชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. ผลิตก๊าซชีวภาพและเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. ทำการวิเคราะห์ Ultimate/Proximate Analysis ของวัตถุดิบ และประเมินศักยภาพสูงสุดในการผลิต
5. ศึกษากระบวนการทางกลที่อาจใช้เพิ่มประสิทธิภาพ

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)
2. สร้างชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งขนาดถึงหมัก 1,000 ลิตร โดยใช้ระบบการหมักแบบ Batch
3. ดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งด้วยชุดต้นแบบที่สร้างขึ้น
4. วิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

5. ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

### 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1. อาคารศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. หน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ที่สามารถนำไปใช้งานกับภาคครัวเรือนขนาด 3-4 คน
2. สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
3. สามารถทราบถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้
4. สามารถนำตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพใช้แทนเชื้อเพลิงอื่นๆ
5. สนับสนุนนโยบายยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติกลุ่มเรื่องการพัฒนาพลังงานทดแทน
6. สนับสนุนนโยบายเศรษฐกิจของรัฐบาลเรื่องพลังงาน



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

การเลี้ยงกุ้งทะเลนั้น ผู้เลี้ยงจะปล่อยลูกกุ้งลงไปเลี้ยงในบ่อเป็นจำนวน 70,000-100,000 ตัว/ไร่ หรือมากกว่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความพร้อมของอุปกรณ์การเลี้ยง โดยเฉพาะระบบการดีน้ำเพิ่มออกซิเจนจะต้องมีเพียงพอกับจำนวนตัวกุ้งที่ปล่อยลงไป และจะต้องวางชุดของใบพัดดีน้ำให้กระแสน้ำภายในบ่อไหลวนเพื่อรวมกากตะกอนที่เกิดขึ้นไว้ที่กลางบ่อ เมื่อจับกุ้งจำหน่ายแล้วก็จะเหลือเฉพาะตะกอนเลนกองอยู่ตรงกลางบ่อ ตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 5,000-7,000 ลิตร/ไร่ ที่ระยะเวลาของการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3-4 เดือน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวกุ้งที่ปล่อยลงไปบ่อและปริมาณของการให้อาหารในแต่ละครั้งด้วย การที่จะเลี้ยงกุ้งทะเลในรอบต่อไปก็ต้องมีการเตรียมบ่อใหม่โดยนำเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งออกจากบ่อด้วยวิธีการตักออกหรือการดูดออก ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน ปัญหาที่พบคือ ตะกอนเลนที่นำออกมาจากบ่อนั้นไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเล

##### 2.1.1 คำจำกัดความของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

“ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง” หมายถึง ซากแพลงก์ตอนพืช ซากแพลงก์ตอนสัตว์ สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง) ตะกอนน้ำ ตะกอนดิน หรือสารแขวนลอยอื่นๆ ทั้งหมดรวมกันแล้ว

เป็นของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะกองรวมกันอยู่ตรงกลางบริเวณพื้นบ่อมีลักษณะเป็นโคลนเหลว (Sludge) สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย

### 2.1.2 ผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้งทะเล

ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเล มีผู้ที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาวิจัยและสรุปไว้ดังนี้

สมศักดิ์ มณีพงศ์, ประวิทย์ โท้วฒนะ และพิภพ ปราบณรงค์ (2535) ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการทำนาุ้งที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการทำนาุ้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายอย่าง เช่น ทำให้สมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพของดินในพื้นที่นาและบริเวณใกล้เคียงเปลี่ยนไป ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ทำให้น้ำทะเลสกปรก ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำชายฝั่ง ทำลายแหล่งน้ำจืดธรรมชาติ ส่งผลให้ประชาชนขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค

เชาว์ ศรีวิชัย, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, คณิต ไชยคำ และดุสิต ต้นวิไล (2537) ได้ศึกษาพบว่าเกษตรกรมักปล่อยตะกอนเลนออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยง หรือดูดตะกอนเลนออกจากบ่อเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเล และส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและตื้นเขิน

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2540) รายงานว่าภาวะมลพิษจากบ่อเลี้ยงกุ้งถูกถ่ายเทไปยังสภาพแวดล้อมชายฝั่งโดยผ่านทางน้ำและตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกจากบ่อ

สิริ เอกมหาราช และคณะ (2548) ได้วิเคราะห์น้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเลจะมีลักษณะเป็นตะกอนที่ประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบนิเวศของทะเลสาบสงขลามีโอกาสเสื่อมโทรม เนื่องจากปัญหาแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายเติบโตมากเกินไปในแหล่งน้ำ

Thongrak, Prato, Chaiyawarisajja and Kurtz (1997) พบว่าการเลี้ยงกุ้งเพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุดก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเช่นกัน

Paez-osuna, Guerro-galvan and Ruiz-fernandez (1998) ศึกษาการเลี้ยงกุ้งทะเลในแถบตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศเม็กซิโก พบว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารและสารอินทรีย์

Anh, Kroeze, Bush and Mol (2010) ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาในประเทศเวียดนาม พบว่าแหล่งกำเนิดที่สำคัญของมลพิษคือการปล่อยทิ้ง

น้ำเสียและตะกอนเลน ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดจากการทำฟาร์มกุ้งคือ มลพิษทางน้ำ ตะกอนปนเปื้อนและการแพร่กระจายเชื้อโรค

## 2.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

### 2.2.1 กลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) คือ การทำงานของแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง โดยมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

**แบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid Former Bacteria)** แบคทีเรียพวกนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.0-6.5 และส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Facultative Anaerobic Bacteria ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้โดยใช้สารอินทรีย์ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง โดยทั่วไปแบคทีเรียพวกนี้สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง ผลผลิตหลักที่ได้จากการดำรงชีวิตอยู่ของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ กรดอินทรีย์, แอลกอฮอล์, กรดไขมัน, คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย เป็นต้น

**แบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methane Former Bacteria)** แบคทีเรียพวกนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 7.0-7.8 และส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Obligate Anaerobic Bacteria ดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนเท่านั้น มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่าพวกแรก และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าโดยเฉลี่ยแล้วต้องใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า การดำรงชีวิตอยู่ของแบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในการเจริญเติบโต จนมีผลผลิตหลักสุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน

### 2.2.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

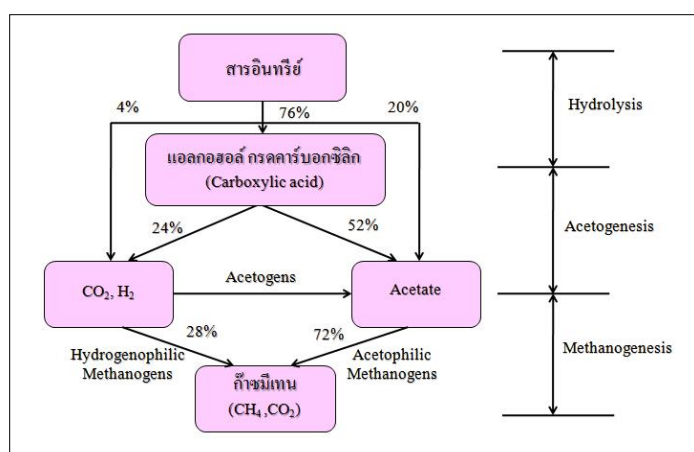
ปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เป็นวิธีการทางชีวภาพโดยที่สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยที่ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)** กระบวนการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์ (Polymer Break-down) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำเช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน รวมทั้งคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยสลายยากได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และสารประกอบประเภทไฟเบอร์พืชเช่น ลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยวหรือสารอินทรีย์

โมเลกุลเล็ก เช่น กลูโคส, กรดอะมิโนและกรดไขมัน เป็นต้น ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย การทำงานของเอนไซม์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

**ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)** ในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดแลคติก (Lactic Acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน

**ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)** กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน การเกิดก๊าซมีเทนสามารถเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือเกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 72% ของก๊าซมีเทนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน แบคทีเรียพวกที่สร้างกรดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลง pH, อุณหภูมิและมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่าแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทนมาก ความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตนี้ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นตัวหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในถังหมัก



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทน

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

สภาพแวดล้อมมีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพออกมานั้น มีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

**ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)** จะส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม โดยที่แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Former Bacteria) จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH มากที่สุด ในขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนจะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH ระหว่าง 6.8-7.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acid Former Bacteria) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพที่ pH ระหว่าง 5.0-8.0 ในทางปฏิบัติการรักษา pH ให้มีค่าเท่ากับ 7 จะทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มทำงานร่วมกันได้ดี

**อุณหภูมิ (Temperature)** อุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้ออกซิเจนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 10-20°C ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-35°C และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-60°C สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพการทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ Mesophilic และ Thermophilic การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิ Thermophilic แบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าในช่วง Mesophilic โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วง Mesophilic ประมาณ 20-50% ดังนั้นประเทศที่อยู่ในเขตกึ่งร้อน จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ แต่สำหรับประเทศไทยนั้นระบบจะทำงานอยู่ในช่วง Mesophilic ได้เองโดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วง Mesophilic จะน้อยกว่า Thermophilic แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องค่าใช้จ่ายแล้วพบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบให้อยู่ในช่วง Thermophilic

**ความเข้มข้นของของแข็ง (Solids Concentration)** ปริมาณของของแข็งในระบบหมักมีความสำคัญต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ถ้าระบบหมักมีความเข้มข้นของของแข็งมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นลดลง

**สภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic)** ในระบบหมักจะต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย เนื่องจากออกซิเจนมีผลกระทบต่อเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

**อาหารเสริม (Nutrients)** แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนต้องการสารอินทรีย์ในอัตราส่วนของ C : N ประมาณ 20-30 : 1 นอกจากนี้แบคทีเรียยังต้องการแร่ธาตุบางชนิดในการสร้างเซลล์ใหม่ เช่น ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) โดยทั่วไปในมูลสัตว์ต่าง ๆ จะมีธาตุอาหารเหล่านี้เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรีย จึงไม่จำเป็นต้องเสริมธาตุอาหารเหล่านี้ไปอีก

**สารที่เป็นพิษ (Toxic Substances)** สารบางอย่างที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษกับแบคทีเรีย ได้แก่สารประกอบของโลหะ เช่น โพแทสเซียม (Potassium) โซเดียม (Sodium) แคลเซียม (Calcium) และแมกนีเซียม (Magnesium) เป็นต้น

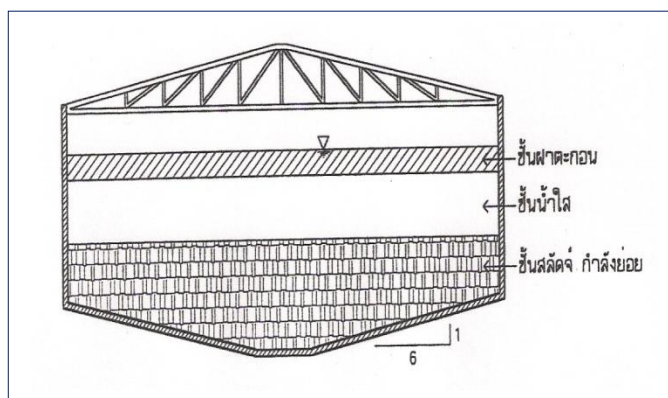
#### 2.2.4 การหมักแบบแบตช์ (Batch Fermentation)

การหมัก (Fermentation) ในทางชีวเคมีหมายถึง การสร้างพลังงานจากกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ เนื่องจากเอนไซม์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีสารอินทรีย์เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น การศึกษาไคเนติกส์ของการหมัก (Fermentation Kinetic) เป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้เราทราบถึงธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก เช่น การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (สารอินทรีย์) การเกิดผลผลิต (ก๊าซชีวภาพ) การเปลี่ยนแปลงของ pH และอุณหภูมิ โดยบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงเป็นตัวเลขอย่างแน่ชัด การหมักแบบแบตช์เป็นระบบการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์แบบปิดที่มีปริมาณสารอาหารเริ่มต้นจำกัด คือจะมีการป้อนสารอาหารเพียงครั้งเดียว แล้วปล่อยให้ระบบเกิดการย่อยสลายไปจนถึงระยะเวลาที่ต้องการหรือจนหยุดกระบวนการแล้วจึงถ่ายสารออก (สนใจ สิริ โภค, 2547) เมื่อเริ่มระบบหมักแบบแบตช์ช่วงแรกเป็นระยะที่จุลินทรีย์กำลังปรับตัวเซลล์จะยังไม่มีการเพิ่มจำนวน หลังจากนั้นจุลินทรีย์จะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดและคงที่ แต่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะถูกจำกัดด้วยสารอาหาร เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลง อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งหยุดการเจริญเติบโต

#### 2.2.5 การย่อยสลัดจ์

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดหรือย่อยสลัดจ์แบบไร้ออกซิเจนจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เรียกว่า Mesophilic คือตั้งแต่ 20°C จนถึง 45°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับประเทศไทยเพราะจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงช่วงนี้ และมีอากาศร้อนเกือบทั้งปี การย่อยสลัดจ์แบบไร้ออกซิเจนในถังจะมีอยู่ด้วยกัน 4 รูปแบบคือ การย่อยอัตรามาตรฐาน (Standard-Rate Digestion), การย่อยขั้นเดียวอัตราสูง (Single-Stage High-Rate Digestion), การย่อยสองขั้นตอน (Two-Stage Digestion) และการย่อยแบบเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic Digestion) ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการหมักแบบแบตช์และรูปแบบการย่อยอัตรามาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้หมักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมากที่สุด ระบบนี้เป็นถังเดียวที่จะเกิดทั้งการย่อย การทำขึ้นและการแยกน้ำใสออก เมื่อสลัดจ์ไหลเข้าระบบนี้แล้วจะเกิดการย่อยด้วยจุลินทรีย์ในสลัดจ์ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ขณะที่ก๊าซลอยขึ้นจะพาเอาตะกอนต่างๆ เช่น ตะกอนทั่วไป ไขมัน น้ำมัน เป็นต้น ลอยขึ้นผิวน้ำในถังซึ่งจะเกิดฝ้าตะกอน (Scum) อยู่บนผิวน้ำมาก ทำให้ระบบนี้มีอยู่ 3 ชั้นคือ ชั้น

ฝาตะกอน ชั้นน้ำใสและชั้นสลัดจ์กำลังย่อย ปริมาตรจริงๆ ที่ใช้ย่อยสลายสลัดจ์ไม่เกิน 50% ของ ปริมาตรในถัง จึงนิยมใช้ถังแบบนี้กับระบบบำบัดสลัดจ์ขนาดเล็ก



รูปที่ 2.3 ระบบถังย่อยอัตรามาตรฐาน

## 2.3 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์ โดยเชื้อจุลินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์นี้สามารถมีชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ในขณะที่ทำการย่อยสลายจะเกิดก๊าซขึ้นมากลุ่มหนึ่งประกอบด้วยมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เป็นหลัก รองลงมาคือคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อยเช่นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ), ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ก๊าซมีเทนมีมากที่สุด มีคุณสมบัติติดไฟได้และไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เมื่อเผาไหม้ร่วมกับอากาศจะได้เปลวไฟสีน้ำเงิน

### 2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ

สารอินทรีย์ทุกชนิดที่เน่าเปื่อยได้สามารถนำมาหมักเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งสิ้น แต่จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากหรือน้อยและจะเกิดก๊าซชีวภาพยากหรือง่าย จะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์นั้นว่าเป็นชนิดใด เช่น

**มูลสัตว์** สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากมูลสัตว์ถูกย่อยมาแล้วครั้งหนึ่งจากกระเพาะอาหารทำให้มีขนาดเล็กลง เชื้อจุลินทรีย์สามารถกัดกินย่อยสลายได้ง่าย

**ขยะจากชุมชน** เช่นเศษอาหาร เศษผักและเศษผลไม้ ฯลฯ

**น้ำเสีย** เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆและจากโรงฆ่าสัตว์ ฯลฯ

**วัสดุเหลือทิ้งจากแปลงเกษตรและจากธรรมชาติ** เช่นฟาง อ้อย ข้าวโพด หญ้า ใบไม้ สาหร่ายและผักตบชวา ฯลฯ

**กากตะกอน** เช่นกากตะกอนที่แยกออกจากน้ำเสีย กากตะกอนที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพและเคมี

จากการทบทวนเอกสารการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ยังไม่มีการนำเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้ในการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยในปัจจุบันจะเป็นการผลิตก๊าซชีวภาพจาก น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เศษอาหาร เศษผัก เศษผลไม้ มูลสุกร มูลวัว มูลกระบือและมูลช้างดังนี้

สุรพล สุวคนธ์ (2526) ศึกษาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัวแบบกึ่งต่อเนื่องในสภาพไร้ออกซิเจน โดยใช้ขวดหมักขนาด 2.75 ลิตร และใช้ไม้ไผ่เป็นตัวกลาง ที่ระยะเวลาการหมัก 50 วัน พบว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 60.3% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณ 36.1%

ภวานาญ เสมรสุต, สายทิพย์ ปฐมรัตน์และเพชร กัตัญญกุล (2527) ศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักฟางข้าวและมูลสัตว์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน คือ ระดับที่ 1 ใช้ฟางข้าวอย่างเดียว ระดับที่ 2 ใช้ฟางข้าวผสมกับมูลกระบือในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ระดับที่ 3 ใช้ฟางข้าวผสมกับมูลกระบือในอัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ระดับที่ 4 ใช้ฟางข้าวผสมกับมูลกระบือในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองปรากฏว่า การใช้ฟางข้าวผสมกับมูลกระบือในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักหรือใช้ฟางข้าว 150 กรัม ผสมกับมูลกระบือ 300 กรัม จะทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพดีที่สุดในรองลงมาคือ การใช้ฟางข้าวผสมกับมูลกระบือในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนักหรือใช้ฟางข้าว 80 กรัม ผสมกับมูลกระบือ 480 กรัม แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ฟางข้าวผสมมูลกระบือผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนมูลสัตว์ได้

นุชรา สีนบัวทอง (2537) ศึกษาการกำจัดมูลโคด้วยระบบการหมักไร้อากาศขนาด 10.2 ลิตร จำนวน 4 ถัง บรรจุตัวกลางตาข่ายพลาสติก ชนิดกลางแสงแดด ความเข้มข้นมูลโคผสมที่เลือกใช้อ้อยระหว่าง 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร การป้อนมูลโคผสมเข้าระบบเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องคือทำการเติมทุกวัน ด้วยอัตราคงที่ 1.02 ลิตร/วัน ที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 30-33 องศาเซลเซียส ควบคุมระยะเวลาเก็บกักให้คงที่ 10 วัน ผลการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นมูลโคผสม 10 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถกำจัด BOD, COD, TS และ TVS ได้ 84.08, 63.77, 63.48 และ 61.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นมูลโคผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ คือ 37.73, 50.99, 46.32 และ 49.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักซีไอดีที่ถูกกำจัดมีค่าเฉลี่ย 0.82 ลิตรต่อกรัม

สนั่น ตั้งสถิตย์ (2538) ศึกษาการบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโรบิกแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากมูล



สุกรด้วยถังหมักที่มีการกวน ถังมีปริมาตร 6.04 ลิตร และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบครึ่งฟิล์ม ถังมีปริมาตร 2.54 ลิตร มีการใช้ตัวกลางโพลีเอไมด์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเส้นด้าย เพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ การป้อนอาหารของถังผลิตกรดอินทรีย์และถังผลิตก๊าซชีวภาพเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง 1200 ml/day และมีค่า COD ก่อนและหลังผลิตก๊าซ 0.85 g/l และ 0.14 g/l จากผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่า 0.95 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีก๊าซมีเทนอยู่ 72%

วุฒิกัญท์ คุมมินทร์ (2544) ศึกษาทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารในถังหมักแบบชั้นกรองไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน โดยมีการวนน้ำหมักระหว่าง 2 ถึง ถึงใบที่ 1 บรรจุขยะเศษอาหารเพื่อผลิตกรดอินทรีย์และหมუნวนกรดอินทรีย์ป้อนเข้าถังใบที่ 2 ซึ่งมีการบรรจุตัวกลางพลาสติก (Bio-media) น้ำหมักที่ผ่านการย่อยสลายจะถูกหมუნวนกลับเข้าถังผลิตกรดในอัตราที่เท่ากัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขยะเศษอาหารและการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราการหมუნวนที่ต่างกัน การทดลองหมักในถังหมัก 2 ขั้นตอนปริมาตร 200 ลิตร พบว่าขยะเศษอาหารในถังผลิตกรดอินทรีย์เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว การหมუნวนน้ำหมักเข้าถังผลิตก๊าซมีเทนแบบต่อเนื่อง ระบบสามารถรับภาระสารอินทรีย์และผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าการป้อนกรดอินทรีย์แบบเป็นช่วงๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 65 วัน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้โดยเฉลี่ย 120 ลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนอยู่ 56-60%

เกษม ทิพย์สุนทรศักดิ์ (2546) ศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ในถังปฏิกรณ์ขนาดปริมาตร 22.7 ลิตร โดยขยะอินทรีย์ที่ใช้มี 4 ชนิด ได้แก่ ขยะชุมชน, เศษสับประรด, เศษฝรั่งและเศษใบยาสูบ ผลการทดลองได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.68, 13.79, 8.63 และ 3.46 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และมีก๊าซมีเทน 1.76, 6.03, 4.18, และ 1.06 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของเศษสับประรดสูงสุด รองลงมาคือ เศษฝรั่ง, ขยะชุมชนและเศษใบยาสูบ

จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนชนิดขั้นตอนเดียว ใช้ถังหมักปริมาตร 250 ลิตร และมีใบกวนอยู่ภายในถัง ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บกัก 60 วัน ได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของระบบ 157 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.4%

บรรพต ทองนาถ (2546) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์จากการหมักก๊าซชีวภาพที่หมักด้วยมูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็ม, มูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็มและกลูโคส, มูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็มและกากน้ำตาล, มูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็ม กลูโคสและกากน้ำตาล และมูลสุกรปกติ โดยใช้ถังหมักขนาดบรรจุ 20 ลิตร ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของทั้ง 5 ตัวอย่างพบว่า มูลสุกร

ผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็มและกากน้ำตาลเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด รองลงมาคือมูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็มและกลูโคส, มูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็ม กลูโคสและกากน้ำตาล, มูลสุกรปกติ และมูลสุกรผสมน้ำจุลินทรีย์อีเอ็ม ดังนี้คือ 646, 433, 353, 36 และ 6.67 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 15 วันหลังจากเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพ

อัจฉรา พิเลิศ (2554) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างและน้ำเสียจากการผลิตกระดาษสามมูลช้างร่วมกับฟางข้าว ผลจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วน หัวเชื้อ/มูลช้าง/น้ำเสีย/ฟางข้าว (กรัม) (1:2:16:0.15) มีปริมาตรรวม 106.6 ลิตร ถึงหมักขนาด 200 ลิตร มีการเติมวัตถุดิบแบบครั้งเดียว สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 45 ลิตร/วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 69% มีค่าความร้อน 39 MJ/m<sup>3</sup> และค่า COD ลดลงจาก 5,360 mg/l เหลือ 3,227 mg/l

อารียา วิรัชวรกุล (2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร และมีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ทั้งสองถัง ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน ได้ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น 54.35 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 61.26%

ประมวล ทรายทอง (2547) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งในกระบวนการผลิตขนมจีนโดยวิธีการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรดมีปริมาตร 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาตร 52.83 ลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15, 10 และ 8 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่าง 88.68-93.69 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 73.49-87.45 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่าง 88.75-95.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 93.69 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้น 4.28 ลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 64.91 เปอร์เซ็นต์

Mandal and Mandal (1998) ทดลองเพิ่มอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ได้แก่ มูลโค, มูลกระบือ, มูลอูฐและมูลม้า โดยการใช้และไม่ใช้แมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) การทดลองพบว่าปริมาณสูงสุดของการเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นกับปริมาณแมกนีเซียม โดยจากการทดลองได้อัตราแมกนีเซียมที่เหมาะสมคือ 45 mg Mg/300 cm<sup>3</sup> ของมูลสัตว์ทุกชนิด โดยปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลอูฐสูงกว่ามูลม้า, มูลกระบือและมูลโค

Chan, Chu and Wong (1999) ทดลองวิธีการย่อยและผลิตก๊าซชีวภาพจากการผสมสัลดจ์จากน้ำทิ้ง, ตะกอนเลนที่ขุดลอกและขยะชุมชน ในอัตราที่แตกต่างกัน 13 แบบ เป็นเวลา 36 วัน การผสมสัลดจ์จากน้ำทิ้ง, ตะกอนเลนที่ขุดลอกและขยะชุมชนให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่า เมื่อ

เปรียบเทียบกับกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ ขยะชุมชนหรือสลัดจ์จากน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียว อัตราผสมที่เหมาะสมสามารถลดเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพและให้ก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 75-20-5 (ขยะ-สลัดจ์-ตะกอนเลน) โดยน้ำหนัก สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.42 ลิตร/กิโลกรัม และมีปริมาณมีเทน 68.3%

Kim, Ahn, and Speece (2001) ศึกษาเปรียบเทียบเสถียรภาพและประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่อุณหภูมิ Mesophilic (35 °C) กับ Thermophilic (55 °C) ซึ่งหาค่าความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ เมื่อแต่ละถังปฏิกรณ์มีการเติมน้ำเสียแตกต่างกัน 4 แบบ คือ เติมน้ำเสียวันละครั้ง, เติมน้ำเสียต่อเนื่อง, เติมน้ำเสียวันละครั้ง แบบ 2 ขั้นตอน และเติมน้ำเสียวันละครั้งแต่ไม่มีการกวน ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ไม่ว่าจะเติมน้ำเสียด้วยวิธีใดก็ตามถึงชนิดไหนก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C จะเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °C ในทุกๆ การทดลอง

### 2.3.2 การใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพในรูปพลังงานทดแทน

พลังงานจากก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตขึ้นใช้เองได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จะสามารถชดเชยหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น ใช้หุงต้มในครัวเรือน ใช้กับเครื่องอบแห้งและหม้อต้มไอน้ำ ฯลฯ รวมถึงการใช้ในรูปให้แสงสว่างกับตะเกียง ใช้กับเครื่องยนต์งานเกษตรหรืองานฟาร์มและผลิตกระแสไฟฟ้าใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในฟาร์ม ก๊าซชีวภาพปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถ

- ใช้กับตะเกียงก๊าซขนาด 60-100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5-6 ชั่วโมง
- ใช้กับเครื่องยนต์ขนาด 2 แรงม้า ได้นาน 1 ชั่วโมง
- ใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ
- มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทน
  - ก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม
  - น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร
  - น้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร
  - ฟืนไม้ 1.50 กิโลกรัม
  - ถ่านไม้ 0.74 กิโลกรัม
  - ไฟฟ้า 1.20 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง

### 2.3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ปริมาณ %
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	50-75
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	25-50
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	0-8
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	0-1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	0-3
แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	เล็กน้อย
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	เล็กน้อย

### 2.3.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ชนิดของก๊าซ และ คุณสมบัติ	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	60% CH <sub>4</sub> 40% CO <sub>2</sub>	65% CH <sub>4</sub> 34% CO <sub>2</sub> 1% อื่นๆ
ค่าความร้อน (MJ/m <sup>3</sup> )	35.64	-	10.8	22.68	21.6	24.48
สัดส่วนคิดไฟ (% ในอากาศ)	5 - 15	-	4 - 80	4 - 45	6 - 12	7.7 - 23
อุณหภูมิติดไฟ (°C)	650 - 750	-	585	-	650 - 750	650 - 750
ความดันเปลี่ยนสถานะ (Bar)	47	75	13	89	75 - 89	75-89
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (°C)	-82.5	31	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (กรัม/ลิตร)	0.72	1.98	0.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (kJ/m <sup>3</sup> - °C)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

[ที่มา: สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่]

## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ระบบต่างๆ ต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้นๆ ดังนั้น การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน สามารถประมาณได้จากแบบจำลองที่มีผู้วิจัยศึกษาไว้แล้ว ซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน และในแบบจำลองมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบหลายตัวแปรที่จะต้องประมาณค่า จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เพื่อที่จะเก็บข้อมูลจากการทดลอง ประกอบด้วย ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้น (S) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อุณหภูมิ (T) และปริมาณก๊าซชีวภาพ (Q) โดยใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ

ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนโดยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบแล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าของสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่สำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบแบคซ์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม

Simeonov, Momchev and Grancharov (1996) ศึกษาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของช่วงอุณหภูมิมีโซฟิลิกในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของมูลสัตว์ มีค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งอธิบายพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนทั้งกระบวนการแบคซ์และกระบวนการต่อเนื่อง ในการพิจารณากระบวนการแบบต่อเนื่องมีแนวทางในการหาค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองเก็บข้อมูล และสามารถทำการจำลองสถานการณ์ได้ดี

Husain (1998) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางจลนศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยพิจารณาแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สถานะคงตัว ได้พัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์จาก Hill (Auburn University, AL) สมการได้ทำนายความเข้มข้นของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์จากอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในปฏิกิริยาของถังหมักแบบกวน ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

Noykova, Muller, Gyllenberg and Timmer (2002) ได้ศึกษาการวิเคราะห์การวัดปริมาณของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียโดยการระบุเอกลักษณ์และการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ โดยมีการแยกแบคทีเรียออกเป็นสองกลุ่ม และได้วิเคราะห์ปริมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลการทดลอง และทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อนำไปควบคุม

Muller, Noykova Gyllenberg and Timmer (2002) ได้ศึกษาการระบุค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียที่สร้างขึ้น เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปทั่วไปโดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสอง และแสดงโครงสร้างการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Simeonov and Stoyanov (2003) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของของเสียจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นและทำการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้วิธีที่ดีที่สุดบนสมการไม่เป็นเชิงเส้น ทำการพัฒนาการควบคุมอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและทำการจำลองสถานการณ์จากข้อมูลที่ทดลองได้

Tartakovsky, Mu, Zeng, Lou, Guiot and Wu (2008) ใช้หลักการทางชีวเคมีในการสร้างสมการ Kinetic rate equation และ Mass balance ของ Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)

โดยใช้วิธี Orthogonal collocation ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

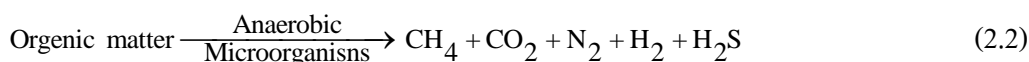
Abu Qdais, Bani Hani and Shatnawi (2009) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียโดยใช้เครื่องฆ่าเชื้อเนติคัลออร์ทิทิมเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ได้ทำการเก็บค่าอุณหภูมิ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งที่ระเหยได้ และ pH เพื่อทำนายการเกิดก๊าซชีวภาพ

#### 2.4.1 ทฤษฎีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เกิดจากการทำสมดุลมวลสาร เป็นการคำนวณเบื้องต้นในทางวิศวกรรมเคมี สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายกลายเป็นก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวล ดังสมการ

อัตราสะสมมวลสารในระบบ = อัตราการป้อนมวลสารเข้าสู่ระบบ - อัตราการดึงมวลสารออกจากระบบ + อัตราการเกิดสารใหม่ในระบบ - อัตราการใช้สารในระบบ (2.1)

ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองแบบขั้นตอนเดียวโดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนกลายเป็นก๊าซชีวภาพ



ก่อนที่จะเริ่มทำสมดุลมวลสารต้องระบุระบบ (System) หรือกระบวนการที่เราสนใจศึกษาก่อน ต้องเขียนขอบเขตของระบบ (System Boundary) รอบระบบหรือกระบวนการที่เราสนใจ ระบบในที่นี้จะหมายถึงการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยผ่านหน่วยปฏิบัติการย่อย (Unit Operation) หนึ่งหน่วยหรือหลายหน่วยก็ได้ ทั้งนี้เราอาจสนใจหน่วยย่อยหน่วยใดหน่วยหนึ่งเป็นระบบ หรือ 2-3 หน่วยย่อยรวมกันก็ได้เป็นหนึ่งระบบ หรือรวมทุกหน่วยเข้าเป็นหน่วยเดียวหรือระบบเดียวกันได้เช่นเดียวกัน ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจเป็นการเกิดปฏิกิริยา การย่อยหรือการลดขนาด หรือการเพิ่มขนาด การถ่ายเทความร้อน การกลั่น การดูดซับ การทำปฏิกิริยาชีวเคมี หรืออื่น ๆ ที่ทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของสารตั้งต้น ระบบมี 2 ระบบคือ ระบบเปิด (Open or Flow System) เป็นระบบที่มีมวลสารถ่ายเทผ่านเข้าออกระบบ และระบบปิด (Closed or Batch System) จะไม่มีมวลสารผ่านเข้าออกระบบ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพนั้นมีจุลินทรีย์อยู่สองกลุ่มที่ทำการย่อยสลายจากสารอินทรีย์จนมาเป็นก๊าซชีวภาพ ทั้งสองกลุ่มนี้ต้องทำงานร่วมกันและสอดคล้องกัน ซึ่งปัจจัยที่ได้นำมาวิเคราะห์คืออุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนใหญ่มักจะแสดงโดยสมการ

การสะสมสุทธิของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{d(VX)}{dt} = \mu VX - F_{out}X \quad (2.3)$$

การสะสมสุทธิของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{d(VS)}{dt} = -k_1\mu VX + F_{in}S_{in} - F_{out}S \quad (2.4)$$

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (2.5)$$

- เมื่อ
- V ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อ (l)
  - X คือความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (g/l)
  - S คือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (g/l)
  - S<sub>in</sub> คือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ไหลเข้า (g/l)
  - F<sub>in</sub> คืออัตราการไหลเข้า (l/d)
  - F<sub>out</sub> คืออัตราการไหลเข้า (l/d)
  - k<sub>1</sub> ค่าสัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์
  - μ อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ในสมการดังกล่าวคือ สมมติฐานการสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของชีวมวล ( $\mu X$ ) และระยะการบริโภคสารอินทรีย์ ( $k_1 \mu X$ ) เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของชีวมวล  $X$  สมมติฐานนี้ได้รับการตรวจสอบหลายครั้ง และได้กลายเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป (Monod, 1942)

การกำหนดปริมาณการเจือจางแสดงโดยสมการ

$$D = \frac{F_{in}}{V} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  คือปริมาณการเจือจาง ( $d^{-1}$ )

เมื่อนำสมการปริมาณการเจือจางแทนลงในสมการการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - D)X \quad (2.7)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \mu X + D(S_{in} - S) \quad (2.8)$$

$$\frac{dV}{dt} = DV - F_{out} \quad (2.9)$$

สมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 เป็นแบบจำลองเฉพาะที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมัก แบบแบตช์ (Batch) แบบป้อนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Fed-batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) สำหรับการทดลองวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบตช์ (Batch reactor) เนื่องจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวหนืด ในถังที่เริ่มหมักแบบแบตช์จะมีสารอินทรีย์จำนวนมาก (เชื้อ) เมื่อปริมาณสารอินทรีย์เพียงพอ การใช้สารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ก็จะคงที่ (ไม่ต้องเจือจาง) ดังนั้นในสมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ปริมาณการเจือจาง  $D=0$



กระบวนการแบบเบตซ์จะมีการเติมสารตั้งต้นเพียงครั้งเดียวจนกว่าจะจบกระบวนการแล้ว จึงนำสารนั้นออกมา การทำงานของกระบวนการนี้คือ อัตราการไหลเข้าและไหลออกมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ดังสมการ

$$F_{in} = F_{out} = 0 \quad (2.10)$$

เมื่อเลือกใช้กระบวนการหมักแบบเบตซ์ (ใส่ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งครั้งเดียวตลอดการ ทดลอง) และในระบบมีปริมาณคงที่ จากสมการที่ 2.7, 2.8, 2.9 และ 2.10 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (2.11)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \mu X \quad (2.12)$$

การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักจะทำให้เกิดการสร้างผลผลิต ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นน้ำหรือออกมาในรูปแบบของก๊าซ ดังนั้นความสัมพันธ์ของการสมดุลมวลกับผลผลิตในถังหมัก หาได้จากสมการ

$$\frac{dP}{dt} = v X - DP - Q \quad (2.13)$$

- เมื่อ
- X คือความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (g/l)
  - D คืออัตราการเจือจาง ( $d^{-1}$ )
  - P คือความเข้มข้นของสารสังเคราะห์ผลผลิต (ช่วงที่เป็นของเหลว) (l)
  - Q คืออัตราการไหลออกของผลผลิตก๊าซจากถังหมัก (l/day)
  - v คืออัตราการสร้างผลผลิต ( $l^2/g-d$ )

ในเทอมของ  $v X$  แสดงให้เห็นถึงอัตราการสร้างผลผลิตจากความเข้มข้นของจุลินทรีย์ และในบางครั้งความเข้มข้นของสารสังเคราะห์ผลผลิต (ช่วงที่เป็นของเหลว) น้อยมาก ( $P=0$ ) ดังนั้น

อัตราการไหลออกของผลผลิตก๊าซจากถังหมักจึงเท่ากับอัตราการสร้างผลผลิตก๊าซ และสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q = vX \quad (2.14)$$

เมื่อการสร้างผลผลิตก๊าซสัมพันธ์กันกับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นค่าเฉพาะของอัตราการสร้างผลผลิตก๊าซก็เป็นสัดส่วนกับค่าเฉพาะของอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ดังสมการ

$$v = k_2 X \quad (2.15)$$

เมื่อ  $k_2$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิตก๊าซ

ดังนั้นอัตราการไหลออกของผลผลิตก๊าซจากถังหมัก สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q = k_2 \mu X \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.11, 2.12 และ 2.16 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ( $\mu$ ) คือตัวแปรที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การย่อยสลาย และการสร้างผลผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 2.4.2 อิทธิพลของปัจจัยทางด้านชีววิทยาที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ในการทดลองทางด้านชีวภาพ กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นมีจุลินทรีย์อยู่สองกลุ่มที่ทำการย่อยสลายจากสารอินทรีย์จนมาเป็นก๊าซชีวภาพ ทั้งสองกลุ่มนี้ต้องทำงานร่วมกันและสอดคล้องกัน และอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับเวลา ( $\mu$ ) อิทธิพลจากสมบัติทางกายภาพและเคมี และปัจจัยทางด้านชีววิทยาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (S) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(\text{pH})\mu(T)\mu(Q) \dots \quad (2.17)$$

เมื่อ S คือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (g/l)

pH คือค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

T คืออุณหภูมิ (K)

Q คือปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (l/day)

$\mu$  อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ( $\text{day}^{-1}$ )

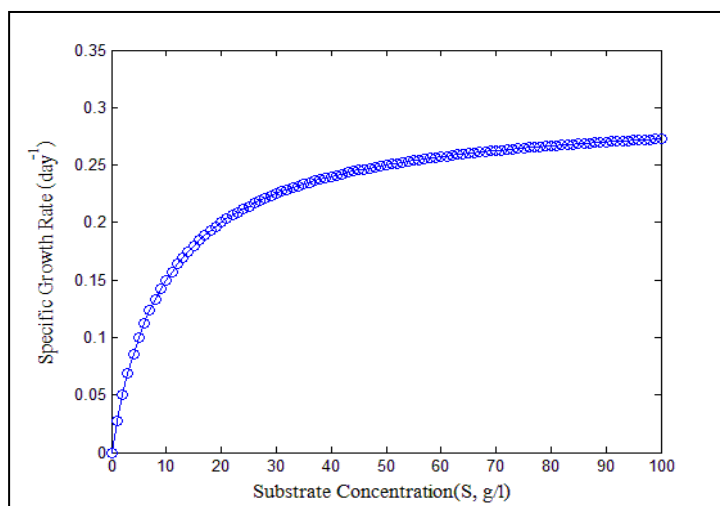
อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หาได้จากสมการของ Monod law (Monod, 1942)

$$\mu(S) = \frac{\mu_{\max}S}{k_S + S} + k_{(S)} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\mu_{\max}$  คืออัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ( $\text{day}^{-1}$ )

$k_S$  คือค่าสัมประสิทธิ์

$k_{(S)}$  คือค่าคงที่



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)

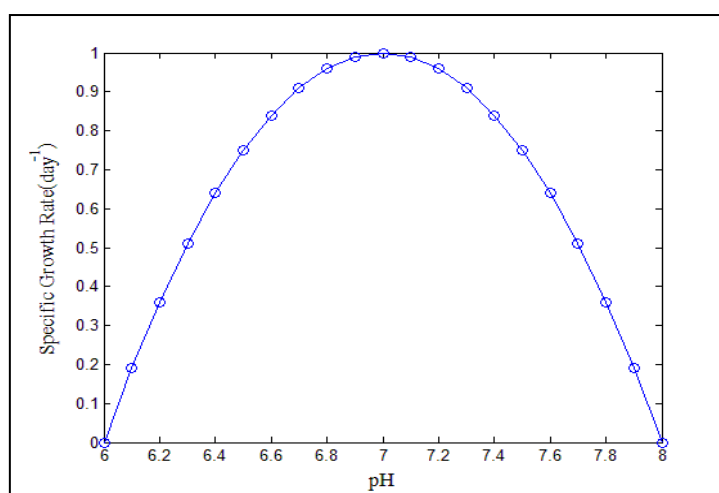
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของแบบจำลอง Monod จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณมากขึ้นการเจริญเติบโต

ของจุลินทรีย์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจะค่อยๆคงที่ ในทางตรงข้ามเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์น้อยด้วยเช่นกัน

อิทธิพลของความเป็นกรดเป็นด่างที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หาได้จากสมการของ Parabolic law (Rozzi, 1984)

$$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c \quad (2.19)$$

เมื่อ  $a, b, c$  คือค่าคงที่



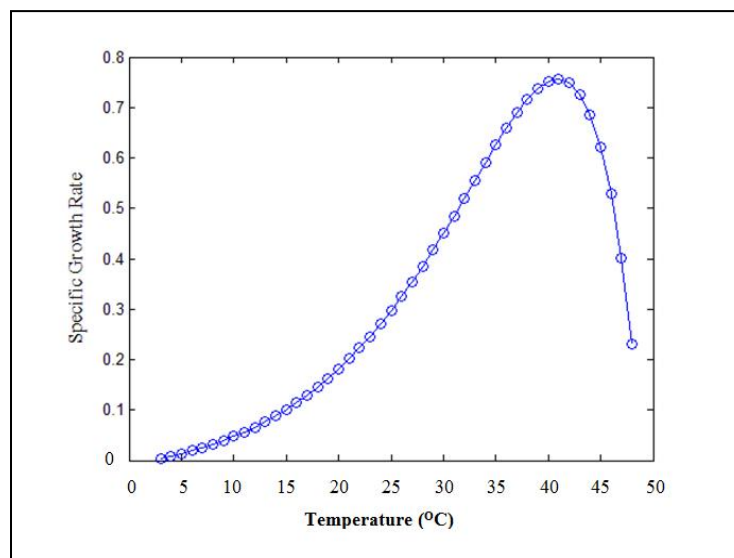
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สามารถเกิดได้ในช่วงระหว่าง pH 6-8 ซึ่งจะมีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุดอยู่ที่ pH เท่ากับ 7 ดังนั้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนต้องควบคุมระบบให้มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างใกล้เคียง 7 กราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีลักษณะคล้ายกับระฆังคว่ำ ซึ่งถ้า pH น้อยกว่า 6 หรือ pH มากกว่า 8 จุลินทรีย์จะมีการเจริญเติบโตได้ช้าหรือไม่มีการเจริญเติบโตหรืออาจทำให้จุลินทรีย์ตายได้

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หาได้จากสมการของ Arrhenius-type law (Topiwala and Sinclair, 1971)

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $E_1, E_2$  คือค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ (J/g.mole)  
 $R$  คือค่าคงที่ของก๊าซ (J/g)  
 $a_1, a_2, a_3$  คือค่าคงที่



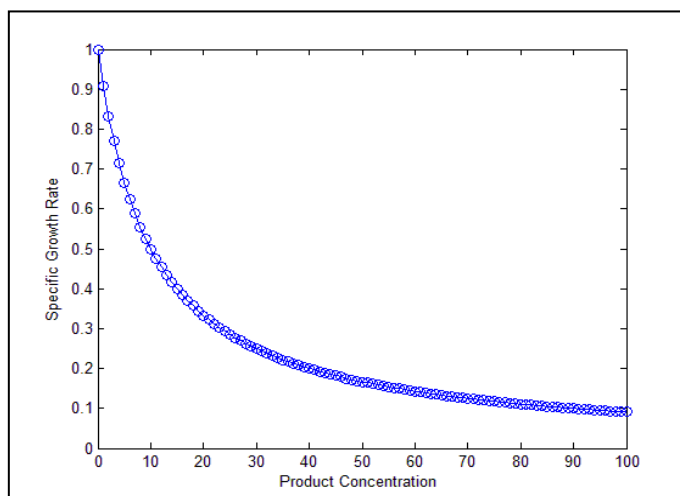
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0-50 °C

อิทธิพลของผลผลิตที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หาได้จากสมการ

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k_Q$  คือค่าสัมประสิทธิ์  
 $k_{(Q)}$  คือค่าคงที่



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)

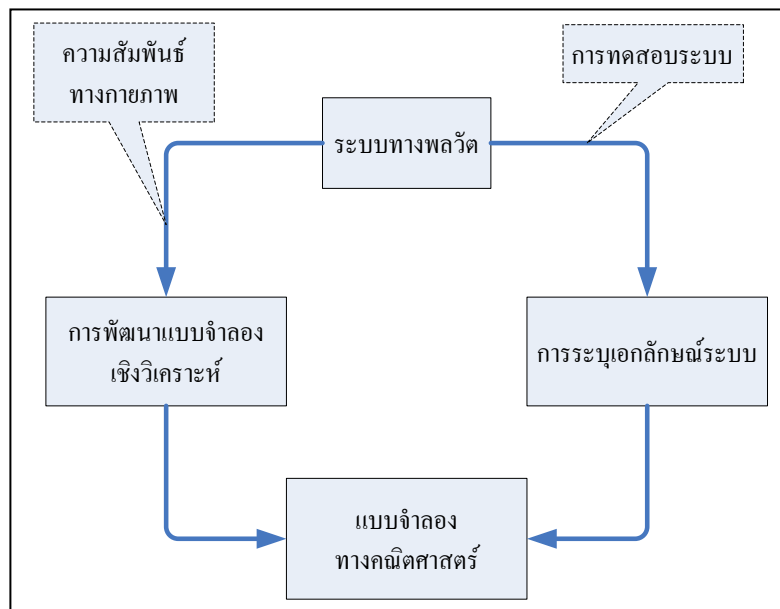
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กับผลผลิตซึ่งเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์คงที่และสภาวะแวดล้อมคงที่ เมื่อเกิดผลผลิตน้อยจะแสดงว่าปริมาณจุลินทรีย์ยังน้อยอยู่จึงทำให้มีการสร้างจุลินทรีย์ได้มากขึ้น เมื่อผลผลิตมากแสดงว่าปริมาณจุลินทรีย์มีมากแล้วทำให้มีการสร้างจุลินทรีย์ได้น้อยลง

## 2.5 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

การระบุเอกลักษณ์ของระบบจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษาไว้แล้ว และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ แบบจำลองเฉพาะกรณี (Tailor-made model) และแบบจำลองทั่วไป (Ready-made model) แบบจำลองเฉพาะกรณีได้รับการพัฒนาขึ้นจากความสัมพันธ์ทางกายภาพพื้นฐานของระบบ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏในแบบจำลองประเภทนี้สื่อความหมายทางกายภาพของระบบเป็นสำคัญ และแบบจำลองทั่วไป เป็นแบบจำลองที่ได้รับการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏในแบบจำลองทั่วไป ไม่สื่อความหมายทางกายภาพของระบบแต่ถูกใช้เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของระบบ แบบจำลองประเภทนี้เป็นรูปลักษณะที่ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในวิทยาการระบบควบคุม และได้ประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่เหมาะสมในการระบุเอกลักษณ์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการระบุเอกลักษณ์ และทำการทดลองเพื่อบันทึกข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตอย่างเพียงพอในการนำไปใช้

### 2.5.1 แนวคิดในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต จะอาศัยความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบ ซึ่งเป็นกฎทางธรรมชาติที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่น กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เป็นต้น วิธีดังกล่าวเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตต่างๆ ซึ่งอาจเรียกแบบจำลองที่ได้จากวิธีดังกล่าวว่าแบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical model) หรือแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (Analytical model) ในระบบที่มีความซับซ้อนสูง อาจประสบปัญหาในเรื่องของการหาสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ อธิบายความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบ ส่งผลให้ไม่สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอย่างถูกต้องได้ อีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวคือ การทดสอบระบบด้วยสัญญาณอินพุตที่เหมาะสม สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบได้รับการบันทึก และคำนวณด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมให้กับระบบ วิธีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเรียกว่าการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) แสดงดังรูปที่ 2.8 อธิบายกระบวนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองแนวทางที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



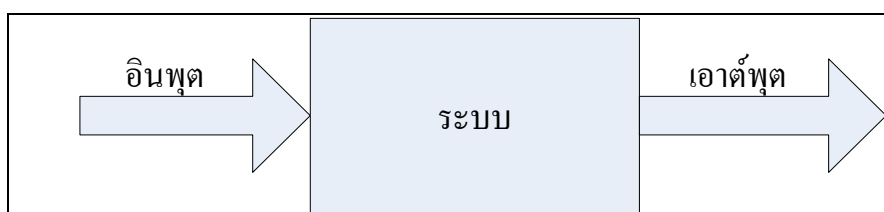
รูปที่ 2.8 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต อาจมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป เช่น อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน สมการอนุพันธ์สามัญ (ODE) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (PDE) ทั้งนี้

รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบเป็นสำคัญ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ความสนใจในขณะนี้ เป็นแบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และได้ประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตในงานวิจัยนี้ต่อไป

