

ผลของธาตุอาหารรองต่อการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์จากมูลสุกร

EFFECT OF TRACE ELEMENTS ON HYDROLYSIS AND ORGANIC ACIDS
FORMATION FROM PIGGERY WASTE

กัลยาณี มีทรัพย์

KANLAYANEE MEESAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสัตวบาลศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

ผลของธาตุอาหารรองต่อการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์จากมูลสุกร

EFFECT OF TRACE ELEMENTS ON HYDROLYSIS AND ORGANIC ACIDS
FORMATION FROM PIGGERY WASTE

กัญญาณี มีทรัพย์

KANLAYANEE MEESAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสุขาภิบาลอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**EFFECT OF TRACE ELEMENTS ON HYDROLYSIS AND ORGANIC ACIDS
FORMATION FROM PIGGERY WASTE**

KANLAYANEE MEESAP

**A THESIS SUBMITTED IN PATIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE (FOOD SANITATION)
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของธาตุอาหารรองต่อการไฮโดรไลซิสนและการสร้างกรดอินทรีย์จากมูลสุกร |
| นักศึกษา | นางสาวกัลยาณี มีทรัพย์ |
| รหัสประจำตัว | 47067707 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | สาขาวิชาการอาหาร |
| พ.ศ. | 2550 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.วราวุฒิ คุรุสง |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ |

บทคัดย่อ

การขาดแคลนธาตุอาหารรองในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ อาจเป็นผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้ไม่สมบูรณ์หรือค้อยเสถียรภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณธาตุอาหารรองที่มีต่อการผลิตก๊าซมีเทนของมูลสุกรที่มีของแข็งเป็นส่วนประกอบร้อยละ 50 ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ปริมาตรใช้งาน 2 ลิตร จำนวน 9 ถัง ซึ่งได้รับธาตุอาหารรองที่ต่างกัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลจากการเติมธาตุอาหารแต่ละชนิด ทั้งนี้ทำการป้อนของเสียแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยภาระสารอินทรีย์ในช่วง 1 - 3.8 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน

ผลการทดลองพบว่าค่าซีโอดีละลายและกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำออกของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 900 มิลลิกรัมต่อลิตรซีโอดี ตามลำดับ แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นพบว่าถังปฏิกรณ์ที่เติมแร่ธาตุเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์และโมลิบดีนัมเป็น 10 เท่า นั้นเกิดก๊าซมีเทนมากขึ้นและเกิดอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยมีปริมาณเฉลี่ยต่อวัน 203 199 135 และ 191 มิลลิลิตรตามลำดับ ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่เติมแร่ธาตุซิลิเนียม ทั้งสแตน ทองแดงและสังกะสีนั้นเกิดก๊าซมีเทนในปริมาณต่ำและไม่สม่ำเสมอโดยเกิดเฉลี่ยเกิดน้อยกว่า 100 มิลลิลิตรต่อวัน ทั้งนี้เนื่องจากธาตุอาหารรองแต่ละชนิดที่เติมให้ระบบมีผลต่อปริมาณและคุณภาพของจุลินทรีย์แตกต่างกัน โดยพบว่าจุลินทรีย์ที่ได้รับแร่ธาตุเหล็ก และนิกเกิล มีความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดตามลำดับ รองลงมาคือโคบอลต์ โมลิบดีนัมและสังกะสี ตามลำดับ และแร่ธาตุที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าชุดควบคุมคือ ซิลิเนียม ทั้งสแตนและทองแดงตามลำดับ

| | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thesis Title | Effect of Trace Elements on Hydrolysis and Organic Acids Formation from Piggery Waste |
| Student | Miss Kanlayanee Meesap |
| Student ID. | 47067707 |
| Degree | Master of Science |
| Program | Food sanitation |
| Year | 2007 |
| Thesis Advisor | Asso. Prof.Dr.Warawut Krusong |
| Thesis Co-Advisor | Dr.Saroeh Boonyakitsombut |

ABTRACT

Deficiency of trace elements may cause on less efficiency of biogas production. The purpose of this research was to study effect of trace elements on methane production from piggery waste, which was composed of 50% solids. The process was conducted using nine completely stirred tank reactors with liquid volume of 2 liters. They were semi-continuous fed with organic loading rate of 1-3.8 kg COD/L-day. The experimental results showed that all reactors had similar effluent SCOD and VFA concentrations; 1,500 mg/L and 900 mg/L-COD, respectively. But biogas and methane production were different, the reactor supplemented with trace element Fe, Ni, Co and Mo had continuous and higher biogas and methane production (203, 199, 135 and 191 ml/day, respectively) than those supplemented with Se, W, Cu and Zn (less than 100 ml/day). The result suggested that the trace element supplementation affected to quantity and quality of microorganism. The highest of SMA in the sludge was from reactor supplemented with Fe and Ni, respectively, next were those from reactor supplemented with Co, Mo and Zn, respectively. While the reactor supplemented with Se, W and Cu had less SMA than the control reactor, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้ ธาตุอาหารรองที่มีต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ รวมทั้งการศึกษาด้าน เชื้อจุลินทรีย์ของน้ำเสียชนิดมูลสุกร จาก รศ.ดร.วราวุฒิ ครูส่ง และ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความ อนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเพื่อนๆ นักศึกษาและเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ช่วยเหลือให้ คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งตรวจเทียบและแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆ ที่ผิดพลาด จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและ ให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณศูนย์บูรณาการเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมไทย มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กัลยาณี มีทรัพย์