### 2.5.2 พื้นฐานการระบุเอกลักษณ์

ก่อนจะทราบถึงการระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมต่างๆของระบบ และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขึ้นมาก่อน เพื่อความสะดวกในการศึกษาวิเคราะห์ และสามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบจะมีพฤติกรรมอย่างไรเมื่ออยู่ภายใต้อินพุตต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกต้อง ระบบจึงมีความผิดพลาดน้อย ซึ่งเป็นการยากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และยากต่อการหาเครื่องมือในการวัดค่าต่าง ๆ ในทางปฏิบัติงานสิ่งที่จะได้จากระบบคือ อินพุตและเอาต์พุตจากระบบเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เพื่อใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบได้



รูปที่ 2.9 ระบบเปิด

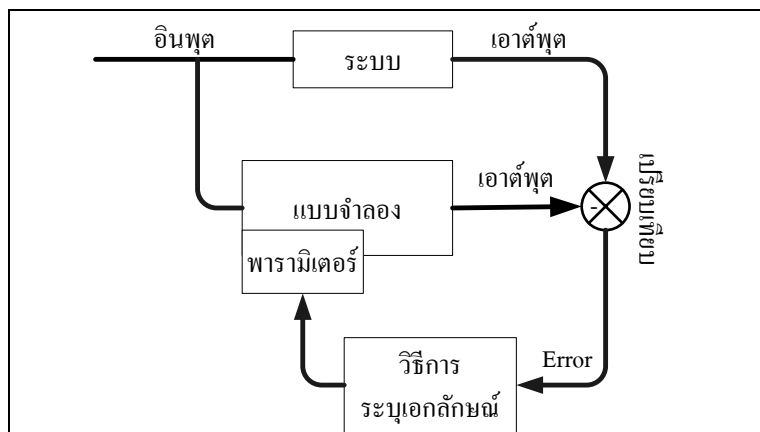
ระบบจะแสดงพฤติกรรมออกมาในลักษณะต่าง ๆ ตามแต่อินพุตหรือแรงที่ป้อนให้กับระบบ และถ้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง เมื่อถูกกระทำด้วยอินพุต สมการทางคณิตศาสตร์จะแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงหรือเหมือนกับระบบ กล่าวคือความแตกต่างของเอาต์พุต (Error) จะต้องมีค่าน้อย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความถูกต้องสูงดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเปรียบเทียบการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับเอาต์พุตที่ได้จากการวัดของระบบ





รูปที่ 2.10 แผนภาพบล็อกการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

การระบุเอกลักษณ์เป็นกระบวนการหลักอย่างหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยโครงสร้างทั่วไปในการหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.11 พิจารณาระบบมีแบบจำลองที่ยังไม่ทราบสัมประสิทธิ์



รูปที่ 2.11 การค้นหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองระบบด้วยการระบุเอกลักษณ์

การระบุเอกลักษณ์คือการหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ทำให้แบบจำลองตอบสนองต่อเอาต์พุตของระบบเหมือนกับเอาต์พุตของแบบจำลอง ดังนั้นกลไกการค้นหาสัมประสิทธิ์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ จะอาศัยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับระบบจริง แล้วทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ไปในทิศทางที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองลดลง หรือเป็นไปตาม

เงื่อนไขที่กำหนด การระบุเอกลักษณ์สามารถแบ่งออกเป็นหลายแนวทางคือการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตด้วยวิธีการดั้งเดิม และการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

### 2.5.3 เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ความหมายของปัญญาประดิษฐ์ คือการคิดเป็นขบวนการที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่คือ การสร้างวิธีการแทนสิ่งที่อยู่ในใจของปัญหาปัจจุบัน การดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องและการจัดการกับการแทนค่าทางปัญญานั้นออกมาเป็นคำตอบ

ถ้าจะอธิบายขั้นตอนทั้ง 3 ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ก็คือ เมื่อคนเราต้องการแก้ปัญหาที่กำลังประสบ คนจะทำการแทนปัญหานั้นให้อยู่ในรูปสัญลักษณ์ ที่สมองสามารถตีความได้ จากนั้นก็ทำการดึงข้อมูลที่เคยมีอยู่ ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในสมองหรือที่อื่น ที่อยู่ในรูปของสัญลักษณ์เช่นกัน มาเปรียบเทียบ เพื่อดูว่าเคยมีประสบการณ์เช่นนั้นมาก่อนหรือไม่ ถ้ามีประสบการณ์นั้นก็จะถูกนำมาปรับใช้ ถ้าไม่มีก็จะพยายามที่จะหาวิธีการจัดการกับปัญหานั้น ในลักษณะของสัญลักษณ์ออกมาเป็นคำตอบ

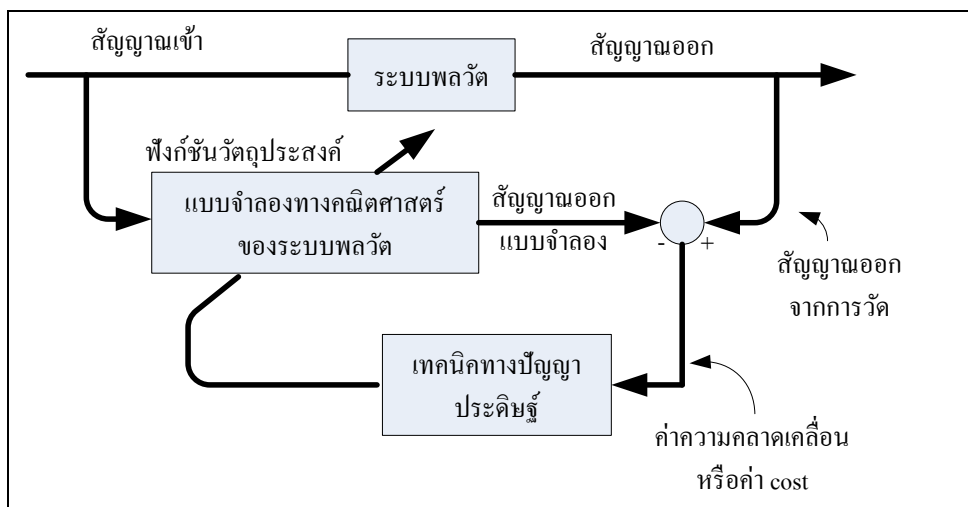
การทำงานของสมองเช่นนี้ คนจะต้องมีส่วนที่เป็นหน่วยความจำอยู่สองประเภทคือ ประเภทแรกหน่วยความจำถาวรที่ใช้เก็บบทเรียน และประสบการณ์นี้จะเก็บอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ที่มาจากการแทนที่สิ่งที่มีอยู่ในใจดังกล่าวข้างต้น ประเภทที่สองหน่วยความจำดำเนินการส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งกระดานที่ใส่เก็บข้อมูลที่ถูกแทนค่าในรูปสัญลักษณ์ สำหรับการประมวลผลและการเปรียบเทียบเพื่อการแก้ไขปัญหา เมื่อการดำเนินการเสร็จสิ้นข้อมูลนั้นก็จะถูกลบออกไป เมื่อได้คำตอบแล้ว ปัญหา คำตอบ และวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นจะถูกเก็บไว้เพื่อใช้ในการอ้างอิงต่อไป จุดสำคัญของกระบวนการนี้ก็คือการสร้างวิธีการแสดงความรู้ เมื่อประสบกับปัญหาที่คุ้นเคยขึ้น ขบวนการสร้างวิธีการแสดงความรู้ที่เหมาะสมก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะว่าประสบการณ์ในการหาข้อมูล และเทคนิคในการแก้ปัญหามีอยู่เดิม สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ความต้องการในการใช้ความจำดำเนินงานลดลง

จากความเข้าใจดังกล่าวข้างต้น ทำให้มนุษย์มีความพยายามในการสร้างเครื่องมือเพื่อทำหน้าที่แทนความฉลาดของมนุษย์เพื่อช่วยมนุษย์แก้ปัญหา ก่อนหน้านั้นมนุษย์มีการพัฒนาเครื่องคิดเลขในอดีตจนกลายเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้งานของปัญญาประดิษฐ์มีความหลากหลายสาขาแต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปทางด้านเทคนิคการค้นหาคำตอบของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นการหาอัลกอริทึมที่สามารถหาคำตอบใกล้เคียงที่สุดในเวลาที่เร็วที่สุด จากฐานข้อมูล เป็นเป้าหมาย ซึ่งการได้คำตอบใกล้เคียงที่สุด และการใช้เวลาที่น้อยที่สุด คือหัวใจสำคัญ 2

ประการ แต่ในบางครั้งข้อมูลมีจำนวนมากหมายถึงเกินกว่าศักยภาพของคอมพิวเตอร์ ทำให้ค้นหาคำตอบในเวลาที่ยากลำบากได้ ดังนั้นต้องทำการผ่อนปรนกับความพยายามในเรื่องการได้คำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด หรือการใช้เวลาน้อยที่สุด เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ดังนั้นจึงได้นำศาสตร์ของปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนดให้โดยอาศัยประสบการณ์ในการหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึมในการหาคำตอบ

#### 2.5.4 วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต กระบวนการระบุเอกลักษณ์ระบบยังคงใช้แนวคิดดั้งเดิม คืออาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เพียงแต่กระบวนการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง จะใช้เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ เป็นตัวปฏิบัติการซึ่งมีแนวทางปฏิบัติดังต่อไปนี้ กำหนดให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจเป็นส่วนประกอบหลักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าคำตอบที่ได้จากเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์คือสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง กลไกการระบุเอกลักษณ์ระบบยังคงใช้แนวคิดดั้งเดิมคืออาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุต (จากตัวตรวจรู้) และเอาต์พุต (จากตัวตรวจรู้) ของระบบ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ทำให้ค่าเอาต์พุตจากการจำลองสถานการณ์มีค่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตของระบบจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่า Cost ของกระบวนการค้นหา เมื่อการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่ยอมรับได้ นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองที่ได้จากการค้นหา รวมทั้งแบบจำลองที่ใช้ สามารถนำมาอธิบายพลวัตของระบบได้อย่างสมเหตุสมผล กระบวนการระบุเอกลักษณ์ระบบ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

## 2.6 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

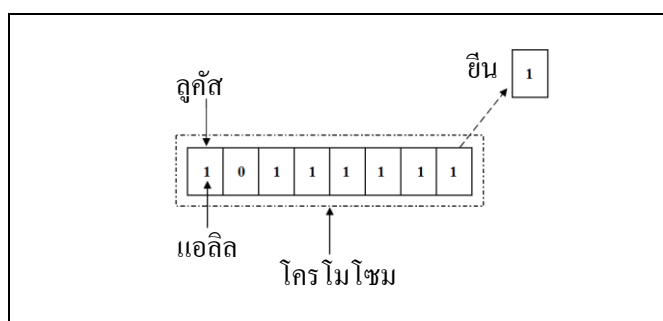
### 2.6.1 การทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA)

จินเนติกอัลกอริทึม เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการค้นหาและแก้ปัญหาเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุด ได้รับการพัฒนาโดยการจำลองวิธีการมาจากกระบวนการทางพันธุกรรม สำหรับหลักการของวิธีการนี้คือสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งส่วนที่ดีและส่วนที่ไม่ดี ซึ่งลักษณะที่ดีจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน โดยวิธีนี้ข้อมูลจะถูกพิจารณาในรูปแบบของการเข้ารหัสที่เรียกว่าโครโมโซมซึ่งจะมีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่สอดคล้องกับปัญหาในการพิจารณาหาค่าความเหมาะสม (Fitness value) ของโครโมโซมที่มีต่อปัญหา ในการคำนวณจะใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมมากระทำกลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้นจนได้โครโมโซมรุ่นใหม่ที่มีค่าความเหมาะสมกับปัญหามากขึ้น และกระทำซ้ำจนกระทั่งได้โครโมโซมที่แทนคำตอบที่ถูกต้องหรือเหมาะสมที่สุดกับปัญหา โดยจินเนติกอัลกอริทึมจะมีลักษณะที่เป็นพื้นฐานดังนี้

- จินเนติกอัลกอริทึมจะไม่ใช้ค่าของจุดต่าง ๆ ในเซตของการค้นหาโดยตรง แต่จะใช้การเข้ารหัสแก่จุดนั้น ๆ แทน
- จินเนติกอัลกอริทึมจะทำการค้นหาโดยใช้กลุ่มของค่าเริ่มต้น
- จินเนติกอัลกอริทึมจะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวัดค่าความเหมาะสมของตัวแปรที่ต้องการค้นหากับปัญหาที่ต้องการพิจารณา

- จินเนติกอัลกอริทึมจะใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic operators) กระทำกับกลุ่มข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสระหว่างการคำนวณในขั้นตอนของการกำเนิดใหม่ (Reproduction)

เนื่องจากจินเนติกอัลกอริทึมเป็นกระบวนการคำนวณที่เลียนแบบกลไกการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นในกระบวนการคำนวณของจินเนติกอัลกอริทึมจึงมีคำศัพท์เฉพาะทางชีววิทยาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยโดยอธิบายได้ดังนี้ กระบวนการจินเนติกอัลกอริทึมจะเริ่มต้นด้วยการสุ่มเซตผลเฉลยที่เกิดจากการเข้ารหัสโดยใช้สายของตัวอักษร (String) ซึ่งเทียบได้กับโครโมโซม (Chromosome) เพื่อแทนผลเฉลยจริงของปัญหา ซึ่งโครโมโซมเหล่านี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยคือตัวอักษร (Character) คือ ยีน (Gene) โดยบริเวณที่อยู่ของยีนบนโครโมโซมคือ ลูคัส (Locus) และสถานะของยีนที่อยู่บนโครโมโซมเรียกว่าแอลลีล (Allele) ลักษณะเฉพาะของโครโมโซมที่ถูกเข้ารหัสเหล่านี้เทียบได้กับจีโนไทป์ (Genotype) และเมื่อมีการถอดรหัสโครโมโซมจะได้ผลเฉลยจริงของปัญหาซึ่งผลเฉลยจริงของปัญหานี้จะเทียบได้กับฟีโนไทป์ (Phenotype) ซึ่งลักษณะของโครโมโซมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



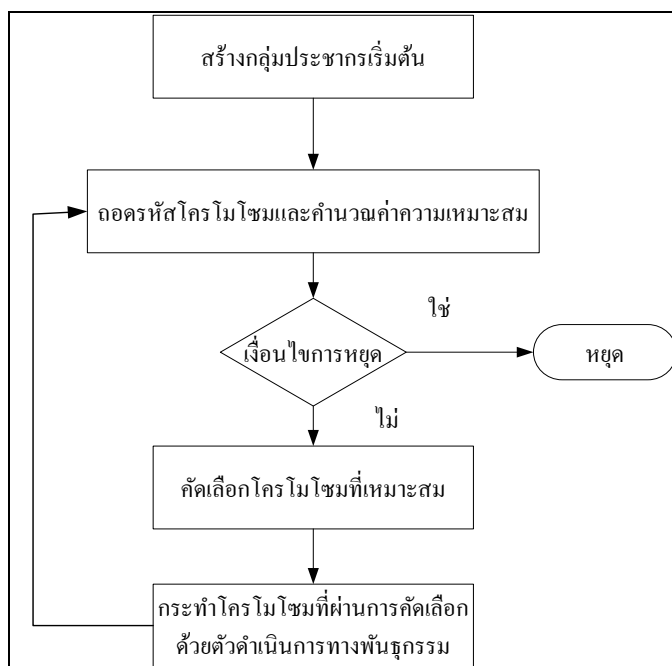
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของโครโมโซม

### 2.6.2 จินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย (Simple genetic algorithm)

กระบวนการจินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย ซึ่งได้อธิบายถึงองค์ประกอบพื้นฐานตลอดจนถึงกลไกของจินเนติกอัลกอริทึม โดยกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่ายแสดงผังแผนภูมิสายงานในรูปที่ 2.14 และอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. สร้างกลุ่มของโครโมโซมซึ่งเป็นประชากร (Population) เริ่มต้นโดยการสุ่ม
2. ถอดรหัสโครโมโซมทุกโครโมโซมเพื่อให้ได้ตัวแปรจริงของปัญหา

3. นำตัวแปรจริงของปัญหาที่ได้มาคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละโครโมโซมในประชากร
4. คำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness value) ของโครโมโซมจากค่าวัตถุประสงค์
5. สร้างประชากรชุดใหม่จากประชากรชุดเก่าด้วยการคัดเลือก (Selection) โดยพิจารณาจากค่าความเหมาะสม
6. นำประชากรที่ผ่านการคัดเลือกมากระทำด้วยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic operators) อันได้แก่ การผสมข้ามพันธุ์ (Crossing over) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นต้น
7. กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่งเข้าสู่คำตอบของปัญหาที่ต้องการหรือเท่ากับจำนวนรอบของการทำซ้ำที่กำหนดไว้ ซึ่งจำนวนหนึ่งรอบจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 เรียกว่าหนึ่งรุ่นของการคำนวณ (Generation)



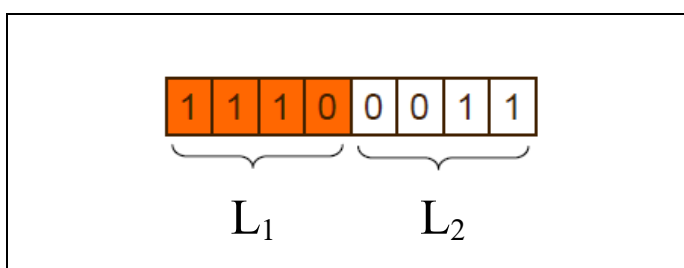
รูปที่ 2.14 แผนภูมิสายงานแสดงกระบวนการจินเนติกอัลกอริทึม

จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นว่ากระบวนการหลัก ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่ายมี 5 ขั้นตอน ได้แก่ การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome coding) การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness

evaluation) การคัดเลือก การผสมข้ามพันธุ์ และการกลายพันธุ์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะได้อธิบายรายละเอียดดังนี้

### 1. การเข้ารหัสโครโมโซม

จินเนติกอัลกอริทึมจะทำการคำนวณในปริภูมิของตัวแปรที่เกิดจากการเข้ารหัสตัวแปรที่ต้องการค้นหา โดยทั่วไปรูปแบบของรหัสที่ใช้มักจะถูกอยู่ในรูปของเลขฐานสอง ซึ่งโครโมโซมที่ใช้แทนคำตอบของปัญหาแต่ละปัญหาประกอบไปด้วยเซตของบิต 0 หรือ 1 ส่วนความยาวของโครโมโซมจะถูกกำหนดตามความต้องการซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา โดยตัวอย่างของโครโมโซมที่เป็นเลขฐานสองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครโมโซมยาว 8 บิต ใช้แทนคำตอบของปัญหา

### 2. การประเมินความเหมาะสม (Fitness evaluation)

โดยทั่วไปค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมจะมีความสัมพันธ์กับค่าวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้จากการถอดรหัสโครโมโซมแต่ละโครโมโซม ไปเป็นตัวแปรจริงของปัญหาแทนตัวแปรที่ได้จากการถอดรหัสลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งใช้วัดคุณสมบัติของโครโมโซมว่าเหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ เพียงใด โดยถ้าเป็นปัญหาในการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดหรือปัญหาการหาจุดสูงสุด เราสามารถนำค่าวัตถุประสงค์ไปใช้เป็นค่าความเหมาะสมได้เลย แต่ถ้าเป็นปัญหาในการหาเงื่อนไขน้อยที่สุด (Minimization) หรือปัญหาการหาจุดต่ำสุด ค่าความเหมาะสมจะหาได้โดย  $\text{Fitness value} = C_{\max} - \text{Objective value}$  โดยที่  $C_{\max}$  คือจำนวนจริงบวกที่มั่นใจว่ามากกว่าค่าความเหมาะสมที่ได้จากปริภูมิของการค้นหาเสมอ โดยที่ค่า  $C_{\max}$  มักพิจารณาใช้ค่าสูงสุดของค่าวัตถุประสงค์ของประชากรชุดแรก

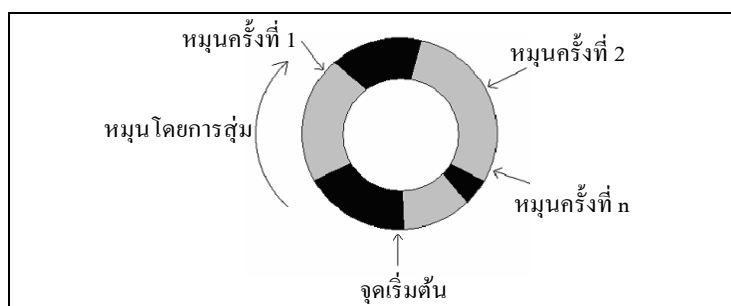
### 3. การคัดเลือก

จินเนติกอัลกอริทึมจะทำงานโดยการสนับสนุนให้โครโมโซมที่มีความเหมาะสมสามารถสืบทอดไปยังรุ่นต่อไปของการคำนวณ โดยใช้กระบวนการการคัดเลือก โดย

โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกไปเป็นประชากรรุ่นใหม่มากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย เทคนิคของการคัดเลือกที่นิยมใช้มีสองชนิดได้แก่

#### การคัดเลือกชนิดวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel selection)

การคัดเลือกชนิดวงล้อรูเล็ตเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด เทคนิคนี้จะมีลักษณะที่เปรียบเทียบได้กับวงล้อรูเล็ตที่มีช่องไม่เท่ากัน โดยช่องของวงล้อรูเล็ตที่มีขนาดใหญ่จะเทียบได้กับโอกาสที่จะถูกเลือกของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมาก และในทางกลับกันช่องที่มีขนาดเล็กจะเทียบได้กับโอกาสที่จะถูกเลือกของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย ซึ่งขนาดช่องของวงล้อรูเล็ตแต่ละช่องที่เทียบได้กับขนาดของโอกาสในการถูกเลือกของโครโมโซมแต่ละตัวจะหาได้จากอัตราส่วนของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวกับค่าความเหมาะสมรวมของโครโมโซมทุกตัว ในการคัดเลือกกระทำโดยการกำหนดจุดคงที่จุดหนึ่ง จากนั้นทำการหมุนวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่ม และเมื่อวงล้อรูเล็ตหยุดหมุน จุดที่กำหนดไว้ไปตรงกับตำแหน่งของช่องบนวงล้อช่องใดโครโมโซมที่ถูกแทนโดยช่องนั้นบนวงล้อจะถูกคัดเลือกไปเป็นโครโมโซมของประชากรรุ่นต่อไป จากนั้นทำการหมุนวงล้อโดยการสุ่มต่อไปเพื่อคัดเลือกโครโมโซมจนครบตามจำนวนประชากรเริ่มต้น แผนภูมิของการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 มีข้อสังเกตอยู่ว่าหากวงล้อรูเล็ตถูกหมุนโดยการสุ่มอย่างแท้จริงแล้วการคัดเลือกจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการคือโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากและในทางตรงกันข้ามกับกับโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย แต่จำนวนครั้งของการหมุนของวงล้อรูเล็ตถูกจำกัดโดยจำนวนประชากร ซึ่งจะทำให้การคัดเลือกโดยวิธีนี้ไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการคัดเลือกอย่างแท้จริง คือ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากอาจจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกน้อยกว่าหรือเท่ากับโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้เทคนิคการคัดเลือกแบบ Stochastic universal sampling

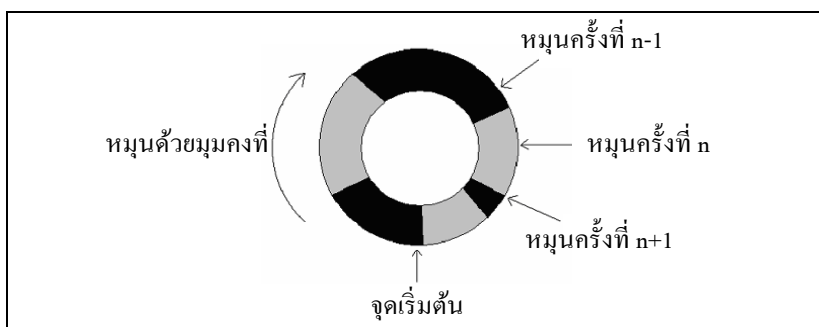


รูปที่ 2.16 แผนภูมิของการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเล็ต



### การคัดเลือกแบบ Stochastic universal sampling

การคัดเลือกโดยเทคนิคนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการคัดเลือกแบบวงล้อรูเลตจะแตกต่างกันเฉพาะที่การหมุนวงล้อรูเลต คือทำการหมุนวงล้อรูเลตไปเป็นมุมที่แน่นอนครั้งละ  $360/n$  ในแต่ละครั้งของการหมุน โดยที่  $n$  คือ จำนวนประชากรทั้งหมด การหมุนในแต่ละครั้งก็จะทำให้ได้โครโมโซมหนึ่งตัว ซึ่งเมื่อหมุน  $n$  ครั้งก็จะได้ประชากรครบตามจำนวนเดิม แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic universal sampling สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 การหมุนด้วยมุมที่คงที่นี้จะทำให้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากและโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อยจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกน้อย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากเทคนิคการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลตได้



รูปที่ 2.17 แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling

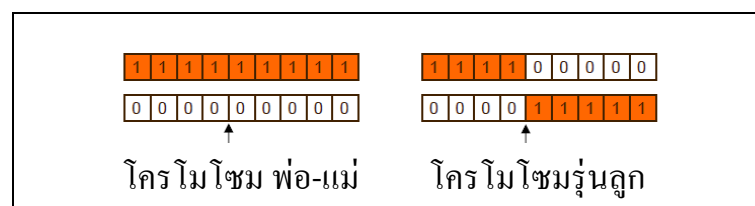
#### 4. การผสมข้ามพันธุ

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าจินเนติกอัลกอริทึมจะคำนวณโดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมเพื่อเปลี่ยนแปลงโครโมโซมที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกมาแล้ว โดยตัวดำเนินการทางพันธุกรรมชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมอย่างมาก คือดำเนินการผสมข้ามพันธุซึ่งกระบวนการนี้จะเริ่มต้นด้วยการเลือกโครโมโซมมาคู่หนึ่งจากโครโมโซมที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกมาแล้วด้วยการสุ่ม ซึ่งโครโมโซมคู่นี้จะเรียกว่าโครโมโซมพ่อแม่ จากนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนยีนกันระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ ซึ่งจะได้โครโมโซมลูกมาสองตัว และใช้กระบวนการเดียวกันนี้กับโครโมโซมที่เหลืออยู่จนได้โครโมโซมลูกครบตามจำนวนประชากรเดิม โดยทั่วไปแล้วการผสมข้ามพันธุจะไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกโครโมโซมพ่อแม่ที่เลือกมา แต่จะมีการกำหนดความเป็นไปได้ในการเกิดการผสมข้ามพันธุ (Crossing over probability) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9 โดยหากไม่เกิดการผสมข้ามพันธุจะทำให้โครโมโซมลูกที่ได้มี

ลักษณะเหมือนโครโมโซมพ่อแม่ทุกประการ เทคนิคของการผสมข้ามพันธุ์ที่ใช้กันมากมีสองเทคนิคคือ

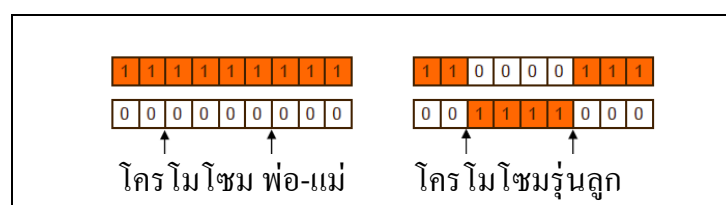
#### การผสมข้ามพันธุ์ชนิดผสมข้ามพันธุ์แบบหนึ่งมิติ

เทคนิคการผสมข้ามพันธุ์ชนิดนี้จะมีการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมรุ่นลูกที่จับคู่กัน โดยที่การแลกเปลี่ยนยีนนี้จะเกิดขึ้นในด้านหนึ่งของจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ (Crossing - over site) แล้วสลับกันไปตามจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุ์ โดยจำนวนจุดของการผสมข้ามพันธุ์  $n$  จุดจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุดและ 2 จุด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 และ รูปที่ 2.19 ตามลำดับ จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าการแลกเปลี่ยนยีนจะเกิดขึ้นด้านขวาของจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุ์ ในกรณีของการผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุด ส่วนในกรณีของการผสมข้ามพันธุ์แบบ 2 จุดแสดงในรูปที่ 2.19 และจากทั้งสองกรณีข้างต้นหลังจากเกิดการผสมข้ามพันธุ์จะมีทั้งยีนของโครโมโซมพ่อและแม่ โดยรูปแบบของการแลกเปลี่ยนยีนจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุ์ซึ่งจะถูกเลือกขึ้นมาโดยการสุ่ม



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุด

โดยที่หัวของลูกศร คือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์



รูปที่ 2.19 แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 2 จุด

โดยที่หัวของลูกศร คือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์

### การผสมข้ามพันธุชนิคยูนิฟอร์ม

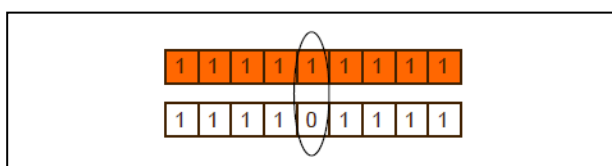
เทคนิคการผสมข้ามพันธุชนิคตามที่กล่าวมาแล้วจะพิจารณาการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมพ่อแม่โดยพิจารณาจากจุดที่เกิดการผสมข้ามพันธุ แต่เทคนิคการผสมข้ามพันธุชนิคยูนิฟอร์ม จะพิจารณาการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมพ่อแม่โดยใช้โครโมโซมต้นแบบของการผสมข้ามพันธุ ซึ่งเป็นสายตัวอักษรที่เป็นตัวเลขฐานสองที่มีความยาวเท่ากับโครโมโซมพ่อแม่ โดยในการเกิดผสมข้ามพันธุจะพิจารณายีนทุกยีนของโครโมโซมโดยการกำหนดว่ายีนของโครโมโซมรุ่นลูกจะมาจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวใดจะคัดสินจากโครโมโซมต้นแบบของลูกแต่ละตัว หากยีนของโครโมโซมต้นแบบเป็น 0 จะใช้ยีนจากโครโมโซมพ่อแม่อีกตัวหนึ่ง แต่หากยีนของโครโมโซมต้นแบบเป็น 1 จะใช้ยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวเดิม แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุชนิคยูนิฟอร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุชนิคยูนิฟอร์ม

### 5. การกลายพันธุ

การกลายพันธุเป็นตัวดำเนินการหนึ่งที่สร้างโครโมโซมใหม่จากโครโมโซมเดิมตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้โครโมโซมตัวใหม่นี้จะถูกเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยโดยการกลับค่าสถานะของยีนตัวอย่างเช่นในกรณีการกลายพันธุของโครโมโซมเลขฐานสองจะเกิดขึ้นโดยการกลับบิตของข้อมูล (Bit flipped) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การกลายพันธุ์ของโครโมโซมเลขฐานสองการกลายพันธุ์โดยการกลับบิตของข้อมูล

จากรูปที่ 2.21 บริเวณที่เกิดการกลายพันธุ์ คือ ตำแหน่งลูคัสที่ 4 ของโครโมโซม โดยยีนที่ตำแหน่งนี้จะถูกเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ซึ่งการเกิดการกลายพันธุ์จะไม่ได้เกิดขึ้นในทุกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซม แต่การกลายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation probability) การผสมข้ามพันธุ์จะเป็นตัวดำเนินการหลักที่มีผลอย่างมากต่อการคำนวณของจินเนติกอัลกอริทึม ส่วนการกลายพันธุ์แม้จะมีโอกาสในการเกิดน้อยกว่าจึงทำให้มีผลต่อการคำนวณน้อยแต่ก็เป็นตัวดำเนินการหนึ่งที่สามารถสร้างโครโมโซมที่มีความเหมาะสมกว่าประชากรรุ่นพ่อแม่ได้

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยของการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วิธีการหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ และกล่าวถึงที่มาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมาจากการใช้หลักการสมดุลมวลในการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และกล่าวถึงวิธีการระบุเอกลักษณ์ เพื่อทำการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณที่เหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทำให้ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองให้มากที่สุด โดยใช้วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาวิจัย การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ได้แบ่งการศึกษาวิจัยดังนี้

#### 3.1 วิธีวิจัย

##### 3.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ เป็นตะกอนเลนสดจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง โดยทำการศึกษาคูณสมบัติของตะกอนทั้งก่อนและหลังนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

ค่าพารามิเตอร์	
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen)	pH
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	TS
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids)	TDS
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	TSS
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids)	TVS
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids)	TFS
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand)	BOD
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand)	COD
9. ไนโตรเจน (Nitrogen)	N
10. ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	P
11. โพแทสเซียม (Potassium)	K
12. คาร์บอน (Carbon)	C
13. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter)	OM

### 3.1.2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพใช้ระบบการบำบัดหรือย่อยสลัดจ์ (Sludge) แบบไร้ออกซิเจน รูปแบบการย่อยอัตรามาตรฐาน (Standard – Rate Digestion) รูปแบบนี้จะเกิดการย่อยด้วยจุลชีพในสลัดจ์ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ชุดสำหรับหมักก๊าซชีวภาพใช้ถังพลาสติก PE (Polyethylene) สีน้ำเงิน โดยใส่ตะกอนเลนลงไปครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch) ภายในถังพลาสติกจะติดตั้งหัวโพรบวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และติดตั้งหัวโพรบวัดอุณหภูมิของตะกอนเลน

### 3.1.3 ระบบตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ

ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำ และใช้ชุดเคาท์เตอร์ (Counter) เป็นจำนวนรอบ เป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

### 3.1.4 ระบบบันทึกข้อมูล

บันทึกข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม Lab View ในการวัดค่าและบันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), อุณหภูมิ (T) และชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q)

### 3.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) เพื่อหาปริมาณของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ )

### 3.1.6 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน สามารถประมาณได้จากแบบจำลองที่มีผู้วิจัยศึกษาไว้แล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบเบตซ์ เกิดจากการทำสมดุลมวลสารซึ่งสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายกลายเป็นก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการโดยใช้โปรแกรม Matlab และเลือกใช้การค้นหาคำตอบของค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) วิเคราะห์ผลโดยการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองและพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)

3.1.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน การสะสมสุทธิของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพประมาณได้จากสมการที่ 2.11

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

การสะสมสุทธิของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพประมาณได้จากสมการที่ 2.12

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \mu X$$

ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพประมาณได้จากสมการที่ 2.16

$$Q = k_2 \mu X$$

อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (S), ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), อุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 2.17

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(\text{pH})\mu(T)\mu(Q) \dots$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ประมาณได้จากสมการของ Monod law (Monod, 1942) ดังสมการที่ 2.18

$$\mu(S) = \frac{\mu_{\max}S}{k_S + S}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณได้จากสมการของ Parabolic law (Rozzi, 1984) ดังสมการที่ 2.19

$$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิประมาณได้จากสมการของ Arrhenius-type law (Topiwala and Sinclair, 1971) ดังสมการที่ 2.20

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตประมาณได้จากสมการ 2.21

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$$



### 3.1.6.2 เครื่องมือที่ใช้ในการประมาณการ

การประมาณการค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรม Matlab และเลือกใช้การค้นหาคำตอบของค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) โดยใช้สมการที่ 2.11, 2.12, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 และ 2.21 ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องค้นหาคำตอบจำนวน 14 ตัวแปร การค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแสดงดังในรูปที่ 2.11 โดยการใส่ข้อมูลอินพุตที่ได้จากการทดลองคือ ปริมาณสารอินทรีย์ (S), ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), อุณหภูมิ (T) และผลผลิตก๊าซชีวภาพ  $Q(t)$  จากนั้นให้โปรแกรมทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ โดยอาศัยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับระบบจริงแล้วทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ให้ไปในทิศทางที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองลดลงคือ ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลอง  $Q(t)$  และผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  $\tilde{Q}(t)$  และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาคือ ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทั้ง 14 ตัวแปร

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- ชุดเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้สำหรับบันทึกเก็บข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), อุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q)
- เครื่อง pH มิเตอร์และหัวโพรบ pH ใช้สำหรับวัดและอ่านค่าของ pH ในถังหมักชีวภาพ
- เครื่องเทอร์โมมิเตอร์ หัวโพรบเทอร์โมคัปเปิลและหัวโพรบเทอร์มิสเตอร์ ใช้สำหรับวัดและอ่านค่าของอุณหภูมิ ในถังหมักก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิภายนอกถังหมัก
- ชุดวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ และเคาท์เตอร์นับจำนวนรอบ ใช้สำหรับตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ
- เครื่อง Gas Chromatography (GC) ใช้สำหรับวิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ
- ถังหมักก๊าซชีวภาพ ใช้สำหรับหมักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ
- ถังเก็บก๊าซชีวภาพ ใช้สำหรับเก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไว้ใช้ปรุงอาหารในครัวเรือน
- แท็งก์เก็บก๊าซชีวภาพ ใช้สำหรับเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มความดันออกไปใช้จุดไฟที่หัวเตาแก๊สหุงต้ม
- หัวเตาแก๊ส ใช้สำหรับจุดไฟปรุงอาหารในครัวเรือน
- เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับอัดก๊าซชีวภาพจากถังเก็บก๊าซไปไว้ในแท็งก์เก็บก๊าซเพื่อเพิ่มความดันให้ก๊าซชีวภาพไหลออกไปยังหัวเตาแก๊สหุงต้ม

### 3.3 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีการทดลองหมักตะกอนเลนหลายการทดลองดังนี้

#### 3.3.1 การทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

การทดลองครั้งนี้เป็นการเริ่มทำการทดลองครั้งแรกของการวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

##### 3.3.1.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร บ้านฉางหลวง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี และมีคุณสมบัติก่อนหมักก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของตะกอนเลนปกติก่อนหมักก๊าซชีวภาพ

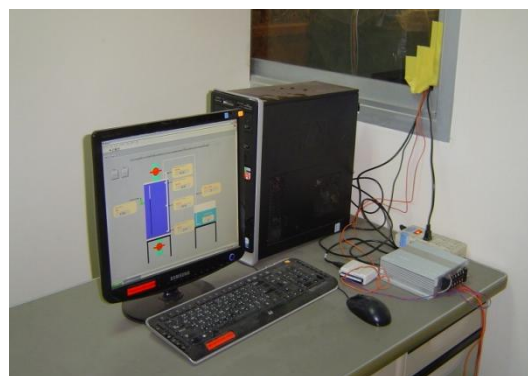
คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนปกติ
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : pH)	7.7
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS), (mg/l)	139,859
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS), (mg/l)	24,500
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS), (mg/l)	112,200
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS), (mg/l)	22,653
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS), (mg/l)	139,603
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD), (mg/l)	2,334
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD), (mg/l)	7,840

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของตะกอนเลนปกติก่อนหมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

คุณสมบัติของตะกอนเลนปกติก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนปกติ
9. ไนโตรเจน (Nitrogen : N), (mg/l)	4,300
10. ฟอสฟอรัส (Phosphorus : P), (mg/l)	6.24
11. โพแทสเซียม (Potassium : K), (mg/l)	816.5
12. คาร์บอน (Carbon : C), (mg/l)	42,700
13. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM), (mg/l)	73,500

### 3.3.1.2 ชุดการทดลอง

- ถังหมักก๊าซชีวภาพ ใช้ถังพลาสติก PE ขนาด 120 ลิตร ภายในถังหมักติดตั้งหัวโพรบวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และหัวโพรบวัดค่าอุณหภูมิ (T)
- ชุดตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ใช้หลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่ผลิตได้ และใช้เคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบเป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพโดยทำการเซตจำนวนรอบไว้ที่ 1 รอบเท่ากับก๊าซชีวภาพ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm<sup>3</sup>)
- การบันทึกข้อมูล บันทึกข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม Lab View ในการวัดค่าและบันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง, อุณหภูมิและปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยกำหนดให้โปรแกรมบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

### 3.3.1.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนเลนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรไปส่งไปในถังหมักก๊าซชีวภาพ ปริมาณ 80 ลิตร (109.6 กิโลกรัม) ปิดฝาถังหมักให้แน่น และเริ่มระบบที่เครื่องคอมพิวเตอร์ ให้ทำการบันทึกข้อมูล ระยะเวลาทำการทดลองหมัก 1 เดือน

### 3.3.2 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

การทดลองครั้งนี้ เป็นการทดลองเพื่อเพิ่มปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด เปรียบเทียบกัน คือ ผสมกากน้ำตาล 10% (Silva et al, 2009) และผสมยูเรียในอัตราส่วน 10%

#### 3.3.2.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร บ้านเขาไม้แก้ว อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง มีคุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและผสมยูเรียก่อนหมักก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ผสมกากน้ำตาล 10%	ผสมยูเรีย 10%
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : pH)	8.3	5.8	8.7
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS), (mg/l)	57,035	131,423	104,689
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS), (mg/l)	15,500	123,600	78,000
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS), (mg/l)	34,200	18,300	14,200
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS), (mg/l)	8,712	94,420	76,542
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS), (mg/l)	45,941	45,180	24,318
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD), (mg/l)	735	41,963	396

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและผสมยูเรียก่อนหมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ผสมกากน้ำตาล 10%	ผสมยูเรีย 10%
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD), (mg/l)	6,227.2	105,084	3,697.4
9. ไนโตรเจน (Nitrogen : N), (mg/l)	8,000	7,300	11,300
10. ฟอสฟอรัส (Phosphorus : P), (mg/l)	191.19	213.7	136.89
11. โพแทสเซียม (Potassium : K), (mg/l)	1,233	9,405	1,361
12. คาร์บอน (Carbon : C), (mg/l)	56,300	87,300	47,700
13. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM), (mg/l)	96,900	150,100	82,100

### 3.3.2.2 ชุดการทดลอง

- ถังหมักก๊าซชีวภาพใช้ถังพลาสติก PE ขนาด 30 ลิตร ภายในถังหมักติดตั้งหัวโพรบวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และหัวโพรบวัดค่าอุณหภูมิ (T)
- ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ใช้หลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่ผลิตได้ และใช้เคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบเป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการเซตจำนวนรอบไว้ที่ 1 รอบเท่ากับก๊าซชีวภาพ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm<sup>3</sup>)
- การบันทึกข้อมูล บันทึกข้อมูลโดยการจดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง, อุณหภูมิ และจำนวนรอบของเคาท์เตอร์ ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมผสมยูเรีย

### 3.3.2.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนเลนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร แบ่งออกเป็น 3 ถังการทดลอง ถังละ 15 ลิตร

ถังที่ 1 หมักตะกอนเลนปกติ 15 ลิตร

ถังที่ 2 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% โดยใช้ตะกอนเลน 13.5 ลิตร (18.495 กิโลกรัม) และผสมกากน้ำตาล 1.5 ลิตร (2.055 กิโลกรัม) ปริมาตรรวม 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม)

ถังที่ 3 หมักตะกอนเลนผสมยูเรีย 10% โดยใช้ตะกอนเลน 13.5 ลิตร และผสมยูเรีย 1.5 ลิตร ปริมาตรรวม 15 ลิตร

### 3.3.3 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

การทดลองครั้งนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเพิ่มเติมจากการทดลองที่ 3.3.2 เนื่องจากการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลทำให้เกิดก๊าซเร็วและมาก ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงทำการเปรียบเทียบการผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือ ผสมกากน้ำตาล 4%, 8% และ 12% เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดของก๊าซชีวภาพ

#### 3.3.3.1 คุณสมบัติของตะกอน

ตะกอนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง มีคุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลก่อนหมักก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล		
		4%	8%	12%
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : pH)	8.5	7.2	6.8	6.4
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS), (mg/l)	91,439	125,748	182,449	140,399
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS), (mg/l)	35,300	79,000	122,900	84,750
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS), (mg/l)	56,139	46,748	59,549	55,649

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลก่อนหมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล		
		4%	8%	12%
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS), (mg/l)	18,727	55,138	103,590	52,067
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS), (mg/l)	72,712	70,610	78,859	88,332
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD), (mg/l)	1,830	37,000	41,655	52,800
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD), (mg/l)	4,670.4	50,596	97,300	151,788
9. ไนโตรเจน (Nitrogen : N), (mg/l)	3,100	3,800	3,600	3,600
10. ฟอสฟอรัส (Phosphorus : P), (mg/l)	6.25	2.15	2.00	3.00
11. โพแทสเซียม (Potassium : K), (mg/l)	1,448.5	3,055	3,256.5	7,280
12. คาร์บอน (Carbon : C), (mg/l)	22,900	67,300	68,300	79,500
13. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM), (mg/l)	50,200	115,800	118,500	136,700

### 3.3.3.2 ชุดการทดลอง

ใช้ชุดการทดลองเดียวกันกับชุดการทดลอง 3.3.2



รูปที่ 3.4 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล

### 3.3.3.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง แบ่งออกเป็น 3 ถังการทดลอง ถึงละ 15 ลิตร

ถังที่ 1 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% โดยใช้ตะกอนเลน 14.4 ลิตร (19.728 กิโลกรัม) และผสมกากน้ำตาล 0.6 ลิตร (0.822 กิโลกรัม) มีปริมาตรรวม 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม)

ถังที่ 2 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% โดยใช้ตะกอนเลน 13.8 ลิตร (18.906 กิโลกรัม) และผสมกากน้ำตาล 1.2 ลิตร (1.644 กิโลกรัม) มีปริมาตรรวม 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม)

ถังที่ 3 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% โดยใช้ตะกอนเลน 13.2 ลิตร (18.084 กิโลกรัม) และผสมกากน้ำตาล 1.8 ลิตร (2.466 กิโลกรัม) มีปริมาตรรวม 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม)

### 3.3.4 การทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเพิ่มเติม จากการทดลองที่ 3.3.3 เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ได้มาจากการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล มีปริมาณของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) น้อย ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (Panishnumsin et al, 2010) โดยผสมมูลสุกร 5%, 10% และ 20% เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดของก๊าซชีวภาพ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ )

#### 3.3.4.1 คุณสมบัติของตะกอน

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร บ้านเขาไม้แก้ว อำเภอเสีเกา จังหวัดตรัง มีคุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ แสดงตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมมูลสุกรก่อนหมักก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร		
		5%	10%	20%
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : pH)	8.4	7.8	7.6	7.3
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS), (mg/l)	50,126	40,647	53,099	61,768
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS), (mg/l)	24,000	23,500	24,250	14,125
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS), (mg/l)	26,126	17,147	28,849	47,643



ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมมูลสุกรก่อนหมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

คุณสมบัติของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพ	ปกติ	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร		
		5%	10%	20%
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS), (mg/l)	38,569	11,472	15,669	24,225
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS), (mg/l)	11,557	29,175	37,430	37,543
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD), (mg/l)	2,820	4,440	5,160	8,460
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD), (mg/l)	3,240	7,500	7,020	12,060
9. ไนโตรเจน (Nitrogen : N), (mg/l)	7,000	9,200	8,700	10,900
10. ฟอสฟอรัส (Phosphorus : P), (mg/l)	193.31	185.23	185.04	179.9
11. โพแทสเซียม (Potassium : K), (mg/l)	1,171	1,374	1,372	1,879
12. คาร์บอน (Carbon : C), (mg/l)	38,600	50,100	56,400	76,600
13. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM), (mg/l)	66,400	86,100	97,000	131,800

#### 3.3.4.2 ชุดการทดลอง

ใช้ชุดการทดลองเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 3.3.2



รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองหมักตะกอนผสมมูลสุกร

### 3.3.4.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนเลนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร แบ่งออกเป็น 3 ถังการทดลอง ถังละ 20 กิโลกรัม (15.06 ลิตร)

ถังที่ 1 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% โดยใช้ตะกอนเลน 19 กิโลกรัม (13.87 ลิตร) ผสมมูลสุกร 1 กิโลกรัม (0.93 ลิตร) มีน้ำหนักรวม 20 กิโลกรัม

ถังที่ 2 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% โดยใช้ตะกอนเลน 18 กิโลกรัม (13.14 ลิตร) ผสมมูลสุกร 2 กิโลกรัม (1.85 ลิตร) มีน้ำหนักรวม 20 กิโลกรัม

ถังที่ 3 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% โดยใช้ตะกอนเลน 16 กิโลกรัม (11.68 ลิตร) ผสมมูลสุกร 4 กิโลกรัม (3.7 ลิตร) มีน้ำหนักรวม 20 กิโลกรัม

### 3.3.5 การทดลองหมักตะกอนเลนปกติ แบบมีการกวนผสมและไม่กวนผสม

การทดลองครั้งนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพระหว่างการหมักตะกอนเลนปกติแบบมีการผสม และไม่มีการกวนผสม ดังนั้นจึงไม่ได้วิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลน และไม่ได้ตรวจวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ขณะทำการทดลอง มีการวัดและเก็บข้อมูลเฉพาะอุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q) เท่านั้น

#### 3.3.5.1 ตะกอนเลน

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร บ้านเขาไม้แก้ว อำเภอเสีเกา จังหวัดตรัง

#### 3.3.5.2 ชุดการทดลอง

ใช้ชุดการทดลองเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 3.3.2 แต่มีการดัดแปลงถังหมักที่ 1 ใหม่ โดยทำการติดตั้งใบกวนผสมและติดตั้งมอเตอร์เพื่อใช้เป็นต้นกำลังของการกวนผสมตะกอนขณะหมักก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบมีการกวนผสมและไม่กวนผสม

### 3.3.5.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนเลนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร แบ่งออกเป็น 2 ถึงการทดลอง

ถังที่ 1 ใส่ตะกอนเลนลงไป 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม) หมักก๊าซแบบมีการกวนผสมโดยใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาควบคุมการทำงานของมอเตอร์กวน โดยกำหนดให้มีการกวนผสมทุก ๆ 8 ชั่วโมง กวนครั้งละ 15 นาที ตลอดการทดลอง