สารบัญ

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญภาพ..... | VII |
| บทที่ 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... | 2 |
| บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ความหมายของ ก๊าซชีวภาพและกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ..... | 3 |
| 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ..... | 6 |
| 2.3 ความสำคัญของธาตุอาหารรอง..... | 8 |
| 2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน..... | 13 |
| 2.5 การอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทนและกลุ่มสร้างมีเทน..... | 14 |
| 2.6 ประโยชน์ของการใช้แร่ธาตุเสริม..... | 14 |
| บทที่ 3. อุปกรณ์และวิธีการ..... | 17 |
| 3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์..... | 17 |
| 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 18 |
| 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาและวิเคราะห์..... | 24 |
| บทที่ 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุดิบและตะกอนจุลินทรีย์..... | 27 |
| 4.2 ผลการย่อยสลายมูลสุกรในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์..... | 29 |
| 4.3 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอไลต์ทั้งหมดและซีโอไลต์ละลาย..... | 30 |
| 4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความเป็นด่างทั้งหมด..... | 31 |
| 4.5 การกำจัดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid ; VFA)..... | 33 |
| 4.6 การเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน..... | 35 |
| 4.7 ปริมาณและคุณภาพของจุลินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 40 |
| บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 43 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 43 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 44 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 45 |
| ภาคผนวก..... | 49 |
| ก การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในช่วงเวลาต่างๆ..... | 49 |
| ข วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์..... | 73 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 87 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1. | บทบาทของธาตุอาหารหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....9 |
| 2.2. | บทบาทของธาตุอาหารรองในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....10 |
| 2.3. | องค์ประกอบของเซลล์ โคแฟกเตอร์และองค์ประกอบโดยประมาณ.....15 ของโคบอลต์และนิกเกิลใน <i>Methanosacina barkeri</i> |
| 3.1. | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเริ่มเดินระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว.....20 |
| 3.2. | ธาตุอาหารรองตามสูตรของ Speece (1996) ที่เติมลงในระบบของถังปฏิกรณ์.....21 แบบกวนผสมสมบูรณ์ภายหลังจากช่วงเริ่มต้นการหมักแล้ว |
| 3.3. | รูปแบบชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาการไฮโดรไลซิสวัตถุดิบมูลสุกร.....22 |
| 3.4. | พารามิเตอร์ที่ศึกษาและวิเคราะห์.....24 |
| 4.1. | ผลการวิเคราะห์ลักษณะของมูลสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....27 |
| 4.2. | คุณลักษณะของน้ำเสียมูลสุกรที่เข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ.....28 |
| 4.3. | ปริมาณแร่ธาตุของสลัดจ์ที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....38 |
| ก.1. | ค่าซีโอดีละลายและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%) ของระบบ.....50 |
| ก.2. | กรดอินทรีย์ระเหย (VFA mg/L).....53 |
| ก.3. | Alkalinity mg/L CaCO ₃55 |
| ก.4. | ค่า pH.....58 |
| ก.5. | ปริมาณก๊าซชีวภาพ (mL).....67 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1 | ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....3 |
| 3.1 | ลักษณะของชุดถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....19 |
| 3.2 | ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการไฮโดรไลซิสมูลสุกร.....23 |
| 4.1 | ภาระสารอินทรีย์ที่เข้าระบบในรูปของซีโอดีทั้งหมด.....29 |
| 4.2 | การเปลี่ยนแปลงของ SCOD ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร.....30 |
| 4.3 | การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร.....31 |
| 4.4 | การเปลี่ยนแปลงของค่า Alkalinity ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร.....32 |
| 4.5 | การเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร.....34 |
| 4.6 | ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมระหว่างกระบวนการย่อยมูลสุกรที่สภาวะคงตัว.....36 |
| 4.7 | ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมระหว่างกระบวนการย่อยมูลสุกรที่สภาวะคงตัว.....36 |
| 4.8 | ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัว.....37 |
| 4.9 | ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VSS) ในถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัว.....41 |
| 4.10 | ปริมาณ Fermentative bacteria ในทุกๆถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัว.....42 |
| 4.11 | ประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทน (SMA) ของแต่ละถังปฏิกรณ์.....42 |
| | ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัวจนถึงสิ้นสุดการทดลอง |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยหลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยรูปแบบของวิธีชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นกระบวนการขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลง การเกิดก๊าซชีวภาพนั้นประกอบด้วยหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิที่เหมาะสม ค่าความเป็นกรดด่าง การกวนมูลสัตว์ในบ่อ ระยะเวลาการเก็บกักของเหลว (HRT) และความเหมาะสมของปริมาณสารอินทรีย์ที่เติมลงในบ่อหมัก (Gamze และ Goksel, 2004) เนื่องจากระบบก๊าซชีวภาพเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งต้องการอาหารในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน บางครั้งการขาดแคลนแร่ธาตุหรือธาตุอาหารรองอาจเป็นผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ไม่มีเสถียรภาพ และท้ายที่สุดก็จะทำให้ระบบล้มเหลว (Callaghan และคณะ, 1995) โดยเฉพาะในกระบวนการย่อยสลายของเสียประเภทของแข็งที่ใช้ระยะเวลานานๆ ระบบจะไม่เกิดการล้มเหลวจากการลดลงของพีเอช (Boopathy, 1998) หรือการสะสมของกรดอินทรีย์ (Lettinga, 1995) แต่เกิดจากการขาดธาตุอาหารรองที่จำเป็นบางชนิด (Scherer และคณะ, 1983) ดังนั้นการเติมธาตุอาหารรองให้กับจุลินทรีย์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตก๊าซไม่ล้มเหลว ทั้งนี้ธาตุอาหารมี 2 ประเภทคือธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง โดยแต่ละประเภทประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิด ในส่วนของธาตุอาหารหลักจำเป็นที่ต้องมีการเติมให้ระบบเนื่องจาก จุลินทรีย์มีความต้องการในปริมาณมาก และมีแนวโน้มว่าจะขาดมากที่สุด แต่ธาตุอาหารรองมีหลายชนิดบางครั้งไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าธาตุอาหารรองชนิดใดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างแท้จริง อีกทั้งบางครั้งธาตุอาหารรองบางชนิดอาจมีเพียงพอแล้วในน้ำเสียตั้งต้น การเติมธาตุอาหารรองหลายชนิดอาจทำให้เกิดความสับสนเปลืองโดยเปล่าประโยชน์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารรองที่มีต่อการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจากมูลสุกร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Complete Mixed Stirred Tank Reactor; STR) ที่ใช้เป็นระดับห้องปฏิบัติการ (Bench Scale) ขนาดปริมาตรใช้งาน 2 ลิตร ที่มีการเติมมูลสุกรแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยติดตั้งในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารรองแต่ละชนิดที่มีต่อการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด ซึ่งใช้ธาตุอาหารหลักร่วมด้วยโดยใช้สูตรที่แนะนำโดย Speece (1996) ส่วนธาตุอาหารรองเลือกทดสอบตาม Kayhanian และ Rich (1995) ซึ่งประกอบด้วยธาตุอาหารรอง 8 ชนิด ได้แก่ เหล็ก โปบอลต์ โมลิบดีนัม ซิลิเนียม นิกเกิล ทังสเทน ทองแดงและสังกะสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการไฮโดรไลซิสของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่มีการเติมธาตุอาหารรองให้จุลินทรีย์ โดยสามารถเลือกธาตุอาหารรองที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างแท้จริง และสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