ถังที่ 2 ใส่ตะกอนเลนลงไป 15 ลิตร (20.55 กิโลกรัม) และไม่มีการกวนผสม

### 3.3.6 การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

การทดลองครั้งนี้ เป็นการทดลองหมักก๊าซชีวภาพเพื่อนำก๊าซไปใช้ปรุงอาหารในครัวเรือน โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.3.4 (หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%) เนื่องจากมีปริมาณการเกิดก๊าซและปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเหมาะสมกว่าการทดลองอื่น ๆ และไม่ได้วิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลน ไม่ได้ตรวจวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ขณะทำการทดลองมีการวัดและเก็บข้อมูลเฉพาะอุณหภูมิ (T) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ (Q) เท่านั้น

#### 3.3.6.1 ตะกอนเลน

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ นำมาจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกร บ้านเขาไม้แก้ว อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง

#### 3.3.6.2 ชุดการทดลอง

- ถังหมักก๊าซชีวภาพใช้ถังพลาสติก PE ขนาด 700 ลิตร จำนวน 4 ถัง ที่ฝาถังทุกถังทำเป็นถุงพลาสติกคลุมไว้สำหรับกักเก็บก๊าซไว้ในถังหมัก เพื่อให้เกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ของระหมักแบบไร้ออกซิเจน



รูปที่ 3.7 ชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

- ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ให้หลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่ผลิตได้ และใช้เคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบเป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการ เซตจำนวนรอบไว้ที่ 1 รอบเท่ากับก๊าซชีวภาพ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm<sup>3</sup>) และนำก๊าซชีวภาพที่ ผลิตได้ทั้ง 4 ถัง มาตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซรวมกัน



รูปที่ 3.8 ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

- การบันทึกข้อมูล บันทึกข้อมูลโดยการจดจำนวนรอบของเคาท์เตอร์ และ อุณหภูมิทุกวันตลอดการทดลอง

- ถุงเก็บก๊าซชีวภาพ ทำจากพลาสติก PVC สีดำขนาดกว้าง 1.8 เมตร ยาว 10 เมตร สามารถเก็บก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 10 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.9 ถุงเก็บก๊าซชีวภาพ

- แท็งก์เก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มความดันออกไปใช้งานที่หัวเตาแก๊ส ใช้หลักการแทนที่น้ำของก๊าซโดยใช้ถังพลาสติก PE จำนวน 2 ถัง ขนาด 3,000 ลิตร และ 1,000 ลิตร ถังขนาด 3,000 ลิตร ตัดเปิดปากถังให้กว้างเพื่อนำถังขนาด 1,000 ลิตรใส่ลงไปข้างใน และถังขนาด 1,000 ลิตร ตัดปากถังที่มีเกลียวออกแล้วเชื่อมปิดให้สนิท และเจาะรูใส่วาล์วสำหรับนำก๊าซออกไปใช้งานที่ก้นถังเจาะเปิดออกให้กว้างเว้นขอบไว้ประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อไม่ให้ถังเสีรูปรอง จากนั้นนำถังขนาด 1,000 ลิตร สวมลงในถังขนาด 3,000 ลิตร ระหว่างถัง 2 ถังทำเป็นรางและแกนบังคับการเลื่อนขึ้นลงของถังขนาด 1,000 ลิตร ต่อท่อก๊าซชีวภาพเข้าไปที่ก้นถังขนาด 3,000 ลิตร โดยให้ปลายท่อก๊าซอยู่ที่ตรงกลางและล่างสุดของถัง (ก้นถัง) ชั้นตอนสุดท้ายก็เติมน้ำให้เต็มถังขนาด 3,000 ลิตร (ถังขนาด 1,000 ลิตร ก็จะจมอยู่ในน้ำ) เมื่อก๊าซชีวภาพไหลเข้าไปในแท็งก์เก็บก๊าซ ถังขนาด 1,000 ลิตร ก็จะยกตัวลอยขึ้น นำวาล์วหนักไปวางกดทับบนถัง 1,000 ลิตร ก็จะทำให้ก๊าซชีวภาพมีแรงดันไหลออกไปยังหัวเตาแก๊สหุงต้ม



รูปที่ 3.10 แท็งก์เก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มความดัน

- เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและคอมเพรสเซอร์ของแอร์รถยนต์ ใช้สำหรับอัดก๊าซชีวภาพจากถังเก็บก๊าซไปไว้ในแท็งก์เก็บก๊าซก่อนนำก๊าซออกไปใช้งาน



รูปที่ 3.11 เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ

- หัวเตาแก๊สหุงต้ม ใช้สำหรับปรุงอาหารในครัวเรือน โดยทำการดัดแปลงท่อทางเข้าของแก๊สที่หัวเตาให้กว้างและยาวขึ้น เพื่อความเหมาะสมกับก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 3.12 หัวเตาแก๊สหุงต้ม

### 3.3.6.3 วิธีการทดลอง

นำตะกอนเลนที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรผสมมูลสุกร 20% ใสลงไป ในถังหมักก๊าซทั้ง 4 ถัง มีปริมาตรรวมต่อถัง 600 ลิตร (787 กิโลกรัม) ใช้ตะกอนเลน 480 ลิตร (657.6 กิโลกรัม) ผสมมูลสุกร 120 ลิตร (129.6 กิโลกรัม)

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบคทีเรียของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยใช้โปรแกรม Matlab และเลือกใช้การค้นหาคำตอบด้วยวิธี จินเนติกอัลกอริทึม ดังแสดงในภาคผนวก ๓ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนคือ ค่าของอินทรีย์วัตถุ และผลที่ได้จากการทดลองคือ อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ และได้กำหนดจำนวนประชากรไว้ที่ 100, จำนวนรอบไว้ที่ 100000 รอบ, กำหนดค่า  $E_1=16000$  J/g.mole,  $E_2=34500$  J/g.mole และ  $R=1.98702411342312$  J/g เพื่อประมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลน ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ วิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ และการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการทดลองวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

##### 4.1.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

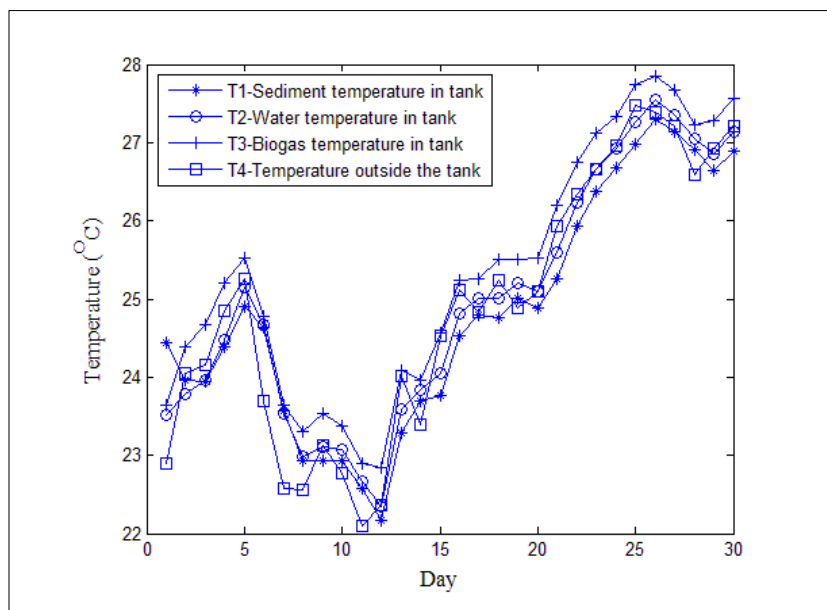
คุณสมบัติของตะกอนเลนหลังหมักก๊าซชีวภาพ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS), ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS), ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS), ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (TFS), ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (BOD), ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (COD) และโปตัสเซียม (K) มีค่าลดลง 0.2, 123,881 mg/l, 14,800 mg/l, 106,450 mg/l, 20,203 mg/l, 128,681 mg/l, 2,010 mg/l, 6,643 mg/l และ 154 mg/l ตามลำดับ และมีค่าไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), คาร์บอน (C), และอินทรีย์วัตถุ (OM) มีค่าเพิ่ม 700 mg/l, 130.71 mg/l, 4,600 mg/l และ 7,800 mg/l ตามลำดับ

##### 4.1.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

- อุณหภูมิ

จากกราฟรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายนอกถึงหมักมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 24.87 °C และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังหมักของ ตะกอนเลน, น้ำและก๊าซชีวภาพมีค่า 24.8 °C, 24.95 °C และ 25.33 °C ตามลำดับ และตลอดการทดลอง 1 เดือน อุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 22.1 – 27.85 °C

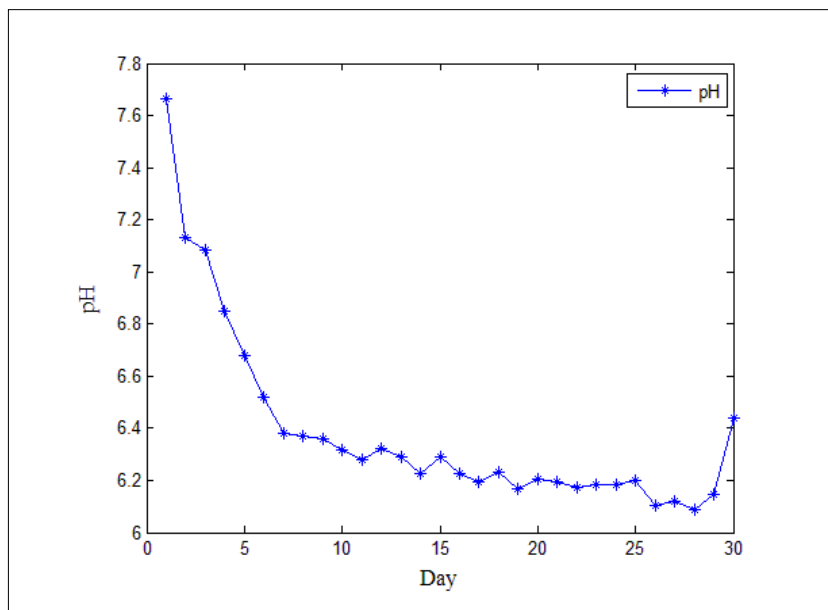




รูปที่ 4.1 อุณหภูมิ (T)

- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

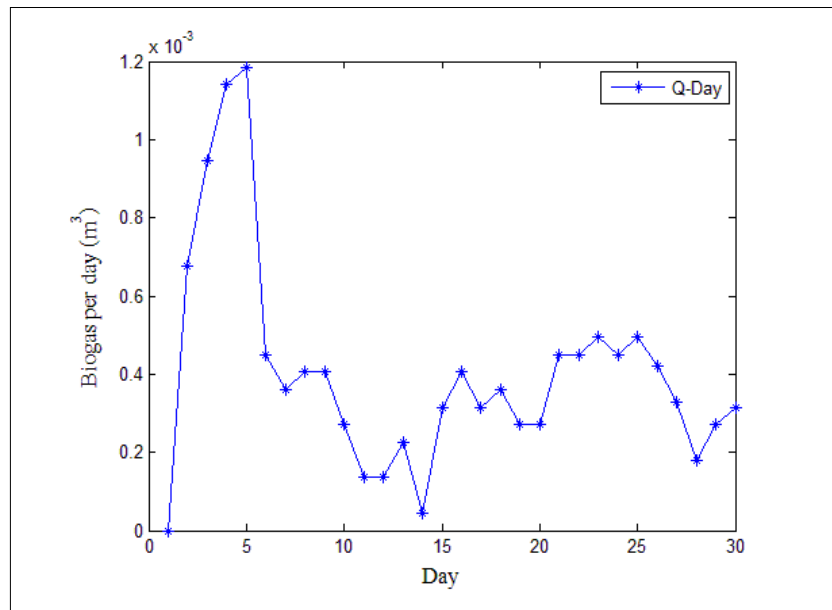
จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเริ่มต้นหมักตะกอนเลน pH มีค่าเท่ากับ 7.66 ในช่วงวันที่ 1 – 7 ของการทดลอง ค่า pH ลดลงทุกวันและลดลงเร็วมาก โดยในวันที่ 7 pH มีค่าเท่ากับ 6.38 แสดงว่าแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในช่วงวันที่ 8 -28 ของการทดลอง pH มีค่าลดลงเล็กน้อยและสลับ เพิ่มขึ้นบ้างบางวัน โดยในวันที่ 28 ของการทดลอง pH มีค่าเท่ากับ 6.08 และในช่วงของวันที่ 29 – 30 ของการทดลอง pH เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง มีผลให้แบคทีเรียลดการย่อยสลาย โดยในวันที่ 30 ของการทดลอง pH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6.43 และตลอดเวลาการทดลอง 1 เดือน pH มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.08 – 7.66



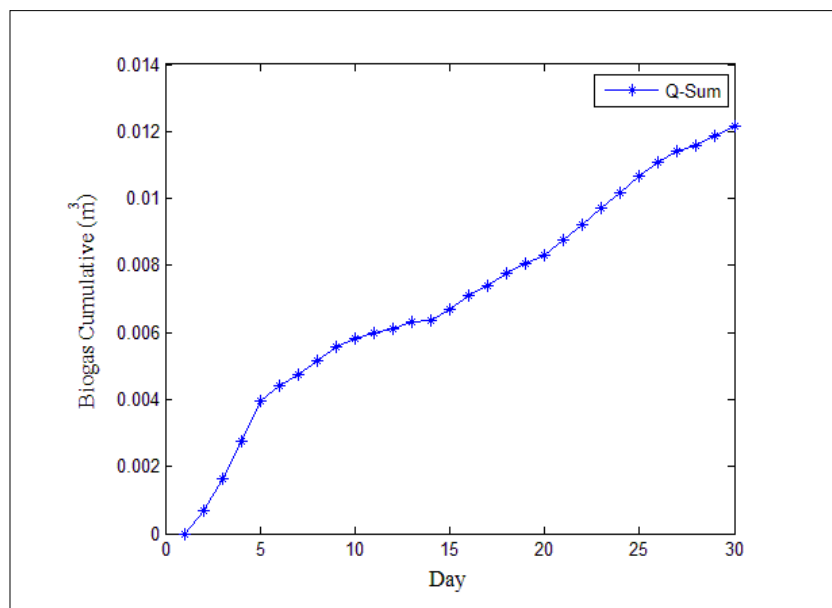
รูปที่ 4.2 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง pH

- ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเกิดขึ้นเร็วมาก เมื่อเริ่มทำการหมักในวันถัดมามีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น  $0.000675 \text{ m}^3$  และเพิ่มปริมาณการเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ ในวันที่ 5 ของการทดลองก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีปริมาณ  $0.00118 \text{ m}^3$  จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพลดน้อยลงเนื่องจากอุณหภูมิลดลง หลังจากวันที่ 14 ของการทดลองก๊าซชีวภาพเกิดเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อครบ 1 เดือนของการทดลอง ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.012165 \text{ m}^3$  เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  $0.0004055 \text{ m}^3/\text{d}$  และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) มีปริมาณ 44.34%, 4.91% และ 17.23% ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



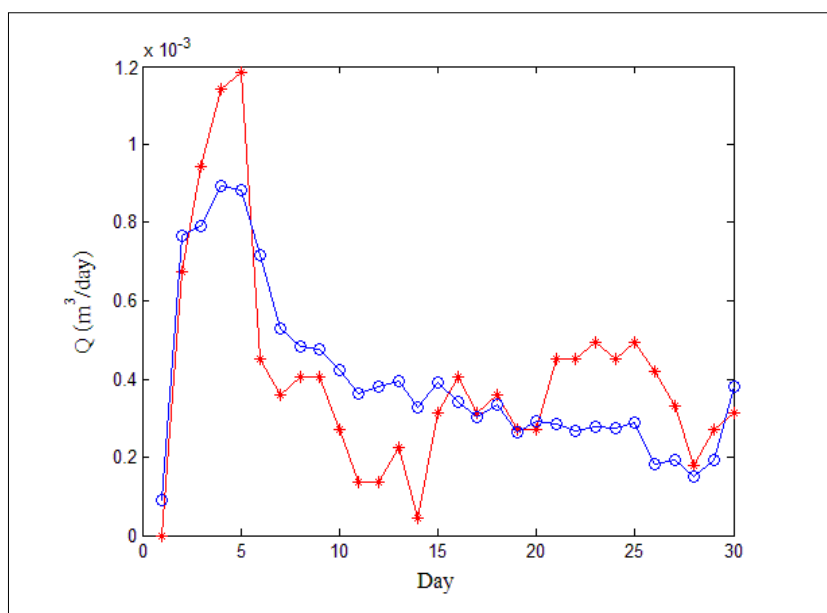
รูปที่ 4.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

#### 4.1.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนปกติ คือ ค่าอินทรีย์วัตถุ 73.5 g/l และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณการค่าสัมประสิทธิ์และศึกษาผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง, ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.1

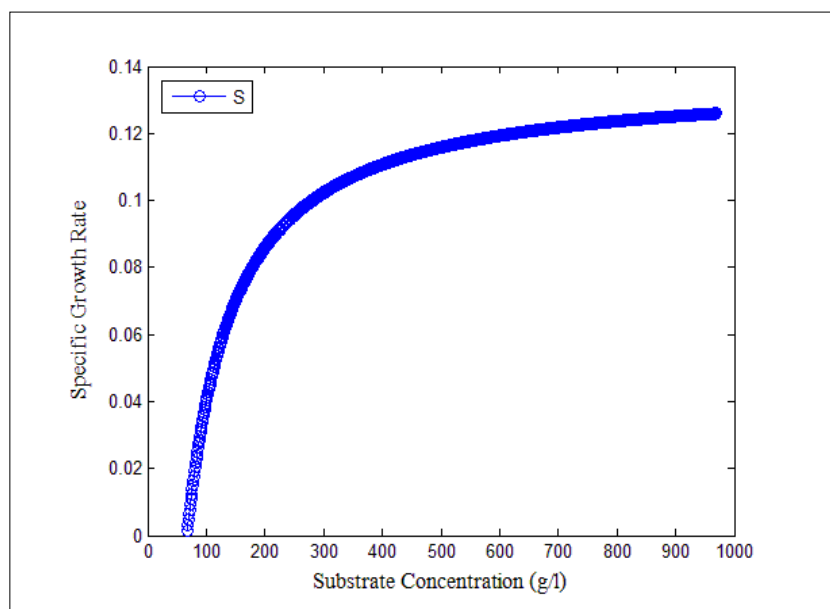
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนปกติ

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2\mu X$ (2.16)	$k_2=5$ $X=5$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max}S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=0.9316$ $k_S=11.5905$ $k_{(S)}=(-0.7974)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$ (2.19)	$a=(-0.9949)$ $b=13.5861$ $c=45.6025$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1\exp(-E_1/RT) - a_2\exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1=1.68E^{11}$ $a_2=(-5.10E^{23})$ $a_3=(-0.0444)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q=12$ $k_{(Q)}=19.434$



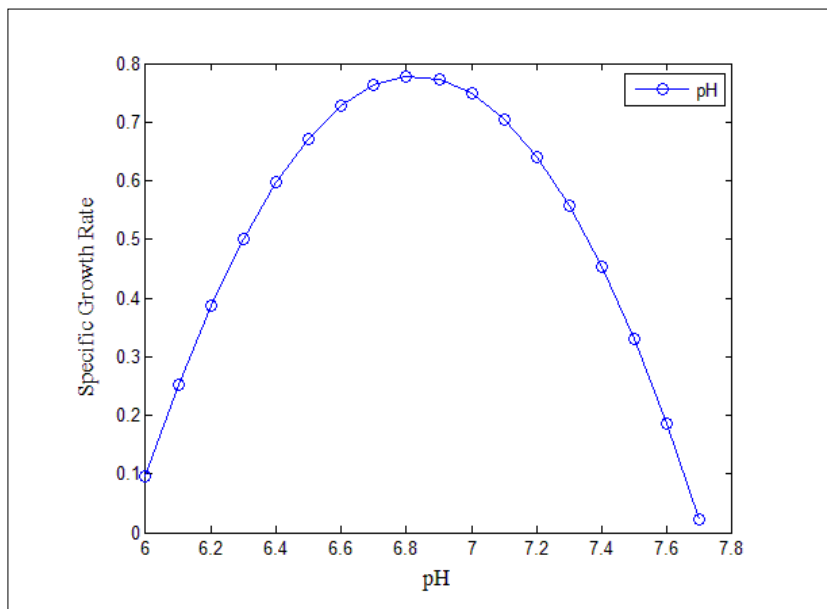
รูปที่ 4.5 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนปกติ ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2=5$  และ  $X=5$



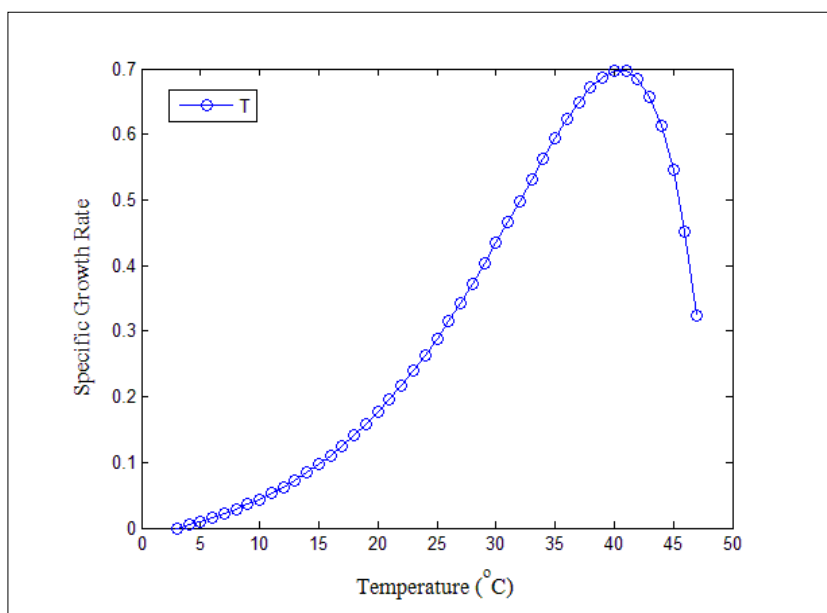
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)

จากรูปที่ 4.6 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนปกติด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=0.9316$ ,  $k_s=11.5905$  และ  $k_{(S)}=(-0.7974)$



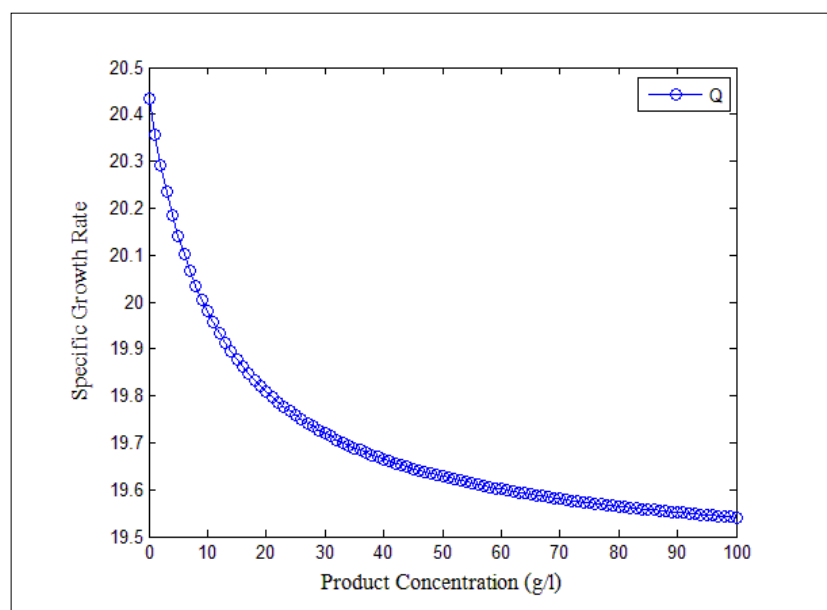
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

จากรูปที่ 4.7 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนปกติด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9949)$ ,  $b=13.5861$  และ  $c=45.6025$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)

จากรูปที่ 4.8 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนปกติด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=1.68E^{11}$ ,  $a_2=(-5.10E^{23})$  และ  $a_3=(-0.0444)$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q)

จากรูปที่ 4.9 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนปกติด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_0=12$  และ  $k_{(0)}=19.434$

## 4.2 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

### 4.2.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

- ตะกอนเลนปกติ หลังการหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนเลนมีค่า pH, TS, TDS, TSS, TVS, TFS, BOD, COD, N, K, C และ OM ลดลง 1.2, 43,826 mg/l, 6,610 mg/l, 28,820 mg/l, 6,642 mg/l, 4,802 mg/l, 650 mg/l, 5,457.8 mg/l, 7,300 mg/l, 156 mg/l, 23,700 mg/l และ 40,700 mg/l ตามลำดับ และมีค่า P เพิ่มขึ้น 62.24 mg/l

- ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนเลนมีค่า pH, TS, TDS, TSS, TVS, TFS, COD, N, P, K, C และ OM ลดลง 0.4, 2,623 mg/l, 54,325 mg/l, 5,425 mg/l, 6,841 mg/l, 11,959 mg/l, 29,972 mg/l, 6,700 mg/l, 204.09 mg/l, 1,859 mg/l, 16,400 mg/l และ 28,200 mg/l ตามลำดับ และมีค่า BOD เพิ่มขึ้น 3,675 mg/l

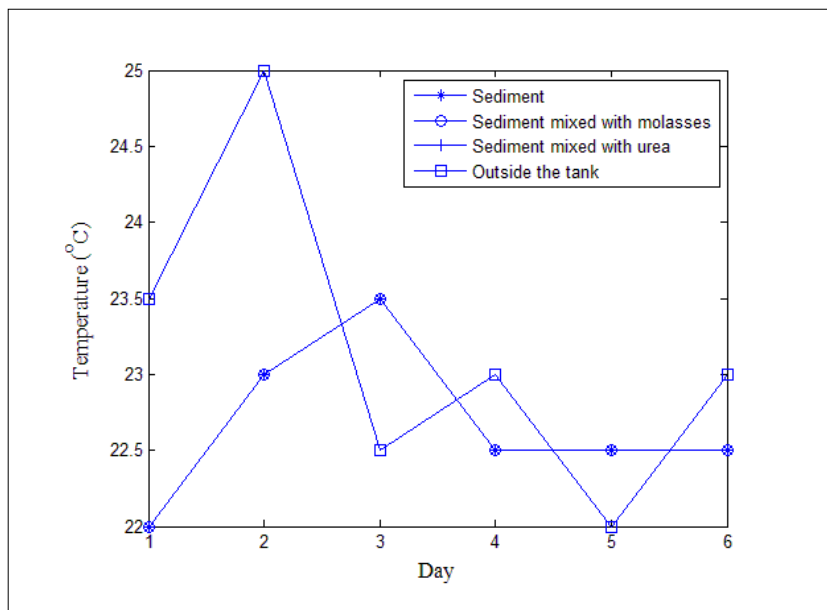
- ตะกอนเลนผสมยูเรีย 10% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนมีค่า TS, TDS, TSS, TVS, TFS, N, K, C และ OM ลดลง 79,280 mg/l, 62,500 mg/l, 2,850 mg/l, 69,457 mg/l, 5,994 mg/l, 6,600 mg/l, 322 mg/l, 14,300 mg/l และ 24,600 mg/l ตามลำดับ และมีค่า pH, BOD, COD และ P เพิ่มขึ้น 0.6, 633 mg/l, 1,065.8 mg/l และ 95.39 mg/l ตามลำดับ

### 4.2.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

- อุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของตะกอนทั้ง 3 ถังมีค่าเท่ากัน โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 22.66 °C และอุณหภูมิภายนอกถังหมักมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 25.16 °C ตลอดการทดลอง 1 เดือน อุณหภูมิอยู่ในช่วง 22 – 25 °C

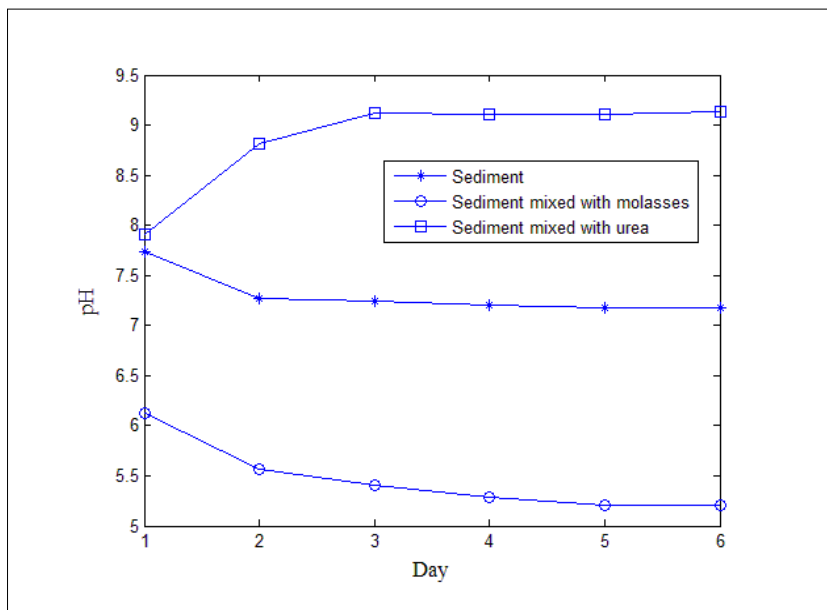




รูปที่ 4.10 อุณหภูมิ (T)

- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

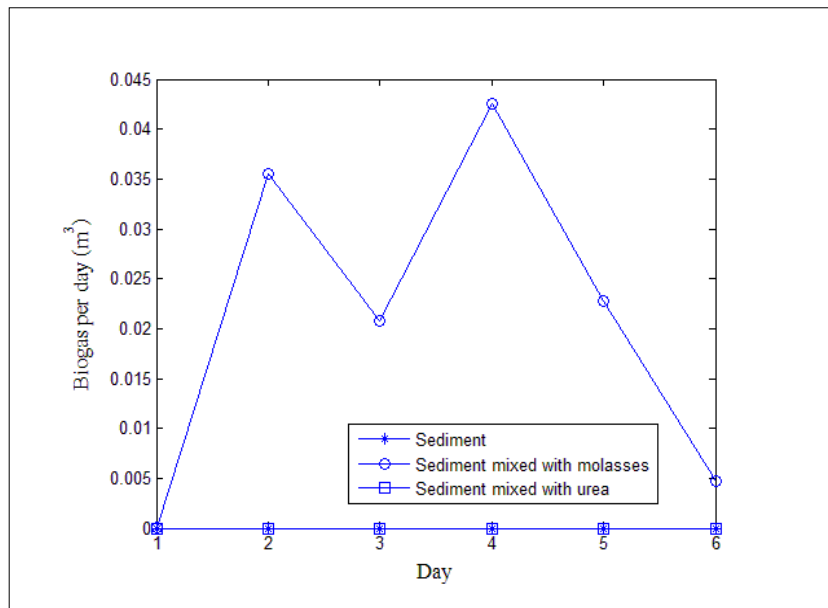
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่า pH ของตะกอนเลนปกติมีค่าเป็นกลางอยู่ในช่วง 7.18 - 7.73 ส่วนค่า pH ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลมีค่าเป็นกรดอยู่ในช่วง 5.20 - 6.12 และค่า pH ของตะกอนเลนผสมยูเรียมีค่าเป็นด่าง อยู่ในช่วง 7.91 - 9.13



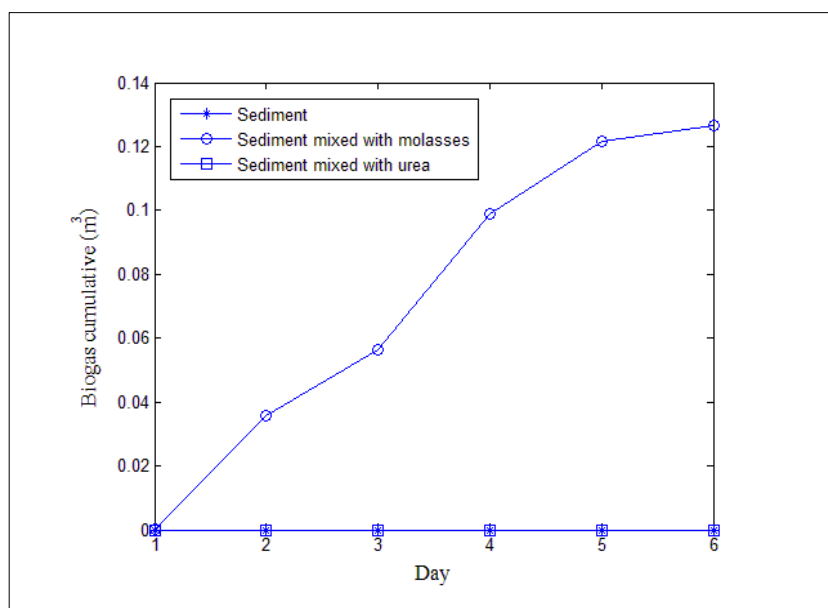
รูปที่ 4.11 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

- ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าตะกอนเลนปกติและตะกอนเลนผสมยูเรียไม่เกิดก๊าซชีวภาพ แต่ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลเกิดก๊าซชีวภาพ โดยในวันแรกของการทดลองเกิดก๊าซขึ้นมา  $0.00006 \text{ m}^3$  และเกิดก๊าซมากขึ้นต่อเนื่อง วันที่ 4 ของการทดลองเกิดก๊าซมากที่สุด  $0.04216 \text{ m}^3$  ตลอดการทดลอง ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นทั้งหมด 6 วัน ได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.12641 \text{ m}^3$  เฉลี่ยได้อัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพ  $0.02107 \text{ m}^3/\text{d}$  และมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 1.61%, ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) 24.4% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 38.03 ppm



รูปที่ 4.12 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



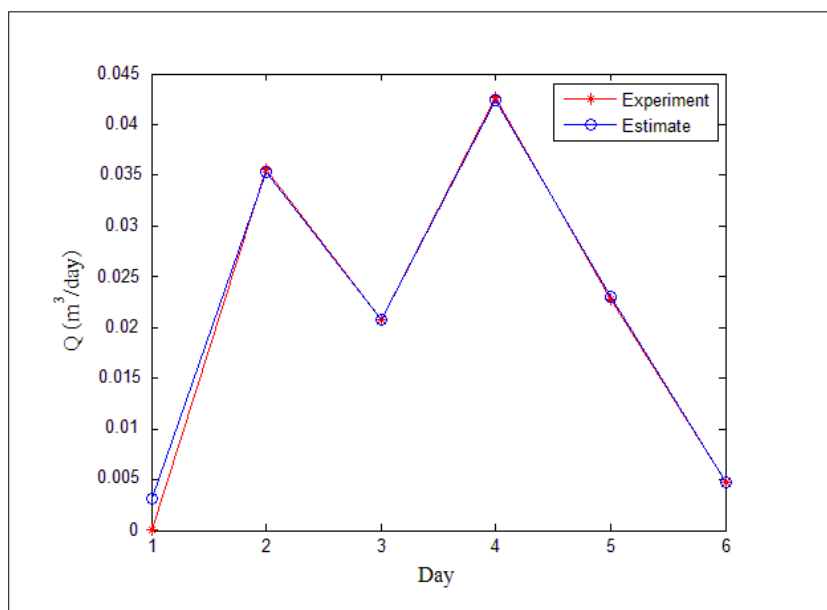
รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

#### 4.2.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% คือ ค่าอินทรีย์วัตถุ 150.1 g/l และผลที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิ, ความเป็นกรดเป็นด่าง และ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ มาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณการค่าสัมประสิทธิ์ และศึกษาผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง, ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ดังแสดงในรูปที่ 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.2

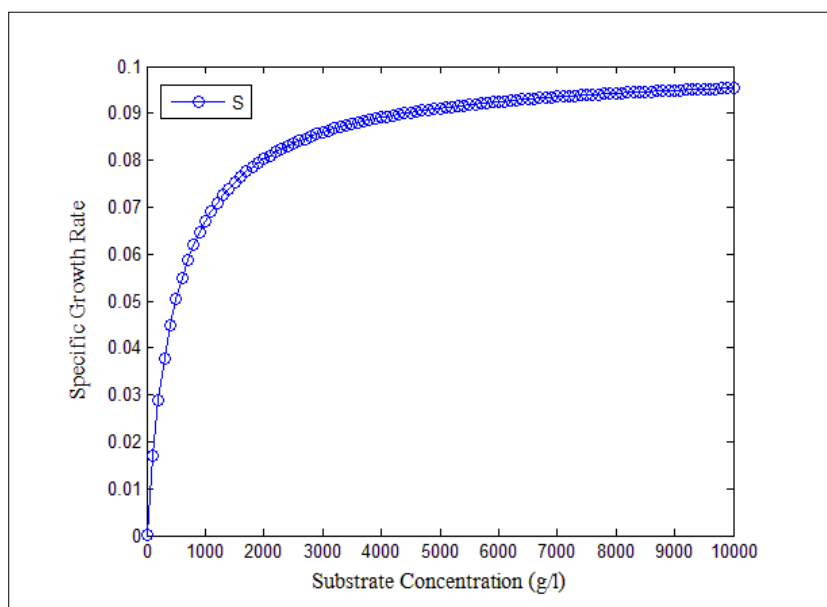
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2 \mu X$ (2.16)	$k_2=0.0082$ $X=0.003$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=0.0071$ $k_S=2.8013$ $k_{(S)}=0.0094$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$ (2.19)	$a=(-0.9999)$ $b=13.9972$ $c=(-47.9904)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1=2.32E^{11}$ $a_2=(-8.96E^{24})$ $a_3=(-0.0276)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q=1.2340$ $k_{(Q)}=0.0008$



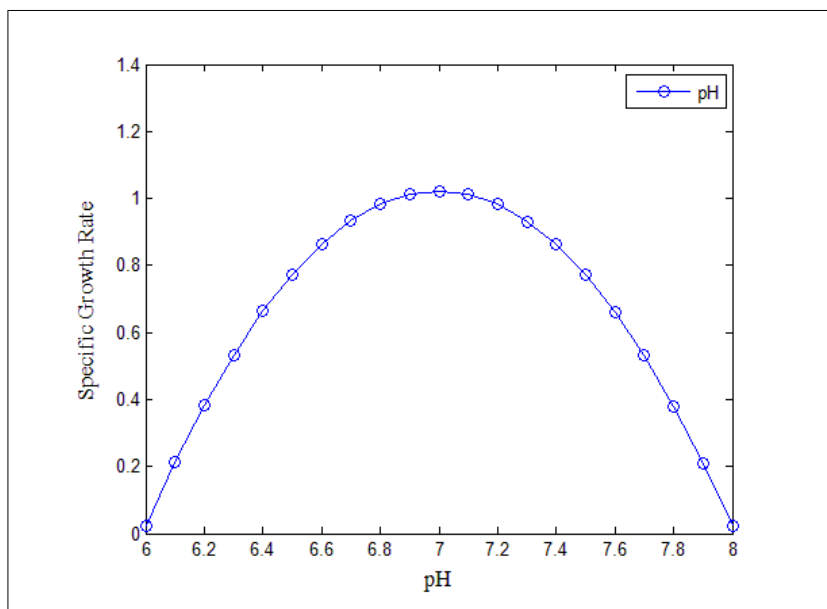
รูปที่ 4.14 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.14 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2=0.0082$  และ  $X=0.003$



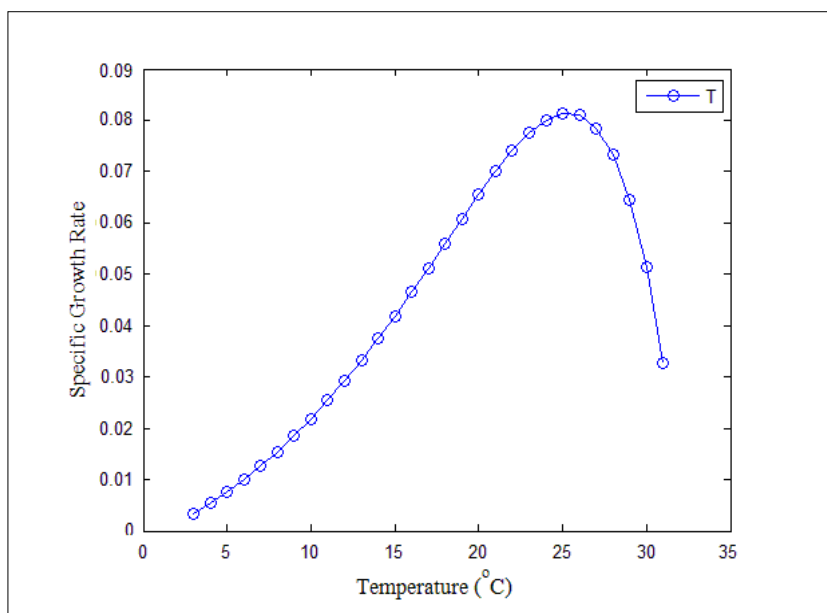
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)

จากรูปที่ 4.15 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=0.0071$ ,  $k_s=2.8013$  และ  $k_{(S)}=0.0094$



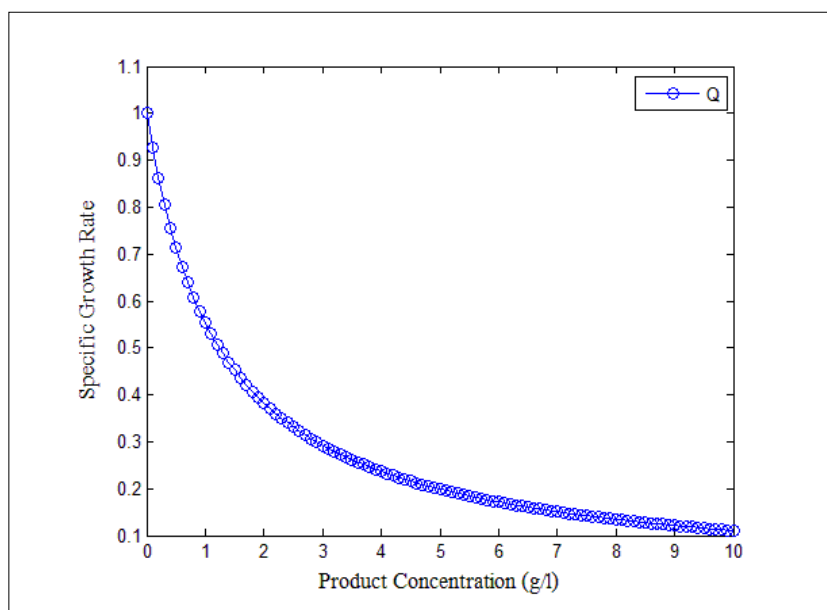
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

จากรูปที่ 4.16 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9999)$ ,  $b=13.9972$  และ  $c=(-47.9904)$



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)

จากรูปที่ 4.17 เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=2.32E^{11}$ ,  $a_2=(-8.96E^{24})$  และ  $a_3=(-0.0276)$



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q)

จากรูปที่ 4.18 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=1.2340$  และ  $k_Q=0.0008$

### 4.3 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

#### 4.3.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

- ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนเลนมีค่า pH, TS, TDS, TSS, TFS, BOD, COD, C และ OM ลดลง 1.6, 30,907 mg/l, 17,255 mg/l, 13,688 mg/l, 31,918 mg/l, 15,340 mg/l, 87,266 mg/l, 20,700 mg/l และ 35,600 mg/l ตามลำดับ และมีค่า TVS, N, P และ K เพิ่มขึ้น 1,011 mg/l, 1,100 mg/l, 4.52 mg/l และ 2,116 mg/l ตามลำดับ

- ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนเลนมีค่า pH, TS, TDS, TSS, TVS, TFS และ COD ลดลง 0.8, 76,618 mg/l, 43,750 mg/l, 32,868 mg/l, 44,495 mg/l, 32,123 mg/l และ 6,590 mg/l ตามลำดับ และมีค่า BOD, N, P, K, C และ OM เพิ่มขึ้น 14,595 mg/l, 1,600 mg/l, 0.01 mg/l, 3,609 mg/l, 2,900 mg/l และ 4,000 mg/l ตามลำดับ

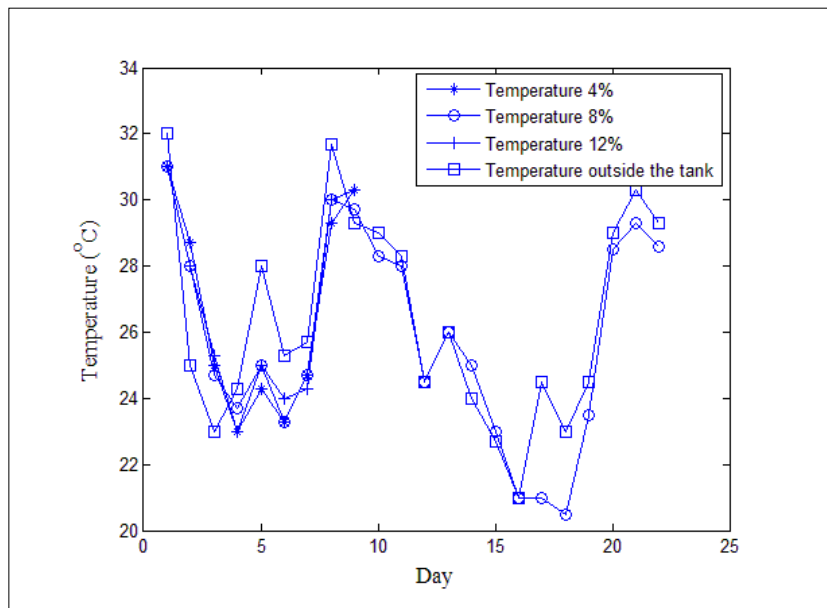
- ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วตะกอนเลนมีค่า pH, TSS, TFS และ COD ลดลง 2, 40,608 mg/l, 33,011 mg/l และ 30,198 mg/l ตามลำดับและมีค่า TS, TDS, TVS, BOD, N, P, K, C และ OM เพิ่มขึ้น 7,710 mg/l, 48,325 mg/l, 40,728 mg/l, 1,575 mg/l, 1,300 mg/l, 19.24 mg/l, 722.5 mg/l, 9,400 mg/l และ 16,200 mg/l ตามลำดับ

#### 4.3.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

- อุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าช่วงวันที่ 1 – 4 ของการทดลองอุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศลดลง มีผลทำให้อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมักลดลงตามไปด้วย และค่อยเพิ่มขึ้นหลังจากวันที่ 6 ของการทดลองจนถึงวันที่ 8 ของการทดลอง ช่วงวันที่ 9 – 16 อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงทุกวัน โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่  $25.89^{\circ}\text{C}$  และตลอดการทดลอง 22 วัน อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง  $20.5 - 31^{\circ}\text{C}$

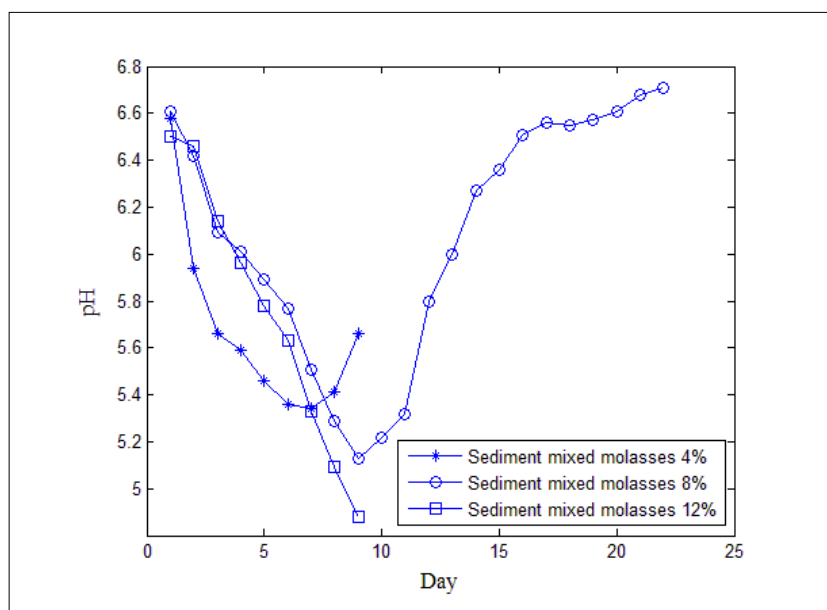




รูปที่ 4.19 อุณหภูมิ (T)

- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

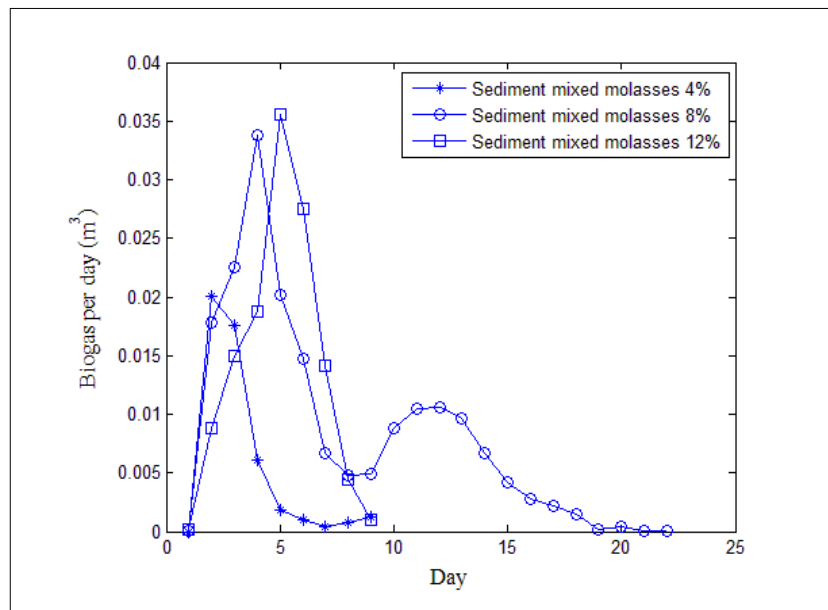
จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเริ่มต้นหมักก๊าซชีวภาพ pH มีค่าลดลงทุกวัน แสดงว่าเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ผลิตกรด pH จึงมีค่าลดต่ำลง ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% pH ลดลงต่ำสุดในวันที่ 7 ของการทดลองมีค่า 5.34 ในวันที่ 8 – 9 ของการทดลองเริ่มเพิ่มขึ้น ส่วนตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% pH ลดลงต่ำสุดในวันที่ 9 ของการทดลองมีค่า 5.13 ช่วงวันที่ 10 – 22 ของการทดลอง pH มีค่าเพิ่มขึ้นทุกวัน ในวันที่ 22 วันสุดท้ายของการทดลอง pH มีค่า 6.71 และตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% pH ลดต่ำลงทุกวันทั้ง 9 วันของการทดลอง โดยในวันสุดท้าย pH มีค่า 4.98 ตลอดการทดลองมีค่า pH อยู่ในช่วง 4.88 – 6.71



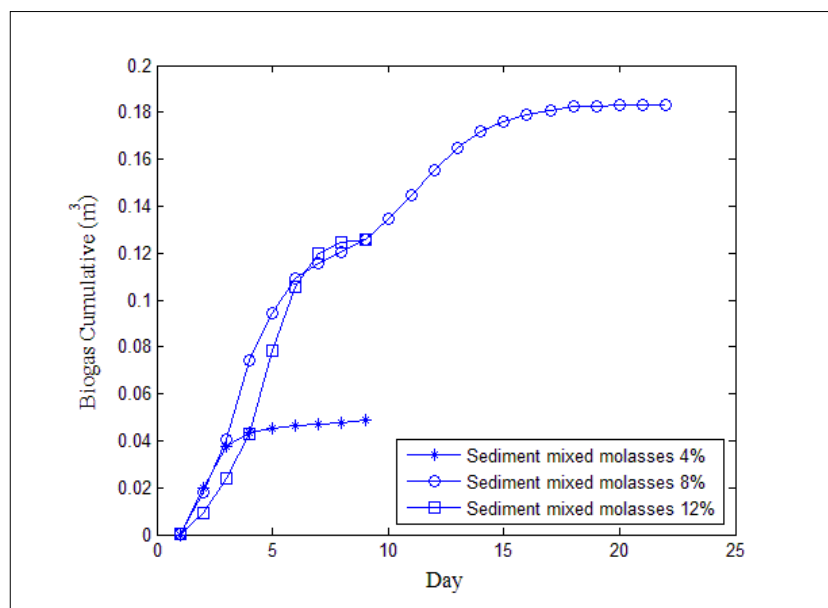
รูปที่ 4.20 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

- ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองพบว่า ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% และ 12% เกิดก๊าซชีวภาพ 9 วัน ได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.04894 \text{ m}^3$  และ  $0.12555 \text{ m}^3$  ตามลำดับ เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  $0.00543 \text{ m}^3/\text{d}$  และ  $0.01395 \text{ m}^3/\text{d}$  ตามลำดับ และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 61.57% และ 4.06% ตามลำดับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 6.72% และ 41.15% ตามลำดับ ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) 41.74% และ 2.6% ตามลำดับ ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) 4.50% และ 48.96% ตามลำดับ ส่วนตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% เกิดก๊าซชีวภาพ 22 วัน ได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.18321 \text{ m}^3$  เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  $0.00832 \text{ m}^3/\text{d}$  มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 7.37% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 41.74% ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) 41.15% ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) 46.34% ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 7.38 ppm ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของกากน้ำตาลจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนลดลง แต่จะได้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นตามส่วนผสมของกากน้ำตาล



รูปที่ 4.21 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



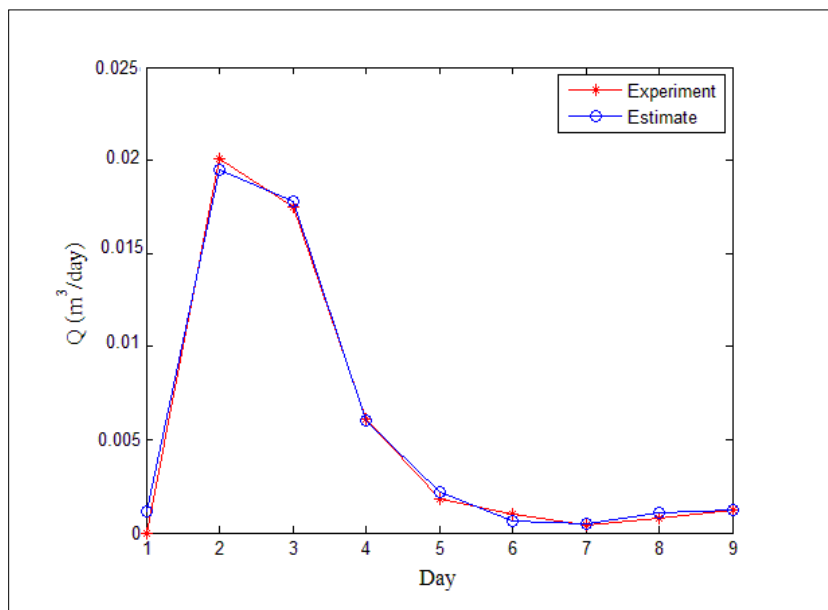
รูปที่ 4.22 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

### 4.3.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%, 8% และ 12% คือ ค่าอินทรีย์วัตถุ 115.8 g/l, 118.5 g/l และ 136.7 g/l ตามลำดับ และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ มาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์และศึกษาผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง, ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ดังแสดงในรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.3 ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ดังแสดงในรูปที่ 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.4 และตะกอนผสมกากน้ำตาล 12% ดังแสดงในรูปที่ 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.5

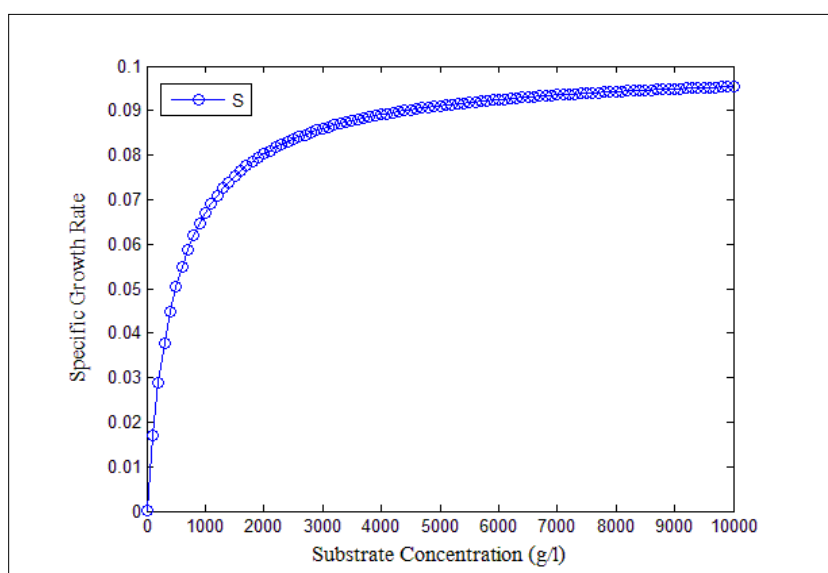
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2 \mu X$ (2.16)	$k_2=0.0001$ $X=0.0001$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=0.1$ $k_S=495.6079$ $k_{(S)}=0.0001$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$ (2.19)	$a=(-0.9997)$ $b=13.9986$ $c=(-47.9856)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1=1.53E^{11}$ $a_2=(-2.77E^{24})$ $a_3=(-0.0441)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q=1$ $k_{(Q)}=0.0001$



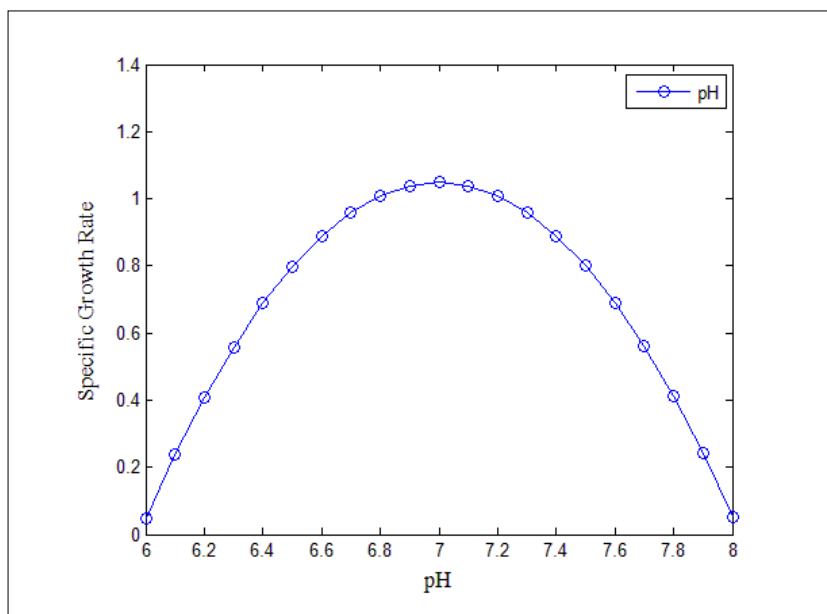
รูปที่ 4.23 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง  
ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

จากรูปที่ 4.23 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลน  
ผสมกากน้ำตาล 4% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2=0.0001$  และ  $X=0.0001$



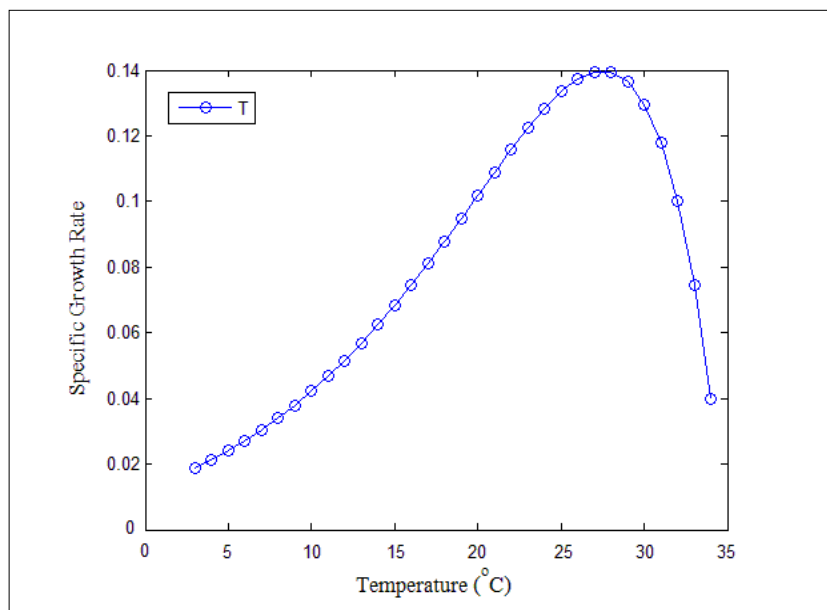
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)  
ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

จากรูปที่ 4.24 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=0.1$ ,  $k_S=495.6079$  และ  $k_{(S)}=0.0001$



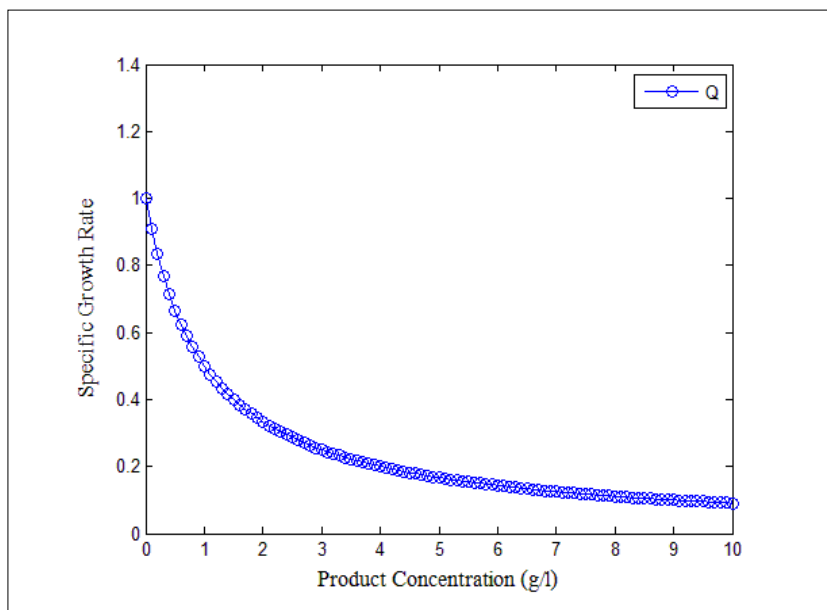
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

จากรูปที่ 4.25 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9997)$ ,  $b=13.9986$  และ  $c=(-47.9856)$



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

จากรูปที่ 4.26 เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=1.53E^{11}$ ,  $a_2=(-2.77E^{24})$  และ  $a_3=(-0.0441)$



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

จากรูปที่ 4.27 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=1$  และ  $k_{(Q)}=0.0001$

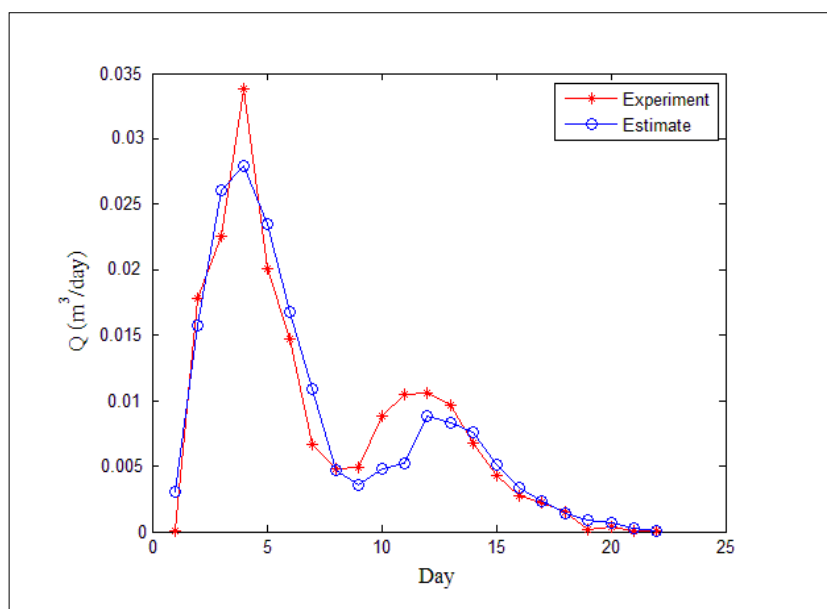
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2 \mu X$ (2.16)	$k_2=0.2173$ $X=0.3107$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=1$ $k_S=118.0217$ $k_{(S)}=7.4233$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$ (2.19)	$a=(-0.9997)$ $b=13.9986$ $c=(-47.9856)$



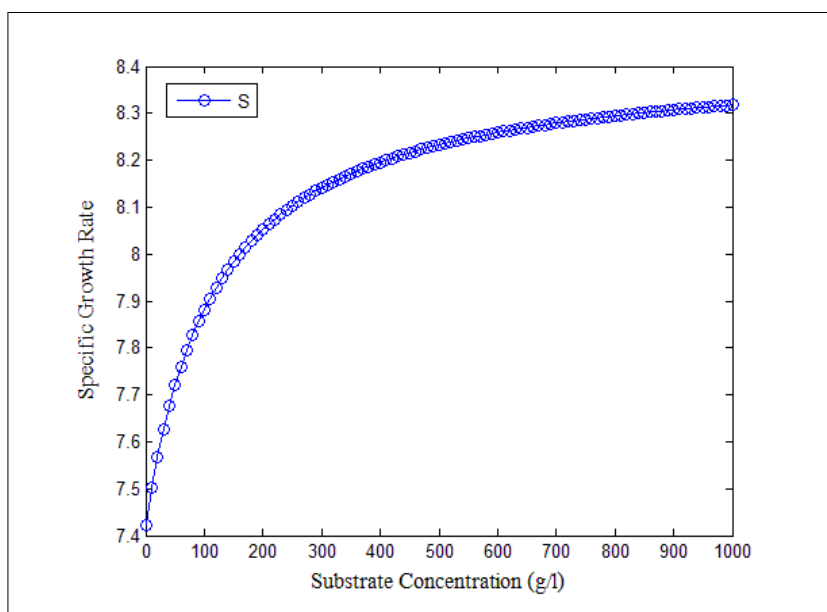
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% (ต่อ)

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1 = 4.833E^{10}$ $a_2 = (-1.02E^{23})$ $a_3 = (-0.0444)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q = 1.999E^3$ $k_{(Q)} = 1$



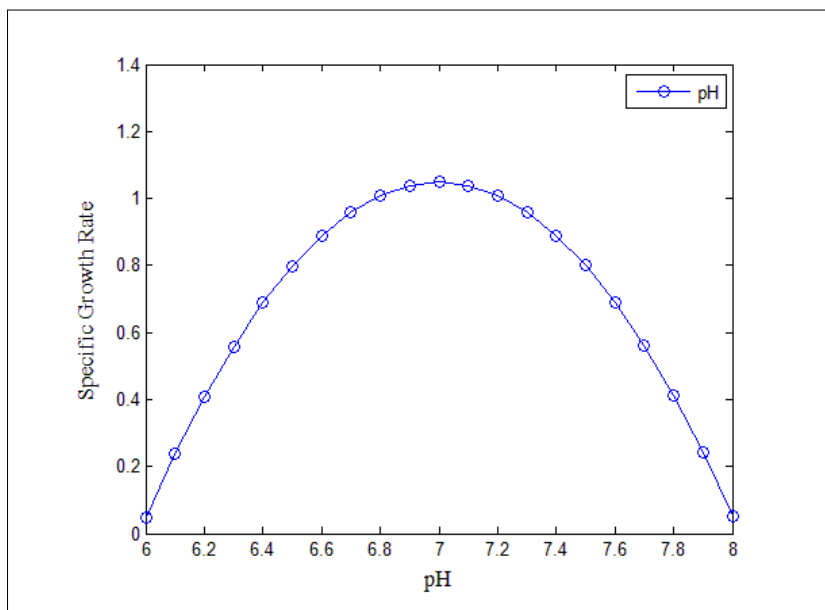
รูปที่ 4.28 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

จากรูปที่ 4.28 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2 = 0.2173$  และ  $X = 0.3107$



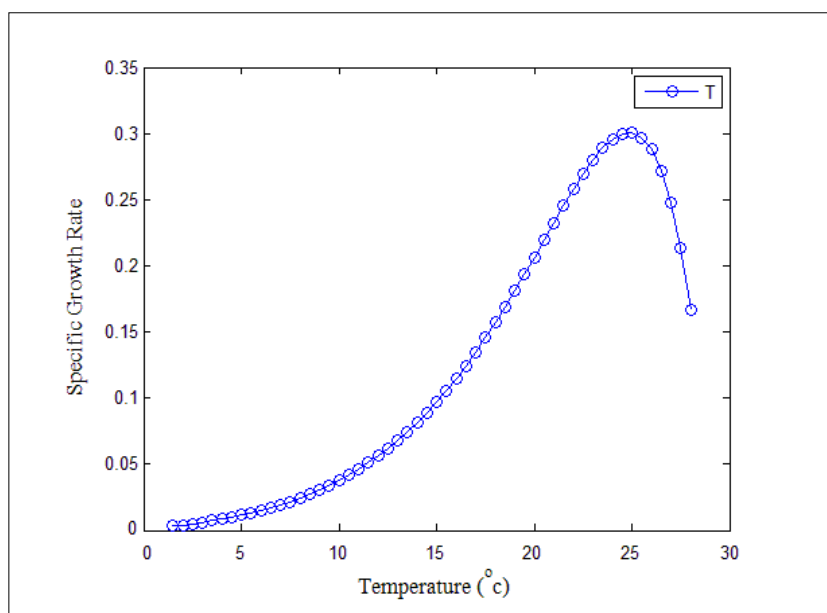
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

จากรูปที่ 4.29 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=0.1$ ,  $k_S=118.0217$  และ  $k_{(S)}=7.4233$



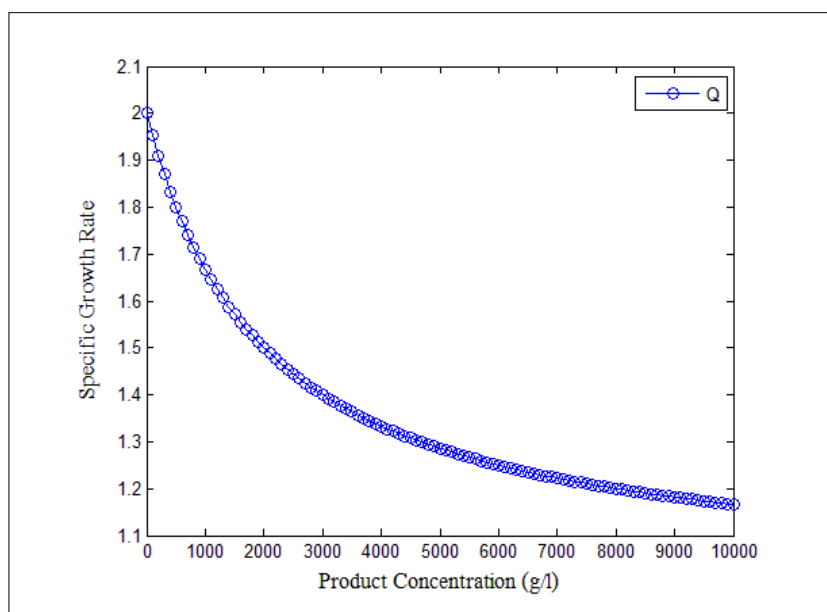
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

จากรูปที่ 4.30 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9997)$ ,  $b=13.9986$  และ  $c=(-47.9856)$



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

จากรูปที่ 4.31 เป็นการศึกษาคำสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=4.83E^{10}$ ,  $a_2=(-1.02E^{23})$  และ  $a_3=(-0.0444)$



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

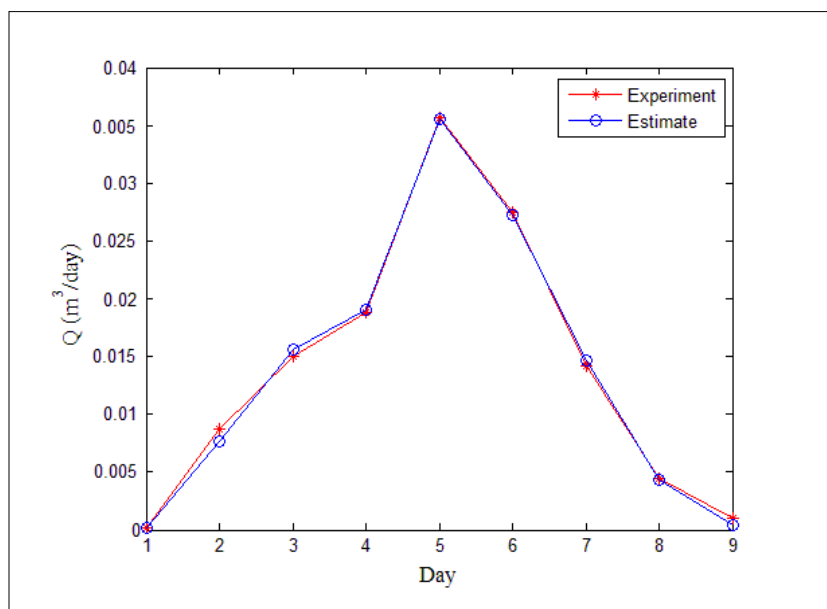
จากรูปที่ 4.32 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=1.999E^3$  และ  $k_{(Q)}=1$

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2 \mu X$ (2.16)	$k_2=0.0001$ $X=0.0001$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=0.0042$ $k_S=72.886$ $k_{(S)}=0.0003$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(pH) = a(pH)^2 + b(pH) + c$ (2.19)	$a=(-0.9997)$ $b=13.9972$ $c=(-47.9856)$

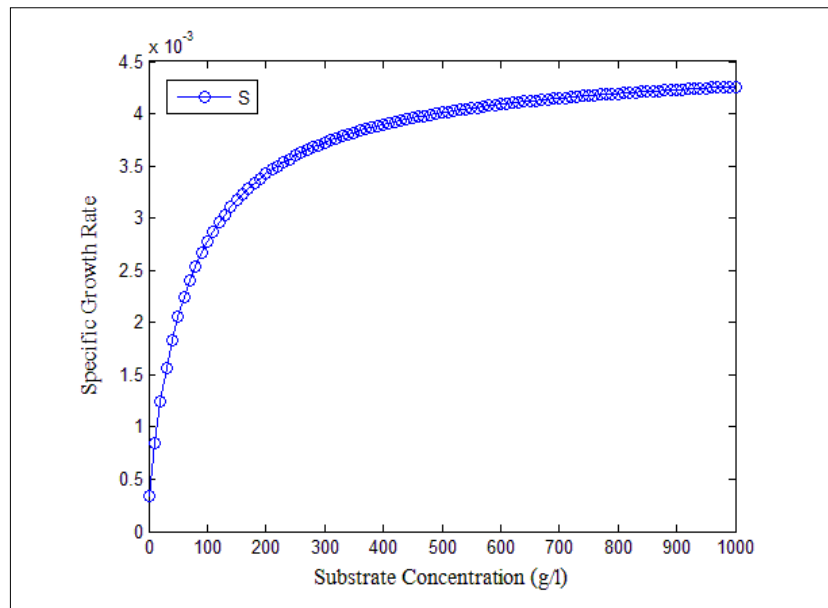
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% (ต่อ)

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1 = 2.4E^{10}$ $a_2 = (-1.65E^{23})$ $a_3 = (-0.0274)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q = 0.0144$ $k_{(Q)} = 0.0103$



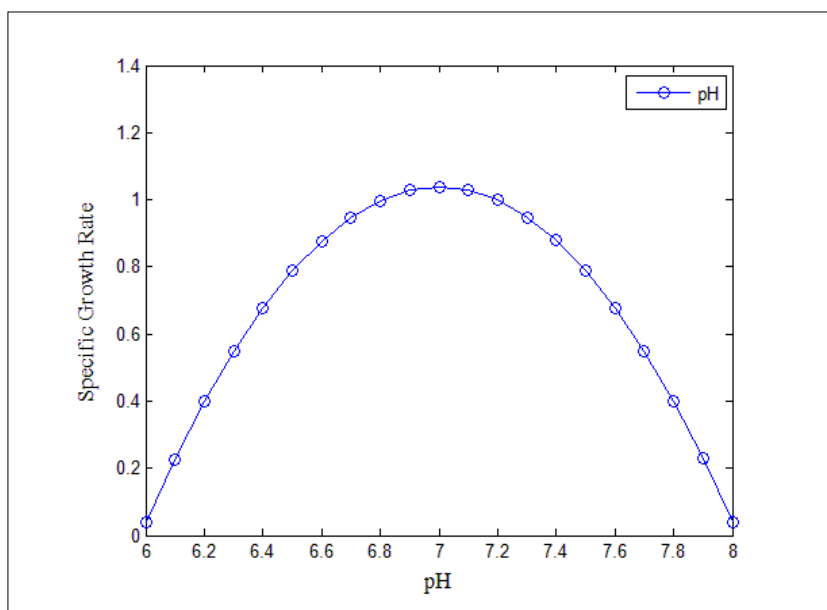
รูปที่ 4.33 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

จากรูปที่ 4.33 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2=0.001$  และ  $X=0.001$



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

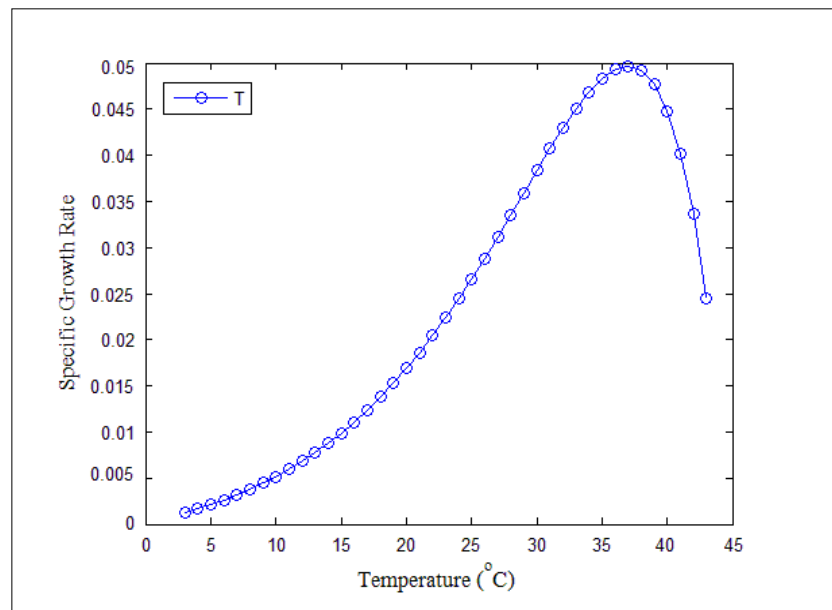
จากรูปที่ 4.34 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=0.0042$ ,  $k_s=72.886$  และ  $k_{(S)}=0.0003$



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

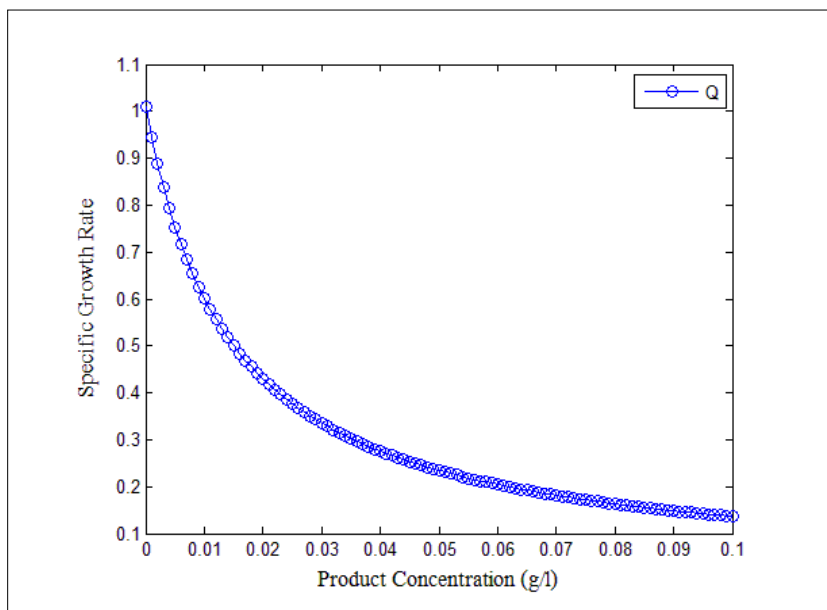
จากรูปที่ 4.35 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9997)$ ,  $b=13.9972$  และ  $c=(-47.9856)$





รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

จากรูปที่ 4.36 เป็นการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=2.4E^{10}$ ,  $a_2=(-1.65E^{23})$  และ  $a_3=(-0.0274)$



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

จากรูปที่ 4.37 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=0.0144E^3$  และ  $k_{(Q)}=0.0103$

#### 4.4 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

##### 4.4.1 คุณสมบัติของตะกอนเลน

- ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้ว ตะกอนเลนมีค่า pH, TDS, BOD, P, K, C และ OM ลดลง 0, 3,500 mg/l, 998 mg/l, 2.75 mg/l, 229 mg/l, 4,300 mg/l, และ 7,300 mg/l ตามลำดับ และมีค่า TS, TSS, TVS, TFS, COD และ N เพิ่มขึ้น 110,967 mg/l, 114,467 mg/l, 22,375 mg/l, 88,592 mg/l, 1,802.4 mg/l, และ 200 mg/l ตามลำดับ

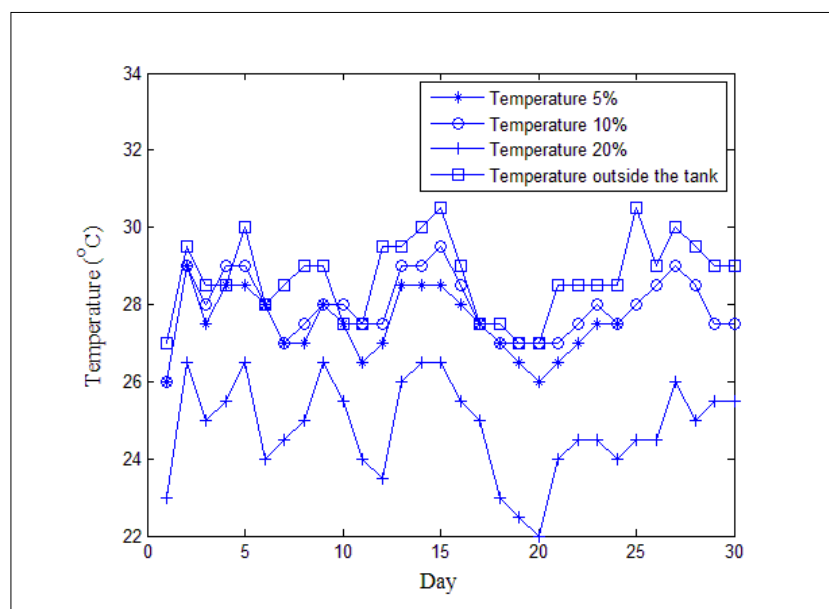
- ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้ว ตะกอนเลนมีค่า pH, TDS, BOD, COD, P, C และ OM ลดลง 4,760 mg/l, 3,034 mg/l, 43.2 mg/l, 18.28 mg/l, 7,200 mg/l และ 12,400 mg/l ตามลำดับ

- ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% หลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้ว ตะกอนเลนมีค่า BOD, COD, P, C และ OM ลดลง 7, 171 mg/l, 5,470.8 mg/l, 10.66 mg/l, 3,200 mg/l และ 5,600 mg/l ตามลำดับ

#### 4.4.2 การผลิตและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

- อุณหภูมิ

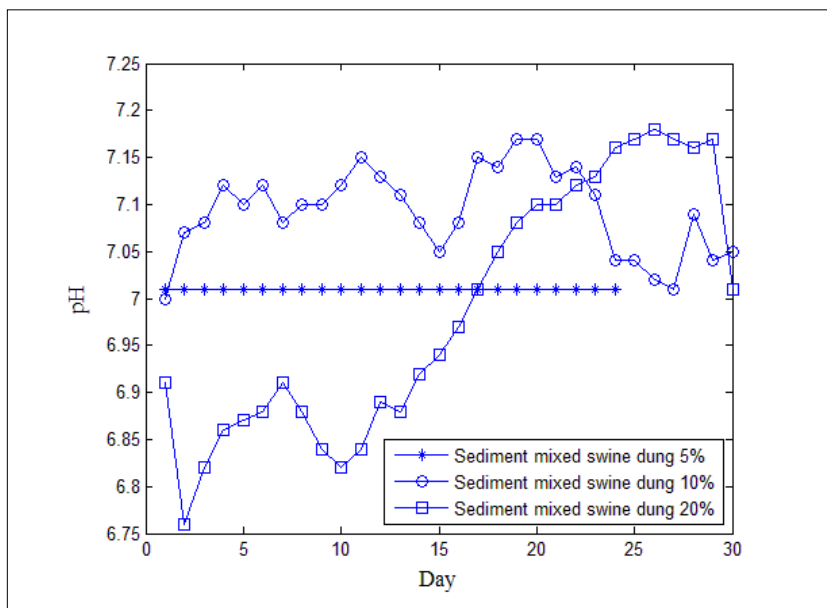
จากรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นและลดลงบ้างเล็กน้อยสลับกันไป โดยมีอุณหภูมิต่ำสุด 22 °C และมีอุณหภูมิสูงสุด 30.5 °C ซึ่งตลอดการทดลองอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 26.25 °C



รูปที่ 4.38 อุณหภูมิ (T)

- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

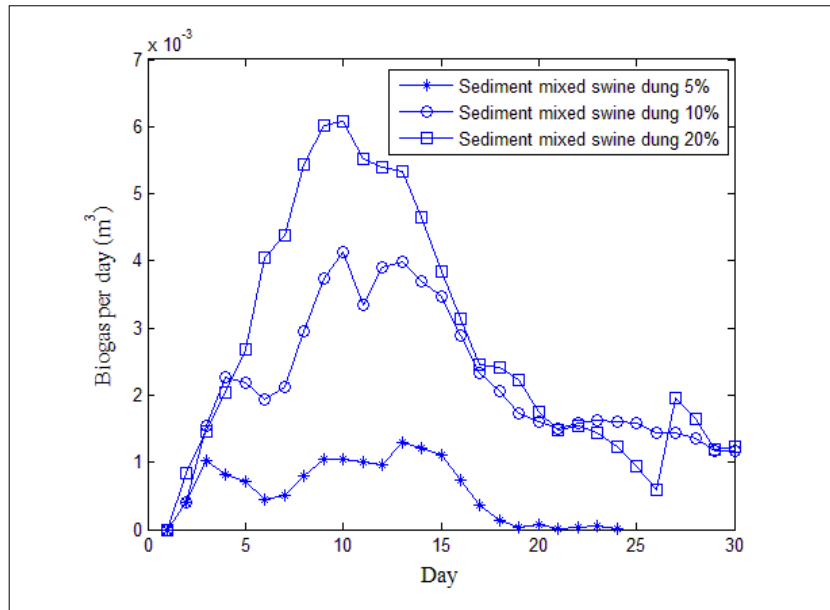
จากรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่า ค่า pH ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ไม่สามารถอ่านค่าได้ เนื่องจากตัวโพรบ pH มีปัญหา สำหรับค่า pH ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% มีค่าเป็นกลางตลอดการทดลอง โดยมีค่า pH ต่ำสุด คือ 7 และมีค่า pH สูงสุด คือ 7.17 และค่า pH ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% มีค่าเป็นกรดตั้งแต่วันที่ 1 – 16 ของการทดลอง และมีค่าเป็นกลางตั้งแต่วันที่ 17 – 30 ของการทดลอง โดยมีค่า pH ต่ำสุด คือ 6.76 และมีค่า pH สูงสุด คือ 7.18



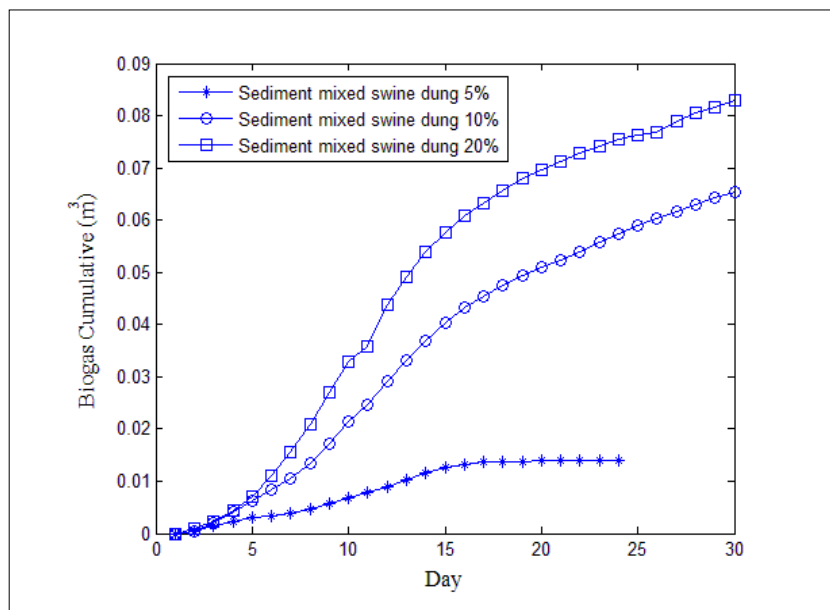
รูปที่ 4.39 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

- ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% เกิดก๊าซชีวภาพ 24 วัน และได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.01403 \text{ m}^3$  เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  $0.00058 \text{ m}^3/\text{d}$  และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) มีค่าคือ 81.57%, 27.68%, 0.95% และ 0.4 ppm ตามลำดับ ส่วนตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% และ 20% เกิดก๊าซชีวภาพ 30 วัน ได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $0.06542 \text{ m}^3$  และ  $0.08292 \text{ m}^3$  ตามลำดับ เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  $0.00218 \text{ m}^3/\text{d}$  และ  $0.00276 \text{ m}^3/\text{d}$  ตามลำดับ และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คือ 81.59% และ 68.89% ตามลำดับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) คือ 24.73% และ 42.62% ตามลำดับ ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) คือ 1.35% และ 0.92% ตามลำดับ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) คือ 1.48 ppm และ 0.14 ppm ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของมูลสุกรจะทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่จะมีผลทำให้ปริมาณของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ลดลง



รูปที่ 4.40 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



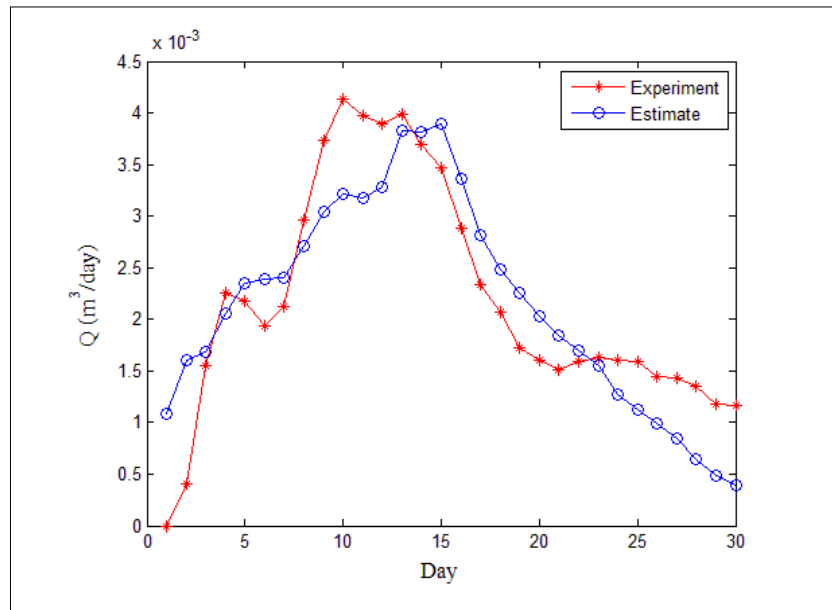
รูปที่ 4.41 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

#### 4.4.3 ผลการประมาณการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% และ 20% คือ ค่าอินทรีย์วัตถุ 97 g/l และ 131.8 g/l ตามลำดับ และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ มาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์และศึกษาผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง, ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) และความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% มีค่าแสดงดังรูปที่ 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.6 และตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% มีค่าแสดงดังรูปที่ 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.7

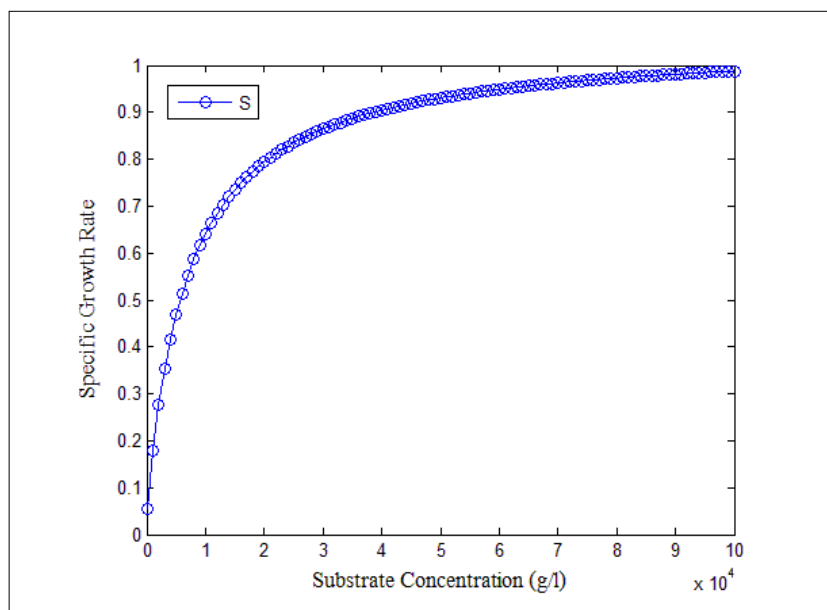
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2\mu X$ (2.16)	$k_2=2.3292$ $X=3.4054$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max}S}{k_S + S} + k(S)$ (2.18)	$\mu_{\max}=1$ $k_S=7.0081E^3$ $k(S)=0.0535$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH})^2 + b(\text{pH}) + c$ (2.19)	$a=(-0.9997)$ $b=13.9986$ $c=(-46.9859)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1=5.23E^{11}$ $a_2=(-1.02E^{23})$ $a_3=(-0.0444)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k(Q)$ (2.21)	$k_Q=9.5E^3$ $k(Q)=1$



รูปที่ 4.42 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลอง  
ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

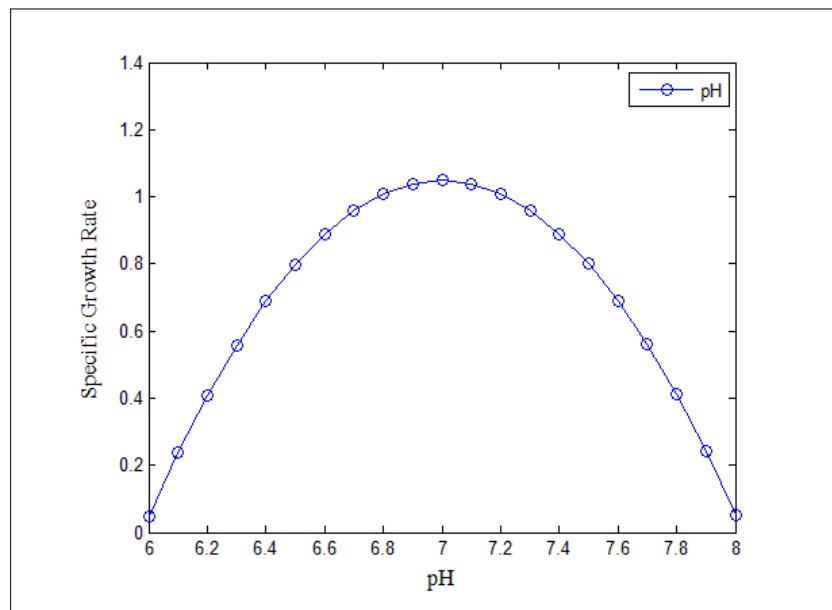
จากรูปที่ 4.42 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลน  
ผสมมูลสุกร 10% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2=2.3292$  และ  $X=3.4054$



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

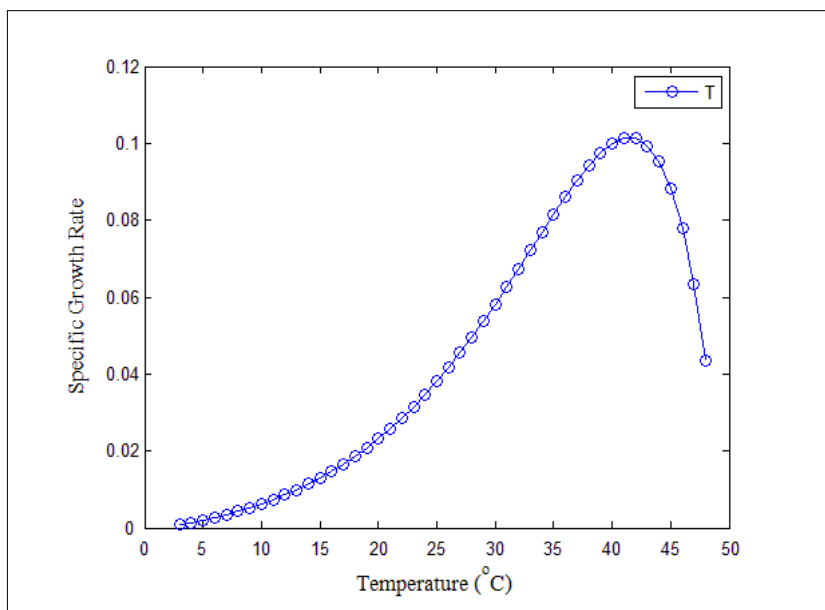
จากรูปที่ 4.43 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=1$ ,  $k_s=7.0081E^3$  และ  $k_{(S)}=0.0535$





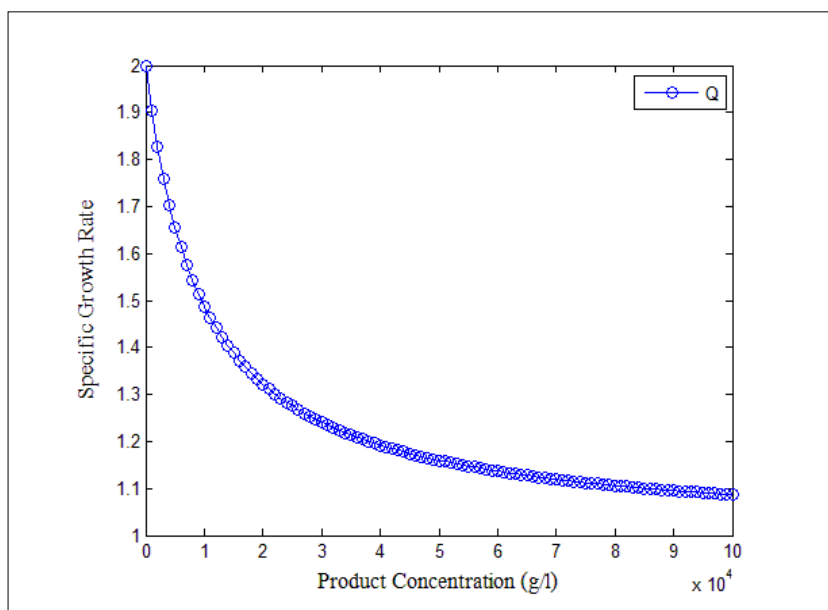
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

จากรูปที่ 4.44 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9997)$ ,  $b=13.9986$  และ  $c=(-46.9859)$



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

จากรูปที่ 4.45 เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=5.23E^{11}$ ,  $a_2=(-1.02E^{23})$  และ  $a_3=(-0.0444)$