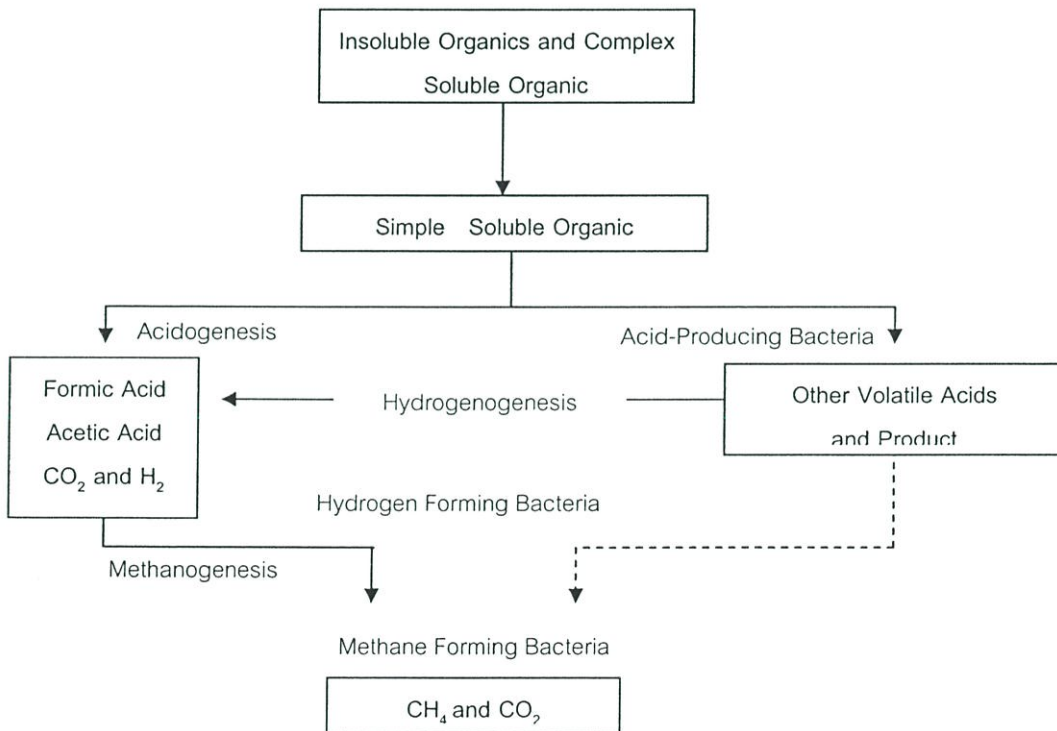
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของ ก๊าซชีวภาพและกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

2.1.1 ก๊าซชีวภาพ

คือก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือในที่นี้หมายถึงมูลสัตว์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) 50 - 70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 30 - 50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งรวมทั้งสิ้น 4 ขั้นตอน (นิศากร, 2538) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ที่มา: ธีระ (2533)

2.1.2 หลักการกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยไม่ใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจนอิสระ โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobes) การย่อยสลายนี้อาจแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. Hydrolysis
2. Acidogenesis
3. Acetogenesis
4. Methanogenesis

- ขั้นตอน Hydrolysis

กระบวนการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายของสารโมเลกุลใหญ่ (Polymer breakdown) ในขั้นนี้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน จะถูกทำให้ละลายน้ำด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมานอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ของจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่จุลินทรีย์สามารถดูดซึมเข้าไปในเซลล์ได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น ซึ่งในการย่อยสลายขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดจึงใช้เวลาต่างกันและผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ถูกย่อยสลาย (ชาญศักดิ์, 2546)

เมื่อโมเลกุลสารอินทรีย์สามารถซึมผ่านผนังเซลล์จุลินทรีย์เข้าไปได้ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acidogens) จะใช้สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารและปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดน้ำส้ม กรดอินทรีย์ที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้โดยกลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้ผลิตภัณฑ์คือก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเรียกว่าก๊าซชีวภาพ (Biogas) ทั้งกลุ่มจุลินทรีย์สร้างกรดและสร้างมีเทนจะพบอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ในดินในแปลงนาข้าว ท่อระบายน้ำเสีย คูคลองที่เน่าเสีย และในมูลสัตว์ต่างๆ (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ ค้นจาก : <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=251,2549>) ทั้งนี้เชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ จุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนต้องอยู่ในสภาพสมดุลกัน หากอาหาร (มูลสัตว์) มีมากเกินไปจุลินทรีย์กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จะผลิตกรดขึ้นมามากจนกระทั่งจุลินทรีย์กลุ่มที่ 3 หยุดทำงาน หากอาหารมีน้อยเกินไปจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตช้า หากมีการกวนอาหารพอสมควร จะทำให้จุลินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่มทำงานสัมพันธ์

กันได้ หากมีการกวนอาหารมากเกินไปก็กลับจะทำให้การเกิดก๊าซลดลง เพราะไม่มีเวลาย่อยสลาย (นิสากร, 2538)

- ขั้นตอน Acidogenesis

สารประกอบอย่างง่ายที่ละลายน้ำที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกจุลินทรีย์ประเภทที่ดำรงชีพได้ทั้งสภาพมีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative Anaerobic Bacteria) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดระเหยง่ายที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้เรียกว่า จุลินทรีย์สร้างกรดซึ่งสายพันธุ์ของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันตามชนิดของสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม การเกิดกรดไขมันระเหยทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงซึ่งโดยทั่วไปค่าพีเอชของระบบที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.5 - 8.0 (มันสิน, 2523) กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรดปกติควรมีค่าประมาณ 200 - 400 มก. ของกรดอะซิติก/ลิตร กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม

- ขั้นตอน Acetogenesis

กรดไขมันระเหยที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนการสร้างกรด จะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก ให้เป็นอะซิเตท ฟอร์มเมท ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน (ภัทรารุช, 2546) ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดไขมันระเหยและไฮโดรเจนที่มีปริมาณสูงจนสามารถยับยั้งการสร้างมีเทนได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้เรียกว่า จุลินทรีย์สร้างไฮโดรเจน

- ขั้นตอน Methanogenesis

ขั้นตอนนี้จุลินทรีย์จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นก๊าซชีวภาพ โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน จะสามารถดำรงชีพอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้น จึงทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่าจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด จุลินทรีย์กลุ่ม

สร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงที่เอช 7.0 – 7.8 และมีเวลาในการแบ่งตัวเท่ากับ 3-5 วัน (Busswell และ Mueller, 1952)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

2.2.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ ดังนั้นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ในกรณีที่อัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์สูง จำนวนจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะกระจายอยู่ทั่วไปไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้ตกตะกอนได้ไม่ดี น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีลักษณะขุ่นและมีสารอินทรีย์เหลืออยู่สูง แต่ถ้าอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ต่ำ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้น้อยลง ดังนั้นการควบคุมการทำงานที่ดีจึงต้องควบคุมอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าเหมาะสม (Grady และ Lim, 1980)

2.2.2 ธาตุอาหาร

ธาตุอาหาร (Nutrient) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก นอกเหนือไปจากสารอินทรีย์ต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นพลังงาน โดยปกติแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ครบในน้ำเสียชุมชนแต่อาจไม่เพียงพอในน้ำเสียอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารที่สำคัญเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก (Floc) เจริญเติบโตได้ไม่ดี และทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใยเจริญได้มากกว่า ซึ่งจะทำให้สลัดจ์ (Sludge) ไม่จมตัวและอาจไหลปนออกมากับน้ำทิ้ง เนื่องจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศต้องมีจุลินทรีย์ 2 ชนิดทำงานร่วมกันคือจุลินทรีย์สร้างกรดและสร้างมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไม่ค่อยมีปัญหา แต่จุลินทรีย์สร้างมีเทนมีลักษณะพิเศษและมีความต้องการแร่ธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยมากแต่ขาดไม่ได้ แร่ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิลและซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) (มันสิน, 2542) ดังนั้นถ้าในน้ำเสียขาดแร่ธาตุดังกล่าวปฏิกิริยาไร้ออกซิเจนจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หรือเท่ากับไม่สามารถเลี้ยงจุลินทรีย์ไร้ออกซิเจนนั่นเอง

2.2.3 ระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียต้องมีมากพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ หากระยะเวลาไม่เพียงพอสารอินทรีย์บางส่วน โดยเฉพาะของแข็งที่ย่อยสลายได้ยากและถูกย่อยสลายได้ไม่หมด ทำให้มีค่าบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก แต่ถ้านานเกินไปก็จะทำให้จุลินทรีย์ได้รับอาหารไม่เพียงพอและลดจำนวนลงได้ Miron และคณะ (2000) ศึกษาผลของเวลากักเก็บตะกอน (Sludge Retention Time) ในกระบวนการไฮโดรไลซิส กระบวนการสร้างกรด และกระบวนการสร้างมีเทน

ของน้ำเสียชุมชน โดยใช้ระบบกวนกวนสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 25°C แปรผันค่าเก็บกักตะกอนให้อยู่ในช่วง 3-15 วัน จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกักตะกอนน้อยกว่า 8 วัน ระบบจะอยู่ในสถานะสร้างกรดในขณะที่มีการสร้างก๊าซมีเทนต่ำมาก ขณะเดียวกันเมื่อเวลาเก็บกักตะกอนมากกว่า 8 วันระบบจะทำงานในสถานะสร้างก๊าซมีเทนได้ดี

2.2.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์สามารถเจริญได้ดีที่ค่า pH ระหว่าง 6.5-8.5 ถ้าค่า pH สูงจะทำให้ฟอสฟอรัสตกตะกอนผลึกแยกออกจากน้ำ จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทำให้ระบบทำงานได้ไม่ดีเช่นกัน ค่า pH ไม่ใช่สัญญาณล่วงหน้าที่ยังบอกถึงการงานที่ล้มเหลวของระบบไว้รอออกซิเจนได้ทันทั่วทั้งที่ ทั้งนี้ความเสียหายจะเกิดขึ้นก่อนที่ pH จะลดลง ข้อมูล pH มีความสำคัญเนื่องจากจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม โดยเฉพาะกลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญได้ดีในช่วง pH 8-9.2 เท่านั้น ถ้าไม่มีการควบคุมให้มีค่าเป็นกลางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนก็จะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้ นอกจากนี้การรักษาค่า pH ให้เป็นกลางยังเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งในระหว่างที่มีการแก้ไขระบบล้มเหลวให้ฟื้นตัว (มันสิน, 2542)

2.2.5 สารพิษ

สารพิษแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พิษแบบเฉียบพลัน ซึ่งจุลินทรีย์จะตายหมดในระยะเวลาอันสั้น และพิษแบบออกฤทธิ์ช้า ใช้เวลานานและค่อยๆ ตาย พิษเฉียบพลันสามารถสังเกตได้ง่ายเนื่องจากมีผลเกิดขึ้นรวดเร็ว ตัวอย่างสารพิษได้แก่ โซดาไฟ สารหนู ส่วนสารพิษออกฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดงและโลหะหนักต่างๆ จุลินทรีย์จะสะสมเอาไว้ภายในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด (Grady และ Lim, 1980) นอกจากนี้ความเป็นพิษอาจเกิดจากสารอนทรีย์ก็ได้ เช่น แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงเกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Gallert และคณะ, 1998) เป็นต้น

2.2.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุกๆ 10°C จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตขึ้นอีกเท่าตัวจนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 37°C และอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์เติบโตได้น้อยลง แต่ทั้งนี้การควบคุมอุณหภูมิขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาแบบไลโอทาสีมี 2 ช่วง คือ มีโซฟิลิก (Mesophilic) $30-38^{\circ}\text{C}$ และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) $49-57^{\circ}\text{C}$ แต่โดยทั่วไปแล้วจะควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่ระบบนั้นสูงจึงไม่นิยม แต่อย่างไรก็ตาม

ตามการทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลากักเก็บ และขนาดของถังหมักลดลง

2.3 ความสำคัญของธาตุอาหารรอง

การพัฒนากระบวนการย่อยอาหารแบบไร้อากาศมีมุ่งเน้นที่เสถียรภาพของระบบ ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญก็คือ ความต้องการแร่ธาตุหรือธาตุอาหารรองของแบคทีเรียที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ธาตุอาหารรองมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนและกระบวนการสร้างมีเทน โดยเฉพาะแร่ธาตุหลักเป็นแร่ธาตุหลักที่เป็นองค์ประกอบเซลล์ ส่วนแร่ธาตุสังกะสี ทองแดง นิกเกิลและโคบอลต์ มีความสำคัญในช่วงการเจริญเติบโตตามลำดับ (Yansheng และคณะ, 2003)

แบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการแร่ธาตุเสริมหลายชนิดเพื่อการเจริญเติบโต ทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง บทบาทของแร่ธาตุเสริมหลักและแร่ธาตุเสริมรองที่มีต่อการเจริญโตและเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียไร้อากาศดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 เพื่อให้แบคทีเรียเกิดเมตาบอลิซึมอย่างเหมาะสมและกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีเสถียรภาพ ก็ควรมีแร่ธาตุเหล่านี้อยู่ในสัดส่วนและความเข้มข้นที่เหมาะสม (Kayhanian และ Rich, 1995)

ตารางที่ 2.1 บทบาทของธาตุอาหารหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

| แร่ธาตุ | บทบาท | หมายเหตุ |
|------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| คาร์บอน | ให้พลังงาน สร้างเซลล์ | เป็นแหล่งพลังงานหลักและธาตุที่สำคัญต่อการสร้างเซลล์ของแบคทีเรีย เนื่องจากสารอินทรีย์โดยทั่วไปมักอุดมไปด้วยคาร์บอน คาร์บอนจึงไม่ใช่แร่ธาตุที่เป็นตัวจำกัด แต่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) คาร์บอนต่อฟอสฟอรัส (C/P) คาร์บอนต่อโพแทสเซียม (C/K) มักเป็นตัวจำกัดมากกว่า |
| ไนโตรเจน | สังเคราะห์โปรตีน | ไนโตรเจนเป็นสารอาหารเสริมที่มีความสำคัญต่อการสร้างเซลล์แบคทีเรีย ไนโตรเจนที่พบในเซลล์อยู่ในรูป Reduced-form เช่น อะมิโนไนโตรเจน (R-NH ₂) ซึ่งมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์โปรตีน |
| ฟอสฟอรัส | สังเคราะห์กรดนิวคลีอิก | ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์สารต่างๆ ของแบคทีเรีย แต่มักมีความสำคัญน้อยกว่าไนโตรเจนหรือคาร์บอน ฟอสฟอรัสมีความสำคัญในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก |
| โพแทสเซียม | ความสามารถในการซึมผ่านได้ | โพแทสเซียมจะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านได้ของเซลล์ ซึ่งจะช่วยให้การส่งผ่านแร่ธาตุเกิดได้ดีขึ้น และยังช่วยสร้างสมดุลประจุบวกในเซลล์อีกด้วย |
| ซัลเฟอร์ | เอนไซม์หลายชนิด | ความต้องการซัลเฟอร์ของ Methanogens มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวอาจใช้ซัลเฟอร์ได้ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้นและมีหลายกระบวนการที่ทำให้ซัลเฟอร์หายไปจากระบบ กระบวนการสร้างมีเทนได้ ซัลเฟอร์อาจไม่อยู่ในรูปที่ถูกรีดิวซ์ ก็อยู่ในรูปของซัลเฟต |