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

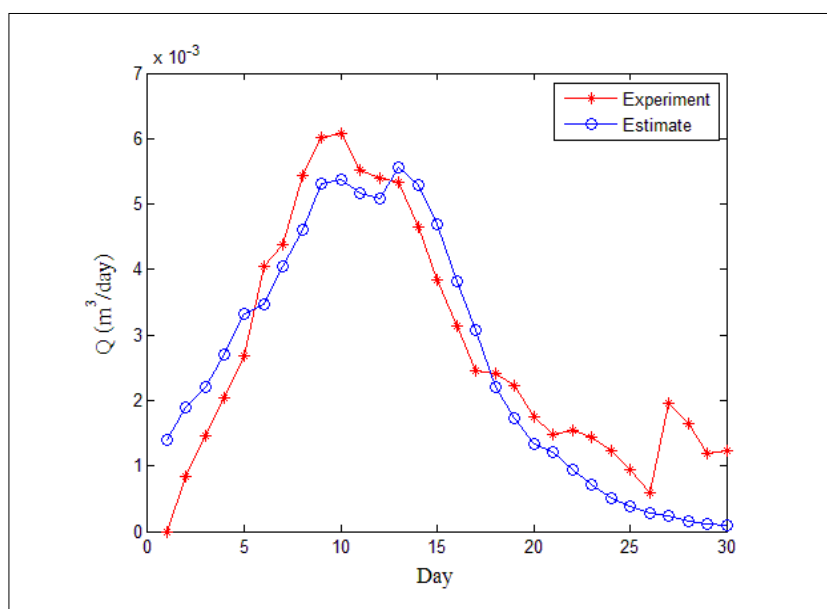
จากรูปที่ 4.46 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=9.5E^3$  และ  $k_Q=1$

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพ Q	$Q = k_2 \mu X$ (2.16)	$k_2=3.8348$ $X=1.749$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S)	$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} + k_{(S)}$ (2.18)	$\mu_{\max}=1$ $k_S=1.5E^3$ $k_{(S)}=0.0104$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	$\mu(pH) = a(pH)^2 + b(pH) + c$ (2.19)	$a=(-0.9997)$ $b=13.9986$ $c=(-47.9856)$

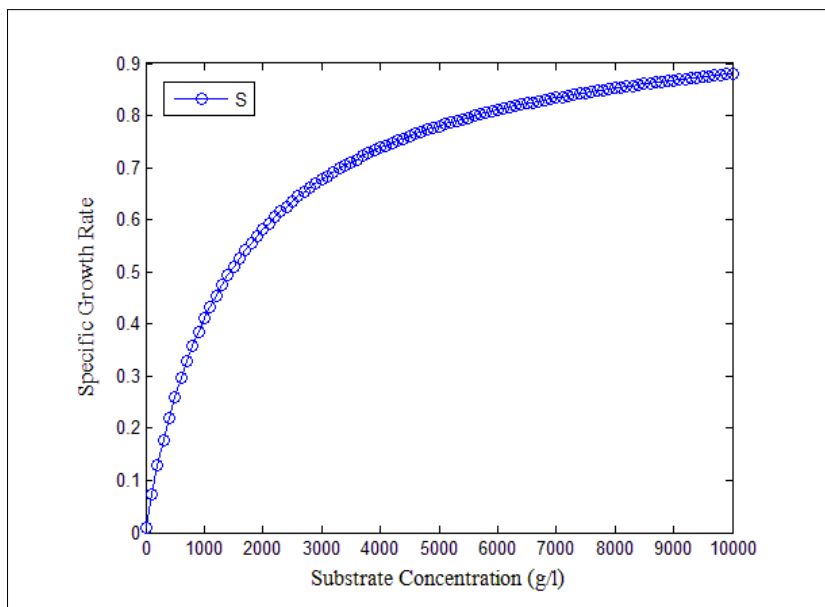
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% (ต่อ)

การประมาณการ	รูปแบบสมการ	ผลการประมาณ
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T)	$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3$ (2.20)	$a_1 = 9.67E^{11}$ $a_2 = (-1.02E^{23})$ $a_3 = (-0.0037)$
ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิต (Q)	$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_{(Q)}$ (2.21)	$k_Q = 1.5E^3$ $k_{(Q)} = 1$



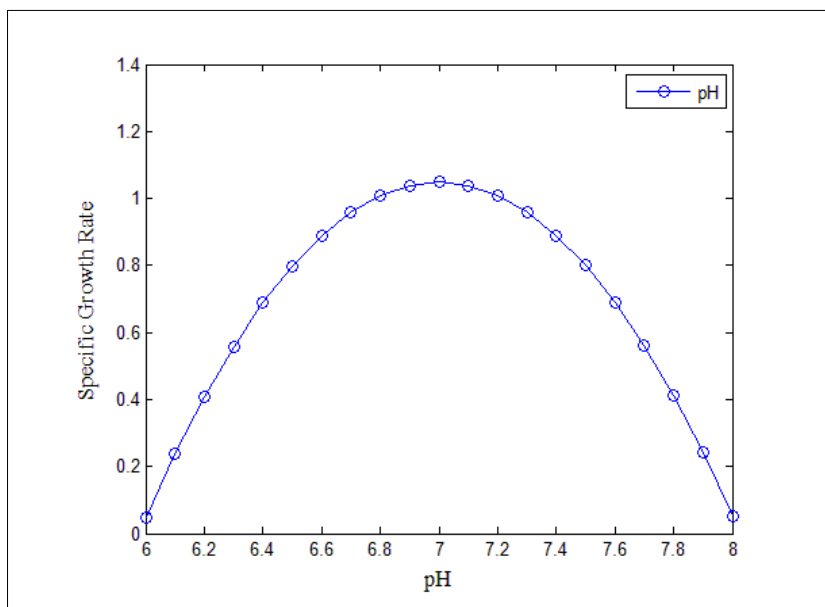
รูปที่ 4.47 ผลการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับผลการทดลองของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

จากรูปที่ 4.47 เป็นการประมาณการปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ด้วยสมการ 2.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_2 = 3.8348$  และ  $X = 1.749$



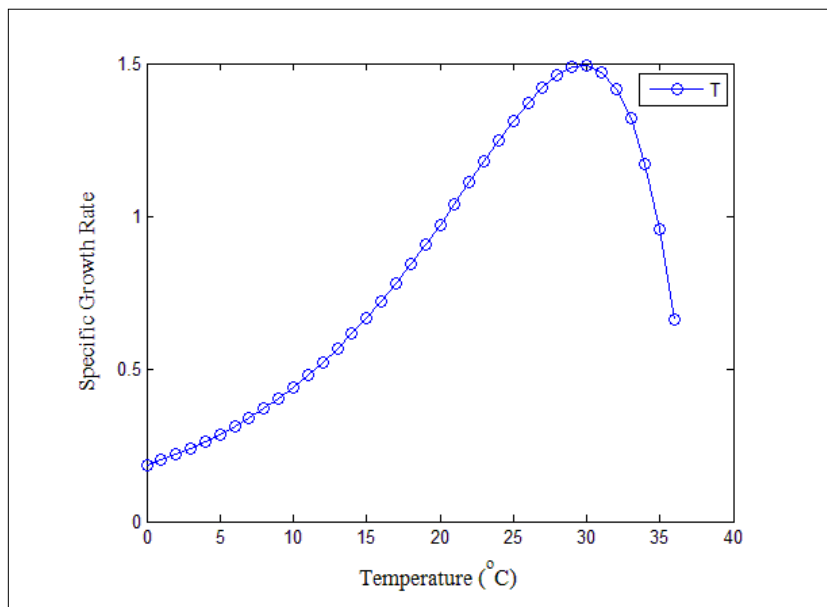
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ (S) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

จากรูปที่ 4.48 เป็นการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ด้วยสมการ 2.18 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\mu_{\max}=1$ ,  $k_s=1.5E^3$  และ  $k_{(S)}=0.0104$



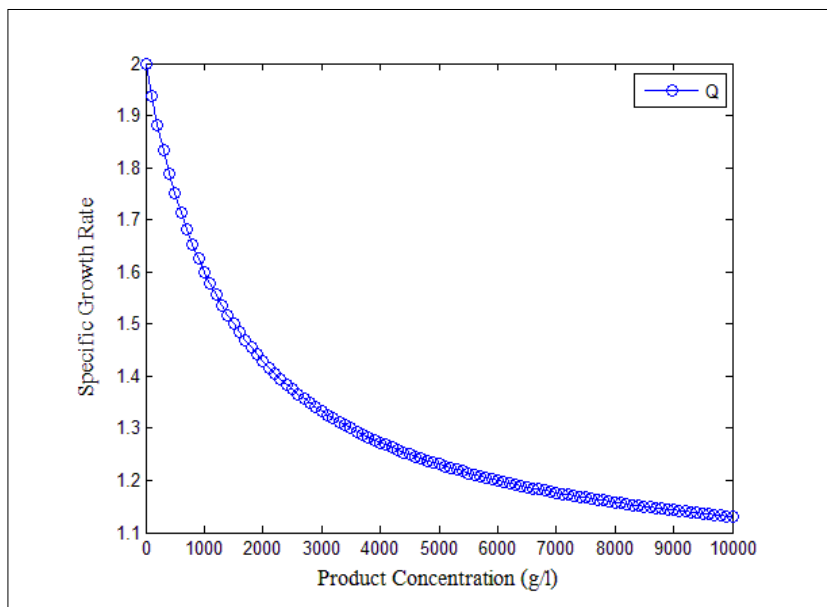
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

จากรูปที่ 4.49 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเป็นกรดเป็นด่างของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ด้วยสมการ 2.19 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a=(-0.9997)$ ,  $b=13.9986$  และ  $c=(-47.9856)$



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ (T) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

จากรูปที่ 4.50 เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ด้วยสมการ 2.20 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_1=9.67E^{11}$ ,  $a_2=(-1.02E^{23})$  และ  $a_3=(-0.0037)$



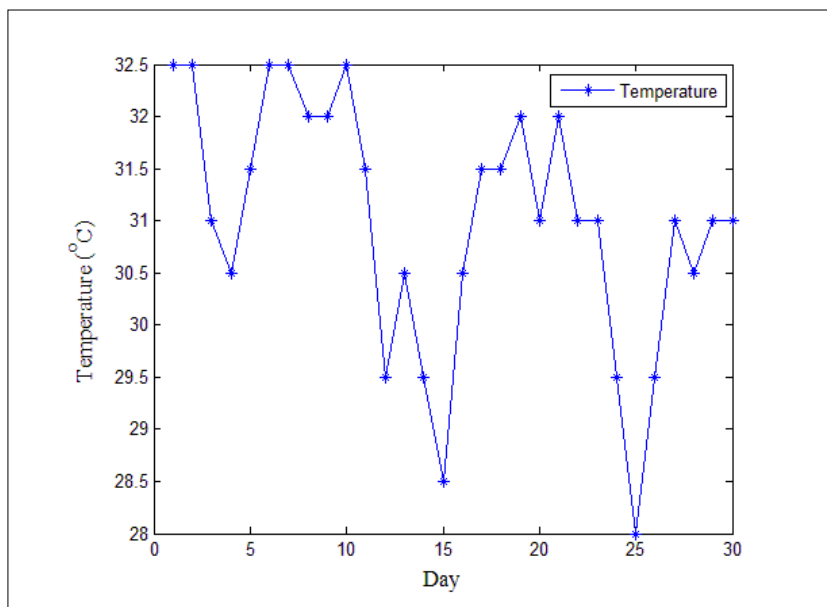
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Q) ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

จากรูปที่ 4.51 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับผลผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ด้วยสมการ 2.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $k_Q=1.5E^3$  และ  $k_Q=1$

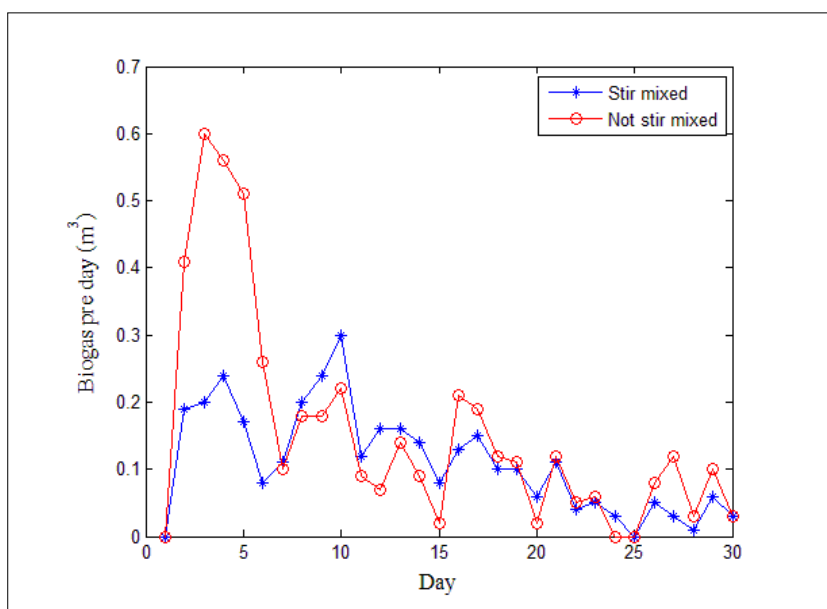
#### 4.5 ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม

จากรูปที่ 4.53 และ 4.54 แสดงให้เห็นว่าการหมักตะกอนเลนแบบกวนผสมเกิดก๊าซชีวภาพน้อยกว่าการหมักตะกอนเลนแบบไม่กวนผสม โดยได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด  $3.34 \text{ m}^3$  และ  $4.67 \text{ m}^3$  ตามลำดับ เฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ  $0.11133 \text{ m}^3/\text{d}$  และ  $0.15566 \text{ m}^3/\text{d}$  ตามลำดับ

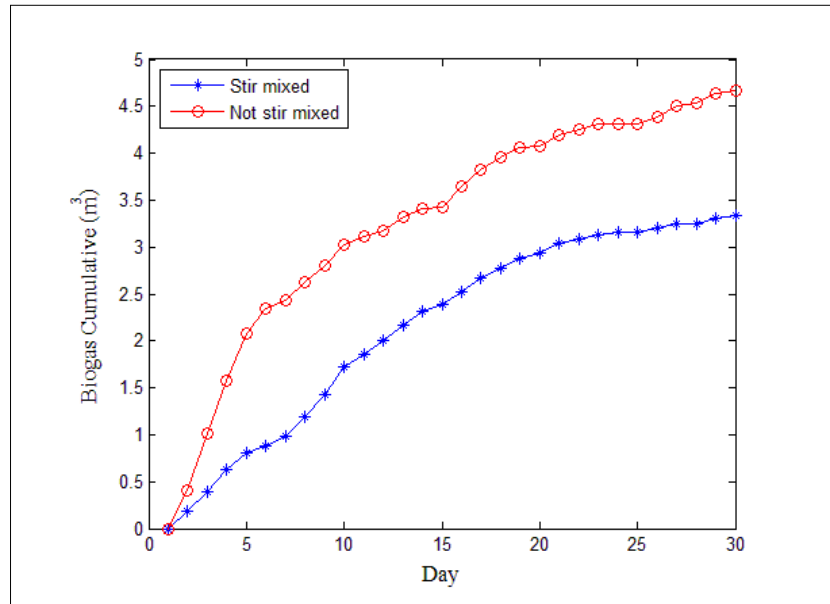




รูปที่ 4.52 อุณหภูมิ (T)



รูปที่ 4.53 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

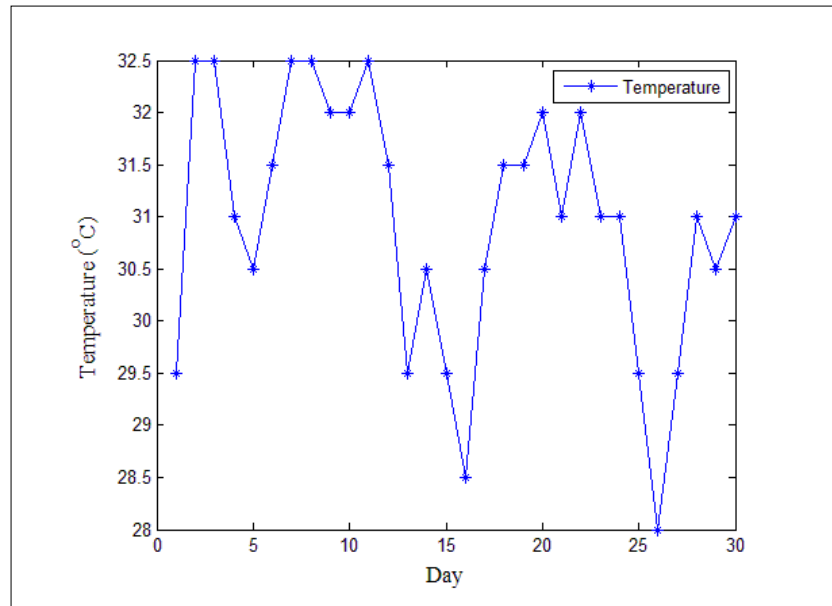


รูปที่ 4.54 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

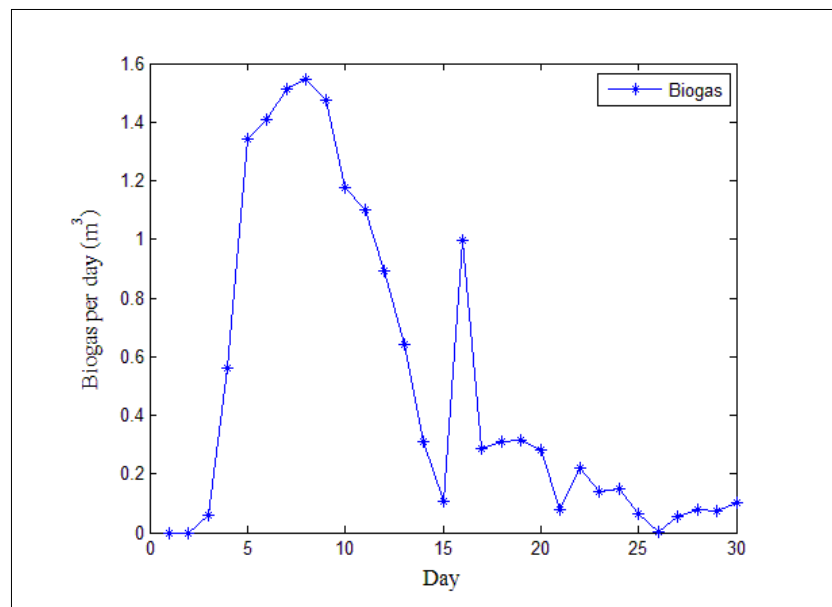
#### 4.6 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

##### 4.6.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพ

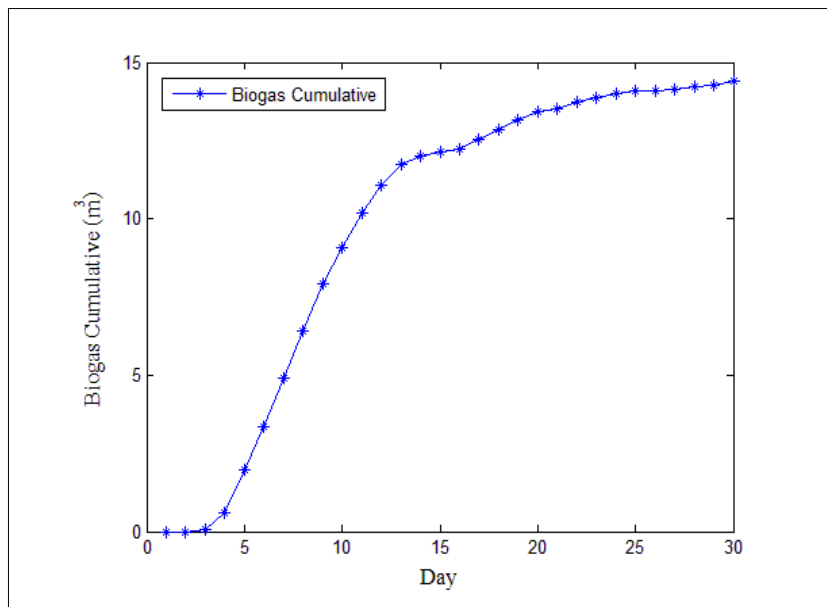
จากรูปที่ 4.56 แสดงให้เห็นว่า ช่วงวันที่ 1 – 8 ของการทดลอง มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นทุกวัน และในวันที่ 8 จะเกิดก๊าซมากที่สุด ซึ่งได้ปริมาณก๊าซชีวภาพ คือ 1.54545 m<sup>3</sup> ส่วนในช่วงวันที่ 8 – 15 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพเริ่มลดลง โดยตลอดการทดลอง 30 วัน ได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมด 14.38485 m<sup>3</sup> ดังนั้นเฉลี่ยได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.479495 m<sup>3</sup>/d



รูปที่ 4.55 อุณหภูมิ (T)



รูปที่ 4.56 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.57 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

#### 4.6.2 การใช้ก๊าซชีวภาพปรุงอาหารในครัวเรือน

จากการผลิตก๊าซชีวภาพและนำมาใช้ปรุงอาหารในครัวเรือนสามารถสรุปได้ว่าการจุดไฟเตาแก๊สปรุงอาหาร 1 นาที ต้องใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ  $0.004 \text{ m}^3$  หรือ 4 ลิตร และการจะปรุงอาหารในครัวเรือนต่อวันจะต้องใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ  $0.54 \text{ m}^3$  หรือ 540 ลิตร ซึ่งเพียงพอต่อครัวเรือนขนาด 3-4 คน

#### 4.7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงประมาณการกับมูลสัตว์ชนิดอื่น

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงประมาณการของการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ชนิดอื่นแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบเชิงประมาณการของการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ชนิดอื่น

มูลสัตว์ที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ	ปริมาณก๊าซมีเทน	ประสิทธิภาพการกำจัด COD	ก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด
มูลสุกร (สนั่น ตั้งสถิตย์. 2538)	72%	83.53%	1.12 l/g COD removal
มูลช้าง (อัจฉรา พิเลิศ. 2554)	69%	39.79%	0.000198 l/g COD removal
มูลโค (นุชรา สีนบัวทอง. 2537)	50.99%	84.08%	0.82 l/g COD removal
มูลวัว (สุรพล สุวคนธ์. 2526)	60.3%	-	-
ตะกอนเลนๆ ผสมมูลสุกร 20%	68.89%	45.3%	1.01 l/g COD removal

#### 4.7.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทน

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลสุกรมีปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุดคือ 72% รองลงมาคือ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลช้าง, ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกึ่งผสมมูลสุกร 20%, ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลวัวและก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลโค ซึ่งมีปริมาณก๊าซมีเทน 69%, 68.89%, 60.3% และ 50.99% ตามลำดับ

#### 4.7.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดคือ 84.08% รองลงมาคือ การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร, การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกึ่งผสมมูลสุกร 20% และ การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 83.53%, 45.30 และ 39.79% ตามลำดับ

#### 4.7.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลสุกรมีปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 1.12 l/g COD removal ซึ่งมีปริมาณการเกิดก๊าซมากที่สุด รองลงมาคือ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกึ่งผสมมูลสุกร 20%, ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลโคและก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลช้าง ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 1.01 l/g COD removal, 0.82 l/g COD removal และ 0.000198 l/g COD removal ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นได้คำนึงถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ลักษณะการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานของเกษตรกรและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถสรุปได้ 10 ประเด็นหลักดังนี้

5.1.1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ ซึ่งสามารถใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้

5.1.2 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีค่า BOD มากกว่า 500 mg/l, ค่า COD มากกว่า 3,000 mg/l และมีค่าการนำไฟฟ้าของเกลือสูงกว่า 8 ms/cm หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำธรรมชาติลดลง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กขาดออกซิเจนไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและตื้นเขิน

5.1.3 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถกำจัดให้ค่า BOD และ COD ลดลงได้สูงสุด 84.76% และ 45.36% ตามลำดับ ลดผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติและระบบนิเวศป่าชายเลน

5.1.4 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแบคทีเรียมีความเหมาะสมต่อลักษณะการใช้พลังงานทดแทนของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง เนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นและการเก็บตะกอนเลนนั้นสามารถเก็บได้ที่ระยะเวลาประมาณ 3-4 เดือน

5.1.5 ในการวิจัยนี้ได้ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง เพื่อประมาณปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์และกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

5.1.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบแบคทีเรีย สามารถประยุกต์ใช้สมการสมดุลมวลสารร่วมกับวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ ในการประมาณค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง โดยการค้นหาค่าด้วยจินเนติกอัลกอริทึม อธิบายพลวัตของการเกิดก๊าซชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (S) การเปลี่ยนแปลง

ปริมาณความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (X) และอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ( $\mu$ ) ได้ ซึ่งตัวแปร 3 ตัวสุดท้ายนี้ไม่สามารถวัดได้ จากการประยุกต์ใช้วิธีนี้สามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงได้

5.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งคือ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และปริมาณสารอินทรีย์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง Mesophilic 20-35 °C ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-8 ส่วนสารอินทรีย์นั้นถ้าเกษตรกรใช้จุลินทรีย์ (EM) ขณะเลี้ยงกุ้งจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในตะกอนเลนลดน้อยลง

5.1.8 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเพียงอย่างเดียวจะมีปริมาณก๊าซมีเทนประมาณ 11.75-44.34% มีค่าความร้อนประมาณ 6.52-24.6 MJ/kg และไม่พบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

5.1.9 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งผสมมูลสุกร 20% จะมีปริมาณก๊าซมีเทนประมาณ 68.89-81.59% มีค่าความร้อนประมาณ 38.2-45.28 MJ/kg และพบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.14-1.48 ppm

5.1.10 การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งผสมมูลสุกร 20% เพื่อใช้ในครัวเรือนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00427 m<sup>3</sup>/kg จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่มีปริมาณมากพอเพียงที่จะใช้เป็นพลังงานทดแทนในครัวเรือนของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งที่มีสมาชิกประมาณ 3-4 คน ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.54 m<sup>3</sup>/d ดังนั้นเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งควรจะมีบ่อเลี้ยงกุ้งขนาด 3 ไร่ขึ้นไปจะมีตะกอนเลนพอเพียงต่อการผลิตก๊าซชีวภาพใช้ในครัวเรือน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 คุณสมบัติของตะกอนเลนหลังจากหมักก๊าซชีวภาพแล้วยังมีคุณค่าสารอาหารเหลืออยู่ ซึ่งสามารถศึกษาวิจัยต่อเพื่อจะนำไปประโยชน์ทางด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในการทำปุ๋ยชีวภาพ ฯลฯ

5.2.2 บริเวณที่เลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่จะอยู่ห่างไกลจากแหล่งชุมชนและกระแสไฟฟ้าเข้าไม่ถึง ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ควรศึกษาต่อเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ขับเคลื่อนปั้มน้ำเพิ่มออกซิเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง หรือผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์มเลี้ยงกุ้ง

5.2.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบแบคทีเรีย ให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบอื่นๆ ต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดและผลิตก๊าซมีเทน

5.2.4 การศึกษาวิจัยหาจุดอันตรายที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงตะกอนเลนในบ่อ  
เลี้ยงกุ้งเป็นก๊าซชีวภาพ



## รายการอ้างอิง

- กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2542). สถิติการประมง [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.fisheries.go.th/fish/web1/hotnews.php>
- กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2548). สถิติการประมง [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.fisheries.go.th/fish/web1/hotnews.php>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [ออนไลน์]. (2543). ได้จาก <http://www.dede.go.th/dede>
- เกษม ทิพย์สุนทรศักดิ์. (2546). การย่อยสลายขยะอินทรีย์ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยวิธีลิซเบดและการหมักต่อโดยวิธีใช้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์.(2543). วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรังสิต. 645 หน้า.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรังสิต. 673 หน้า.
- คณิต ไชยคำ และ ขงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร (2537). ผลกระทบของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา กรมประมง.
- เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย. ฐานข้อมูลเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [ออนไลน์]. (2550). ได้จาก <http://teenet.Chiangmai.ac.th>
- จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ, ปิติ พูนไชยศรี และ ปราโมช เชี่ยวชาญ. (2545). ประมวลสาระชุดวิชาการจัดการคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. 557 หน้า.
- จิรวัดน์ ชาลีวรรณ. (2546). ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราการย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เชาว์ ศรีวิชัย, ขงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร, คณิต ไชยคำ และ ดุสิต ต้นวิไลย. (2537). การตรวจ และติด

- ตามคุณภาพน้ำ และดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดปัตตานี. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 5/2537 กรมประมง สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง จ. สงขลา. 18 หน้า.
- ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ. (2531). ระบบน้ำและของเสียในบ่อกุ้ง. กรุงเทพมหานคร: ศรีเมืองการพิมพ์. เดชา พวงดาวเรือง. (2550). การระบุเอกลักษณ์ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ด้วยเทคนิคการ ค้นหาแบบปัญญาประดิษฐ์. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 30: 301-314.
- นิติ สุวรรณเบญจกุล. (2544). การออกแบบและก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 100 หน้า.
- นุชรา สีนบัวทอง. 2537 การศึกษาการทำงานของถังหมักไร้อากาศชนิดที่มีตัวกลางยึดเกาะในการ บำบัดของเสียจากมูลโค. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย กรุงเทพฯ 163 แผ่น.
- บรรพต ทองนาค. (2546). การผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสุกร. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต โปรแกรม วิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเพชรบุรี.
- ประมวล ทรายทอง. (2547). การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งในกระบวนการผลิตขนมจีนโดยวิธีการ ย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.
- ภวานาฏ เสมรสุต, สายทิพย์ ปฐมรัตน์ และ เพชร กัตัญญกุล. (2527). เปรียบเทียบปริมาณการเกิด ก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว และมูลสัตว์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน. รายงานผลการค้นคว้าวิจัยปี 2527 ข้าวและธัญพืชเมืองหนาว กรมวิชาการเกษตร. หน้า 94.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วุฒิภรณ์ คุมมินทร์. (2544). การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหารที่มีความเข้มข้นสูงโดยการหมัก แบบชั้นกรองไร้อากาศ 2 ขั้นตอนร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สนั่น ตั้งสถิต (2538). การบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโร บิกแบบ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมศักดิ์ มณีพงศ์, ประวิทย์ ไตวัฒนะ และ พิภพ ปราบณรงค์. (2535). ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจาก การทำนาแก้งที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่องการอนุรักษ์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ครั้งที่ 3. หน้า 561-565.
- สันทนา พุ่มพวง. (2546). การศึกษาการใช้ก๊าซชีวภาพจากมูลช้างเป็นแหล่งพลังงานทดแทนใน ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร.

- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม [ออนไลน์]. (2543). ได้จาก <http://www.onep.go.th>
- ศิริ เอกมหาราช, ก่อเกียรติ กุลแก้ว, พุทธ ส่องแสงจินดา, จุฬิรัตน์ พรหมสุด, นิคม ละอองศิริวงศ์ และ วลีรัตน์ มุสิกะสังข์. (2548). การศึกษาน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเพื่อประเมินผลกระทบต่อระบบนิเวศในทะเลสาบสงขลา. การประชุมวิชาการประมง ประจำปี 2548 กรมประมง. หน้า 78-79.
- สุนทร โคตรบรรเทา. (2535). **แก๊สมูลสัตว์**. กรุงเทพมหานคร.
- สุรพล สุวคนธ์. (2526). การปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาการสอนเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อัญญา พิเลิศ. (2554). การผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลช้างและน้ำเสียจากการผลิตกระดาษร่วมกับมูลฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาริยา วิรัชวรกุล. (2546). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abu Qdais, H., Bani Hani, K. and Shatnawi, N. (2009). Modeling and optimization of biogas production from a waste digester using artificial neural network and genetic algorithm. **Resources: Conservation and Recycling**. 54(6): 359-363.
- Anh, P. T., Kroeze, C., Bush, S. R. and Mol, A. P. J. (2010). Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: causes and options for control. **Agricultural Water Management**. 97: 872-882.
- Bastin, G. and Dochain, D. (1991). **On-line estimation and adaptive control of bioreactors**. Amsterdam and New York: Elsevier Science Publishers.
- Chan, Y. S. G., Chu, L. M. and Wong, M. H. (1999). Codisposal of municipal refuse, sewage sludge and marine dredgings for methane production. **Environmental Pollution**. 106: 123-128.

- Husain, A. (1998). Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion - a selected review. **Biomass and Bioenergy**. 14(5/6): 561-571.
- Kim, M., Ahn, Y. and Speece, R. E. (2001). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. **Institute of Water Research**. 36: 4369-4385.
- Mandal, T. and Mandal, N. K. (1998). Biomethanation of some waste materials with pure metallic magnesium catalyst: improved biogas yields. **Energy Conversion and Management**. 39(11): 1177-1179.
- Mu, S. J., Zeng, Y., Wu, P., Lou, S. J. and Tartakovsky, B. (2008). Anaerobic digestion model no. 1-based distributed parameter model of an anaerobic reactor: I. Model development. **Bioresource Technology**. 99(9): 3676-3684.
- Muller, T. G., Noykova, N., Gyllenberg, M., and Timmer, J. (2002). Parameter identification in dynamical models of anaerobic waste water treatment. **Mathematical Biosciences**. 177-178: 147-160.
- Nijaguna, B. T. (2002). **Biogas technology**. Bangalore: Principal JSS Academy of Technical Education.
- Noykova, N., Muller, T. G., Gyllenberg, M. and Timmer, J. (2002). Quantitative analyses of anaerobic waste water treatment processes: identifiability and parameter estimation. **Biotechnology and Bioengineering**. 78(1): 89-103.
- Paez-osuna, F., Guerro-galvan, S. R. and Ruiz-fernandez, A. C. (1998). The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico. **Marine Pollution Bulletin**. 36(1): 65-75.

- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B. and Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass and Bioenergy**. 34: 1117-1124.
- Silva, F., Nadais, H., Prates, A., Arroja, L. and Capela, I. (2009). Molasses as an external carbon source for anaerobic treatment of sulphite evaporator condensate. **Bioresource Technology**. 100: 1943-1950.
- Simeonov, I., Momchev, V. and Grancharov, D. (1996). Dynamic modeling of mesophilic digestion of animal waste. **Water Research**. 30(5): 1087-1094.
- Simeonov, I., and Stoyanov, S. (2003). Modelling and dynamic compensator control of the anaerobic digestion of organic wastes. **Chemical and Biochemical Engineering**. 17(4): 285-292.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

## ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

### ก.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ก่อน	หลัง	ปริมาณการ เปลี่ยนแปลง
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen ; pH)	7.7	7.5	0.2
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	139,859	15,978	123,881
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	24,500	9,700	14,800
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	112,200	5,750	106,450
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	22,653	2,450	20,203
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	139,603	10,922	128,681
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัด โดยวิธีชีวภาพ (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	2,334	324	2,010
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัด โดยวิธีเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	7,840	1,197	6,643
9. ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	4,300	5,000	เพิ่มขึ้น 700
10. ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	6.24	136.95	เพิ่มขึ้น 130.71
11. โพแทสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	816.5	662.5	154
12. คาร์บอน (mg/l) (Carbon ; C)	42,700	47,300	เพิ่มขึ้น 4,600
13. อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	73,500	81,300	เพิ่มขึ้น 7,800

ก.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

วัน	อุณหภูมิ (°C)				pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ(m <sup>3</sup> )	
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>		ต่อวัน	สะสม
1	24.44772	23.51046	23.6354	22.89188	7.663807	0	0
2	23.96669	23.77834	24.38318	24.04561	7.132003	0.000675	0.000675
3	23.93589	23.95364	24.67249	24.15662	7.086005	0.000945	0.00162
4	24.3905	24.48518	25.19916	24.84045	6.849594	0.00114	0.00276
5	24.89401	25.15523	25.53147	25.24862	6.681634	0.001185	0.003945
6	24.63251	24.66457	24.7765	23.70158	6.517114	0.00045	0.004395
7	23.56214	23.5284	23.64502	22.57964	6.381751	0.00036	0.004755
8	22.92839	22.97671	23.305	22.55754	6.368808	0.000405	0.00516
9	22.94048	23.10884	23.52849	23.12353	6.360384	0.000405	0.005565
10	22.92346	23.0819	23.37431	22.77118	6.316624	0.00027	0.005835
11	22.56863	22.66827	22.89658	22.10313	6.280468	0.000135	0.00597
12	22.16301	22.34757	22.85073	22.36379	6.320852	0.000135	0.006105
13	23.28125	23.58903	24.09231	24.01354	6.289623	0.000225	0.00633
14	23.69606	23.84512	23.95472	23.40092	6.225345	0.000045	0.006375
15	23.76004	24.04517	24.56956	24.53534	6.290661	0.000315	0.00669
16	24.52351	24.81572	25.24477	25.11921	6.225373	0.000405	0.007095
17	24.79419	25.01254	25.2514	24.83985	6.192388	0.000315	0.00741
18	24.75788	25.00598	25.49745	25.23915	6.23222	0.00036	0.00777
19	25.0136	25.21226	25.4974	24.89132	6.169543	0.00027	0.00804
20	24.88349	25.10569	25.53186	25.09541	6.206704	0.00027	0.00831
21	25.25548	25.59712	26.19139	25.9304	6.195531	0.00045	0.00876
22	25.92388	26.23704	26.74185	26.33912	6.172336	0.00045	0.00921
23	26.38162	26.65608	27.12406	26.65352	6.182138	0.000495	0.009705
24	26.6784	26.91877	27.33955	26.95818	6.185032	0.00045	0.010155
25	26.98628	27.27092	27.73549	27.46842	6.201786	0.000495	0.01065
26	27.29886	27.54074	27.8514	27.39547	6.10317	0.00042	0.01107
27	27.14329	27.3575	27.67191	27.21508	6.119672	0.00033	0.0114
28	26.90829	27.04276	27.23111	26.58121	6.089595	0.00018	0.01158
29	26.63811	26.85865	27.28473	26.92553	6.14504	0.00027	0.01185
30	26.89357	27.13979	27.56513	27.21513	6.43999	0.000315	0.012165



### ก.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ผลการวิเคราะห์
1. ปริมาณก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> ); (%)	44.34
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ); (%)	4.91
3. ปริมาณก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> ); (%)	17.23
4. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> ); (%)	ไม่พบ
5. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S); (ppm)	ไม่พบ

### ก.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ
X	5
k <sub>(S)</sub>	-0.7947
k <sub>1</sub>	2
k <sub>2</sub>	5
k <sub>(Q)</sub>	19.434
$\mu_{\max}$	0.9316
a	-0.9949
b	13.5861
c	-45.6025
a <sub>1</sub>	1.68E <sup>11</sup>
a <sub>2</sub>	-5.10E <sup>23</sup>
a <sub>3</sub>	-0.0444
k <sub>S</sub>	11.5905
k <sub>Q</sub>	12
Error	0.8515

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

ข.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอนเลนปกติ			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล			ตะกอนเลนผสมยูเรีย		
	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen ; pH)	8.3	7.1	1.2	5.8	5.4	0.4	8.7	9.3	เพิ่มขึ้น 0.6
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	57,035	13,209	43,826	131,423	128,800	2,623	104,689	25,409	79,280
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	15,500	8,890	6,610	123,600	69,275	54,325	78,000	15,500	62,500
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	34,200	5,380	28,820	18,300	12,875	5,425	14,200	11,350	2,850
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	8,712	2,070	6,642	94,420	87,579	6,841	76,542	7,085	69,457
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	45,941	11,139	34,802	45,180	33,221	11,959	24,318	18,324	5,994
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	735	85	650	41,963	45,638	เพิ่มขึ้น 3,675	396	1,029	เพิ่มขึ้น 633
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	6,227.2	769.4	5,457.8	105,084	75,112	29,972	3,697.4	4,763.2	เพิ่มขึ้น 1,065.8

ข.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอนเลนปกติ			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล			ตะกอนเลนผสมยูเรีย		
	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
9. ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	8,000	700	7,300	7,300	600	6,700	11,300	4,700	6,600
10. ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	191.19	253.43	เพิ่มขึ้น 62.24	213.7	9.61	204.09	136.89	232.28	เพิ่มขึ้น 95.39
11. โพแทสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	1,233	1,077	156	9,405	7,510	1,895	1,361	1,039	322
12. คาร์บอน (mg/l) (Carbon ; C)	56,300	32,600	23,700	87,300	70,900	16,400	47,700	33,400	14,300
13. อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	96,900	56,200	40,700	150,100	121,900	28,200	82,100	57,500	24,600

ข.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

วัน	อุณหภูมิ (°C)				pH			ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> )					
	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ห้อง	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 1		ถังที่ 2		ถังที่ 3	
								ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
1	22	22	22	23.5	7.73	6.12	7.91	0	0	0.00006	0.00006	0	0
2	23	23	23	25	7.27	5.57	8.81	0	0	0.03557	0.03563	0	0
3	23.5	23.5	23.5	22.5	7.25	5.40	9.12	0	0	0.02073	0.05636	0	0
4	22.5	22.5	22.5	23	7.21	5.28	9.11	0	0	0.04261	0.09897	0	0
5	22.5	22.5	22.5	22	7.18	5.20	9.11	0	0	0.02271	0.12168	0	0
6	22.5	22.5	22.5	23	7.18	5.20	9.13	0	0	0.00473	0.12641	0	0

หมายเหตุ : ถังที่ 1 หมักตะกอนเลนปกติ

ถังที่ 2 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10%

ถังที่ 3 หมักตะกอนเลนผสมยูเรีย 10%

### ข.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนปกติ	ผสมกากน้ำตาล	ผสมยูเรีย
1. ปริมาณก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> ); (%)	-	1.61	-
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ); (%)	-	-	-
3. ปริมาณก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> ); (%)	-	-	-
4. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> ); (%)	-	24.4	-
5. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S); (ppm)	-	38.03	-

### ข.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10%
X	0.003
k <sub>(S)</sub>	0.0094
k <sub>1</sub>	0.6494
k <sub>2</sub>	0.0082
k <sub>(Q)</sub>	0.0008
$\mu_{\max}$	0.0071
a	-0.9999
b	13.9972
c	-47.9904
a <sub>1</sub>	2.32E <sup>11</sup>
a <sub>2</sub>	-8.96E <sup>24</sup>
a <sub>3</sub>	-0.0276
k <sub>S</sub>	2.8013
k <sub>Q</sub>	1.2340
Error	9.8907

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

ค.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอน เลนปกติ	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (4%)			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (8%)			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (12%)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen ; pH)	8.5	7.2	5.6	1.6	6.8	6.0	0.8	6.4	4.4	2
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	91,439	125,748	94,841	30,907	182,449	105,831	76,618	140,399	148,116	เพิ่มขึ้น 7,710
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	35,300	79,000	61,775	17,225	122,900	79,150	43,750	84,750	133,075	เพิ่มขึ้น 48,325
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	56,139	46,748	33,060	13,688	59,549	26,681	32,868	55,649	15,041	40,608
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	18,727	55,138	56,149	เพิ่มขึ้น 1,011	103,590	59,095	44,495	52,067	92,795	เพิ่มขึ้น 40,728
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	72,712	70,610	38,692	31,918	78,859	46,736	32,123	88,332	55,321	33,011
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	1,830	37,000	21,660	15,340	41,655	56,250	เพิ่มขึ้น 14,595	52,800	54,375	เพิ่มขึ้น 1,575
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	4,670.4	50,596	36,670	13,926	97,300	90,710	6,590	151,788	121,590	30,198



ค.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอน เลนปกติ	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (4%)			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (8%)			ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (12%)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
9. ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	3,100	3,800	4,900	เพิ่มขึ้น 1,100	3,600	5,200	เพิ่มขึ้น 1,600	3,600	4,900	เพิ่มขึ้น 1,300
10. ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	6.25	2.15	6.67	เพิ่มขึ้น 4.52	2.00	2.10	เพิ่มขึ้น 0.01	3.00	22.24	เพิ่มขึ้น 19.24
11. โพแทสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	1,448.5	3,055	5,171	เพิ่มขึ้น 2,116	3,256.5	6,865.5	เพิ่มขึ้น 3,609	7,280	8,002.5	เพิ่มขึ้น 722.5
12. คาร์บอน (mg/l) (Carbon ; C)	22,900	67,300	46,600	20,700	68,300	71,200	เพิ่มขึ้น 2,900	79,500	88,900	เพิ่มขึ้น 9,400
13. อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	50,200	115,800	80,200	35,600	118,500	122,500	เพิ่มขึ้น 4,000	136,700	152,900	เพิ่มขึ้น 16,200

ค.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

วัน	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง			อุณหภูมิ (T)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> )					
	(pH)			(°C)				ผสมกากน้ำตาล 4%		ผสมกากน้ำตาล 8%		ผสมกากน้ำตาล 12%	
	4%	8%	12%	4%	8%	12%	ห้อง	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
1	6.58	6.61	6.50	31	31	31	32	0	0	0.00008	0.00008	0.00023	0.00023
2	5.94	6.42	6.46	28.7	28	28	25	0.02007	0.02007	0.01784	0.01792	0.00876	0.00899
3	5.66	6.09	6.14	25	24.7	25.3	23	0.01752	0.03759	0.02254	0.04046	0.01499	0.02398
4	5.59	6.01	5.96	23	23.7	23	24.3	0.00612	0.04371	0.03381	0.07427	0.01878	0.04276
5	5.46	5.89	5.78	24.3	25	25	28	0.00183	0.04554	0.02013	0.0944	0.03562	0.07838
6	5.36	5.77	5.63	23.3	23.3	24	25.3	0.00101	0.04655	0.0147	0.1091	0.02753	0.10591
7	5.34	5.51	5.33	24.7	24.7	24.3	25.7	0.00039	0.04694	0.00668	0.11578	0.01416	0.12007
8	5.41	5.29	5.09	29.3	30	30	31.7	0.00075	0.04769	0.00481	0.12059	0.00449	0.12456
9	5.66	5.13	4.88	30.3	29.7	30.3	29.3	0.00125	0.04894	0.00494	0.12553	0.00099	0.12555
10	5.78	5.22	4.78	28.3	28.3	28.7	29	0	0.04894	0.00885	0.13438	0	0.12555
11	5.78	5.32	4.70	28.3	28	28.3	28.3	0	0.04894	0.01049	0.14487	0	0.12555

ค.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (ต่อ)

วัน	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง			อุณหภูมิ (T)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> )					
	(pH)			(°C)				ผสมกากน้ำตาล 4%		ผสมกากน้ำตาล 8%		ผสมกากน้ำตาล 12%	
	4%	8%	12%	4%	8%	12%	ห้อง	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
12	5.78	5.80	4.74	24.5	24.5	24	24.5	0	0.04894	0.0106	0.15547	0	0.12555
13	5.78	6.00	4.67	26	26	26	26	0	0.04894	0.00961	0.16508	0	0.12555
14	5.82	6.27	4.72	24.5	25	24	24	0	0.04894	0.00673	0.17181	0	0.12555
15	6.01	6.36	4.84	23.3	23	23	22.7	0	0.04894	0.00426	0.17607	0	0.12555
16	6.02	6.51	4.88	21	21	20.5	21	0	0.04894	0.00276	0.17883	0	0.12555
17	6.00	6.56	5.00	20.5	21	21	24.5	0	0.04894	0.00218	0.18101	0	0.12555
18	5.94	6.55	5.01	20	20.5	20	23	0	0.04894	0.00146	0.18247	0	0.12555
19	5.94	6.57	4.98	23.5	23.5	22.5	24.5	0	0.04894	0.0002	0.18267	0	0.12555
20	5.94	6.61	4.97	28.5	28.5	29	29	0	0.04894	0.0004	0.18307	0	0.12555
21	5.98	6.68	5.00	28.7	29.3	28.7	30.3	0	0.04894	0.0001	0.18317	0	0.12555
22	5.96	6.71	4.98	29	28.6	28.3	29.3	0	0.04894	0.00004	0.18321	0	0.12555

ค.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (4%)	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (8%)	ตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล (12%)
1. ปริมาณก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> ); (%)	61.57	7.73	4.06
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ); (%)	6.72	41.74	41.15
3. ปริมาณก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> ); (%)	41.74	41.15	2.60
4. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> ); (%)	4.50	46.34	48.96
5. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S); (ppm)	ไม่พบ	7.38	ไม่พบ

ค.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ		
	ผลสมกาน้ำตาล 4%	ผลสมกาน้ำตาล 8%	ผลสมกาน้ำตาล 12%
X	0.0001	0.3107	0.0001
$k_{(s)}$	0.0001	7.4233	0.0003
$k_1$	0.0600	19.9997	0.9315
$k_2$	0.0001	0.2173	0.0001
$k_{(Q)}$	0.0001	1.0000	0.0103
$\mu_{\max}$	0.1000	1.0000	0.0042
a	-0.9997	-0.9997	-0.9997
b	13.9986	13.9986	13.9972
c	-47.9856	-47.9856	-47.9856
$a_1$	$1.53E^{11}$	$4.83E^{10}$	$2.4E^{10}$
$a_2$	$-2.77E^{24}$	$-1.02E^{23}$	$-1.65E^{23}$
$a_3$	-0.0441	-0.0444	-0.0274
$k_s$	495.6079	118.0217	72.8860
$k_Q$	1.0000	$1.9990E^3$	0.0144
Error	1.7334	146.3086	2.2298

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอน เลนปกติ	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (5%)			ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (10%)			ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (20%)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
1. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen ; pH)	8.4	7.8	7.8	0	7.6	8.4	เพิ่มขึ้น 0.8	7.3	8.2	เพิ่มขึ้น 0.9
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	50,126	40,647	151,614	เพิ่มขึ้น 110,967	53,099	122,418	เพิ่มขึ้น 69,319	61,768	109,422	เพิ่มขึ้น 47,654
3. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	24,000	23,500	20,000	3,500	24,250	19,490	4,760	14,125	24,692	เพิ่มขึ้น 10,567
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	26,126	17,147	131,614	เพิ่มขึ้น 114,467	28,849	102,928	เพิ่มขึ้น 74,079	47,643	84,730	เพิ่มขึ้น 37,087
5. ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	38,569	11,472	33,847	เพิ่มขึ้น 22,375	15,669	30,418	เพิ่มขึ้น 14,749	24,225	28,142	เพิ่มขึ้น 3,917
6. ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	11,557	29,175	117,767	เพิ่มขึ้น 88,592	37,430	91,990	เพิ่มขึ้น 54,560	37,543	81,280	เพิ่มขึ้น 43,737
7. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	2,820	4,440	3,442	998	5,160	2,126	3,034	8,460	1,289	7,171
8. ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	3,240	7,500	9,302.4	เพิ่มขึ้น 1,802.4	7,020	6,976.8	43.2	12,060	6,589.2	5,470.8

ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลัง หมักก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