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

| แร่ธาตุ | บทบาท | หมายเหตุ |
|---------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ต่อ | | หรืออยู่ในสภาพที่ถูกรีดิวซ์ คือซัลไฟด์ ซัลเฟตอาจยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้ เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ซัลเฟอร์ในรูปของซัลไฟด์มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทนหลายชนิด เอนไซม์หลายชนิดต้องการซัลเฟอร์ เช่น Carbon monoxide dehydrogenase (CODH) และ Formate dehydrogenase (FDH) ซัลเฟอร์อาจหายไปอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และอาจจะตกตะกอนอยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ กิจกรรมของแบคทีเรียและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพก็อาจทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอนได้ |

ที่มา : Kayhanian และ Rich (1995)

ตารางที่ 2.2 บทบาทของธาตุอาหารรองในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

| แร่ธาตุ | บทบาท | หมายเหตุ |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เหล็ก | CODH ¹ , ตกตะกอนซัลไฟด์ | เหล็กเป็นธาตุที่พบได้ในเนื้อเยื่อของแบคทีเรียสร้างมีเทนในปริมาณสูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ เหล็กมีความจำเป็นหลายประการต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ เช่น กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด และอาจตกตะกอนซัลไฟด์ รวมถึงช่วยจับ Extra cellular polymer ด้วย |
| โคบอลต์ | CODH ¹ | มักอยู่ในเอนไซม์ที่จำเพาะเจาะจงและเอนไซม์ต่างๆ เช่น carbon monoxide dehydrogenase จะใช้โคบอลต์ในกิจกรรมการสร้างอะซิเตท |

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

| แร่ธาตุ | บทบาท | หมายเหตุ |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| โมลิบดีนัม | FDH ³ ยับยั้ง sulfur reducer | โมลิบดีนัมมักพบได้ในเอนไซม์ต่างๆไป เช่น Formate dehydrogenase (FDH ³) แต่โมลิบดีนัมอาจจะไปยับยั้ง sulfate reducing bacteria ทำให้การเกิดซัลไฟด์เป็นไปได้ยาก |
| ทองแดง | SODM, hydrogenase ² | ทองแดงเป็นส่วนประกอบของ super dismutase (SODH) และ hydrogenase อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมทองแดงไม่ทำให้เกิดผลใดๆอย่างมีนัยสำคัญ |
| ซิลิเนียม | FDH ³ , เมตาบอลิซึมกรดไขมัน | ซิลิเนียมเป็นส่วนประกอบในเอนไซม์ของแบคทีเรียไร้อากาศ รวมถึงในกรดนิวคลีอิกของแบคทีเรีย เอนไซม์ที่มีซิลิเนียมเป็นองค์ประกอบคือ FDH ³ ซิลิเนียมทำให้เอนไซม์มีความตื่นตัวที่พิเศษเป็นกลาง และมี Redox potential ต่ำ และอาจช่วยในการย่อยสลายไขมัน |
| ทังสแตน | FDH ³ และอาจช่วยในการเปลี่ยน CO ₂ และ H ₂ ไปเป็นมีเทน | ทังสแตนเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH ³ และช่วยในการเมตาบอลิซึม CO ₂ และ H ₂ ในลักษณะเดียวกับนิกเกิล แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลการเติมทังสแตนอย่างแน่ชัด |

CODH¹ = Carbon monoxide dehydrogenase

SODM² = Super dismutase

FDH³ = Formate dehydrogenase

ที่มา : Kayhanian และ Rich (1995)

เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นชีววิธีคือ ระบบก๊าซชีวภาพ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งต้องการอาหารในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน (Speece, 1996) ธาตุอาหารมีความจำเป็นต่อจุลินทรีย์ทุกชนิด กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogens) ซึ่งประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ ซึ่งแต่ละชนิดก็มีความจำเพาะกับธาตุอาหารแตกต่างกัน จากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการพบว่าน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ รวมทั้งน้ำเสียจากโรงงาน

อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์อาหารหมักนั้นบางครั้งอาจมีธาตุอาหารแต่ละชนิดไม่เพียงพอหรือไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Cho และคณะ, 1995) มีรายงานว่ากระบวนการย่อยแบบไร้ออกซิเจนขั้นตอนการเปลี่ยนสารประกอบอะซิเตทไปเป็นมีเทนนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ในบางอุตสาหกรรมพบว่าอะซิเตทเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดมลพิษ ดังนั้นแร่ธาตุเสริมบางชนิดสามารถส่งเสริมการนำ อะซิเตทไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นถึง 30 - 40 g/L ต่อวัน (Jensen และคณะ, 2006)

Speece (1996) รายงานว่ามีการทดลองนำแร่ธาตุที่มักขาดในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่สามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ประกอบด้วย สารประกอบของเหล็ก ทองแดง ซิลิเนียม โคบอลต์ แมงกานีส หังสเดน นิกเกิล โมลิบดีนัม โบรอน และสังกะสี ทดลองแบบใช้สารเดี่ยวและใช้หลายสารร่วมกันเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่เติมแร่ธาตุ) วัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวันและวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าทุกชุดการทดลองให้ปริมาณแก๊สแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid; VFA) ที่เกิดขึ้นสูงกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้แร่ธาตุที่กล่าวมาข้างต้นยังมีแร่ธาตุอีกหลายชนิดที่มีผลต่อกระบวนการผลิตมีเทน

นอกจากนี้ Mah และคณะ (1978) ทดลองเกี่ยวกับการใช้ธาตุเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์เพื่อเพิ่มอัตราการนำอะซิเตทไปใช้ พบว่าการใช้เหล็กหรือนิกเกิลเพียงอย่างเดียว สามารถเพิ่มการนำอะซิเตทไปใช้ได้ไม่เกิน $10 \text{ kg/m}^3\text{-d}$. แต่ถ้าใช้เหล็กและนิกเกิลร่วมกันใส่ลงในถังปฏิกรณ์โดยตรงสามารถเพิ่มอัตราการนำอะซิเตทไปใช้ได้ถึง $30 \text{ kg/m}^3\text{-d}$. และในกรณีที่ใส่เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ร่วมกันพบว่าเพิ่มอัตราการนำอะซิเตทไปใช้ได้มากกว่า $30 \text{ kg/m}^3\text{-d}$. ภายในเวลา 5 วัน