รายการทดสอบ คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ตะกอน เลนปกติ	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (5%)			ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (10%)			ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (20%)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง	ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
9. ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	7,000	9,200	9,400	เพิ่มขึ้น 200	8,700	10,100	เพิ่มขึ้น 1,400	10,900	12,000	เพิ่มขึ้น 1,100
10. ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	193.31	185.23	182.48	2.75	185.04	166.76	18.28	179.90	169.24	10.66
11. โพแทสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	1,171	1,374	1,145	229	1,372	1,529	เพิ่มขึ้น 157	1,879	2,076.5	เพิ่มขึ้น 197.5
12. คาร์บอน (mg/l) (Carbon ; C)	38,600	50,100	45,800	4,300	56,400	49,200	7,200	76,600	73,400	3,200
13. อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	66,400	86,100	78,800	7,300	97,000	84,600	12,400	131,800	126,200	5,600



ง.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

วัน	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง			อุณหภูมิ (T)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> )					
	(pH)			(°C)				ผสมมูลสุกร 5%		ผสมมูลสุกร 10%		ผสมมูลสุกร 20%	
	5%	10%	20%	5%	10%	20%	ห้อง	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
1	7.01	7.00	6.91	26	26	23	27	0	0	0	0	0	0
2	7.01	7.07	6.76	29	29	26.5	29.5	0.00041	0.00041	0.0004	0.0004	0.00083	0.00083
3	7.01	7.08	6.82	27.5	28	25	28.5	0.00102	0.00143	0.00155	0.00195	0.00147	0.0023
4	7.01	7.12	6.86	28.5	29	25.5	28.5	0.00082	0.00225	0.00226	0.00421	0.00205	0.00435
5	7.01	7.10	6.87	28.5	29	26.5	30	0.00071	0.00296	0.00218	0.00639	0.00268	0.00703
6	7.01	7.12	6.88	28	28	24	28	0.00045	0.00341	0.00194	0.00833	0.00405	0.01108
7	7.01	7.08	6.91	27	27	24.5	28.5	0.0005	0.00391	0.00213	0.01051	0.00439	0.01547
8	7.01	7.10	6.88	27	27.5	25	29	0.0008	0.00471	0.00296	0.01347	0.00543	0.0209
9	7.01	7.10	6.84	28	28	26.5	29	0.00105	0.00576	0.00374	0.01721	0.00602	0.02692
10	7.01	7.12	6.82	27.5	28	25.5	27.5	0.00105	0.00681	0.00413	0.02134	0.00607	0.03299
11	7.01	7.15	6.84	26.5	27.5	24	27.5	0.00101	0.00782	0.00334	0.02468	0.00552	0.03581
12	7.01	7.13	6.89	27	27.5	23.5	29.5	0.00097	0.00879	0.0039	0.02916	0.00539	0.0439
13	7.01	7.11	6.88	28.5	29	26	29.5	0.0013	0.01027	0.00399	0.03315	0.00533	0.04923
14	7.01	7.08	6.92	28.5	29	26.5	30	0.00121	0.01148	0.00369	0.03684	0.00464	0.05387
15	7.01	7.05	6.94	28.5	29.5	26.5	30.5	0.0011	0.01258	0.00347	0.04031	0.00384	0.05771

ง.2 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (ต่อ)

วัน	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง			อุณหภูมิ (T)				ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> )					
	(pH)			(°C)				ผสมมูลสุกร 5%		ผสมมูลสุกร 10%		ผสมมูลสุกร 20%	
	5%	10%	20%	5%	10%	20%	ห้อง	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
16	7.01	7.08	6.97	28	28.5	25.5	29	0.00073	0.01331	0.00288	0.04319	0.00314	0.06085
17	7.01	7.15	7.01	27.5	27.5	25	27.5	0.00036	0.01367	0.00234	0.04553	0.00245	0.0633
18	7.01	7.14	7.05	27	27	23	27.5	0.00014	0.01381	0.00207	0.0476	0.00241	0.06571
19	7.01	7.17	7.08	26.5	27	22.5	27	0.00003	0.01384	0.00172	0.04932	0.00222	0.06793
20	7.01	7.17	7.10	26	27	22	27	0.00008	0.01392	0.00161	0.05093	0.00174	0.06967
21	7.01	7.13	7.10	26.5	27	24	28.5	0.00001	0.01393	0.00151	0.05244	0.00149	0.07116
22	7.01	7.14	7.12	27	27.5	24.5	28.5	0.00004	0.01397	0.00159	0.05403	0.00154	0.0727
23	7.01	7.11	7.13	27.5	28	24.5	28.5	0.00005	0.01402	0.00163	0.05566	0.00143	0.07413
24	7.01	7.04	7.16	27.5	27.5	24	28.5	0.00001	0.01403	0.00161	0.05727	0.00124	0.07537
25	7.01	7.04	7.17	28.5	28	24.5	30.5	0	0.01403	0.00159	0.05886	0.00095	0.07632
26	7.01	7.02	7.18	28	28.5	24.5	29	0	0.01403	0.00144	0.0603	0.00058	0.0769
27	7.01	7.01	7.17	29	29	26	30	0	0.01403	0.00143	0.06173	0.00195	0.07885
28	7.01	7.09	7.16	28	28.5	25	29.5	0	0.01403	0.00135	0.06308	0.00165	0.0805
29	7.00	7.04	7.17	27.5	27.5	25.5	29	0	0.01403	0.00118	0.06426	0.00119	0.08169
30	7.01	7.05	7.01	27.5	27.5	25.5	29	0	0.01403	0.00116	0.06542	0.00123	0.08292

ง.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (5%)	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (10%)	ตะกอนเลนผสมมูลสุกร (20%)
1. ปริมาณก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> ); (%)	81.57	81.59	68.89
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ); (%)	27.68	24.73	42.62
3. ปริมาณก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> ); (%)	0.95	1.35	0.92
4. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> ); (%)	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
5. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S); (ppm)	0.4	1.48	0.14

ง.4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณ	
	ผลสมมูลสุกร 10%	ผลสมมูลสุกร 20%
X	3.4054	1.7490
$k_{(s)}$	0.0535	0.0104
$k_1$	15.9566	7.3118
$k_2$	2.3292	3.8348
$k_{(Q)}$	1.0000	1.0000
$\mu_{\max}$	1.0000	1.0000
a	-0.9997	-0.9997
b	13.9986	13.9986
c	-46.9859	-47.9856
$a_1$	$5.23E^{11}$	$9.67E^{11}$
$a_2$	$-1.02E^{23}$	$-1.02E^{23}$
$a_3$	-0.0444	-0.0037
$k_s$	$7.0081E^3$	$1.5000E^3$
$k_Q$	$9.500E^3$	$1.5000E^3$
Error	9.2851	18.8624

## ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม

**จ.1 ข้อมูลผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม**

วัน	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณก๊าซชีวภาพแบบกวนผสม (m <sup>3</sup> )		ปริมาณก๊าซชีวภาพแบบไม่กวนผสม (m <sup>3</sup> )	
		ต่อวัน	สะสม	ต่อวัน	สะสม
1	32.5	0	0	0	0
2	32.5	0.19	0.19	0.41	0.41
3	31	0.2	0.39	0.6	1.01
4	30.5	0.24	0.63	0.56	1.57
5	31.5	0.17	0.8	0.51	2.08
6	32.5	0.08	0.88	0.26	2.34
7	32.5	0.11	0.99	0.1	2.44
8	32	0.2	1.19	0.18	2.62
9	32	0.24	1.43	0.18	2.8
10	32.5	0.3	1.73	0.22	3.02
11	31.5	0.12	1.85	0.09	3.11
12	29.5	0.16	2.01	0.07	3.18
13	30.5	0.16	2.17	0.14	3.32
14	29.5	0.14	2.31	0.09	3.41
15	28.5	0.08	2.39	0.02	3.43
16	30.5	0.13	2.52	0.21	3.64
17	31.5	0.15	2.67	0.19	3.83
18	31.5	0.1	2.77	0.12	3.95
19	32	0.1	2.87	0.11	4.06
20	31	0.06	2.93	0.02	4.08
21	32	0.11	3.04	0.12	4.2
22	31	0.04	3.08	0.05	4.25
23	31	0.05	3.13	0.06	4.31
24	29.5	0.03	3.16	0	4.31
25	28	0	3.16	0	4.31
26	29.5	0.05	3.21	0.08	4.39
27	31	0.03	3.24	0.12	4.51
28	30.5	0.01	3.25	0.03	4.54
29	31	0.06	3.31	0.1	4.64
30	31	0.03	3.34	0.03	4.67

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

ฉ.1 ข้อมูลผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

วัน	ผลการทดลอง		
	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซต่อวัน (m <sup>3</sup> )	ก๊าซสะสม (m <sup>3</sup> )
1	29.5	0	0
2	32.5	0	0
3	32.5	0.05919	0.05919
4	31	0.55869	0.61788
5	30.5	1.34355	1.96143
6	31.5	1.41009	3.37152
7	32.5	1.51269	4.88421
8	32.5	1.54545	6.42966
9	32	1.47657	7.90623
10	32	1.17795	9.08418
11	32.5	1.1001	10.18428
12	31.5	0.89319	11.07747
13	29.5	0.63912	11.71659
14	30.5	0.3084	12.02499
15	29.5	0.10698	12.13197
16	28.5	0.9975	12.23172
17	30.5	0.2853	12.51702
18	31.5	0.31143	12.82845
19	31.5	0.31629	13.14474
20	32	0.28155	13.42629
21	31	0.07737	13.50366
22	32	0.21945	13.72311
23	31	0.14037	13.86348
24	31	0.14715	14.01063
25	29.5	0.06246	14.07309
26	28	0.00315	14.07624
27	29.5	0.05391	14.13015
28	31	0.07797	14.20812
29	30.5	0.07548	14.2836
30	31	0.10125	14.38485



ภาคผนวก ข

วิเคราะห์วัตถุประสงค์และประเมินศักยภาพของระบบ

## วิเคราะห์วัตถุดิบและประเมินศักยภาพของระบบ

### 1. ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติ

#### ข้อมูลจากการทดลอง (ตะกอนเลนปกติ)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 12.165 l
- ปริมาณตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 80 l
- ค่า TS ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 139.859 g/l
- ค่า TS ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 15.978 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 24.5 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 9.7 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 112.2 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 5.75 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 22.653 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 2.45 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 139.603 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 10.922 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 2.334 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 0.324 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 7.84 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 1.197 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ = 0.8165 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ = 0.6625 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 44.34%

#### 1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 1.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \left( \frac{139.859 - 15.978}{139.859} \right) \times 100 \\ &= 88.57\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

1.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ	= 60.41%
1.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบ	= 94.88%
1.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัด TVS ของระบบ	= 89.18%
1.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัด TFS ของระบบ	= 92.18%
1.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ของระบบ	= 86.12%
1.1.7 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ	= 84.73%
1.1.8 ประสิทธิภาพการกำจัด K ของระบบ	= 18.86%

**1.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด  
(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)**

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนที่เข้าระบบ (l)

S<sub>0</sub> คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนที่ออกจากระบบ (g/l)

**1.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่ถูกกำจัด**

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{12.165}{80(139.859 - 15.978)} \\ &= 0.0012 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{(12.165 \times 0.4434)}{80(139.859 - 15.978)} \\ &= 0.00054 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

- 1.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS = 0.0103 l/g TDS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS = 0.0046 l/g TDS removal
- 1.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TSS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TSS = 0.0014 l/g TSS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TSS = 0.00063 l/g TSS removal
- 1.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TVS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TVS = 0.0075 l/g TVS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TVS = 0.0033 l/g TVS removal
- 1.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TFS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TFS = 0.0012 l/g TFS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TFS = 0.00052 l/g TFS removal
- 1.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก BOD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม BOD = 0.0757 l/g BOD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม BOD = 0.0335 l/g BOD removal
- 1.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD = 0.0229 l/g COD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD = 0.0101 l/g COD removal
- 1.2.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก K ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม K = 0.9874 l/g K removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม K = 0.4378 l/g K removal

### 1.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนปกติ

#### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 80 l
- ตะกอนเลนหนัก  $80 \times 1.37 = 109.6$  kg
- หมักตะกอนเลน 30 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.012165 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 44.34%

1.3.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.012165}{30} = 0.000406 \text{ m}^3/\text{d}$

1.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 80 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.012165 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.012165)}{80}$$

$$= 0.000152 \text{ m}^3 \approx (0.152 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00015 m<sup>3</sup>

1.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 109.6 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.012165 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.012165)}{109.6}$$

$$= 0.00011 \text{ m}^3 \approx (0.11 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00011 m<sup>3</sup>

1.3.4 พลังงานค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนปกติ

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มี

ค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 44.34% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.4434 \times 55.5)}{1}$$

$$= 24.6 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 44.34% มีค่าความร้อน 24.6 MJ/kg

## 2. ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

### ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมกากน้ำตาล 10%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 126.41 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 131.423 g/l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 128.8 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 123.6 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 69.275 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 18.3 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 12.875 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 94.42 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 87.579 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 45.18 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 33.221 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 105.084 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 75.112 g/l
- ค่า N ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 7.3 g/l
- ค่า N ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 0.6 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 0.2137 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 0.00961 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 9.405 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 7.51 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 87.3 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 70.9 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ = 150.1 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ = 121.9 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 1.61%

## 2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 2.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \left( \frac{131.423 - 128.8}{131.423} \right) \times 100 \\ &= 1.99\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

2.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ	= 43.95%
2.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบ	= 29.64%
2.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัด TVS ของระบบ	= 7.25%
2.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัด TFS ของระบบ	= 26.46%
2.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ	= 28.52%
2.1.7 ประสิทธิภาพการกำจัด N ของระบบ	= 91.78%
2.1.8 ประสิทธิภาพการกำจัด P ของระบบ	= 95.5%
2.1.9 ประสิทธิภาพการกำจัด K ของระบบ	= 20.15%
2.1.10 ประสิทธิภาพการกำจัด C ของระบบ	= 18.79%
2.1.11 ประสิทธิภาพการกำจัด OM ของระบบ	= 18.79%

## 2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ (l)

$S_0$  คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่เข้าระบบ (g/l)

$S$  คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10% ที่ออกจากระบบ (g/l)

2.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{126.41}{15(131.423 - 128.8)} \\ &= 3.2128 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{(126.41 \times 0.0161)}{15(131.423 - 128.8)} \\ &= 0.0517 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

2.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS} = 0.1551 \text{ l/g TDS removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS} = 0.0024 \text{ l/g TDS removal}$$

2.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TSS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TSS} = 1.5534 \text{ l/g TSS removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TSS} = 0.025 \text{ l/g TSS removal}$$

2.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TVS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TVS} = 1.8478 \text{ l/g TVS removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TVS} = 0.0297 \text{ l/g TVS removal}$$

2.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TFS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TFS} = 0.7046 \text{ l/g TFS removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TFS} = 0.0113 \text{ l/g TFS removal}$$

2.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD} = 0.2811 \text{ l/g COD removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD} = 0.0045 \text{ l/g COD removal}$$

2.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก N ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม N} = 1.2578 \text{ l/g N removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม N} = 0.0202 \text{ l/g N removal}$$

2.2.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก P ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม P} = 41.2922 \text{ l/g P removal}$$



ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม P = 0.6648 l/g P removal

2.2.9 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก K ที่ถูกกำจัด

ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม K = 4.4471 l/g K removal

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม K = 0.0715 l/g K removal

2.2.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก C ที่ถูกกำจัด

ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม C = 0.5138 l/g C removal

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม C = 0.0082 l/g C removal

2.2.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก OM ที่ถูกกำจัด

ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม OM = 0.2988 l/g OM removal

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม OM = 0.0048 l/g OM removal

## 2.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลและตะกอนเลนผสมยูเรีย

### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l

- ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg

- หมักตะกอนเลน 6 วัน

- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.12641 m<sup>3</sup>

- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 1.61%

2.3.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.12641}{6} = 0.021 \text{ m}^3/\text{d}$

2.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.12641 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.12641)}{15}$$

$$= 0.00843 \text{ m}^3 \approx (8.43 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00843 m<sup>3</sup>

2.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.12641 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.12641)}{20.55}$$

$$= 0.00615 \text{ m}^3 \approx (6.15 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00615 m<sup>3</sup>

2.3.4 พลังงานค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 10%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มีค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 1.61% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.0161 \times 55.5)}{1}$$

$$= 0.89 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 1.61% มีค่าความร้อน 0.89 MJ/kg

### 3. ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาลในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

#### 3.1 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

##### ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมกากน้ำตาล 4%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 48.94 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 125.748 g/l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 94.841 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 79 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 61.775 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 46.748 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 33.06 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 70.61 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 38.692 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 37 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 21.66 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 50.596 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 36.67 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 67.3 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 46.6 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ = 115.8 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ = 80.2 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 61.57%

#### 3.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 3.1.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \left( \frac{125.748 - 94.841}{125.748} \right) \times 100 \\ &= 24.58\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

3.1.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ	= 21.8%
3.1.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบ	= 29.28%
3.1.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัด TFS ของระบบ	= 45.2%
3.1.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ของระบบ	= 41.46%
3.1.1.6 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ	= 27.53%
3.1.1.7 ประสิทธิภาพการกำจัด C ของระบบ	= 30.76%
3.1.1.8 ประสิทธิภาพการกำจัด OM ของระบบ	= 30.74%

### 3.1.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ (l)

S<sub>0</sub> คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4% ที่ออกจากระบบ (g/l)

#### 3.1.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{48.94}{15(125.748 - 94.841)} \\ &= 0.11 \text{ l/g TS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{(48.94 \times 0.6157)}{15(125.748 - 94.841)} \\ &= 0.06 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

- 3.1.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS = 0.19 l/g TDS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS = 0.12 l/g TDS removal
- 3.1.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TSS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TSS = 0.24 l/g TSS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TSS = 0.15 l/g TSS removal
- 3.1.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TFS ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TFS = 0.1 l/g TFS removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TFS = 0.06 l/g TFS removal
- 3.1.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก BOD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม BOD = 0.21 l/g BOD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม BOD = 0.13 l/g BOD removal
- 3.1.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD = 0.23 l/g COD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD = 0.14 l/g COD removal
- 3.1.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก C ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม C = 0.16 l/g C removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม C = 0.09 l/g C removal
- 3.1.2.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก OM ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม OM = 0.09 l/g OM removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม OM = 0.06 l/g OM removal

### 3.1.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

#### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg
- หมักตะกอนเลน 9 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.04894 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 61.57%

$$3.1.3.1 \text{ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน } \frac{0.04894}{9} = 0.00544 \text{ m}^3/\text{d}$$

3.1.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.04894 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.04894)}{15} \\ = 0.00326 \text{ m}^3 \approx (3.26 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00326 m<sup>3</sup>

3.1.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.04894 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.04894)}{20.55} \\ = 0.00238 \text{ m}^3 \approx (2.38 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00238 m<sup>3</sup>

3.1.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 4%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มี

ค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 61.57% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.6157 \times 55.5)}{1} \\ = 34.17 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 61.57% มีค่าความร้อน 34.17 MJ/kg

## 3.2 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมกากน้ำตาล 8%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 183.21 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 182.449 g/l
- ค่า TS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 105.831 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 122.9 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 79.15 g/l

- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 59.594 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 26.681 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 103.59 g/l
- ค่า TVS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 59.095 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 78.859 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 46.736 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ = 97.3 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ = 90.71 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 7.73%

### 3.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 3.2.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ} &= \left( \frac{182.449 - 105.831}{182.449} \right) \times 100 \\ &= 41.99\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

$$3.2.1.2 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ} = 35.59\%$$

$$3.2.1.3 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบ} = 55.19\%$$

$$3.2.1.4 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TVS ของระบบ} = 42.95\%$$

$$3.2.1.5 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TFS ของระบบ} = 40.73\%$$

$$3.2.1.6 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ} = 6.77\%$$

### 3.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

- เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ (l)  
 $S_0$  คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่เข้าระบบ (g/l)  
 S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8% ที่ออกจากระบบ (g/l)

3.2.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{183.21}{15(182.449 - 105.831)} \\ &= 0.16 \text{ l/g TS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TS} &= \frac{(183.21 \times 0.0773)}{15(182.449 - 105.831)} \\ &= 0.01 \text{ l/g TS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

3.2.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS} &= 0.28 \text{ l/g TDS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS} &= 0.02 \text{ l/g TDS removal} \end{aligned}$$

3.2.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TSS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TSS} &= 0.37 \text{ l/g TSS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TSS} &= 0.03 \text{ l/g TSS removal} \end{aligned}$$

3.2.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TVS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TVS} &= 0.27 \text{ l/g TVS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TVS} &= 0.02 \text{ l/g TVS removal} \end{aligned}$$

3.2.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TFS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TFS} &= 0.38 \text{ l/g TFS removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TFS} &= 0.03 \text{ l/g TFS removal} \end{aligned}$$

3.2.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD} &= 1.86 \text{ l/g COD removal} \\ \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD} &= 0.14 \text{ l/g COD removal} \end{aligned}$$



### 3.2.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

#### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg
- หมักตะกอนเลน 22 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.18321 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 7.73%

$$3.2.3.1 \text{ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน } \frac{0.18321}{22} = 0.00833 \text{ m}^3/\text{d}$$

#### 3.2.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.18321 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.18321)}{15}$$

$$= 0.01221 \text{ m}^3 \approx (12.21 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.01221 m<sup>3</sup>

#### 3.2.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.18321 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.18321)}{20.55}$$

$$= 0.00892 \text{ m}^3 \approx (8.92 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00892 m<sup>3</sup>

#### 3.2.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 8%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มี

ค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 7.73% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.0773 \times 55.5)}{1}$$

$$= 4.29 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 7.73% มีค่าความร้อน 4.29 MJ/kg

### 3.3 หมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

#### ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมกากน้ำตาล 12%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 125.55 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ = 55.649 g/l
- ค่า TSS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่ออกจากระบบ = 15.041 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ = 88.332 g/l
- ค่า TFS ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่ออกจากระบบ = 55.321 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ = 151.788 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่ออกจากระบบ = 121.59 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 4.06%

#### 3.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 3.3.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TSS ของระบบ} &= \left( \frac{55.649 - 15.041}{55.649} \right) \times 100 \\ &= 72.97\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

$$3.3.1.2 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TFS ของระบบ} = 37.37\%$$

$$3.3.1.3 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ} = 19.89\%$$

#### 3.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ (l)

$S_0$  คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12% ที่ออกจากระบบ (g/l)

3.3.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TSS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TSS} &= \frac{125.55}{15(55.649 - 15.041)} \\ &= 0.21 \text{ l/g TSS removal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TSS} &= \frac{(125.55 \times 0.0406)}{15(55.649 - 15.041)} \\ &= 0.0083 \text{ l/g TSS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

3.3.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TFS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TFS} = 0.25 \text{ l/g TFS removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TFS} = 0.01 \text{ l/g TFS removal}$$

3.3.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD} = 0.28 \text{ l/g COD removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD} = 0.01 \text{ l/g COD removal}$$

3.3.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg
- หมักตะกอนเลน 9 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.12555 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 4.06%

3.3.3.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.12555}{9} = 0.01395 \text{ m}^3/\text{d}$

3.3.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.12555  $\text{m}^3$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X  $\text{m}^3$

$$X = \frac{(1 \times 0.12555)}{15}$$

$$= 0.00837 \text{ m}^3 \approx (8.37 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00837  $\text{m}^3$

3.3.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.12555  $\text{m}^3$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X  $\text{m}^3$

$$X = \frac{(1 \times 0.12555)}{20.55}$$

$$= 0.00611 \text{ m}^3 \approx (6.11 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00611  $\text{m}^3$

3.3.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมกากน้ำตาล 12%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion>  $\text{CH}_4$  มี

ค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก  $\text{CH}_4$  100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่  $\text{CH}_4$  4.06% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.0406 \times 55.5)}{1}$$

$$= 2.25 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่  $\text{CH}_4$  4.06% มีค่าความร้อน 2.25 MJ/kg

#### 4. ผลการทดลองหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกรในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

##### 4.1 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5%

###### ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมมูลสุกร 5%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 14.03 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 23.5 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 20 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 4.44 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 3.442 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 0.18523 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 0.18248 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 1.374 g/l
- ค่า K ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 1.145 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 50.1 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 45.8 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ = 86.1 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ = 78.8 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 81.57%

##### 4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 4.1.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ} &= \left( \frac{23.5 - 20}{23.5} \right) \times 100 \\ &= 14.89\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

$$4.1.1.2 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ของระบบ} = 22.48\%$$

$$4.1.1.3 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด P ของระบบ} = 1.49\%$$

$$4.1.1.4 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด K ของระบบ} = 16.67\%$$

$$4.1.1.5 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด C ของระบบ} = 8.58\%$$

$$4.1.1.6 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด OM ของระบบ} = 8.48\%$$

#### 4.1.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ (l)

S<sub>0</sub> คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5% ที่ออกจากระบบ (g/l)

##### 4.1.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS} &= \frac{14.03}{15(23.5 - 20)} \\ &= 0.27 \text{ l/g TDS removal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS} &= \frac{(14.03 \times 0.8154)}{15(23.5 - 20)} \\ &= 0.22 \text{ l/g TDS removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

##### 4.1.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก BOD ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม BOD} = 0.94 \text{ l/g BOD removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม BOD} = 0.76 \text{ l/g BOD removal}$$

##### 4.1.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก P ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม P} = 340.12 \text{ l/g P removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม P} = 277.33 \text{ l/g P removal}$$

- 4.1.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก K ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม K = 4.08 l/g K removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม K = 3.33 l/g K removal
- 4.1.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก C ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม C = 0.22 l/g C removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม C = 0.18 l/g C removal
- 4.1.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก OM ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม OM = 0.13 l/g OM removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม OM = 0.1 l/g OM removal

#### 4.1.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5%

##### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20 kg
- หมักตะกอนเลน 24 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.01403 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 81.54%

4.1.3.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.01403}{24} = 0.000585 \text{ m}^3/\text{d}$

##### 4.1.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.01403 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.01403)}{15}$$

$$= 0.000935 \text{ m}^3 \approx (0.935 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000935 m<sup>3</sup>

##### 4.1.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.01403 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.01403)}{20}$$

$$= 0.000702 \text{ m}^3 \approx (0.702 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000702 m<sup>3</sup>

4.1.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมมูลสุกร 5%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มีค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 81.54% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.8154 \times 55.5)}{1}$$

$$= 45.25 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 81.54% มีค่าความร้อน 45.25 MJ/kg

## 4.2 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมมูลสุกร 10%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 65.42 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 24.25 g/l
- ค่า TDS ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 19.49 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 5.16 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 2.126 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 7.02 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 6.9768 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 0.18504 g/l
- ค่า P ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 0.16676 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 56.4 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 49.2 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ = 97 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ = 84.6 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 81.59%



#### 4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 4.2.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ของระบบ} &= \left( \frac{24.25 - 19.49}{24.25} \right) \times 100 \\ &= 19.63\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

$$4.2.1.2 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ของระบบ} = 58.79\%$$

$$4.2.1.3 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ} = 0.62\%$$

$$4.2.1.4 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด P ของระบบ} = 9.88\%$$

$$4.2.1.5 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด C ของระบบ} = 12.77\%$$

$$4.2.1.6 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด OM ของระบบ} = 12.78\%$$

#### 4.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ (l)

S<sub>0</sub> คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10% ที่ออกจากระบบ (g/l)

4.2.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก TDS ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม TDS} = \frac{65.42}{15(24.25 - 19.49)}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.92 \text{ l/g TDS removal} \\
 \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม TDS} &= \frac{(65.42 \times 0.8159)}{15 (24.25 - 19.49)} \\
 &= 0.75 \text{ l/g TDS removal}
 \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

- 4.2.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก BOD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม BOD = 1.25 l/g BOD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม BOD = 1.02 l/g BOD removal
- 4.2.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD = 100.95 l/g COD removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD = 82.37 l/g COD removal
- 4.2.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก P ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม P = 238.58 l/g P removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม P = 194.66 l/g P removal
- 4.2.2.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก C ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม C = 0.61 l/g C removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม C = 0.49 l/g C removal
- 4.2.2.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก OM ที่ถูกกำจัด  
 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม OM = 0.35 l/g OM removal  
 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม OM = 0.29 l/g OM removal

#### 4.2.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

##### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20 kg
- หมักตะกอนเลน 30 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.06542 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 81.59%

4.2.3.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.06542}{30} = 0.00218 \text{ m}^3/\text{d}$

## 4.2.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.06542 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.06542)}{15}$$

$$= 0.00436 \text{ m}^3 \approx (43.6 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00436 m<sup>3</sup>

## 4.2.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.06542 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.06542)}{20}$$

$$= 0.00327 \text{ m}^3 \approx (3.27 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00327 m<sup>3</sup>

## 4.2.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมมูลสุกร 10%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มีค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 81.59% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.8159 \times 55.5)}{1}$$

$$= 45.28 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 81.59% มีค่าความร้อน 45.28 MJ/kg

## 4.3 หมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

ข้อมูลจากการทดลอง (ผสมมูลสุกร 20%)

- ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 82.92 l
- ปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ = 15 l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ = 8.46 g/l
- ค่า BOD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่ออกจากระบบ = 1.289 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ = 12.06 g/l
- ค่า COD ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่ออกจากระบบ = 6.5892 g/l
- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ = 76.6 g/l

- ค่า C ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่ออกจากระบบ = 73.4 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ = 131.8 g/l
- ค่า OM ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่ออกจากระบบ = 126.2 g/l
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 68.89%

#### 4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

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

$$\begin{aligned} 4.3.1.1 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ของระบบ} &= \left( \frac{8.46 - 1.289}{8.46} \right) \times 100 \\ &= 84.76\% \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อินทรีย์อื่นๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

$$4.3.1.2 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ} = 45.36\%$$

$$4.3.1.3 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด C ของระบบ} = 4.18\%$$

$$4.3.1.4 \text{ ประสิทธิภาพการกำจัด OM ของระบบ} = 4.25\%$$

#### 4.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

(Total biogas per wt.organic removal and total CH<sub>4</sub> per wt.organic removal)

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด}}{Q(S_0 - S)}$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (l/wt.organic removal)

$$= \frac{(\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด} \times \text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน})}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือปริมาณตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ (l)

S<sub>0</sub> คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่เข้าระบบ (g/l)

S คือปริมาณสารอินทรีย์ของตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ที่ออกจากระบบ (g/l)

4.3.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก BOD ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม BOD} &= \frac{82.92}{15(8.46 - 1.289)} \\ &= 0.77 \text{ l/g BOD removal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม BOD} &= \frac{(82.92 \times 0.6889)}{15(8.46 - 1.289)} \\ &= 0.53 \text{ l/g BOD removal} \end{aligned}$$

∴ สารอินทรีย์อื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

4.3.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก COD ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD} = 1.01 \text{ l/g COD removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD} = 0.69 \text{ l/g COD removal}$$

4.3.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก C ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม C} = 1.73 \text{ l/g C removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม C} = 1.19 \text{ l/g C removal}$$

4.3.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อน้ำหนัก OM ที่ถูกกำจัด

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม OM} = 0.99 \text{ l/g OM removal}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม OM} = 0.68 \text{ l/g OM removal}$$

#### 4.3.3 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

##### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก 20 kg
- หมักตะกอนเลน 30 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.08292 m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 68.89%

$$4.3.3.1 \text{ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน } \frac{0.08292}{30} = 0.00276 \text{ m}^3/\text{d}$$

4.3.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

$$\text{ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.08292 m}^3$$

$$\therefore \text{ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ } X \text{ m}^3$$

$$X = \frac{(1 \times 0.08292)}{15}$$

$$= 0.00553 \text{ m}^3 \quad \approx (5.53 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00553 m<sup>3</sup>

#### 4.3.3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.08292 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.08292)}{20}$$

$$= 0.00415 \text{ m}^3 \quad \approx (4.15 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00415 m<sup>3</sup>

#### 4.3.3.4 พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%

อ้างอิงข้อมูลจาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat-of-combustion> CH<sub>4</sub> มีค่าความร้อนสุทธิ 55.5 MJ/kg

จาก CH<sub>4</sub> 100% มีค่าความร้อน 55.5 MJ/kg

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 68.89% มีค่าความร้อน X MJ/kg

$$X = \frac{(0.6889 \times 55.5)}{1}$$

$$= 30.23 \text{ MJ/kg}$$

∴ ก๊าซชีวภาพที่ CH<sub>4</sub> 68.89% มีค่าความร้อน 30.23 MJ/kg

## 5. ผลการทดลองหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสมและไม่กวนผสม

### 5.1 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนปกติแบบกวนผสม

#### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก  $(15 \times 1.37) = 20.55$  kg
- หมักตะกอนเลน 30 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.00334 m<sup>3</sup>

5.1.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.00334}{30} = 0.000167$  m<sup>3</sup>/d

#### 5.1.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00334 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.00334)}{15}$$

$$= 0.000223 \text{ m}^3 \approx (0.223 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000223 m<sup>3</sup>

#### 5.1.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00334 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.00334)}{20.55}$$

$$= 0.000163 \text{ m}^3 \approx (0.163 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000163 m<sup>3</sup>

### 5.2 ประเมินศักยภาพของระบบหมักตะกอนเลนปกติแบบไม่กวนผสม

#### ข้อมูลจากการทดลอง

- ตะกอนเลนมีปริมาตรรวม 15 l
- ตะกอนเลนหนัก  $(15 \times 1.37) = 20.55$  kg
- หมักตะกอนเลน 30 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ 0.00467 m<sup>3</sup>

5.2.1 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน  $\frac{0.00467}{30} = 0.000156$  m<sup>3</sup>/d

## 5.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนปริมาตร 15 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00467 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.00467)}{15}$$

$$= 0.000311 \text{ m}^3 \approx (0.311 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000311 m<sup>3</sup>

## 5.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนหนัก 20.55 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00467 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 0.00467)}{20.55}$$

$$= 0.000227 \text{ m}^3 \approx (0.227 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนหนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.000227 m<sup>3</sup>



## 6. ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

### ประเมินศักยภาพของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

#### ข้อมูลจากการทดลอง (ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20%)

- ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% มีปริมาตรรวม 600 l
- หมักก๊าซชีวภาพจำนวน 4 ถัง  $600 \times 4 = 2,400$  l
- ตะกอนเลน 480 l (1 l หนัก 1.37 kg)  $480 \times 1.37 = 657.6$  kg
- มูลสุกร 120 l (1 l หนัก 1.08 kg)  $120 \times 1.08 = 129.6$  kg
- ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% หนัก 787 kg  $787 \times 4 = 3,148$  kg
- หมักตะกอนเลน 20 วัน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้  $13.42629$  m<sup>3</sup>
- ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH<sub>4</sub>) = 68.89%

$$6.1 \text{ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน } \frac{13.42629}{20} = 0.67 \text{ m}^3/\text{d}$$

#### 6.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรตะกอนเลน

ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ปริมาตร 2,400 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 13.43 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 13.42629)}{2,400}$$

$$= 0.0056 \text{ m}^3 \approx (5.6 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% ปริมาตร 1 l ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.0056 m<sup>3</sup>

#### 6.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนเลน

ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% หนัก 3,148 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 13.43 m<sup>3</sup>

∴ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% หนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ X m<sup>3</sup>

$$X = \frac{(1 \times 13.42629)}{3,148}$$

$$= 0.00427 \text{ m}^3 \approx (4.27 \text{ l})$$

∴ ตะกอนเลนผสมมูลสุกร 20% หนัก 1 kg ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00427 m<sup>3</sup>

ภาคผนวก ซ

แผนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

### แผนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน

ถังที่	วันที่																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1						0.842	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070											
2						0.842	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070											
						1.684																									
						-0.65	1.034																								
							1.790																								
							-0.65	1.140																							
								1.912																							
								-0.65	1.262																						
									2.000																						
									-0.65	1.350																					
										1.938																					
									-0.65	1.288																					
3										0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070		
4										0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070		
										1.838																					
										-0.65	1.188																				
											1.634																				
											-0.65	0.984																			
												1.330																			
												-0.65	0.680																		
													1.112																		
													-0.65	0.462																	
														1.184																	
														-0.65	0.534																
															1.286																
															-0.65	0.636															
																1.534															
																-0.65	0.884														
																	1.810														
																	-0.65	1.160													
																		2.056													
																		-0.65	1.406												
																			2.134												
																			-0.65	1.480											

แผนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือน (ต่อ)

1	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070										0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294				
2	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070										0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294				
																				2.030													
																				-0.65	1.380												
																					1.826												
																					-0.65	1.176											
																						1.522											
																						-0.65	0.872										
																							1.304										
																							-0.65	0.654									
																								1.376									
																								-0.65	0.726								
																									1.478								
																									-0.65	0.828							
																									1.726								
																										-0.65	1.076						
																											2.002						
																											-0.65	1.352					
																													2.248				
																													-0.65	1.598			
																													2.326				
	1.676																													-0.65			
3	0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070													
4	0.000	0.000	0.014	0.139	0.335	0.352	0.378	0.386	0.369	0.294	0.275	0.223	0.159	0.077	0.026	0.024	0.071	0.077	0.079	0.070													
	2.226																																
	-0.65	1.576																															
		2.022																															
		-0.65	1.372																														
			1.718																														
			-0.65	1.068																													
				1.500																													
				-0.65	0.850																												
					1.572																												
					-0.65	0.922	ครบรอบการใช้แก๊ส 1 เดือน																										

ภาคผนวก ฅ

โปรแกรมที่ใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

```

function f=carel(x)

load pH

load T

load Q

y(1)=x(1);
s(1)=73.5;
sum_error=0;

for i=1:1:30
    u1(i)=((x(6)*s(i))/(x(13)+s(i)))+x(2);
    u2(i)=(x(7)*(pH(i))^2)+(14*x(8)*pH(i))+(48*x(9));
    u3(i)=x(10)*2.4*10^11*exp(-16000/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+x(11)*1.02*10^24
    *exp(-34500/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+(x(12)*0.037);
    u4(i)=(x(14)/(x(14)+Q(i)))+x(5);
    if u1(i)< 0 || u3(i)< 0
        x(1) = inf;x(2) = inf;x(3) = inf;x(4) = inf;x(5) = inf;x(6) = inf;x(7) = inf;x(8) = inf;x(9) =
inf;x(10) = inf;x(11) = inf;x(12) = inf;x(13) = inf;x(14) = inf;
    else
        x(1) = x(1);x(2) = x(2);x(3) = x(3);x(4) = x(4);x(5) = x(5);x(6) = x(6);x(7) = x(7);x(8) =
x(8);x(9) = x(9);x(10) = x(10);x(11) = x(11);x(12) = x(12);x(13) = x(13);x(14) = x(14);
    end
    if u4(i)> 2 || u4(i)< 0
        x(1) = inf;x(2) = inf;x(3) = inf;x(4) = inf;x(5) = inf;x(6) = inf;x(7) = inf;x(8) = inf;x(9) =
inf;x(10) = inf;x(11) = inf;x(12) = inf;x(13) = inf;x(14) = inf;
    else
        x(1) = x(1);x(2) = x(2);x(3) = x(3);x(4) = x(4);x(5) = x(5);x(6) = x(6);x(7) = x(7);x(8) =
x(8);x(9) = x(9);x(10) = x(10);x(11) = x(11);x(12) = x(12);x(13) = x(13);x(14) = x(14);
    end
end

```

```
u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);
y(i+1)=y(i)+(u(i))*y(i);
s(i+1)=s(i)-x(3)*u(i)*y(i);
Qes0(i)=x(4)*u(i)*y(i);
sum_error=sum_error+(Q(i)-Qes0(i))^2;
end
f=sum_error;

return
```

ภาคผนวก ๓

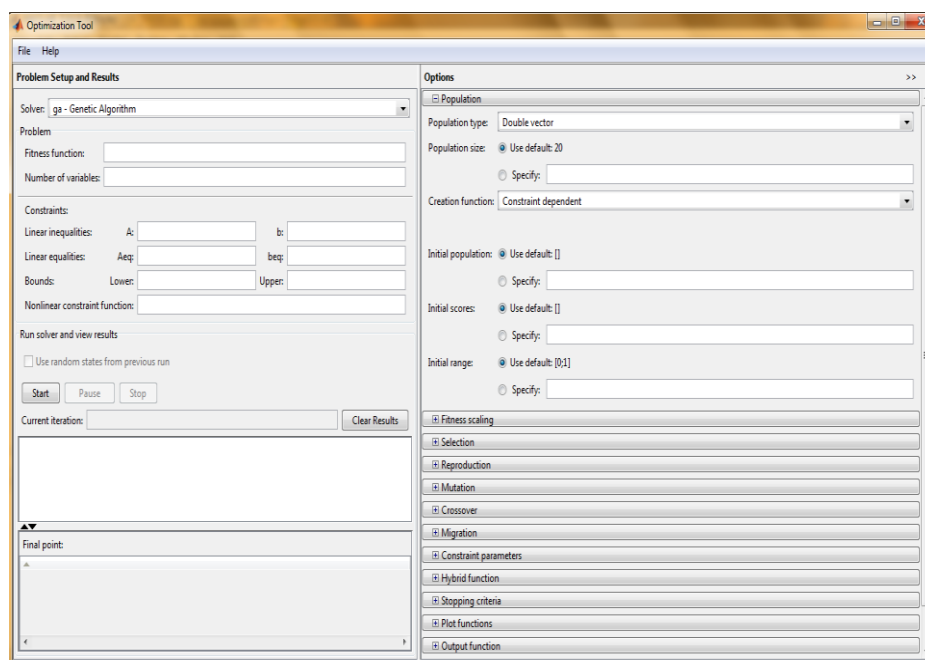
การใช้งานโปรแกรม MATLAB ส่วนของ Toolbox GA



1. นำข้อมูลจากการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ M-file (ภาคผนวก ฉ) โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นการจำลองกระบวนการผลิตการชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกำหนดค่าอินพุตเป็น อุณหภูมิและ pH และมีค่าเอาต์พุตคือค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ และใส่ค่าปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้น

2. สร้างแบบจำลองวัตถุประสงค์ ใน M-file ของ MATLAB ในที่นี้คือฟังก์ชัน Model\_monod ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาค่าทั้งหมด 14 ตัวแปรคือ  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{14}$

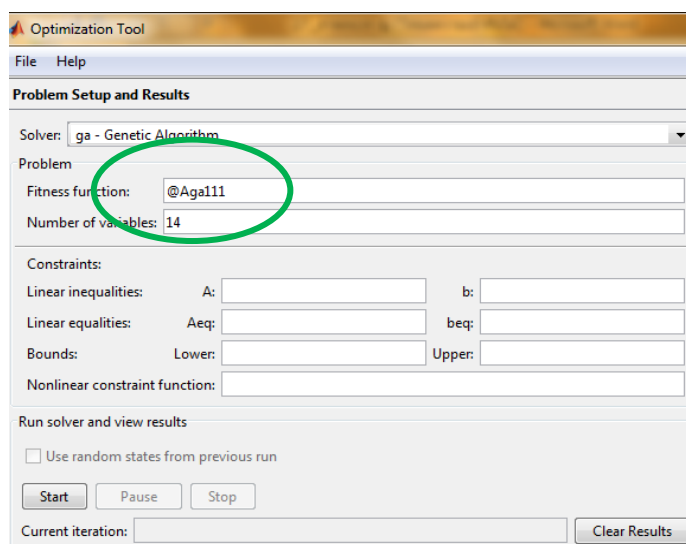
3. จากนั้นเรียกใช้ Genetic Algorithm Tool หรือ GAT ทำได้โดยการเรียกคำสั่งในหน้าต่าง Command Window (`>>gatool`) คำสั่งนี้จะปรากฏหน้าต่าง GA ดังรูปที่ ๑ องค์ประกอบต่าง ๆ ของ GAT แสดงถึงสัมประสิทธิ์ของ GA



รูปที่ ๑.1 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ GAT

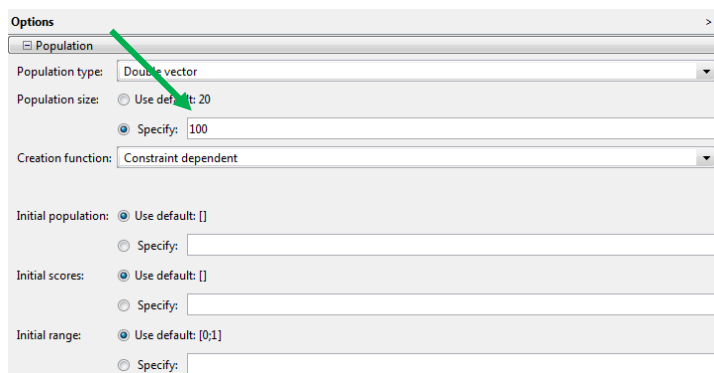
#### 4. การใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function)

พิมพ์คำสั่ง @Aga111 ในช่อง Fitness Function และจำนวนค่าตัวแปรใน Number of variables แสดงดังรูปที่ ญ.2



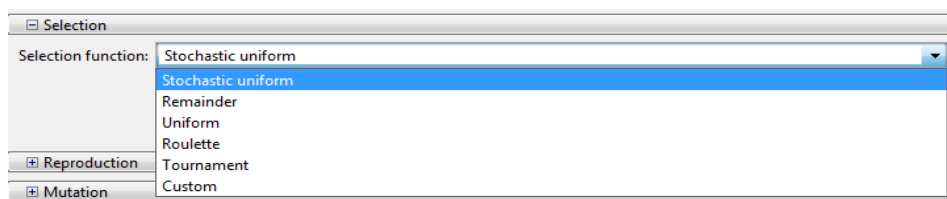
รูปที่ ญ.2 แผนภาพแสดงการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนสัมประสิทธิ์

5. การใส่จำนวนประชากร (Population Size) โดยไปที่ Option => Population โปรแกรมจะกำหนดค่าพื้นฐานจำนวนการสุ่มหาให้เท่ากับ 20 ถ้าต้องการปรับทำได้โดยเลือก Population Size => Specify แล้วระบุจำนวน แสดงดังรูป ญ.3



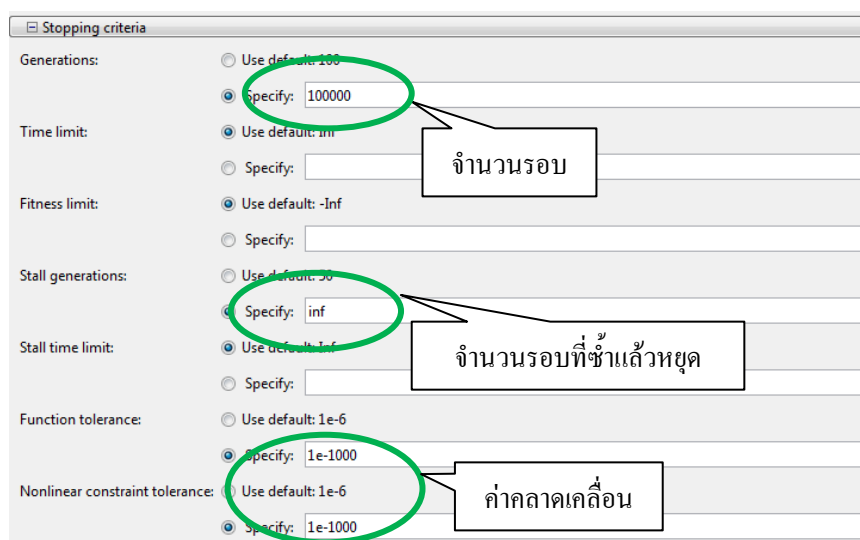
รูปที่ ญ.3 แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size

6. การกำหนดวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) โดยไปที่ Option => Selection มีวิธีการเลือกประชากรลูกหลานหลายวิธีเช่นวิธีเป็นรูปแบบ (Uniform), วิธีจัดการแข่งขัน (Tournament), วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette) และวิธีการสุ่มเฟ้นครอบครัววาล (Stochastic universal) แสดงดังรูปที่ ญ.4



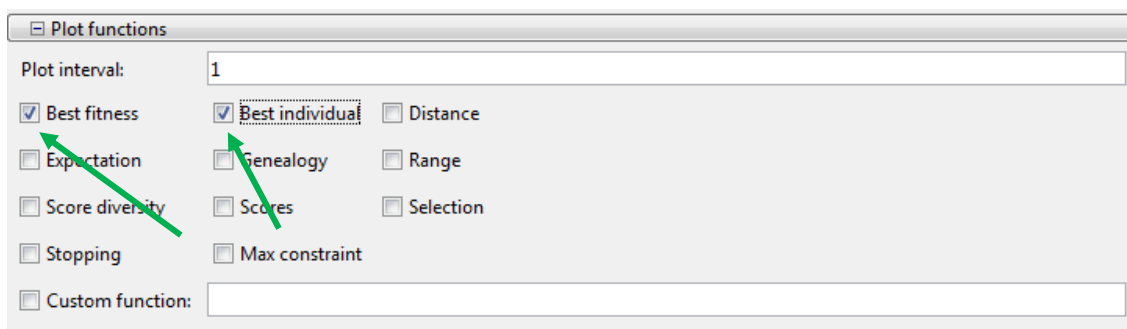
รูปที่ ญ.4 แผนภาพแสดงการเลือก Selection

7. การกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทำได้โดยไปที่ Option => Stopping criteria => Generations เพื่อกำหนดจำนวนรอบ, กำหนดช่วงเวลาในการรัน โดย Option => Stopping criteria => Time limit, กำหนดจำนวนรอบที่มีคำตอบเท่าเดิมแล้วหยุดทำงานโดย Option => Stopping criteria => Stall Generations, กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบโดย Option => Stopping criteria => Function tolerance แสดงดังรูปที่ ญ.5



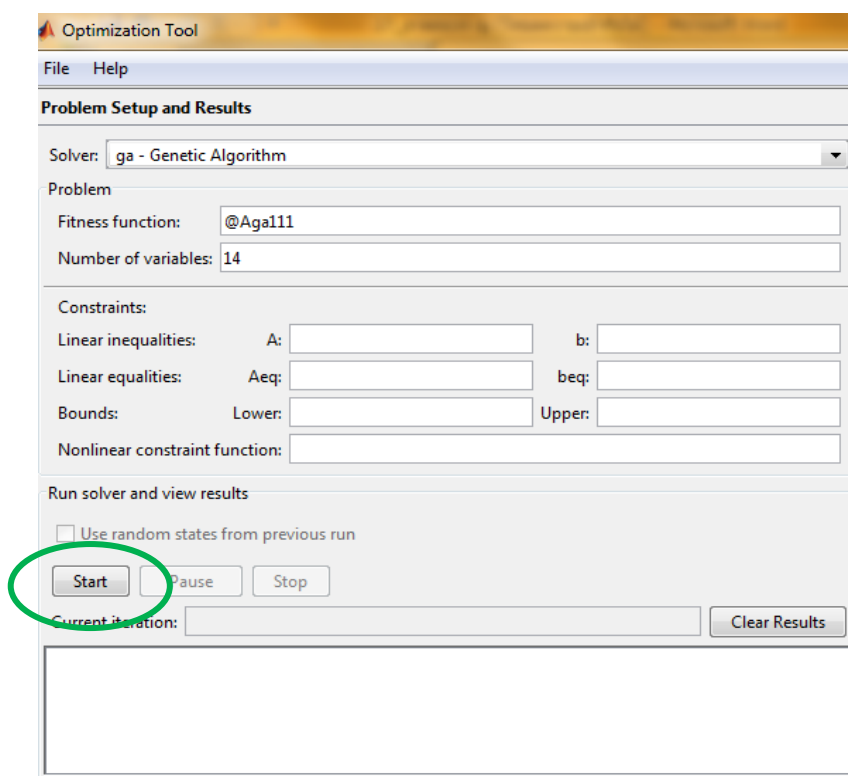
รูปที่ ญ.5 แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและค่าคลาดเคลื่อนของการทำงานของ GA

8. การแสดงกราฟ โดยเลือก Option => Plot Function => Best fitness และ Best individual แสดงดังรูปที่ ๖.6



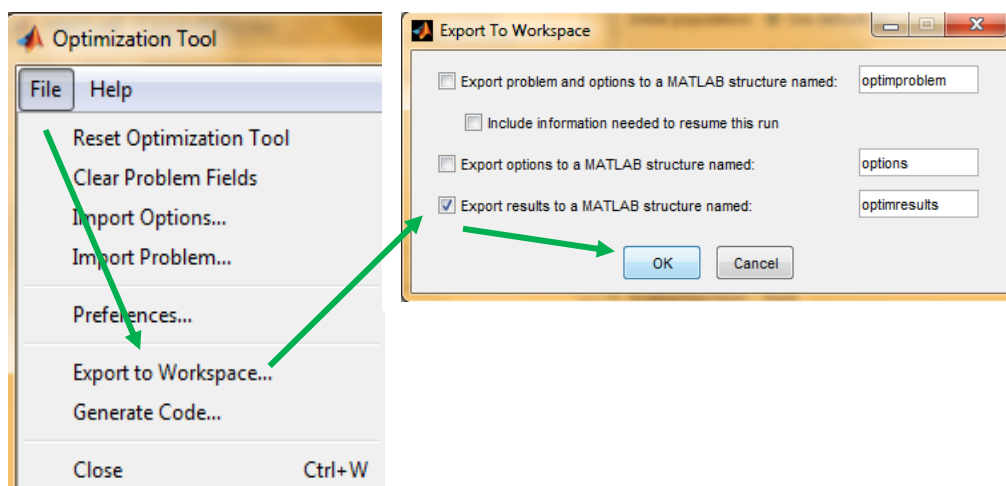
รูปที่ ๖.6 แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟการทำงานของ GA

9. Click Start เพื่อทำการเริ่ม โปรแกรม ดังรูปที่ ๖.7



รูปที่ ๖.7 แผนภาพแสดงการเริ่มโปรแกรม

10. การเก็บค่าตัวแปร โดยไปที่ File => Export to Workspace จะปรากฏหน้าต่าง แสดงดัง รูปที่ ๗.8 และ รูปที่ ๗.9



รูปที่ ๗.8 แผนภาพแสดงการเก็บค่าสัมประสิทธิ์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3.2526	0.0856	3.1025	1.5544	0.0575	0.2020	-3.2886	1.1074	1.2233	0.7738	1.3357	2.6510	2.9751	0.0537
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														

รูปที่ ๗.9 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์

ภาคผนวก ๑

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- ประสิทธิ์ ศรีนคร อรรถวิโรจน์ เขียวนาค กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และ จิระพล ศรีเสริฐผล (2553). การวิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบเบตซ์. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11 ประจำปี 255 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 6-7 พฤษภาคม 2553, หน้า 317-321.
- ประสิทธิ์ ศรีนคร ขวัญตา ตันติกำชน อรรถวิโรจน์ เขียวนาค จิระพล ศรีเสริฐผล และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2554). การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม ปีที่ 7 เล่มที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2554, หน้า 10-21.
- Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A., Chamniprasart, K., and Srikaew, A. (2010). **Estimation dynamical model of an anaerobic digestion of shrimp culture pond sediment in a biogas process using genetic algorithm.** The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10), Iwate, Japan, October 4-6 2010, pp.449-453.
- Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A., and Chamniprasart, K. (2010). **Mathematical modeling and parameters estimation of an anaerobic digestion of shrimp culture pond sediment in a biogas process.** International Journal of Energy and Environment, Issue4 Vol.4. pp.213-220.