Kelly และ Switzenbaum (1984) ศึกษาพบว่าการใช้หางนมผง (Whey powder) เพียงอย่างเดียวมีอัตราการลดลงของ COD ประมาณ $6 \text{ kg/m}^3\text{-d}$ เมื่อใช้ร่วมกับเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ อัตราการลดลงของ COD เพิ่มขึ้นเป็น $40 \text{ kg/m}^3\text{-d}$ ซึ่งการลดลงของ COD หรือ การใช้ COD มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าในถังปฏิกรณ์มีปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากการเติมเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ให้กับระบบ

ประโยชน์ของการเติมเหล็กในถังปฏิกรณ์ คือ การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและป้องกันไม่ให้ระบบล้มเหลว โดยเฉพาะถ้าสารตั้งต้นมีปริมาณของซัลเฟตสูง ซึ่งเหล็กเป็นธาตุอาหารที่ละลาย

น้ำได้น้อยและสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบแยกตัวออกจากน้ำ ตกตะกอนผลึกในรูปของเกลือซัลไฟด์ทำให้สามารถรักษาสมดุลของระบบได้ (Speece, 1996)

2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน

ในกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่ทำงานอย่างสัมพันธ์กัน เพื่อให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่องจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซมีเทน โดยจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการย่อยสลายนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

2.4.1 จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน

จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทนจะเป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดกระบวนการหมักเพื่อผลิตกรด โดยได้รับพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) เช่น อะซิติก บิวทริก โพรพิโอนิก นอกจากนี้ยังมีคาร์โบไฮเดรต ไฮโดรเจน แอมโมเนีย แอลกอฮอล์ และซัลไฟด์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.0-6.5 และส่วนใหญ่เป็นพวกจุลินทรีย์กึ่งไร้อากาศ (Facultative Anaerobic Bacteria) ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไร้อากาศ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง โดยทั่วไปจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง (Busswell และ Mueller, 1952)

2.4.2 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

จุลินทรีย์กลุ่มที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 7.0 - 7.8 จุลินทรีย์กลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาวะไร้อากาศเท่านั้น ดังนั้นจึงดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพแวดล้อมที่จำกัดกว่ากลุ่มแรกและมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม โดยเฉลี่ยแล้วต้องใช้เวลาในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าประมาณ 3-5 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์สร้างมีเทนมักเป็นพวกที่ดำรงชีวิตโดยการใช้อินทรีย์ (Autotroph) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ในขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มไม่สร้างมีเทนนั้นมักเป็นพวกที่ดำรงชีวิตโดยการใช้อินทรีย์ (Heterotroph) (Busswell และ Mueller, 1952)

2.5 การอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทนและกลุ่มสร้างมีเทน

จุลินทรีย์กลุ่มไม่สร้างมีเทนนั้นมีความสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนได้แล้วยังทำหน้าที่ในการปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนอีกด้วย โดยเฉพาะพวกจุลินทรีย์สร้างกรดซึ่งเป็นตัวช่วยลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ เนื่องจากในกระบวนการผลิตกรดอินทรีย์จากสารโมเลกุลเล็ก จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะดึงออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบไปใช้ด้วย ทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศในกระบวนการหมักมากขึ้น จึงเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่เป็นกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Zeeman และคณะ, 1999)

2.6 ประโยชน์ของการใช้ธาตุอาหารเสริมรอง

Speece (1996) ทำการทดลองการใช้แร่ธาตุเสริมกับระบบบำบัดในถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) โดยจัดชุดการทดลองเป็น 3 ชุดคือ ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ชุดที่ 2 เติมแคลเซียมและฟอสฟอรัส และชุดที่ 3 เติมเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ ผลการทดลองพบว่า การเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้เกิดการรวมกันเป็นเม็ดตะกอนเพิ่มมากขึ้น ปริมาณตะกอนของสารอินทรีย์ (VSS) จากเริ่มต้น $70-100 \text{ kg/m}^3$ ลดลงเหลือ $1.5-3 \text{ kg/m}^3$ และอัตราการลดลงของ COD คงที่ที่ 90% ขึ้นไป ที่อัตราการเติมน้ำเสีย $10 \text{ kg/m}^3\text{-d}$ ส่วนผลการทดลองชุดที่ 3 พบว่าปริมาณของตะกอนสารอินทรีย์ไม่เปลี่ยนแปลงขณะที่อัตราการลดลงของ COD คงที่ที่ 95% ขึ้นไป ที่อัตราการเติมน้ำเสีย $10 \text{ kg/m}^3\text{-d}$ เช่นกัน จะเห็นว่าการเติมเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ มีความเสถียรมากกว่า

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารด้วยระบบไร้อากาศให้ผลดีและกรดอินทรีย์ระเหยมีความเข้มข้นต่ำ มีรายงานว่าการใช้โคบอลต์สามารถลดความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยจาก 3000 ml เป็น 500 ml ภายในเวลา 30 วัน ซึ่งปริมาณที่ใช้เพื่อให้ได้ผลดีคือ 0.0025 mg/L โคบอลต์ไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ผลิตมีเทนจากอะซิเตทแต่มีผลมากสำหรับจุลินทรีย์ผลิตมีเทนจากเมทานอล เนื่องจากโคบอลต์ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของโคเอนไซม์ในกระบวนการผลิตมีเทนจากเมทานอลนั่นเอง ดังนั้นเป็นไปได้ว่าโคบอลต์ทำหน้าที่รักษาระดับของสารตั้งต้นระหว่างกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศของการผลิตมีเทน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้โคบอลต์ร่วมกับนิกเกิล โมลิบดีนัม ซิลิเนียม และซัลเฟต สามารถเพิ่มอัตราการผลิตมีเทนได้ประมาณ 40% (Speece, 1996)

Jensen และคณะ (2006) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจำเพาะของแร่ธาตุและกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน *Methanosacina barkeri* โดยใช้แร่ธาตุนิกเกิล โคบอลต์และความเข้มข้นของซัลไฟด์ พบว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน มีมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแร่ธาตุโคบอลต์และนิกเกิลในช่วง 0-400 ไมโครมิลลิกรัมพร้อมกับการลดลงของซัลไฟด์ โดยความเข้มข้นของแร่ธาตุโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งเสริมให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้มากขึ้นและไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของแร่ธาตุที่ละลายได้ในระบบให้เพิ่มขึ้น และจุลินทรีย์ใช้แร่ธาตุโคบอลต์มากกว่านิกเกิล อีกทั้งพบว่าแร่ธาตุทั้งสองชนิดมีผลต่อโครงสร้างเซลล์จุลินทรีย์มากกว่าความสมดุลของไอออนในระบบ โดยตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณแร่ธาตุโคบอลต์และนิกเกิลที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ *M. barkeri* ดังนี้

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของเซลล์ โคแฟกเตอร์และองค์ประกอบโดยประมาณของโคบอลต์และนิกเกิลใน *Methanosacina barkeri*

| | Co | Ni |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Cell cofactor content ($\mu\text{mol g}^{-1}$) | 0.28 | 0.043 |
| Cofactor content/metal content (%) | 90 \pm 10 | 10 \pm 5 |
| Cell metal content ($\mu\text{mol g}^{-1}$) | 0.32 \pm 10 | 0.6 \pm 0.3 |
| Metal consumption (nM) | 190 \pm 20 | 350 \pm 170 |

ที่มา : ดัดแปลงจาก Jensen และคณะ (2006)

นอกจากนี้พบว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์สร้างมีเทนนั้นมีข้อจำกัด คือ แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบถูกควบคุมโดยลักษณะเฉพาะของการใช้ของจุลินทรีย์ (Jewell, 1980)

Patidar และ Tare (2006) ศึกษาผลของสารอาหารที่มีต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ โดยเลือกใช้แร่ธาตุที่สำคัญ ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล สังกะสี และโคบอลต์ โดยศึกษาทั้งการใช้แร่ธาตุเดี่ยวและใช้ร่วมกัน พบว่าการใช้แร่ธาตุร่วมกัน ได้แก่ แร่ธาตุเหล็ก-นิกเกิล-สังกะสี เหล็ก-นิกเกิล-โคบอลต์ เหล็ก-นิกเกิล-สังกะสี-โคบอลต์ ส่งเสริมให้กิจกรรมของจุลินทรีย์สร้างมีเทนลดปริมาณซัลไฟด์ได้มากกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่แร่ธาตุ

นิกเกิล-สังกะสี-โบบอลต์ เหล็ก-นิกเกิล-สังกะสี เหล็ก-โบบอลต์ และแร่สังกะสี สามารถกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้มากที่สุด

ในส่วนของการใช้แร่ธาตุของจุลินทรีย์พบว่าแร่ธาตุนิกเกิล โคบอลต์และสังกะสีเป็นแร่ธาตุที่ถูกใช้มากที่สุดตามลำดับ (Balch และคณะ, 1979)

นอกจากการใช้แร่ธาตุที่ทำงานร่วมกันแบบส่งเสริมกันแล้ว Patidar และ Tare (2006) ยังพบว่าแร่ธาตุนิกเกิลที่ต่อต้านการทำงานของกันและกันด้วย เช่น แร่ธาตุนิกเกิลและสังกะสี ซึ่งพบว่าการใช้แร่ธาตุทั้งสองร่วมกันมีผลต่อจุลินทรีย์ในการลดปริมาณซัลไฟด์ได้น้อยกว่าการใช้แร่ธาตุนิกเกิลหรือสังกะสีเพียงชนิดเดียว ทั้งนี้เกิดจากนิกเกิลมีผลต่อการนำแร่สังกะสีไปใช้ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนกลุ่มลดปริมาณซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria) นั้นเอง

Karri และคณะ (2006) ศึกษาผลของทองแดง (Cu) ที่มีต่อปฏิกิริยาการใช้อะซิเตท (Acetoclastic) และการสร้างไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic) ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนและตัวลดซัลเฟตของตะกอน จุลินทรีย์ไร้อากาศ พบว่าคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถยับยั้งการสร้างไฮโดรเจนได้ถึง 27% และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนส่งผลให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนและปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็ว โดยคอปเปอร์ไอออนความเข้มข้น 63.5 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งระดับของปฏิกิริยา Hydrogenotrophic sulfate reducing ลดลงมากกว่า 99% ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนที่ทำหน้าที่กำจัด ซัลเฟตจะสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนเริ่มต้นนั่นเอง

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบ

- มูลสุกร ซึ่งมีของแข็งเป็นส่วนประกอบประมาณ 50% จาก บริษัท บีอินเตอร์เนชั่นแนล แอนด์เทคโนโลยี จำกัด
- ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบี จาก บริษัท เสริมสุข จำกัด

3.1.2 ชุดทดลองระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

- ขวดพลาสติก ขนาด 3 ลิตร 9 ใบ
- ฝาขวดพลาสติกพร้อมท่อสำหรับเก็บตัวอย่าง
- ชุดการกวน
- แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- ขวดเก็บตัวอย่าง
- ชุดวัดปริมาณก๊าซแบบแทนทีน้ำ

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermometer) Type K
- ตู้อบ (Hot air oven) ยี่ห้อ Contherm รุ่น Series five บริษัท โปรเกรส เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ TUV รุ่น pH 357 บริษัท Wessenschaftlich Technische จำกัด ประเทศเยอรมัน
- เตาไฟฟ้า (Hot plate) ประเทศไทย
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Satorius รุ่น AC210S บริษัท Scientific Promotion จำกัด ประเทศไทย
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Satorius รุ่น AC211S บริษัท Scientific Promotion จำกัด ประเทศไทย

- โถดูดความชื้น (Dessicator)
- เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) บริษัท Lab-line instrument จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 14B คอลัมน์ FID ประเทศญี่ปุ่น
- Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 8A คอลัมน์ TCD ประเทศญี่ปุ่น
- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 400 420 และ 470 นาโนเมตร ยี่ห้อ HACH รุ่น DR/4000 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- กระจายกรอง ขนาด 47 มม. ยี่ห้อ Advantect รุ่น GC-50 บริษัท Toyo Roshi Kaisha จำกัด ประเทศญี่ปุ่น
- เครื่องกลั่น Micro-Kjeldahl รุ่น Vapodest 33 ยี่ห้อ Gerhardt บริษัท Gerhardt Bonn จำกัด ประเทศเยอรมันนี
- ชุดเครื่องย่อยไนโตรเจน รุ่น Tur ยี่ห้อ Gerhardt บริษัท Gerhardt Bonn จำกัด ประเทศเยอรมันนี

3.1.4. อุปกรณ์สำหรับการตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์ กลุ่ม Fermentative bacteria

- PCA media ยี่ห้อ Merck บริษัท Merck kGaA จำกัด ประเทศเยอรมันนี
- Petri dish
- ตะเกียงแอลกอฮอล์และแท่งแก้วรูปตัว L
- ชุดอุปกรณ์สำหรับบ่ม แบบไร้อากาศ
- Autoclave ยี่ห้อ Tomy รุ่น SD-30N บริษัท Tomy Seiko จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