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 ประจำปี 2553  
6 - 7 พฤษภาคม 2553 อาคารศูนย์มหาวิทยาลัย ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



## การวิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบตช์ Analysis of Biogas Production Process from Shrimp Culture Pond Sediment by Batch Method

ประสิทธิ์ ศรีนคร<sup>1</sup> อรรถวิโรจน์ เขียวนาค<sup>1</sup> กนต์ธร ชำนิประศาสน์<sup>2</sup> และ จิระพล ศรีสรุยมล<sup>3</sup>  
Prasit Srinakorn<sup>1</sup> Adtavirod Kheawnak<sup>1</sup> Kontorn Chamniprasart<sup>2</sup> and Jiraphon Srisertpol<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้วิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบตช์ ซึ่งเป็นระบบการย่อยแบบไร้ออกซิเจน วิธีแบบแบตช์จะเป็นการใส่ตะกอนเลนครั้งเดียวตลอดการทดลอง โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในถังหมัก, อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมัก (T1), อุณหภูมิของน้ำในถังหมัก (T2), อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพในถังหมัก (T3), อุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมัก (T4) และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ได้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 424.355 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน โดยมีก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) 44.34%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 4.91%, และก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) 17.23% ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

**คำสำคัญ:** กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ, กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและการวิเคราะห์ทางชีวเคมี

### ABSTRACT

This research was to study the analysis of biogas production process from shrimp culture pond sediment by batch method. This reaction is an anaerobic digestion processes. Batch method was achieved by adding shrimp sediments in a reactor at one time to start reactions until finished reactions. The experiment was to study pH in the reactor, the temperature of sediment (T1) in the reactor, the temperature of the water (T2) in the reactor, the temperature of the biogas (T3) in the reactor, the temperature of the air (T4) outside the reactor and birth biogas rate. Study the analysis physical and chemical characteristics of sediments, biogas production yield and to analyze components of biogas were produced from shrimp culture pond sediment. From the experiment total biogas yield of 13,255 cm<sup>3</sup> and the ability of biogas production was 424.355 cm<sup>3</sup>/day with methane (CH<sub>4</sub>) producing was 44.34%, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) was 4.91%, and nitrogen gas (N<sub>2</sub>) was 17.23%. At get from the education can induce design biogas from shrimp culture pond sediment system has the efficiency, in the lead goes to apply true work.

**Keywords:** Biogas production process, Anaerobic Digestion and Biochemistry analysis

### บทนำ

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเล ประกอบด้วยซากแพลงค์ตอนพืช, ซากแพลงค์ตอนสัตว์, สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง), ตะกอนน้ำ, ตะกอนดิน, ปูนขาวหรือสารแวนลอยอื่นๆ ทั้งหมดรวมกันแล้วเป็นของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะกองรวมกันอยู่

ตรงกลางบริเวณพื้นบ่อ มีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย ตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3,000-6,000 ลิตร/ไร่ (ที่ระยะเวลาของการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3-4 เดือน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวกุ้งที่ปล่อยลงไปเลี้ยงในบ่อและปริมาณของการให้อาหารในแต่ละครั้งด้วย (สำนึกนโยบายและแผน

<sup>1</sup>Graduate student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

<sup>2</sup>Associate professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

<sup>3</sup>Assistant professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000



สิ่งแวดล้อม, 2540) รายงานว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมลพิษทางสภาพแวดล้อมชายฝั่ง โดยผ่านทางน้ำและตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกมาจากบ่อ (ดุสิต และคณะ, 2537) กล่าวว่าการเกษตรกรรมปล่อยตะกอนเลนออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยงหรือดูดตะกอนเลนออกจากบ่อเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศชายเลนเกิดมลภาวะและต้นเหตุน้ำ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยเชื้อจุลินทรีย์ (สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก) เชื้อจุลินทรีย์นี้สามารถมีชีวิตรอยู่ได้โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน สารอินทรีย์ทุกชนิดที่นำไปย่อยได้สามารถนำมาหมักเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งสิ้น จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ (จิรวัดณ์, 2546) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.4% (สนั่น, 2538) ศึกษาการบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกร มีก๊าซมีเทนอยู่ 72% (สุรพล, 2526) ศึกษาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัว มีก๊าซมีเทนอยู่ 60.3% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ 36.1% (อาริยา, 2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 61.26% เนื่องจากปัจจุบันนี้ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ทดแทนหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน, ใช้กับเครื่องย่นต้นงานเกษตรหรืองานฟาร์มและผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์ม ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

**ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง**

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ เป็นตะกอนเลนจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรบ้านจางหลวง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นตะกอนเลนสดตั้งแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ศึกษา

**ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ**

การผลิตก๊าซชีวภาพใช้ระบบการบำบัดหรือย่อยสลัดจ์ (Sludge) แบบไร้ออกซิเจนรูปแบบการย่อยอัตรามาตรฐาน (Standard-Rate Digestion) รูปแบบนี้จะเกิดการย่อยด้วยจุลินทรีย์ในสลัดจ์ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ชุดตั้งหมักก๊าซชีวภาพใช้ถังพลาสติกขนาด 120 ลิตร ใส่ตะกอนเลนลงไป 80 ลิตรโดยใส่ครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch) ภายในถังหมักจะติดตั้งตัวตรวจวัดพีเอช (pH) เพื่อวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เพื่อวัดอุณหภูมิของตะกอนเลน, อุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลัดจ์, อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิภายนอกถังหมัก ชุดการทดลองตั้งแสดงในรูปที่ 2

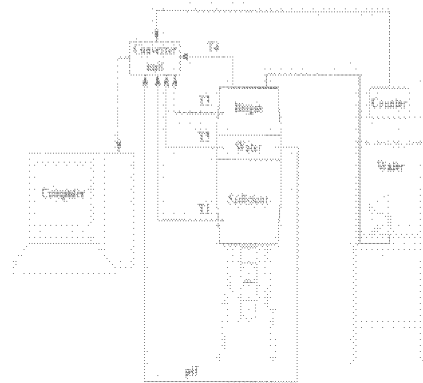
**ระบบตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ**

ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาใช้หลักการแทนที่ของน้ำ และใช้ชุดเคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบ เป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการเซตจำนวนรอบไว้ที่ 1 รอบเท่ากับก๊าซชีวภาพ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร

**ระบบบันทึกข้อมูล**

การบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม Lab View ในการวัดค่าและบันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง, อุณหภูมิของ (ตะกอนเลน, น้ำ, ก๊าซชีวภาพและของอากาศภายนอกถังหมัก) และชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยกำหนดให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง 1 เดือน

**ชุดการทดลอง**



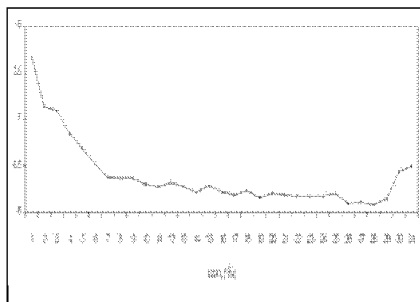
รูปที่ 2 ชุดการทดลอง

การเขตรบบของชุดการทดลองจะให้คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลาย, อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมัก (T1), อุณหภูมิของน้ำในถังหมัก (T2), อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพในถังหมัก (T3), อุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมัก (T4) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจาก Counter นับรอบ เมื่อเริ่มเดินระบบของชุดการทดลอง ค่าเริ่มต้นของ pH, T1, T2, T3, T4 และ Counter มีค่าเท่ากับ 7.76, 24.57°C, 23.43°C, 23.86°C, 22.56°C และ 0 รอบ ตามลำดับ

**ผลการทดลองและวิจารณ์**

**ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง**

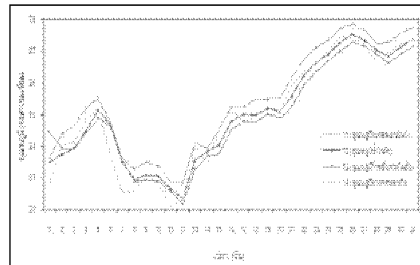
จากการทดลองค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เริ่มต้นหมักก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 7.76 ในช่วงวันที่ 1-7 ของการทดลองค่า pH ลดลงทุกวันและลดลงเร็วมาก โดยในวันที่ 7 มีค่า pH เท่ากับ 6.38 แสดงว่าแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในช่วงวันที่ 8-28 ของการทดลองค่า pH ลดลงเล็กน้อยสลับเพิ่มขึ้นบ้างบางวัน โดยในวันที่ 28 มีค่า pH เท่ากับ 6.08 และช่วงวันที่ 29-31 ของการทดลองค่า pH เริ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง มีผลให้แบคทีเรียลดการย่อยสลาย โดยในวันที่ 31 ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 6.49 และตลอดการทดลอง 1 เดือน ค่า pH เฉลี่ย 6.49 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

**อุณหภูมิ**

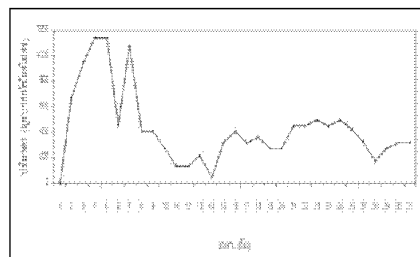
จากข้อมูลสรุปได้ว่าอุณหภูมิภายนอกถังหมัก มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 27.34 °C และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังหมักของตะกอนเลน, น้ำและก๊าซชีวภาพมีค่า 27.15 °C, 27.38 °C และ 27.76 °C ตามลำดับ และตลอดการทดลอง 1 เดือน อุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศของแต่ละวันสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 27.46 °C และ 22.10 °C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



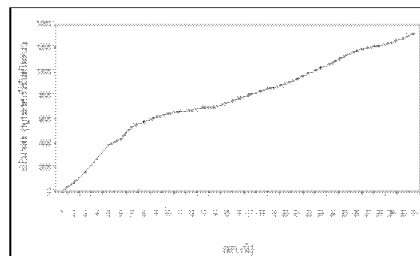
รูปที่ 4 อุณหภูมิ T1, T2, T3 และ T4

**ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ**

จากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเกิดขึ้นเร็วมาก เมื่อเริ่มการทดลองในวันถัดมามีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 675 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ และในวันที่ 4 และ 5 ของการทดลองก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีปริมาตร 1,140 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นปริมาตรการเกิดก๊าซชีวภาพลดน้อยลงและหลังจากวันที่ 14 ของการทดลองเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งที่มีปริมาตรสูงสุด 495 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อครบ 1 เดือนของการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 424.355 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

**องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ**

ผลวิเคราะห์ของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ผลวิเคราะห์(%)
ก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> )	44.34
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	4.91
ก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	17.23
ก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	ไม่พบ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	ไม่พบ

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(กุมภาพันธ์ 2553)

**คุณสมบัติของตะกอนเลน**

จากการทดลองพบว่าค่าสมบัติทางกายภาพและเคมี TS, TDS, TSS, TVS, TFS, BOD, COD และ K มีค่าลดลงเท่ากับ 123,881 mg/l, 14,800 mg/l, 106,450 mg/l, 20,203 mg/l, 128,681 mg/l, 2,010 mg/l, 6,643 mg/l และ 154 mg/l ตามลำดับ และมีค่า N, P, OC และ OM เพิ่มขึ้นเท่ากับ 700 mg/l, 130.71 mg/l, 4,600 mg/l และ 7,800 mg/l ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน-หลัง ผลิตก๊าซชีวภาพ

ลำดับที่	คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ก่อน	หลัง	หมายเหตุ
1	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (mg/l) (Positive potential of Hydrogen ; pH)	7.7	7.5	ลดลง 0.2
2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	139,859 (13.99%)	15,978 (1.60%)	ลดลง 123,881 (12.39%)
3	ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	24,500 (2.45%)	9,700 (0.97%)	ลดลง 14,800 (1.48%)
4	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	112,200 (11.22%)	5,750 (0.58%)	ลดลง 106,450 (10.65%)
5	ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	22,653 (2.27%)	2,450 (0.25%)	ลดลง 20,203 (2.02%)
6	ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	139,603 (13.96%)	10,922 (1.09%)	ลดลง 128,681 (12.87%)
7	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	2,334 (0.23%)	324 (0.03%)	ลดลง 2,010 (0.20%)
8	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	7,840 (0.78%)	1,197 (0.12%)	ลดลง 6,643 (0.66%)
9	ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	4,300 (0.43%)	5,000 (0.5%)	เพิ่มขึ้น 700 (0.07%)
10	ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	6.24 (0.0006%)	136.95 (0.01%)	เพิ่มขึ้น 130.71 (0.013%)
11	โปตัสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	816.5 (0.082%)	662.5 (0.07%)	ลดลง 154 (0.02%)
12	คาร์บอน (mg/l) (Organic Carbon ; OC)	42,700 (4.27%)	47,300 (4.73%)	เพิ่มขึ้น 4,600 (0.46%)
13	อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	73,500 (7.35%)	81,300 (8.13%)	เพิ่มขึ้น 7,800 (0.78%)

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มกราคม, กุมภาพันธ์ 2553)

### สรุป

จากการศึกษาวิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบคทีเรียพบว่าตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งสามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยมีค่าสมบัติทางกายภาพและเคมี (TS, TDS, TSS, TVS, TFS, BOD, COD และ OM) ของตะกอนเลนเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณค่าทางอาหารที่จุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และย่อยสลายได้ก๊าซชีวภาพออกมา และเมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพกับหลังหมักก๊าซชีวภาพ จะเห็นได้เห็นว่าส่วนมากมีค่าลดลง ยกเว้น N, P, OC และ OM มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าตะกอนเลนหลังหมักก๊าซชีวภาพแล้วมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยลง สังเกตได้จากค่า BOD และ COD ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำเสีย ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด BOD และ COD เท่ากับ 86.12% และ 84.73% ตามลำดับ ดังนั้นตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เป็นแนวทางในการบำบัดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากตะกอนเลนและได้พลังงานมาใช้ด้วย แต่ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ในครั้งนี้น่าจะนำไปสู่การออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2546). ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตรา การย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรจระป้อง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ดุสิต ตันวิไล, คณิต ไชยาคำ, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตรและเชาว์ ศรีวิชัย (2537). การตรวจและติดตามคุณภาพน้ำและดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำจังหวัดปัตตานี. รายงานสัมมนาวิชาการประจำปี 2537 กรมประมง
- สนั่น ตั้งสถิต (2538). การบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโรบิกแบบ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุรพล สุวคนธ์ (2526). การปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพให้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาการสอนเคมี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2540). รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม.

อาริยา วิรัชวรกุล (2546). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



## การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน Treatment of Marine Shrimp Culture Pond Sediment by Anaerobic Digestion Process

ประสิทธิ์ ศรีนคร Prasit Srinakorn<sup>a,✉</sup> ขวัญตา ดันติกาม-ton<sup>b</sup>  
อรทวีโรจน์ เขียววาศ Adtavirod Khaewnak<sup>c</sup> จิระพล ศรีเสริฐผล Jiraphon Srisertpol<sup>d</sup>  
กนต์ธร ชำนิประศาสน์ Kontorn Chamniprasart<sup>e</sup>

- <sup>a</sup> นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
Doctoral Student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
- <sup>b</sup> อาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง  
Lecturer, Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Campus
- <sup>c</sup> นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
Master's Student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
- <sup>d</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
- <sup>e</sup> รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

✉ sr\_prasit@hotmail.com

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีวิธีการเลี้ยงแตกต่างกัน 2 แบบ คือ การเลี้ยงกุ้งทะเลแบบไม่ใช้จุลินทรีย์ EM (Effective Microorganisms) ในขณะเลี้ยง และแบบใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยง ผลการศึกษาพบว่า การบำบัดตะกอนเลนโดยใช้ตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งแบบไม่ใช้จุลินทรีย์สามารถลด TS TDS TSS TVS BOD และ COD ได้ 89% 60% 95% 89% 86% และ 85% ตามลำดับ และจากการเลี้ยงกุ้งแบบใช้จุลินทรีย์สามารถลดได้ 81% 52% 99% 80% 95% และ 95% ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลจากการบำบัดตะกอนเลนยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ การหมักตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบไม่ใช้จุลินทรีย์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดได้ 0.025 ลิตร/กรัม.ซีไอทีที่ถูกกำจัด โดยมีองค์ประกอบของ CH<sub>4</sub> CO<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ปริมาณเท่ากับ 44.34% 4.91% และ 17.23% ตามลำดับ ส่วนการหมักตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบใช้จุลินทรีย์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดได้ 0.0015 ลิตร/กรัม.ซีไอทีที่ถูกกำจัด โดยมีองค์ประกอบของ CH<sub>4</sub> CO<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ปริมาณเท่ากับ 11.75% 3.9% และ 5.18% ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณน้อยกว่าที่ได้จากวัสดุตั้งต้นชนิดอื่น แต่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มได้

**คำสำคัญ:** การบำบัดตะกอนเลน การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

### Abstract

This research was to study the treatment of sediment in marine shrimp culture ponds by anaerobic digestion process in biogas production, comparing between two culture systems: with and without use of EM (Effective microorganisms) technology in shrimp culture. The results showed that the treatment of pond sediment by anaerobic digestion process could reduce TS, TDS, TSS, TVS, BOD and COD by 89%, 60%, 95%, 89%, 86% and 85%, respectively in the non-EM culture farm, and 81%, 52%, 99%, 80%, 95% and 95%, respectively in the EM-based farm. In addition, the sediment treatment could produce biogas from the digestion. The anaerobic digestion of sediment from non-EM culture showed that the accumulated biogas production was 0.025 V/g.COD removal, and the biogas compositions of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> were 44.34%, 4.91% and 17.23%, respectively. In the EM-based culture farm, the treatment of pond sediment could produce 0.0015 V/g.COD removal of accumulated biogas, composed of 11.75%, 3.9% and 5.18% of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>, respectively. Although the cumulative biogas production in this study was less than that in other studies using different raw materials, the produced biogas could be used directly as cooking fuel.

**Keywords:** Sediment Treatment; Anaerobic Digestion; Biogas Production Process

## บทนำ

ปัจจุบันการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นอาชีพที่ทำรายได้ให้กับเกษตรกรอย่างต่อเนื่องและเป็นอาชีพหลักของจังหวัดที่อยู่ติดทะเลซึ่งสะดวกในการนำน้ำทะเลมาใช้ในการเลี้ยงกุ้ง จังหวัดตรังเป็นจังหวัดหนึ่งที่มีกลุ่มเกษตรกรประกอบอาชีพเลี้ยงกุ้งทะเลจำนวนมาก โดยเฉพาะอำเภอสิเกา อำเภอกันตัง อำเภอย่านตาขาว อำเภอปะเหลียน และอำเภอหาดสำราญ ซึ่งอำเภอดังกล่าวมีพื้นที่อยู่ที่ติดชายฝั่งทะเลอันดามัน จากสถิติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งประจำปี 2553 มีจำนวนผู้เลี้ยงกุ้งในจังหวัดตรังทั้งหมด 820 ราย รวมเนื้อที่ 11,311.9 ไร่ และจากสถิติการจำหน่ายกุ้งทะเลประจำปีงบประมาณ 2553 (ช่วงเดือนตุลาคม 2552 – มิถุนายน 2553) จังหวัดตรังสามารถผลิตกุ้งทะเลได้ 28,010,897 ตัน คิดเป็นมูลค่า 3,117,963,156 บาท (Trang Provincial Fisheries Office, 2010) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลสามารถทำรายได้ให้กับเกษตรกร แต่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก็เกิดขึ้นอย่างไม่มีการควบคุมจากการศึกษาพบว่าภาวะมลพิษจากบ่อเลี้ยงกุ้งถูกถ่ายเทไปยังสภาพแวดล้อมชายฝั่งโดยผ่านทางน้ำและตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกจากบ่อ (Tunvilai, Chaiyakam, Predalampaburt & Sriwichai, 1994) เกษตรกรมักปล่อยตะกอนเลนออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยงหรือคัดตะกอนเลนออกจากบ่อเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งทะเลและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรง และเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและต้นเขิน Paez-osuna, Guerro-galvan & Ruiz-fernandez (1998) ศึกษาการเลี้ยงกุ้งทะเลในแถบตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศเม็กซิโก พบว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดย การเพิ่มปริมาณธาตุอาหารและสารอินทรีย์ Anh, Kroeze, Bush & Mol (2010) ประเมินผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาในประเทศเวียดนาม พบว่าแหล่งกำเนิดที่สำคัญของมลพิษคือ การปล่อยทั้งน้ำเสียและตะกอนเลน ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดจากการทำฟาร์มกุ้งคือ มลพิษทางน้ำ ตะกอนปนเปื้อน และการแพร่กระจายเชื้อโรค นอกจากนี้ การเลี้ยงกุ้งเพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุดก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเช่นกัน (Thongrak, Prato, Chaiyawarisajja & Kurtz, 1997)

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง (ตะกอนเลนกันบ่อหรือที่เรียกกันทั่วไปว่า มูลกุ้ง) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประกอบด้วย ซากแพลงก์ตอนพืช ซากแพลงก์ตอนสัตว์ สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง) และตะกอนดินทั้งหมดรวมกันเป็นของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งซึ่งจะกองรวมกันอยู่ตรงกลางบริเวณพื้นบ่อ มีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย ตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3,000 - 6,000 ลิตรต่อไร่ (ที่ระยะเวลาของการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3 - 4 เดือน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนกุ้งที่ปล่อยลงไปเลี้ยงในบ่อและปริมาณของการให้อาหารในแต่ละครั้งด้วย หลังจากจับกุ้งจำหน่ายแล้วขั้นตอนต่อไปเกษตรกรจะทำความสะอาดพื้นบ่อโดยต้องนำตะกอนเลนออกจากบ่อเพื่อตากบ่อเตรียมไว้เลี้ยงกุ้งในรอบถัดไป Office of Natural resources and Environmental Policy and Planning (1997) รายงานว่าเกษตรกรส่วนมากจะทิ้งตะกอนเลนกันบ่อออกไปนอกฟาร์ม เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดินและน้ำทะเลชายฝั่งซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศป่าชายเลน แหล่งหญ้าทะเลและแนวปะการัง ตะกอนเลนที่มาจากบ่อจะอุดมไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอาหารเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะความสมบูรณ์ของสารอาหารสูงและเกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสี เมื่อเกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นจะทำให้ออกซิเจนในน้ำทะเลลดลงส่งผลให้สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อยู่ใต้น้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากนี้ตะกอนเลนที่ทิ้งออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งทำให้น้ำทะเลมีความขุ่นมากขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการแพร่กระจายของแสงลงสู่น้ำทะเล ทำให้เกิดผลกระทบต่อปะการังและหญ้าทะเล ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งพบว่าค่า BOD และ COD ซึ่งแสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม ปีที่ 7 เล่มที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2554  
 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT Volume 7 / Number 2 / July - December 2011

กระบวนการย่อยสลายวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในสภาพไร้ออกซิเจนนั้น นอกจากจะช่วยในการกำจัดของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ก่อนปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมแล้ว วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิด อาทิ มูลวัว มูลสุกร และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตร ยังมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ เช่น Suwakon (1983) ศึกษาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัวแบบกึ่งต่อเนื่องในสภาพไร้ออกซิเจนโดยใช้ขุขี้หมักขนาด 2.75 ลิตร จำนวน 3 ขวด ใส่มูลวัวขูดละเอียดประมาณ 2.5 ลิตร และมีการเติมมูลวัวประมาณ 200 มิลลิลิตร โดยทำการเติม 2 วันต่อครั้ง ช่วงเวลาการหมักเฉลี่ย 50 วัน พบว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนประมาณ 60.3% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 36.1% Tangsathit (1995) ศึกษาการบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ใช้มูลสุกร 6 ลิตร ผลการทดลองพบว่าในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาการเก็บของเหลว 2.1 วัน เติมน้ำอินทรีย์ 6.14 กรัม TVA (Total volatile acid) ต่อลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัด TVA และ COD มีค่าสูงถึง 80% และ 90% ตามลำดับ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่า 0.95 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีก๊าซมีเทนอยู่ 72% และ Chaleewan (2003) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง โดยใช้ถังเหล็กที่มีปริมาตรใช้งาน 250 ลิตร และมีใบพัดกวนอยู่ในถัง วัสดุหมักที่นำมาศึกษาเป็นเศษเปลือกและแกนสับประรด และป้อนเข้าสู่ระบบโดยการเติมวันละ 1 ครั้ง ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บกัก 60 วัน ได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของระบบ 157 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.4% ปัจจุบันได้มีการนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อาทิ การใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน และการใช้กับเครื่องยนต์งานเกษตรหรืองานฟาร์มและผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์ม

อย่างไรก็ดี ยังไม่มีการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในการบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย โดยเทคโนโลยีชีวภาพดังกล่าวน่าจะจะมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นมีปริมาณสารอินทรีย์มาก งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนเลน รวมทั้งปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการบำบัดตะกอนเลนที่ใช้และไม่ใช้จุลินทรีย์ในการเลี้ยงกุ้ง การศึกษาดังกล่าวจะทำให้เกิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้ง ตลอดจนนัยต่อการใช้จุลินทรีย์ในการเลี้ยงกุ้ง ทั้งนี้ เทคโนโลยีดังกล่าวน่าจะช่วยลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมชายฝั่งอันเกิดจากการปลดปล่อยน้ำเสีย และก่อให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในแหล่งธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาของ Riffat & Krongthamchat (2006) ใช้แบคทีเรียกลุ่มที่ชอบความเค็ม (Halophilic bacteria) จากดินตะกอนป่าชายเลนที่มีความเค็มมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซมีเทนได้ ดังนั้น การใช้แบคทีเรียกลุ่มที่ชอบความเค็มและสามารถผลิตมีเทน (Methanogenic halophilic bacteria) จากธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะที่มีความเค็มได้โดยไม่ต้องใช้การเติมจุลินทรีย์จากแหล่งอื่น

### ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่วิจัยในครั้งนี้เป็นตะกอนเลนสดที่ได้จากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรบ้านฉางกลาง (ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM: Effective Microorganisms ขณะเลี้ยงกุ้ง) และบ้านหัวหิน (ใช้จุลินทรีย์ EM ขณะเลี้ยงกุ้ง) อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง ตะกอนเลนทั้ง 2 แหล่งมีลักษณะเหมือนกันโดยมีลักษณะเป็นโคลนเหลวเนื้อละเอียด สีดำสนิท และมีน้ำอยู่ในตะกอน เมื่อเกิดการย่อยสลายตะกอนจะตกลงมาโดยน้ำหนัก ทำให้น้ำเกิดขึ้นเล็กน้อย ลักษณะตะกอนเลนในบ่อกุ้งแสดงดังภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ตะกอนเลนบ้านฉางกลาง ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM



ภาพที่ 2 ตะกอนเลนบ้านหัวหิน ใช้จุลินทรีย์ EM

สำหรับการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลน ปริมาณธาตุอาหารของตะกอนเลนแห้งและปริมาณอินทรีย์วัตถุของตะกอนเลนแห้งนั้น งานวิจัยนี้แยกศึกษาการบำบัดตะกอนเลนออกเป็น 2 ชุดการทดลอง กล่าวคือ ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งจากบ้านฉางกลางซึ่งไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยงกุ้ง และชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งจากบ้านหัวหินซึ่งใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยงกุ้ง



#### วิธีวิเคราะห์ลักษณะตะกอนเลน

ตะกอนเลนที่ใช้วิจัยในครั้งนี้มีความแตกต่างกันในขั้นตอนของการเลี้ยงกุ้งและมีค่าใช้จ่ายมากสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของตะกอนเลนและวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ ในการทดลองจึงเลือกวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ และมีผลต่อการทดลองมากที่สุด การวิเคราะห์ลักษณะของตะกอนเลนก่อนบรรจุลงถังหมักได้ทำการเก็บตัวอย่างที่บริเวณตรงจุดกลางของกองตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง 1 ครั้ง เพื่อส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ หลังจากนั้นเมื่อทำการทดลองหมักเพื่อบำบัดตะกอนเลนครบ 31 วัน ก็ได้ทำการเก็บตัวอย่างของตะกอนเลนบริเวณตรงกลางในถังหมักอีก 1 ครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างตะกอนเลนส่งวิเคราะห์ที่ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การตรวจวัดและวิเคราะห์ลักษณะตะกอนเลนจะใช้วิธีวิเคราะห์ดังนี้ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ใช้วิธี Dried at 103 - 103 °C ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (TVS) ใช้วิธี Ignited at 550 °C บีโอดี (BOD) ใช้วิธี 5 Day BOD Test และซีโอดี (COD) ใช้วิธี Open reflux โดยการวิเคราะห์ทุกพารามิเตอร์ดำเนินการตามวิธีของ Standard method for the examination of water and wastewater (APHA, AWWA & WEF, 2005)

#### ระบบการบำบัดตะกอนเลน

การทดลองครั้งนี้เลือกใช้ระบบการบำบัดหรือย่อยสลัดจ์ (Sludge) แบบไร้ออกซิเจน รูปแบบการย่อยอัตรามาตรฐาน (Standard-Rate digestion) รูปแบบนี้จะเกิดการย่อยด้วยจุลินทรีย์ในสลัดจ์เองทำให้เกิดก๊าซมีเทน ชุดถังบำบัดใช้ถังพลาสติกขนาด 120 ลิตร บรรจุตะกอนเลนครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch) ปริมาณ 80 ลิตร โดยการบรรจุตะกอนเลนที่นำมาจากบ่อเลี้ยงกุ้งลงในถังหมัก กวนผสมตะกอนเลนในการบรรจุครั้งแรก หลังจากนั้นปล่อยให้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติเกิดการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เป็นระยะเวลา 31 วัน ภายในถังติดตั้งเครื่องวัด pH เพื่อวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เพื่อวัดอุณหภูมิของตะกอนเลน อุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลัดจ์ อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพ และอุณหภูมิภายนอกถังหมัก ชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 3

#### ระบบตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ

ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำและใช้ ชุดเคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบเป็นเครื่องตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

#### วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

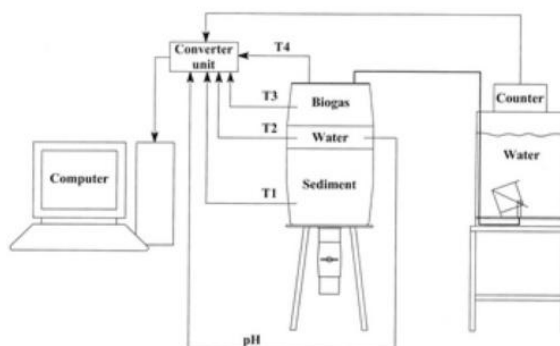
หลังจากเกิดก๊าซชีวภาพได้ทำการทดลองจุดไฟ และเมื่อก๊าซชีวภาพจุดไฟติดจึงเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ โดยใช้ถุงเก็บตัวอย่างก๊าซแบบทึบแสงขนาด 1 ลิตร (Bag foil grab polypropylene ยี่ห้อ SKC) และส่งตัวอย่างก๊าซชีวภาพวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Gas chromatography เพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยทำการวิเคราะห์ 3 ครั้ง สำหรับแต่ละชนิดก๊าซ และใช้ความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน CH<sub>4</sub>: 60%, CO<sub>2</sub>: 35%, N<sub>2</sub>: 5%, H<sub>2</sub>: 99.99% และ H<sub>2</sub>S: 900 ppm (Part per million ส่วนต่อล้านส่วน หรือ 1 ppm = 1 mg/l)

### ระบบบันทึกข้อมูล

งานวิจัยนี้มีการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ LabVIEW ในการเขียนโปรแกรมและบันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิของตะกอนเลน น้ำ ก๊าซชีวภาพและของอากาศภายนอกถังหมัก และชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น และยังสามารถประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพได้ (Simeonov & Stoyanov, 2003) โดยกำหนดให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง 1 เดือน

### ชุดการทดลอง

การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยการทดลองชุดที่ 1 เริ่มทดลองตั้งแต่วันที่ 8 มกราคม – 7 กุมภาพันธ์ 2553 (ระยะเวลาทำการทดลอง 31 วัน) ใช้ตะกอนเลนบ้านฉางกลาง (ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ขณะเลี้ยง) และการทดลองชุดที่ 2 เริ่มทดลองตั้งแต่วันที่ 19 พฤษภาคม – 18 มิถุนายน 2553 (ระยะเวลาทำการทดลอง 31 วัน) ใช้ตะกอนเลนบ้านหัวหิน (ใช้จุลินทรีย์ EM ขณะเลี้ยง) การติดตั้งระบบของชุดการทดลองจะใช้คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลัดจ์ อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมัก (T1) อุณหภูมิของน้ำในถังหมัก (T2) อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพในถังหมัก (T3) อุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมัก (T4) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจาก Counter นับรอบ



ภาพที่ 3 ชุดการทดลอง

### ผลการทดลอง

#### ประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนเลน

การศึกษาทดลองบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถบำบัดตะกอนเลนได้เป็นอย่างดี โดยลักษณะของตะกอนเลนหลังการบำบัดจากทั้งสองชุดการทดลอง ได้แก่ ตะกอนเลนบ้านฉางกลาง และตะกอนเลนบ้านหัวหิน มีค่าดัชนีต่าง ๆ ลดลง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน - หลังการกำจัด

รายการทดสอบ ลักษณะของตะกอนเลน	ตะกอนเลนบ้านฉางกลาง			ตะกอนเลนบ้านหัวหิน		
	ก่อนการ กำจัด (mg/L)	หลังการ กำจัด (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ก่อนการ กำจัด (mg/L)	หลังการ กำจัด (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS)	139,859	15,978	89	117,095	22,061	81
2. ปริมาณของแข็งละลายน้ำ ทั้งหมด (Total Dissolved Solids; TDS)	24,500	9,700	60	42,600	20,300	52
3. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids; TSS)	112,200	5,750	95	75,200	675	99
4. ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total Volatile Solid; TVS)	22,653	2,450	89	19,696	3,922	80
5. บีโอดี (Biological Oxygen Demand; BOD)	2,334	324	86	1,464	75	95
6. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD)	7,840	1,197	85	10,189	530	95

ตะกอนเลนบ้านฉางกลางเป็นตะกอนเลนที่ได้จากการเลี้ยงกุ้งที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่มีปริมาณ TS, TDS, TSS, TVS, BOD และ COD มีค่าเท่ากับ 139,859 mg/L, 24,500 mg/L, 112,200 mg/L, 22,653 mg/L, 2,334 mg/L และ 7,840 mg/L ตามลำดับ แต่หลังจากได้บำบัดตะกอนเลนด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ตะกอนเลนมีค่าต่าง ๆ ลดลงเหลือ 15,978 mg/L, 9,700 mg/L, 5,750 mg/L, 2,450 mg/L, 324 mg/L และ 1,197 mg/L ตามลำดับ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิผลการกำจัดค่าต่าง ๆ เท่ากับ 89%, 60%, 95%, 89%, 86% และ 85% ตามลำดับ

ตะกอนเลนบ้านหัวหินเป็นตะกอนเลนที่ได้จากการเลี้ยงกุ้งที่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่มี ปริมาณมี ปริมาณ TS, TDS, TSS, TVS, BOD และ COD มีค่าเท่ากับ 117,095 mg/L, 42,600 mg/L, 75,200 mg/L, 19,696 mg/L, 1,460 mg/L และ 10,189 mg/L ตามลำดับ แต่หลังจากได้บำบัดตะกอนเลนด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ตะกอนเลนมีค่าต่าง ๆ ลดลงเหลือ 22,061 mg/L, 20,300 mg/L, 675 mg/L, 3,922 mg/L, 75 mg/L และ 530 mg/L ตามลำดับ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบมีประสิทธิผลการกำจัดค่าต่างๆ เท่ากับ 81%, 52%, 99%, 80%, 95% และ 95% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนเลนแสดงดังตารางที่ 1

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตะกอนเลนที่เกิดจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีวิธีการเลี้ยงแตกต่างกันนั้น หลังจากทำการบำบัดตะกอนเลนโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแล้วตะกอนเลนบ้านฉางกลางและตะกอนเลนบ้านหัวหินมีประสิทธิผลการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน

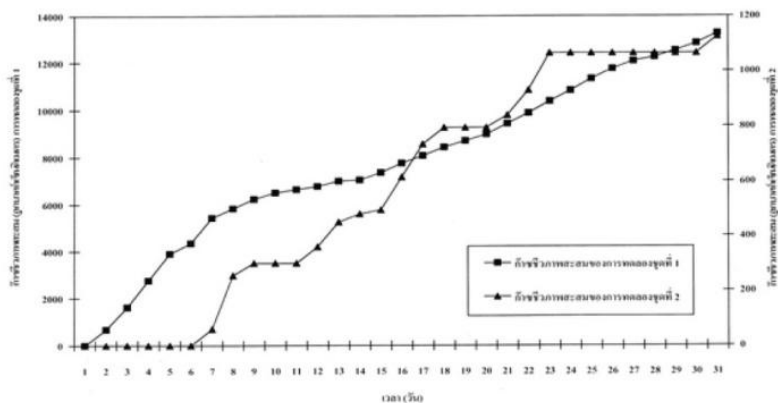
#### ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

ตะกอนเลนจากบ้านฉางกลางซึ่งไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่เลี้ยงกุ้ง ผลจากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเริ่มการทดลองในวันที่ 1 มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 675 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ และในวันที่ 4 และ 5 ของการทดลองก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีปริมาณ 1,140 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพลดน้อยลงและหลังจากวันที่ 14 ของการทดลองเกิดก๊าซ

ชีวภาพเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งมีปริมาณสูงสุด 495 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อครบ 1 เดือนของการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,155 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 0.025 ลิตร/กรัม.ซีไอโอทีที่ถูกกำจัด และมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.011 ลิตร/กรัม.ซีไอโอทีที่ถูกกำจัด และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 424.36 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน

ตะกอนเลนจากบ้านหัวหินซึ่งใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยงกุ้งผลจากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นช้ามากและเกิดก๊าซชีวภาพเป็นช่วงๆ โดยช่วงที่ 1 เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในวันที่ 7 ของการทดลองมีปริมาณ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเกิดขึ้นช้ากว่าการใช้ตะกอนเลนจากบ้านฉางกลางซึ่งไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ถึง 6 วัน และก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุดในวันที่ 8 ของการทดลองมีปริมาณ 195 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพค่อย ๆ ลดลงจนไม่เกิด ช่วงที่ 2 เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในวันที่ 12 ของการทดลองมีปริมาณ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร และก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากในวันที่ 16 และ 17 ของการทดลองมีปริมาณ 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นปริมาณการเกิดชีวภาพค่อยลดลงจนไม่เกิด ช่วงที่ 3 เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในวันที่ 21 ของการทดลองมีปริมาณ 45 ลูกบาศก์เซนติเมตร และก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากในวันที่ 23 ของการทดลองมีปริมาณ 135 ลูกบาศก์เซนติเมตร และหยุดเกิดก๊าซชีวภาพ เมื่อครบ 1 เดือนของการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 1,125 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 0.0015 ลิตร/กรัม.ซีไอโอทีที่ถูกกำจัด และมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.00017 ลิตร/กรัม.ซีไอโอทีที่ถูกกำจัด ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 36.29 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพกับการใช้ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งจากบ้านฉางกลางที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยง พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการใช้ตะกอนเลนจากบ้านหัวหินที่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะเลี้ยงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่า อัตราการเกิดก๊าซมีเทนน้อยกว่า และมีลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพแบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งแตกต่างจากการเกิดก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM จะมีการเกิดก๊าซอย่างต่อเนื่องและระยะเวลาการเกิดก๊าซตั้งแต่เริ่มต้นเกิดก๊าซชีวภาพจนกระทั่งหยุดการเกิดก๊าซชีวภาพมีระยะเวลายาวนานกว่า



ภาพที่ 4 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2

### องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์แยกองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนทั้งสองชุดการทดลองพบว่า การใช้ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งจากบ้านฉางกลางซึ่งไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่เลี้ยงจะให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทน และก๊าซไนโตรเจนสูงกว่าการใช้ตะกอนเลนจากบ้านหัวหินที่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่เลี้ยง ส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน และในทั้งสองชุดการทดลองไม่พบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนทั้งสองชุดการทดลองแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนบ้านฉางกลางและบ้านหัวหิน

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ตะกอนเลนบ้านฉางกลาง (%)	ตะกอนเลนบ้านหัวหิน (%)
ก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> )	44.34	11.75
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	4.91	3.9
ก๊าซไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	17.23	5.18
ก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	ไม่พบ	ไม่พบ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	ไม่พบ	ไม่พบ

### วิจารณ์ผล

ผลจากการศึกษาลักษณะของตะกอนเลนพบว่า ตะกอนเลนมีปริมาณ TS, TDS, TSS, TVS, BOD และ COD สูงมาก การใช้ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพสามารถลดปริมาณ TS, TDS, TSS, TVS, BOD และ COD ลงได้ในระดับสูงทั้งในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการใช้จุลินทรีย์ EM และที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ในขณะที่เลี้ยงกุ้ง (52% - 99%) ผลการทดลองดังกล่าวแสดงว่าการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสามารถลดปริมาณของเสียลงได้ ซึ่งเป็นไปตามหลักการบำบัดโดยการใช้ออกซิเจนย่อยสลายของเสียให้เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน อย่างไรก็ตาม การบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีและไม่มีการใช้จุลินทรีย์ EM นั้นก่อให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยในระยะเวลา 30 วัน บ่อเลี้ยงกุ้งที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ EM ได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,155 ลูกบาศก์เซนติเมตร มากกว่าปริมาณที่ได้จากบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้จุลินทรีย์ EM ที่ได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดในระยะเวลาเดียวกันเพียง 1,125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความแตกต่างดังกล่าวอาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ EM จากการเลี้ยงกุ้งสามารถกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในแหล่งธรรมชาติ ทำให้กระบวนการย่อยสลายมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตะกอนเลนสดที่ไม่ผ่านการเลี้ยงด้วย EM (Chan, Chu & Wong, 1999)

อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ EM โดยทั่วไปสามารถลดปริมาณ TSS TVS และ BOD ได้ หากแต่ไปเพิ่มปริมาณ TDS และ COD ที่อาจเกิดจากการย่อยสลายเปลี่ยนรูปของสาร (Chantsavang, Sinratchatanun, Ayuwat & Sirirote, 1994) ซึ่งในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนั้นหาก COD มีค่าสูงจะเป็นสารตั้งต้นและสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดี (Zakarya, Tajaradin, Abustan & Ismail, 2008) แต่จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า COD จากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่ผ่านการเลี้ยงด้วยจุลินทรีย์ EM มีค่าสูงกว่าแต่ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยกว่าบ่อเลี้ยงกุ้งที่เลี้ยงโดยไม่ใช้จุลินทรีย์ EM อีกทั้งยังใช้ระยะเวลานานกว่าโดยเปรียบเทียบ ทั้งนี้ เนื่องจากจุลินทรีย์ EM อันประกอบด้วยแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลกติก (Lactic bacteria) แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้ (Photosynthetic bacteria) ยีสต์

และรา มีคุณสมบัติเจริญเติบโตได้ดี และสามารถบำบัดของเสียโดยเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากระบวนการหมักนั้นเกิดขึ้นขณะเลี้ยงกุ้งแล้ว (Szymanski & Patterson, 2003) อย่างไรก็ตามการบำบัดของเสียจากบ่อปลาทะเลจากการศึกษาของ Gebauer (2004) สามารถลดปริมาณ COD และผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 0.114 - 0.184 ลิตร/กรัม.ซีโอที ในระยะเวลา 360 วัน ดังนั้น หากปรับสภาพการทดลองให้เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบความเค็มน่าจะสามารถยี้ระยะเวลาการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนคือ pH อยู่ในช่วง 6-7.5 และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 22 - 28 °C (Srisertpol, Srinakorn, Kheawnak & Chamniprasert, 2010)

การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งจากการทดลองได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพียง 0.42 ลิตร/วัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยกว่าการย่อยสลายมูลสุกรในการทดลองของ Tangsathit (1996) และการบำบัดของเสียจากการผลิตผลไม้กระป๋องในการศึกษาของ Chaleewan (2003) ที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.95 ลิตร/วัน และ 157 ลิตร/วัน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของปริมาณก๊าซมีเทน กระบวนการย่อยสลายตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นจะให้ก๊าซมีเทนในสัดส่วน 44.34% (จากการเลี้ยงแบบไม่ใช้จุลินทรีย์ EM) ถึงแม้ว่าปริมาณก๊าซมีเทนจะน้อยกว่าของ Suwakon (1983) และ Chaleewan (2003) ซึ่งมีปริมาณก๊าซมีเทน 60.30% และ 51.4% ตามลำดับ แต่ปริมาณดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นก๊าซหุงต้มเพื่อปรุงอาหารในครัวเรือนของเกษตรกรที่พักอาศัยอยู่ในฟาร์มกุ้งได้ เนื่องจากสัดส่วนดังกล่าวมีศักยภาพในการใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ (Chen, Cheng & Creamer, 2007; Karim, Hoffmann, Klasson & Al-Dahhan, 2005) อีกทั้งก่อนที่จะนำตัวอย่างก๊าซชีวภาพไปวิเคราะห์แยกองค์ประกอบนั้น ก๊าซชีวภาพสามารถจุดไฟติดและลุกไหม้ได้

การเกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณที่น้อยนี้อาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของชนิดแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลาย เนื่องจากมีกลุ่มแบคทีเรียที่ชอบความเค็ม (Halophilic bacteria) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้และผลิตก๊าซมีเทนได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ค่าความเค็มของตะกอนเลน ซึ่งจากการศึกษาของ Riffat & Kronghamchat (2006) พบว่าความเค็มไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ การที่เลือกใช้กระบวนการหมักแบบ Batch เนื่องจากตะกอนเลนมีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว ซึ่งจะหมักแบบเติมตะกอนเลนต่อเนื่องได้ยาก ก็อาจจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีจำนวนแบคทีเรียไม่มากพอที่จะผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณมากเนื่องจากถูกจำกัดด้วยสารอาหารในถังหมัก

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ระบบบำบัดโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในระยะเวลา 31 วัน สามารถลดค่าความสกปรกของน้ำได้ โดยการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบไม่ใช้จุลินทรีย์ สามารถลด TS, TDS, TSS, TVS, BOD และ COD ได้ 89%, 60%, 95%, 89%, 86% และ 85% ตามลำดับ และการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบใช้จุลินทรีย์สามารถลดได้ 81%, 52%, 99%, 80%, 95% และ 95% ตามลำดับซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตะกอนเลนที่ผ่านระบบการบำบัดแล้วมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง และนอกจากนี้การบำบัดตะกอนเลนยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ โดยที่การบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยไม่ใช้จุลินทรีย์ EM เกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยใช้จุลินทรีย์ EM โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,155 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 1,125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และอุณหภูมิ ของการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยไม่ใช้จุลินทรีย์ EM มีค่าอยู่ในช่วง 6 - 7.5 และ 22 - 28 °C ตามลำดับ

และของการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยใช้จุลินทรีย์ EM มีค่าอยู่ในช่วง 6 - 7 และ 28 - 31 °C ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณน้อยกว่าที่ได้จากวัสดุตั้งต้นชนิดอื่น ในระดับการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มได้เนื่องจากจุดไฟลุกไหม้ได้

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยไม่ใช้จุลินทรีย์ EM มีค่าสูงกว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งโดยใช้จุลินทรีย์ EM โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) มีค่าเท่ากับ 44.34%, 4.91%, 17.23% และ 11.75%, 3.90%, 5.18% ตามลำดับ

ดังนั้น การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง สามารถใช้วิธีบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเพื่อช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและได้ก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ภายในฟาร์มเลี้ยงกุ้งของเกษตรกร อย่างไรก็ตาม ในการทดลองครั้งถัดไปควรจะต้องวิเคราะห์ค่าความเค็มของตะกอนเลน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ชอบความเค็มบางชนิดสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงในช่วงความเค็มที่เหมาะสม นอกจากนี้ ยังต้องศึกษาวิธีการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนและการเพิ่มปริมาณของก๊าซชีวภาพให้มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA] & Water Environment Federation [WEF]. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21st ed.). American Public Health Association, Washington D.C., U.S.A.
- Anh, P. T., Kroeze, C., Bush, S. R. & Mol, A. P. J. (2010). Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. *Agricultural Water Management*, 97(6), 872-882.
- Chaleewan, J. (2003). *Effects of retention time in biogas production in high rate anaerobic digestion of fruit canning wastes* [In Thai]. Unpublished Master's thesis, Chiang Mai University.
- Chan, Y. S. G., Chu, L. M., & Wong, M. H. (1999). Co-disposal of municipal refuse, sewage sludge and marine dredgings for methane production. *Environmental Pollution*, 106, 123-128.
- Chantsavang, S., Sinratchatanun, C., Ayuwat, K., & Sirirote, P. (1994). Application of effective microorganism for pig waste treatment. *Kasetsart Engineering Journal*, 21, 98 - 108.
- Chen, Y., Cheng, J. J. & Creamer, K. S. (2007). Inhibition of anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 99, 4044-4064.
- Gebauer, R. (2004). Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production. *Bioresource Technology*, 93, 155-167.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K., & Al-Dahhan, M. H. (2005). Anaerobic Digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. *Bioresource Technology*, 96(16), 1771-1781.

- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (1997). *The state of environmental report B.E. 2540* [In Thai]. Bangkok: Ministry of Science Technology and Environment, Thailand.
- Paez-osuna, F., Guerro-galvan, S. R., & Ruiz-fernandez A.C. (1998). The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 36(1), 65- 75.
- Riffat, R., & Krongthamchat, K. (2006). Specific methanogenic activity of halophilic and mixed cultures in saline wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2(4), 291-299.
- Simeonov, I., & Stoyanov, S. (2003). Modeling and dynamic compensator control of anaerobic digestion of organic wastes. *Chemical and Biochemical Engineering*, 17(4), 285-292.
- Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A. & Chamniprasart, K. (2010). Mathematic modeling and parameters estimation of an aerobic digestion of shrimp of culture pond sediment in a biogas process. *International Journal of Energy and Environment*, 4(4), 213-220.
- Suwakon, S. (1983). *Quality improvement of biogas in laboratory* [In Thai]. Unpublished Master's Independent study, Chiang Mai University.
- Szymanski, N. & Patterson, R. A. (2003, September 30 – October 2). Effective microorganisms (EM) and wastewater systems. In R. A. Patterson & M. J. Jones (Eds.), *Future Directions for On-site Systems: Best Management Practice* (pp. 347 - 355), Proceedings of On-site' 03 Conference, University of New England. Armidale: Lanfax Laboratories.
- Tangsathit, S. (1995). *Waste treatment and energy production from piggyery waste by two stage anaerobic process* [In Thai]. Unpublished Master's thesis. King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
- Thongrak, S., Prato, T., Chaiyawareisajja, S. & Kurtz, W. (1997). Economic and water quality evolution of intensive shrimp production systems in Thailand. *Agricultural systems*, 53(2 - 3), 121 - 141.
- Trang Provincial Fisheries Office. (2010). *Fishery statistics of Trang province* [In Thai]. Retrieved August 21, 2010, from <http://www.fisheries.go.th/fpo-trang/tabean.html>
- Tunvilai, D., Chaiyakam, K., Predalampaburt, Y. & Sriwichai, C. (1994). *Water and soil quality monitoring of shrimp farms in Pattani province* [In Thai]. Technical paper no. 5/1994, National Institute of Coastal Aquaculture, Songkla.
- Zakarya, I. A., Tajaradin, H. A., Abustan, I. & Ismail, N. (2008, June 16 - 20). Relationship between methane production and chemical oxygen demand (COD) in anaerobic digestion of food waste. In H. Al-Mattarneh, K. N. Mustapha & M. F. Nuruddin (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Construction and Building Technology* (pp. 29 - 36). Universiti Tenaga Nasional, Kuala Lumpur.



## Estimation Dynamical Model of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process using Genetic Algorithm

JIRAPHON SRISERTPOL<sup>1</sup>, PRASIT SRINAKORN<sup>1</sup>, ADTAVIROD KHEAWNAK<sup>1</sup>  
KONTORN CHAMNIPRASART<sup>1</sup> AND ARTHIT SRIKAEW<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Institute of Engineering

Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

THAILAND

jiraphon@sut.ac.th

*Abstract:* - Biogas is one type of renewable energy which is important to the energy and environmental planning of Thailand. The study and analysis of the dynamical model of the biogas process can be explained the variables that affect biogas process and optimization. The indirect advantage of biogas production process for shrimp culture sediment was waste treatment. This paper presents a method of system identification and applies an artificial intelligence to estimate the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

*Key-Words:* - Mass Balance Equation, Anaerobic Digestion, Biogas Process, System Identification and Artificial Intelligence.

### 1 Introduction

The biogas is obtained from digesting crumple organic substances of the living things which are both plants and animals. This process is an anaerobic digestion caused by various kinds of microorganisms. The biogas is mostly mixed with methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Biogas which is produced from fermentative procedures has different quantities, depend on the raw materials and the condition of the fermentative procedures. The Biogas has properties like fuel. It is the renewal energy that is used to replace firewood, charcoal, oil, liquid petroleum gas, etc. It is also able to apply to cooking gas directly as same as liquid petroleum gas. This is more convenience for usability than using firewood or charcoal without smoke and ash. The biogas can be applied to use in lamps or electric generators for light generation. It is also used to generate heat and applied to use with all kind of engine instead of oil. The biogas that is used for fuel energy must contain more than 50% of methane. The biochemical properties of shrimp culture pond sediment are waste of the sea shrimp farming and have high BOD and COD. Shrimp farming plays an important but controversial role in the economy development of many countries in South-East Asia because of the high economic returns and catastrophic environmental impact of production in

coastal areas [1-3]. Many mathematical models that are available in literatures were studied and situated model of anaerobic digestion in biogas production from wastes and feces [4-8]. The parameters estimation and the specification of the identity of mathematical models for anaerobic digestion were also studied [9-10]. The control system of production was designed [11-12]. This paper presents a method of system identification and applies an artificial intelligence to estimate the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

### 2 Dynamical Model of the Process

The anaerobic digestion could be modeled as the equation with one stage nonlinear reaction scheme. The reaction of digested organic substances became biogas by using mass balance equation is obtained as follows:

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - D)X \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X + D(S_{in} - S) \quad (2)$$

$$Q = k_2\mu X \quad (3)$$

where  $X$  is concentration of the biomass in the reactor (g/l).  $S$  is substrate concentration (g/l).  $S_{in}$  is the substrate concentration in the fluent.  $\mu$  is the specific growth rate ( $d^{-1}$ ).  $Q$  is biogas flow rate (l/day) and  $k_1, k_2$  are anaerobic digestion constants in the biogas process,  $D=0$ ,  $S_{in}=0$ . Then, we will have new algebraic equations as

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X \quad (5)$$

We can be seen from equations (3), (4) and (5) that the specific growth rate is key parameter for the description of biomass growth, substrate consumption and production formation. The specific growth rate of bacteria depends on the temperature, pH, biogas flow rate and concentration of organic substances then expressed by the multiplication of individual terms, each of them refer to one of the influencing factors:

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(Q)\mu(T)\mu(pH) \quad (6)$$

Meanwhile, the specific growth rate of bacteria was related to concentration of organic substances which are studied [8-9] as the following 3 equations

$$\text{Monod model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_s + S} + k \quad (7)$$

$$\text{Contois model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_m X + S} + k \quad (8)$$

$$\text{Haldane model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_s + S + S^2/k_i} + k \quad (9)$$

Where  $\mu_{max}$  is maximum specific growth rate ( $d^{-1}$ ) and  $k_s, k_m, k_i, k$  are constants. The influence of temperature is often modeled by an Arrhenius type law:

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3 \quad (10)$$

Where  $T$  is the temperature ( $^{\circ}C$ ),  $E_1, E_2$  are gas energy (J/g.mole),  $R$  is the gas constant (J/g) and  $a_1, a_2, a_3$  are constants.

For biogas process, Rozzi proposes treating the influence of pH by a parabolic law:

$$\mu(pH) = apH^2 + bpH + c \quad (11)$$

where  $a, b, c$  are constants.

The relationship between the specific growth rate of bacteria and the temperature could be presented as

$$\mu(Q) = \frac{k_q}{k_q + Q} + k_3 \quad (12)$$

where  $k_q, k_3$  are constant.

In these equations the only modeling assumption is that the biomass growth term ( $\mu X$ ) and the substrate consumption term ( $k_1\mu X$ ) are proportional to the biomass concentration ( $X$ ). This paper is add  $k, k_3$  in equation (7), (8), (9) and (12) for dynamic compensation of useful system identification.

### 3 Problem Solution

#### 3.1 Experimental setup

Experimental setup is designs for data collection of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the batch process, as shown in Fig.1. Where 1- Computer is to create a program LabVIEW for the measurement and collected data of temperature, pH and biogas flow rate. 2 - A digester tank is 80 liter with shrimp culture pond sediment. 3 - Measuring system for biogas flow rate. The experimental data were occurred in analog signal and convert to digital signal via conversion unit with model NI- USB6008.

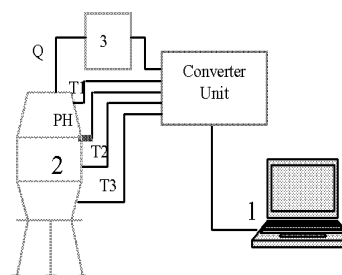


Fig.1 Experimental setup

#### 3.2 Parameter Identification via Artificial Intelligence

The application of an appropriate identification methodology via artificial intelligence technique can be estimated the mathematical model of anaerobic

digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process, as shown Fig.2.

The investigation of the coefficients in the mathematical models (3), (4), (5), (7), (10), (11) and (12) is a very complex problem because of restricted information input temperature, pH, initial substrate concentration ( $s_0$ ) and biogas flow rate ( $Q(t)$ ) can be measured. Where  $\tilde{Q}(t)$  is the biogas flow rate from the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process.  $Q(t)$  was compared to the biogas flow rate result from the experiment setup. Their deviation value could be obtained with sum square error ( $e_{ss}$ )

$$e_{ss} = \sum_{i=1}^N [Q(i) - \tilde{Q}(i)]^2 \quad (13)$$

The identical technique by Genetic Algorithm (GA) is the one method to seek answers by natural selection and GA. It will have the continually improve to find answers from one generation to the next generation like the evolution of living things [13-14]. The components of the GA cycle are populations, original species and new species. GA will have continually improved from narrow local solution to global solution. GA will finish when ending condition is consistent. Generally, the condition is amount of generations required or acceptable deviation value is required to accept the best chromosome in the group of populations.

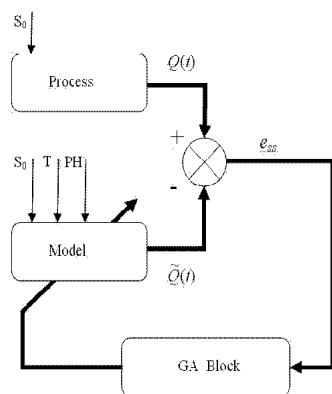


Fig.2 Identification method

### 3.3 Experimental and Identification Results

#### 3.3.1 Experimental results

From the experiment setup, 80 liter shrimp culture pond sediment was put into a tank and fermented the

sediment by anaerobic digestion in batch reactor. The transient response of biogas flow rate in biogas process is shown in Fig.3. The collecting data of accumulative sum of biogas production in 30 days is 13,255 cm<sup>3</sup> and average biogas production is 424.35 cm<sup>3</sup>/day. The reaction temperature varied with room temperature which is shown in Fig.4. and pH profile within 5.8-7.8 each day as shown in Fig.5.

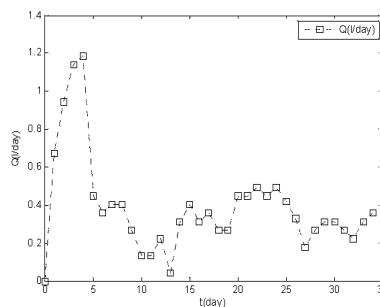


Fig.3 The transient response of biogas flow rate

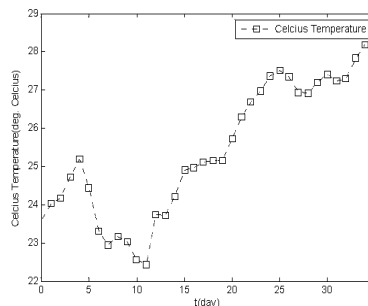


Fig.4 Temperature profile

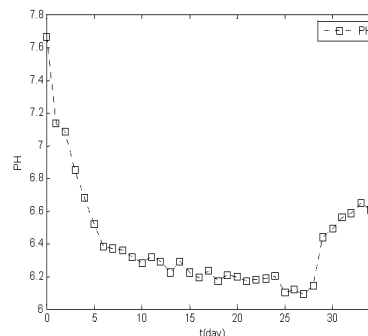


Fig.5 pH profile

There are three models that are available for finding variables in identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond

sediment in the biogas process. The mathematical models depend on the change of bacteria which affected by organic substances and could find that Monod model has minimum error by initial substance concentration (organic matter) which 73.5 g/l. The biochemical properties of shrimp culture pond sediment and chemical compositions of biogas are shown in Table.1, 2.

Table 1  
Biochemical Properties of Shrimp Culture Pond Sediment

No	Biochemical properties	Before	After
1	pH	7.7	7.5
2	Total Solids, mg/l	139,859	15,978
3	Total Dissolved Solids, mg/l	24,500	9,700
4	Total Suspended Solids, mg/l	112,200	5,750
5	Total Volatile Solids, mg/l	22,653	2,450
6	Total Fixed Solids, mg/l	139,603	10,922
7	Biological Oxygen Demand (BOD),mg/l	2,334	324
8	Chemical Oxygen Demand (COD),mg/l	7,840	1,197
9	Total Nitrogen, mg/l	4,300	5,000
10	Total Phosphorus, mg/l	6.24	136.95
11	Total Potassium, mg/l	816.5	662.5
12	Organic Carbon, g/l	42.7	47.3
13	Organic Matter, g/l	73.5	81.3

Table 2  
Chemical Compositions of Biogas

Biogas compositions	Analyzer %
Methane, CH <sub>4</sub>	44.34
Carbon dioxide, CO <sub>2</sub>	4.91
Nitrogen, N <sub>2</sub>	17.23
Hydrogen, H <sub>2</sub>	Non detected
Hydrogen sulfide, H <sub>2</sub> S	Non detected

### 3.3.2 Identification results

The identical specification of the variable via equation (7) to estimate variables, we use specific growth rate of bacteria depend on the temperature, pH, biogas flow rate data,  $E_f=16000$  J/g.mole,  $E_f=34500$  J/g.mole and  $R=1.987$  J/g [2].

The GA program is estimated variables with 100 population numbers and 100,000 GA cycles. The estimation-1 is model with dynamic compensation ( $k, k_3$ ) and estimation-2 is model without dynamic compensation ( $k, k_3$ ). The error of estimation-1 is 0.7239 and estimation-2 is 1.8596. The comparison between the responses of the mathematical model and the experimental data of biogas flow rate are shown in figure 6 and Table 3.

The identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment, the variables can be used to estimate mathematical models. The models should be tested with many cycles in order to gain the accurate variable. The variable that affect biogas flow rate should be controlled as well.

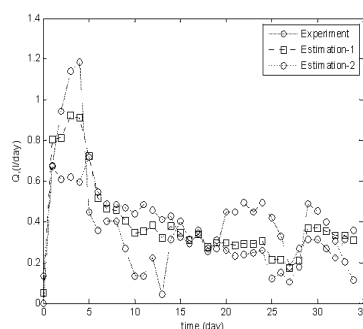


Fig. 6 The responses of biogas flow rate of experimental and estimation data

Table 3  
Parameter Identification for Biogas Process

Parameters	Estimated Value-I	Estimated Value-II
$k_1$	0.119	2.714
$k_2$	3.614	0.477
$\mu_{max}$	1.69	0.1
$k_s$	1.1087	20
$k$	-1.6654	--
$a_1$	$2.4 \times 10^{11}$	$1.92 \times 10^{11}$
$a_2$	$-1.02 \times 10^{23}$	$-8.16 \times 10^{23}$
$a_3$	-0.111	-0.0555
$a$	-5.601	-0.8257
$b$	76.108	11.347
$c$	-254.03	-38.4
$k_q$	9.99	1
$k_3$	17.084	--

## 4 Conclusion

The biochemical properties of shrimp culture pond sediment after biogas process were reducing BOD and COD which effected to soil pollution. This research presents the structure of the mathematical

model and parameter identification technique that is used to estimate dynamical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas production process. The dynamical response of the mathematical model compared to the experimental data by Genetic Algorithm method. As the results of the study, the variable from identity specification can be used to estimate biogas flow rate and applied to design experimental equipments for batch reaction of biogas production from shrimp culture pond which is appropriate to requirement and usability.

### Acknowledgement

The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from Suranaree University of Technology (SUT).

#### References:

- [1] Pham Thi Anh., Carolien Kroeze., Simon R. Bush and Arthur P.j. Mol, "Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: causes and options for control," *Agricultural Water Management*, Vol.97, No.6, 2010, pp. 872-882.
- [2] F.Paez-Osuna, "The environmental impact of shrimp aquaculture: a global perspective," *Environmental Pollution*, Vol.112, Issue.2, 2001, pp. 229-231.
- [3] Sutonya Thongrak, Tony Prato, Sommai Chiyvareesajja and William Kurtz, "Economic and water quality evaluation of intensive shrimp production systems in Thailand," *Agricultural Systems*, Vol.53, Issues 2-3, 1997, pp. 121-141.
- [4] Hill D. T, and Barth C. L, "A dynamic model for simulation of animal waste digestion," *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 49, Issue 10, 1977, pp. 2129-2143.
- [5] Bastin G, and Dochain D, *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, Amsterdam, Elsevier, 1990, chapter 1.
- [6] Simeonov I, "Modelling and control of anaerobic digestion of organic waste," *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.8, No.2, 1994, pp. 45-52.
- [7] Simeonov I, Momchev V and Grancharov D, "Dynamic modeling of mesophilic digestion of animal waste," *Water Research*, Vol.30, No.5, 1996, pp. 1087-1094.
- [8] Husain A, "Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion - a selected review," *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, No.5/6, 1998, pp. 561-571.
- [9] Simeonov I, "Mathematical modelling and parameters estimation of anaerobic fermentation processes," *Bioprocess Engineering*, Vol.21, No.4, 1999, pp. 377-381.
- [10] Noykova N, Miller T, Gyllenberg M, and Timmer J, "Quantitative analyses of anaerobic waste water treatment processes: identifiability and parameter estimation," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.78, No.1, 2002, pp. 89-103.
- [11] Simeonov I, and Stoyanov S, "Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes," *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.17, No.4, 2003, pp. 285-292.
- [12] Simeonov I, and Queinnec I, "Linearizing control of the anaerobic digestion with addition of acetate," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No.7, 2006, pp. 799-810.
- [13] Deacha Puangdownreong, "Identity coefficient of Fourier series with search technique an artificial intelligence," *KMUTT Research and Development Journal*. Vol.30 No.3, 2007, pp. 301-314.
- [14] Arthit Srikaew, *Computational Intelligence*, Bangkok, Suranaree University of Technology, 2009, chapter 3.

## Mathematical Modeling and Parameters Estimation of an Anaerobic Digestion of Shrimp of Culture Pond Sediment in a Biogas Process

Jiraphon Srisertpol, Prasit Srinakorn, Adtavirod Kheawnak and Kontorn Chamniprasart

**Abstract**— The biogas is one type of energy and sustainable development which is important to the energy and environmental planning of Thailand. The study and analysis of the mathematical model of the biogas process can be explained the variables that affect biogas process and proposed a design for biogas reactor using shrimp pond sediment. The treatment of shrimp culture pond sediment by anaerobic digestion process could also reduce the amount of waste and produce biogas, which were the high ratio of methane can be used as renewable energy. This paper presents a mathematical modelling and parameter identification of an artificial intelligence to estimate the mathematical model of an anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

**Keywords**— Mass Balance Equation, Anaerobic Digestion, Biogas Process, System Identification and Artificial Intelligence.

### I. INTRODUCTION

THE biogas is obtained from digesting crumble organic substances of the living things which are both plants and animals. The biomass is an important renewable energy. Thailand has high effective of producing biogas because there are many products from agriculture which are source of biomass energy. This process is an anaerobic digestion caused by various kinds of microorganisms. The biogas is mostly mixed with methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ). Biogas which is produced from fermentative procedures has different quantities, depend on the raw materials and the condition of the fermentative procedures. The biogas has properties like fuel. It is the renewal energy that is used to replace firewood,

J.Srisertpol is with the School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, e-mail: jiraphon@sut.ac.th.

P.Srinakorn is graduate student, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, e-mail: sr\_prasit@hotmail.com.

A.Keawnak is graduate student, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000. e-mail: b03me12@hotmail.com.

K.Chamniprasart is with the School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, e-mail: kontorn@sut.ac.th.

charcoal, oil, liquid petroleum gas, etc. It is also able to apply to cooking gas directly as same as liquid petroleum gas. This is more convenience for usability than using firewood or charcoal without smoke and ash. The biogas can be applied to use in lamps or electric generators for light generation. It is also used to generate heat and applied to use with all kind of engine instead of oil. The biogas that is used for fuel energy must contain more than 50% of methane. The biochemical properties of shrimp culture pond sediment are waste of the sea shrimp farming and have high biological oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD). Shrimp farming plays an important but controversial role in the economy



Fig. 1 Shrimp farming

development of many countries in South-East Asia because of the high economic returns and catastrophic environmental impact of production in coastal areas as shown in Fig.1 [1-3].

In particular, the effluent of sediment into the coastal areas are affecting to coastal water qualities, depletion of dissolved oxygen, high amount of organic matter in adjacent soil and increased soil salinity (in inland shrimp farming) as shown in Fig.2,3. Thailand has 33,444 shrimp farms and can be produced marine shrimp about 401,300 tones. The areas of shrimp farm are  $718 \times 10^6 \text{ m}^2$  in Thailand (data 1999). The marine shrimp farm produces about 1.25-3.125  $\text{kg/m}^2$  depending on the number of shrimp raised in ponds and the amount of feeding. Many mathematical models that are available in literatures were studied and situated model of an anaerobic digestion in biogas production from wastes and feces [4-8]. The parameters estimation and the specification of the identity of mathematical models for anaerobic digestion

were also studied [9-10]. The control system of production was designed [11-12]. The genetic algorithm is really a powerful tool for many problems in numerical analysis and scientific computation. The genetic algorithm has been successfully applied in a variety of areas and is still finding increasing acceptance. The genetic algorithm searches parameters of PID controllers so that specifications for the closed-loop step response are satisfied. The tuned genetic



Fig. 2 Shrimp culture sediment



Fig. 3 Shrimp culture sediment in canal

algorithm was successfully applied for parameter identification [13-15]. The quality of the produced biogas is closely related to the type of biomass which is being used, the quality of waste, the duration of the batch, and also the ration between solid matter and liquid volume [16]. The effectiveness of the energy conversion of waste to biofuel may lead to the improvement of the energy efficiency in digesters via modifying their design and the operating conditions [17].

This paper presents a method of system identification and applies an artificial intelligence to estimate the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of an organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

## II. THE MATHEMATICAL MODEL OF AN ANAEROBIC DIGESTION IN BIOGAS PROCESS

The anaerobic digestion could be modeled as the equation with one stage nonlinear reaction scheme. The reaction of digested organic substances became biogas by using mass balance equation is obtained as follows:

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - D)X \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X + D(S_m - S) \quad (2)$$

$$Q = k_2\mu X \quad (3)$$

where  $X$  is concentration of the biomass in the reactor (g/l).  $S$  is substrate concentration (g/l).  $S_m$  is the substrate concentration in the fluent.  $\mu$  is the specific growth rate ( $d^{-1}$ ).  $Q$  is biogas flow rate (l/day) and  $k_1, k_2$  are anaerobic digestion constants in the biogas process,  $D=0$ ,  $S_m=0$ . Then, we will have new algebraic equations as

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X \quad (5)$$

We can be seen from equations (3), (4) and (5) that the specific growth rate is key parameter for the description of biomass growth, substrate consumption and production formation. The specific growth rate of bacteria depends on the temperature, pH, biogas flow rate and concentration of organic substances then expressed by the multiplication of individual terms, each of them refer to one of the influencing factors:

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(Q)\mu(T)\mu(pH) \quad (6)$$

Meanwhile, the specific growth rate of bacteria was related to concentration of organic substances which are studied [8-9] as the following 3 equations

$$\text{Monod model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max}S}{k_s + S} + k \quad (7)$$

$$\text{Contois model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max}S}{k_m X + S} + k \quad (8)$$

$$\text{Haldane model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max}S}{k_s + S + S^2/k_i} + k \quad (9)$$

where  $\mu_{max}$  is maximum specific growth rate ( $d^{-1}$ ) and  $k_s, k_m, k_i, k$  are constants. The influence of temperature is often modeled by an Arrhenius type law:

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3 \quad (10)$$

where  $T$  is the temperature ( $^{\circ}C$ ),  $E_1, E_2$  are gas energy (J/g.mole),  $R$  is the gas constant (J/g) and  $a_1, a_2, a_3$  are constants.

For biogas process, Rozzi proposes treating the influence of pH by a parabolic law:

$$\mu(\text{pH}) = a\text{pH}^2 + b\text{pH} + c \quad (11)$$

where  $a, b, c$  are constants.

The relationship between the specific growth rate of bacteria and the biogas flow rate could be presented as

$$\mu(Q) = \frac{k_q}{k_q + Q} + k_3 \quad (12)$$

where  $k_q, k_3$  are constant.

In these equations the only modeling assumption is that the biomass growth term ( $\mu\lambda$ ) and the substrate consumption term ( $k_1\mu\lambda$ ) are proportional to the biomass concentration ( $\lambda$ ). This paper is add  $k, k_3$  in equation (7), (8), (9) and (12) for dynamic compensation of useful system identification

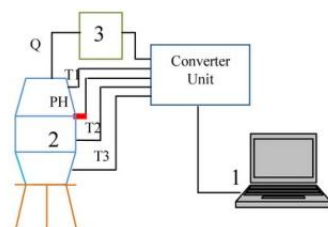


Fig. 4 Experimental setup

### III. RESEARCH PROCEDURE

In this section a description of the research procedures are given and divided topic into 4 parts experiment setup, parameter identification via genetic algorithm, experimental results and simulation results.

#### A. Experimental Setup

The experimental setup is designs for data collection of an anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the batch process, as shown in Fig.4. Where 1- Computer is to create a program LabVIEW for the measurement and collected data of temperature, pH and biogas flow rate. 2 – A digester tank is 80 liter with shrimp culture pond sediment. 3 – Measuring system for biogas flow rate. The experimental data were occurred in analog signal and convert to digital signal via conversion unit with model NI- USB6008.

#### B. Parameter Identification via Genetic Algorithm

The application of an appropriate identification methodology via artificial intelligence technique can be estimated the mathematical model of an anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process, as shown Fig.5. The investigation of the coefficients in the mathematical models (3), (4), (5), (7), (10), (11) and (12) is a very complex problem because of restricted information input

temperature, pH, initial substrate concentration ( $S_0$ ) and biogas flow rate ( $Q(t)$ ) can be measured. Where  $\tilde{Q}(t)$  is the biogas flow rate from the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process.  $Q(t)$  was compared to the biogas flow rate result from the experiment setup. Their deviation value could be obtained with sum square error ( $e_{ss}$ ).

$$e_{ss} = \sum_{i=1}^N [Q(i) - \tilde{Q}(i)]^2 \quad (13)$$

The identical technique by Genetic Algorithm (GA) is the one method to seek answers by natural selection and GA. It will have the continually improve to find answers from one generation to the next generation like the evolution of living things [18-19]. The components of the GA cycle are populations, original species and new species. GA will have continually improved from narrow local solution to global solution. GA will finish when ending condition is consistent. Generally, the condition is amount of generations required or acceptable deviation value is required to accept the best chromosome in the group of populations.

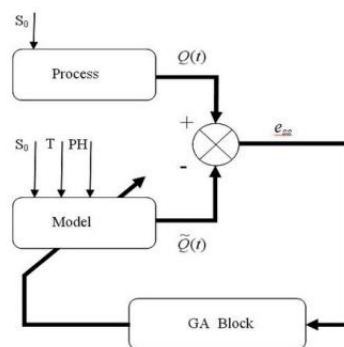


Fig. 5 Identification method

#### C. Experimental results

From the experiment setup, 80 kg shrimp culture pond sediment was put into a tank and fermented the sediment by anaerobic digestion in batch reactor. The transient response of biogas flow rate in biogas process is shown in Fig.6. The results showed that the biogas was occurring fast At the start of an experiment, the biogas occurs 675 cm<sup>3</sup>. The collecting data of accumulative sum of biogas production in 30 days is 13,255 cm<sup>3</sup> and average biogas production is 424.35 cm<sup>3</sup>/day which are CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> composition were 44.34%, 4.91% and 17.23% respectively. The reaction temperature varied with room temperature which is shown in Fig.7 and pH profile within 5.8 - 7.8 each day as shown in Fig. 8.



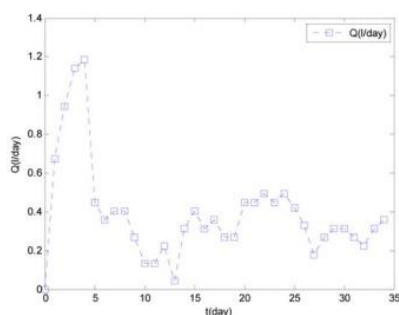


Fig.6 The transient response of biogas flow rate

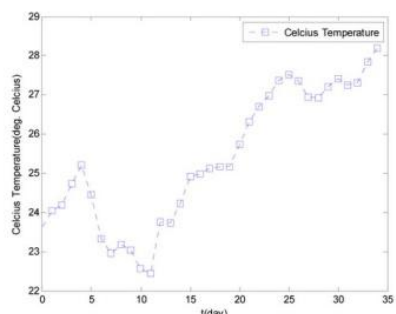


Fig.7 Temperature profile

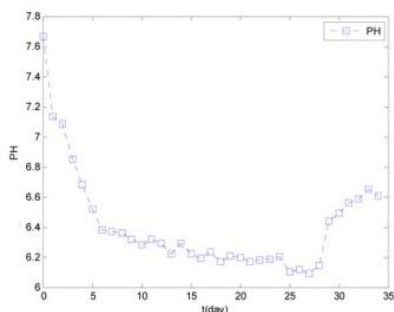


Fig.8 pH profile

There are three models that are available for finding variables in identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process. The mathematical models depend on the change of bacteria which affected by organic substances and could find that Monod model has minimum error by initial substance concentration (organic matter) which 73.5 g/l.

Table 1  
Chemical Compositions of Biogas

Biogas compositions	Analyzer %
Methane, CH <sub>4</sub>	44.34
Carbon dioxide, CO <sub>2</sub>	4.91
Nitrogen, N <sub>2</sub>	17.23
Hydrogen, H <sub>2</sub>	Non detected
Hydrogen sulfide, H <sub>2</sub> S	Non detected

Source: Scientific Equipment Center,  
Prince of Songkla University, February 2010

Table 2  
Biochemical Properties of Shrimp Culture Pond Sediment

No	Biochemical properties	Before	After
1	pH	7.7	7.5
2	Total Solids ,mg/l	139,859	15,978
3	Total Dissolved Solids, mg/l	24,500	9,700
4	Total Suspended Solids, mg/l	112,200	5,750
5	Total Volatile Solids, mg/l	22,653	2,450
6	Total Fixed Solids, mg/l	139,603	10,922
7	Biological Oxygen Demand (BOD),mg/l	2,334	324
8	Chemical Oxygen Demand (COD),mg/l	7,840	1,197
9	Total Nitrogen, mg/l	4,300	5,000
10	Total Phosphorus, mg/l	6.24	136.95
11	Total Potassium, mg/l	816.5	662.5
12	Organic Carbon, g/l	42.7	47.3
13	Organic Matter, g/l	73.5	81.3

Source: The Center for Scientific and Technology Equipment,  
Suranaree University of Technology, January 2010

The biochemical properties of shrimp culture pond sediment and chemical compositions of biogas are shown in Table.1, 2. The results of the treatment of shrimp culture pond sediment by anaerobic digestion in biogas process could reduce the sediment properties TS, TDS, TSS, BOD and COD were 89%, 60%, 95%, 86% and 85% respectively.

#### D. Simulation results

The identical specification of the variable via equation (7) to estimate variables, we use specific growth rate of bacteria depend on the temperature, pH, biogas flow rate data,  $E_1=16000$  J/g.mole,  $E_2=34500$  J/g.mole and  $R=1.987$  J/g [2]. We studied population number and GA cycles that affect system identification as shown in Fig.9, 10. Table 3 and 4 demonstrates the error of GA program. The tests showed the population number and GA cycles increased, the error decreased but need more computation time. The estimation of the mathematical model doesn't consider the error occurred but must be considered with the principle of anaerobic digestion process [20].

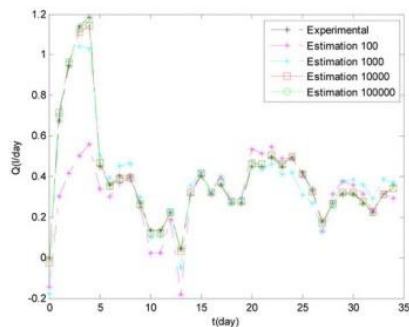


Fig.9 The responses of the GA cycles of system identification

Table 3  
GA cycle

GA cycle	100	1000	10000	100000
$e_{ss}$	1.3676	0.1457	0.0079	0.0035

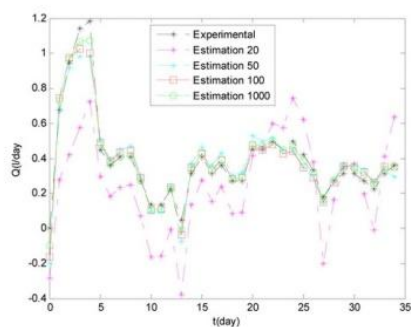


Fig.10 The responses of the population number of system identification

Table 4  
Population number

Population number	20	50	100	1000
$e_{ss}$	2.195	0.187	0.119	0.0475

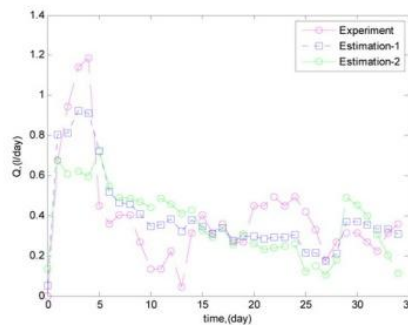


Fig.11 The responses of biogas flow rate of experimental and estimation data

Table 5  
Parameter Identification for Biogas Process

Parameters	Estimated Value-1	Estimated Value-2I
$k_1$	0.119	2.714
$k_2$	3.614	0.477
$\mu_{max}$	1.69	0.1
$k_s$	1.1087	20
$k$	-1.6654	--
$a_1$	$2.4 \times 10^{11}$	$1.92 \times 10^{11}$
$a_2$	$-1.02 \times 10^{23}$	$-8.16 \times 10^{23}$
$a_3$	-0.111	-0.0555
$a$	-5.601	-0.8257
$b$	76.108	11.347
$c$	-254.03	-38.4
$k_q$	9.99	1
$k_3$	17.084	--

The estimation of the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process is selected variables with 100 population numbers and 100,000 GA cycles. The best answer is to find the best chromosome in population. The GA algorithm stops when the search criteria. The estimation-1 is model with dynamic compensation ( $k, k_2$ ) and estimation-2 is model without dynamic compensation ( $k, k_2$ ). The  $k$  compensates unknown dynamic response of the relationship between specific growth rate and concentration of organic substances and  $k_3$  compensates dynamic response of the relationship between

specific growth rate and biogas flow rate. The error of estimation-1 is 0.7239 and estimation-2 is 1.8596.

The comparison between the responses of the mathematical model and the experimental data of biogas flow rate are shown in Fig.11. The results of parameters identification of the mathematical model are represented in Table 5.

The parameters those are estimated by the GA method are necessary to consider the accuracy in accordance with the experiment. The expression equation 7 with parameters of estimated value-I and estimated value-II were adopted by Monod model because it best fit experiment data as shown in Fig. 12.

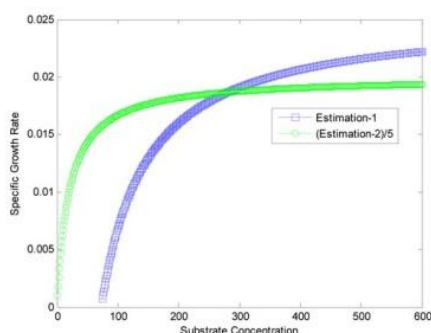


Fig.12 The Monod law

The biomass growth rate is often performed to be slowed down at high biomass concentration. A simple model that accommodated for this situation assumes that the specific growth rate decreases linearly with the biomass concentration and is illustrated in Fig.13.

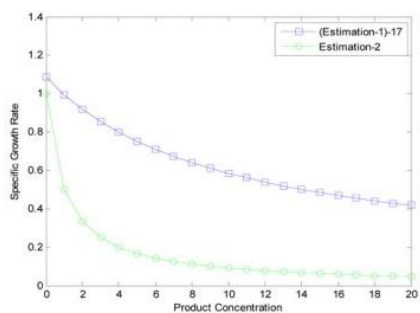


Fig.13 The Contius model

The temperature is most modeled by an Arrhenius-type law, as has been done. The expression shows that the specific growth rate increases with temperature up as shown in Fig.14. The relationship between specific growth rate and pH in biogas process is parabolic form as shown in Fig.15.

The identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment, the variables can be used to estimate mathematical models. The models should be tested with many cycles in order to gain the accurate variable. The variable that affect biogas flow rate should be controlled as well.

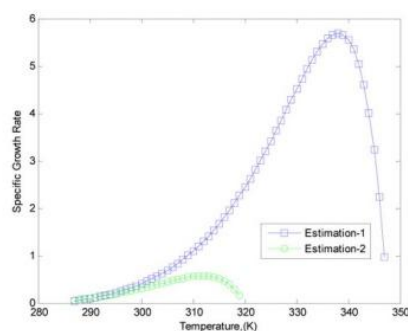


Fig.14 The relationship between specific growth rate and temperature

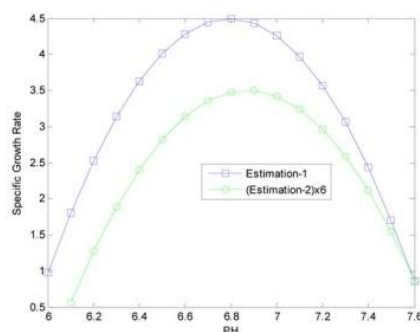


Fig.15 The relationship between specific growth rate and pH

#### IV. CONCLUSION

The biochemical properties of shrimp culture pond sediment after biogas process were reducing 89% of BOD and 60% of COD which effected to soil pollution and emissions (Methane, Carbon dioxide) to the atmosphere. The increase of nitrogen and phosphorus in shrimp culture pond sediment were useful for plant. This research only studied shrimp culture pond sediment from shrimp farming that do not use effective microorganisms because the biochemical properties of shrimp culture pond sediment is charge.

The shrimp culture pond sediment produces biogas via anaerobic digestion as a way solves problems of the energy and environmental management. The biogas of shrimp culture pond sediment has methane 44%, heating value 18 MJ/kg and efficiency of energy conversion 20% approximately. The total

biogas of shrimp culture pond sediment can be occurred  $1.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$  approximately. Therefore, we can produce a biogas  $2.06\text{-}5.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2$  approximately.

This paper presents the structure of the mathematical model and parameter identification technique that is used to estimate dynamical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas production process. The dynamical response of the mathematical model compared to the experimental data by Genetic Algorithm method with principle of anaerobic digestion. The estimation of the mathematical model with dynamic compensation ( $k, k_3$ ) illustrates results consistent with the principle of anaerobic digestion. As the results of the study, the variable from identity specification can be used to estimate biogas flow rate and applied to design experimental equipments for batch reaction of biogas production from shrimp culture pond which is appropriate to requirement and usability.

#### NOMENCLATURE

$X$	concentration of the biomass in the reactor (g/l)
$Q$	biogas flow rate (l/day)
$S$	substrate concentration (g/l)
$S_{in}$	substrate concentration in the fluent (g/l)
$\mu$	specific growth rate ( $\text{d}^{-1}$ )
$k_1, k_2$	anaerobic digestion constants in the biogas process
$\mu_{max}$	maximum specific growth rate ( $\text{d}^{-1}$ )
$T$	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$k_p, k_m$	constant
$k, k_3$	dynamic compensation
$E_1, E_2$	gas energy (J/g.mole)
$R$	gas constant (J/g)
$a_1, a_2, a_3$	constant
$a, b, c$	constant
$k_q$	constant

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from Suranaree University of Technology (SUT) and Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang campus.

#### REFERENCES

- [1] Pham Thi Anh., Carolien Kroeze., Simon R. Bush and Arthur P.J. Mol, Water Pollution by Intensive Brackish Shrimp Farming in South-East Vietnam: Causes and Options for Control, *Agricultural Water Management*, Vol.97, No.6, 2010, pp. 872-882.
- [2] F.Paez-Osuna, The Environmental Impact of Shrimp Aquaculture: a Global Perspective, *Environmental Pollution*, Vol.112, Issue.2, 2001, pp. 229-231.
- [3] Sutonya Thongrak, Tony Prato, Sommai Chiyvareesajja and William Kurtz, Economic and Water Quality Evaluation of Intensive Shrimp Production Systems in Thailand, *Agricultural Systems*, Vol.53, Issues 2-3, 1997, pp. 121-141.
- [4] Hill D. T. and Barth C. L., A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Digestion, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 49, Issue 10, 1977, pp. 2129-2143.
- [5] Bastin G. and Dochain D., *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*, Amsterdam, Elsevier, 1990, chapter 1.
- [6] Simeonov I, Modeling and Control of Anaerobic Digestion of Organic Waste, *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.8, No.2, 1994, pp. 45-52.
- [7] Simeonov I, Momchev V and Grancharov D, Dynamic Modelling of Mesophilic Digestion of Animal Waste, *Water Research*, Vol.30, No.5, 1996, pp. 1087-1094.
- [8] Husain A, Mathematical Models of the Kinetics of Anaerobic Digestion - a Selected Review, *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, No.5/6, 1998, pp. 561-571.
- [9] Simeonov I, Mathematical Modelling and Parameters Estimation of Anaerobic Fermentation Processes, *Bioprocess Engineering*, Vol.21, No.4, 1999, pp. 377-381.
- [10] Noykova N, M., Iler T, Gyllenberg M, and Timmer J., Quantitative Analyses of Anaerobic Waste Water Treatment Processes: Identifiability and Parameter Estimation, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.78, No.1, 2002, pp. 89-103.
- [11] Simeonov I, and Stoyanov S, Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes, *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.17, No.4, 2003, pp. 285-292.
- [12] Simeonov I, and Queinnec L, Linearizing Control of the Anaerobic Digestion with Addition of Acetate, *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No.7, 2006, pp. 799-810.
- [13] J.F.M. Amaral, R.Tanscheit and M.A.C. Pacheco, Tuning PID Controllers through Genetic Algorithms, in N. Mastorakis, *Advances in Fuzzy Systems and Evolutionary Computation*, Part II, World Scientific and Engineering Society Press, ISBN:960-8052-27-0, 2001, pp.232-235.
- [14] Nikos E. Mastorakis, Solving Non-linear Equations via Genetic Algorithms, in *proceeding of the 6<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Evolutionary Computing*, Lisbon, Portugal, June 16-18, 2005, pp.24-28.
- [15] Olympia Roeva, Improvement of Genetic Algorithm Performance for Identification of Cultivation Process Models, in *proceeding of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Evolutionary Computing*, Sofia, Bulgaria, May 2-4, 2008, pp.34-39.
- [16] A.E. Cioabla, I. Ionel and C. Constantin, Experimental Results Concerning Biogas Production through Anaerobic Fermentation, based on Different Waste Biomass, in *proceeding of the 4<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources*, Sousse, Tunisia, May 2010, pp.154-159.
- [17] J.Gelegenis, P. Axaopoulos, M.Samarakou and P. Tsilingiris, Energy Evaluation of Anaerobic Digesters, in *proceeding of the 2006 IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment Systems*, Chalkida, Greece, May 2006, pp.305-310.
- [18] Deacha Puangdownreong, Identity Coefficient of Fourier Series with Search Technique an Artificial Intelligence, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.30 No.3, 2007, pp. 301-314.
- [19] Arthit Srikaew, *Computational Intelligence*, Bangkok, Suranaree University of Technology, 2009, chapter 3.
- [20] Bastin G., Dochain D., *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam and New York, 1991, 379 pp.

**Jiraphon Srisertpol** is an Assistant Professor in School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology in Nakhon Ratchasima, Thailand. Ph.D degree in System Analysis, Control and Processing Information from St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation in Russia. He is head of system and control engineering laboratory. His research interests are in area of mathematical modeling, adaptive system and vibration analysis.

**Prasit Srinakorn** is Ph.D student in School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology in Nakhon Ratchasima, Thailand. Master degree in Mechanical Engineering from King Mongkut's University of Technology North Bangkok in Thailand. His research interests are in area of mathematical modeling and biogas process.

**Adtavirod Kheawnak** is graduate student in School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology in Nakhon Ratchasima, Thailand. Bachelor degree in Mechanical Engineering

from Suranaree University of Technology in Thailand. His research interests are in area of system identification, control system and artificial intelligent.

**Flt.Lt.Kontorn Chamnirasart** is an Associate Professor in School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology in Nakhon Ratchasima, Thailand. Ph.D degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburg in USA. His research interests are in area of continuum mechanics, dynamics and vibration.

## ประวัติผู้เขียน

นายประสิทธิ์ ศรีนคร เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2516 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนวัดควนวิเศษ จังหวัดตรัง ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนวิเชียรมาตุ จังหวัดตรัง ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างกลโลหะ ที่วิทยาลัยเทคนิคตรัง ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างเทคนิคโลหะ ที่วิทยาลัยเทคนิคตรัง ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล จังหวัดปทุมธานี โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตให้เป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และได้รับการบรรจุเข้ารับราชการที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล จังหวัดตรัง ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 เมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2541 ถึงปัจจุบัน ปี พ.ศ. 2544 ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร และปี พ.ศ. 2549 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย : ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 ประจำปี 255 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เข้าร่วมนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการ The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSE'10) เมืองอิวาเตะ ประเทศญี่ปุ่น ได้รับการตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับชาติเรื่อง การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ของวารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม ปีที่ 7 เล่มที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2554 และได้รับการตีพิมพ์วารสารวิชาการนานาชาติเรื่อง Mathematical Modeling and Parameters Estimation of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process. International Journal of Energy and Environment, Issue4 Vol.4.