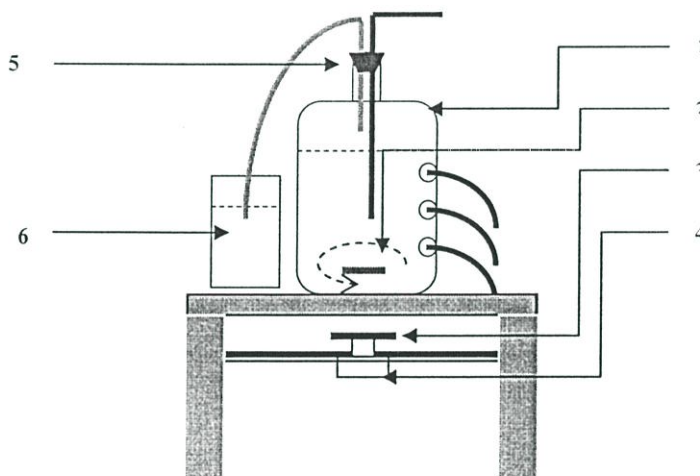
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 ตั้งปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตั้งปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกจำลองจากการทำงานของตั้งปฏิกรณ์แบบมีการกวนสมบูรณ์ ซึ่งทำจากขวดพลาสติกขนาด 3 ลิตร เจาะรู 3 รู ระยะห่างกัน 3 ซม. เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ กลุ่ม Fermentative anaerobic bacteria มีอุปกรณ์ในการกวนผสมประกอบด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่มีสารเคลือบป้องกันการกัดกร่อนใส่ไว้ภายในตั้งปฏิกรณ์และใช้แท่งแม่เหล็กภายนอกถึงเหนี่ยวนำให้แท่งแม่เหล็กภายในตั้งหมุนจนเกิดการผสมภายในตั้งปฏิกรณ์ ซึ่งเกิดภายใต้สภาวะไร้อากาศ ตั้งปฏิกรณ์ปิดด้วยจุกยางมีสายยางต่อออกมา 2 เส้นเพื่อใช้เก็บตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์และเป็น

ช่องทางออกของก๊าซที่เกิดขึ้น ช่องทางออกนี้ต่อไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ลักษณะของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งอุปกรณ์ในการทำปฏิกรณ์ 1 ชุด ประกอบด้วย

1. ถังพลาสติกขนาด 3 ลิตร
2. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ขนาด 4 x 9.5 มิลลิเมตร
3. แท่งแม่เหล็กเหนี่ยวนำขนาด 3x4x0.5 เซนติเมตร
4. มอเตอร์ความเร็วรอบ 120-160 รอบ/นาที
5. จุกยาง
6. อุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซด้วยวิธีแทนที่น้ำ



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของชุดถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) ถังพลาสติกขนาด 3 ลิตร; (2) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ขนาด 4 x 9.5 มิลลิเมตร; (3) แท่งแม่เหล็กเหนี่ยวนำขนาด 3x4x0.5 เซนติเมตร; (4) มอเตอร์ความเร็วรอบ 120-160 รอบ/นาที; (5) จุกยาง; (6) อุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซด้วยวิธีแทนที่น้ำ

3.2.2 การเริ่มต้นระบบ

ระบบที่ใช้ดำเนินการทดลองนี้คือระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว (Conventional single stage digester) โดยที่พารามิเตอร์ที่ใช้เริ่มต้นระบบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ทำการเติมตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น 10 กรัมของแข็งระเหย (VSS) และเติมวัตถุดิบประมาณ 2 กรัมซีโอดีต่อถังต่อวันในช่วงเริ่มต้น แล้วจึงเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 10 กรัมซีโอดี เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลโดยวัดจากการลดลงของค่า COD ที่คงที่ และใช้อุปกรณ์ในการกวนอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะไร้อากาศ ทั้งนี้ในช่วงของการ

เริ่มต้นระบบชุดการทดลองทั้ง 9 ชุด ใช้ธาตุอาหารรองสูตร Speece (1996) ซึ่งประกอบด้วย $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, KI , $(\text{NaPO}_3)_6$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4VO_3 , $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 , $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ Na_2SeO_3 เหมือนกันทั้งหมด และมีวิธีการป้อนของเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous feeding) โดยคั่งน้ำออกและป้อนเพียงวันละครั้งในปริมาณที่เท่ากัน ช่วงแรกของการทดลองเป็นการปรับให้จุลินทรีย์มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียใช้ระยะเวลาประมาณ 45 วัน ติดตามการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะ โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเริ่มเดินระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ใช้ |
|---------------------------|---------------------------------|
| อาหารต่อจุลินทรีย์ | 1:1 (g) |
| เชื้อเริ่มต้น | 10 g VSS |
| สารอินทรีย์ที่ป้อนให้ระบบ | 2 g COD - 10 g COD /reactor/day |
| ความเร็วรอบในการผสม | 120-160 รอบต่อนาที |
| การทำงานของมอเตอร์ | ทำงานต่อเนื่อง |

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชาญศักดิ์ (2546)

3.2.2.1 การเตรียมตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ เริ่มต้น

ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์นำมาจากระบบบำบัดแบบยูเอเอสบี ของบริษัทเสริมสุข จำกัด นำมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหย เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณปริมาณเชื้อเริ่มต้น (g) ที่ต้องเติมลงในระบบ โดยคำนวณได้จาก

$$\begin{array}{llll} \text{ปริมาณของแข็งระเหย} & Y \text{ กรัม} & \text{ใช้ตะกอน} & Z \text{ กรัม} \\ \text{ถ้าต้องการปริมาณของแข็งระเหย} & 10 \text{ กรัม} & \text{ต้องใช้ตะกอน} & = \frac{10 \times Z}{Y} \text{ กรัม} \end{array}$$

จากนั้นนำตะกอนมาปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ ระดับความเร็วสูงสุด ปั่นตะกอนให้มีลักษณะละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน นำมาชั่งน้ำหนักแล้วเติมลงในถังปฏิกรณ์แต่ละถังเท่าๆกัน

3.2.2.2 การเตรียมสารอินทรีย์และสารอาหาร

นำมูลสุกรมาวิเคราะห์ค่า COD เริ่มต้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณ COD เริ่มต้นเช่นเดียวกับตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ จากนั้นนำมูลสุกรมาชั่งน้ำหนักให้ได้ตามที่คำนวณแล้วละลายน้ำกวนผสมให้มูลสุกรละลายทั้งหมดทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีแล้วกรองด้วยผ้าขาวบางใช้เฉพาะส่วนที่

ละลาย เติมสารอาหารที่มีความเข้มข้นตามที่กำหนดในตารางที่ 5 ลงในสารละลายมูลสุกรตามปริมาณที่กำหนด กวนให้เข้ากันแล้วเติมลงในถังปฏิกรณ์ที่เติมตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ลงไปแล้ว

3.2.3 การเดินระบบอย่างต่อเนื่อง

ในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์เริ่มหลังจากช่วงเริ่มต้น การเดินระบบกระทำโดยการเติมสารอินทรีย์วันละหนึ่งครั้ง ด้วยอัตราภาระสารอินทรีย์ (Organic loading rate) 1 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้เวลาเก็บกักทางชลศาสตร์ (Hydraulic retention time : HRT) เท่ากับ 20 วัน (ชาญศักดิ์, 2546) และแต่ละชุดการทดลองทำการปรับค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารรองตามที่กำหนดในตารางที่ 3.2 ในการปฏิบัติก่อนการเติมวัตถุดิบจะนำน้ำออกจากถังปฏิกรณ์ (Effluent) เพื่อรักษาระยะเวลากักเก็บทางชลศาสตร์ โดยน้ำออกจากถังปฏิกรณ์นี้เป็นส่วนหนึ่งถูกนำไปวิเคราะห์หลังจากนั้นจึงเติมวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์พร้อมกันกับการเติมแร่ธาตุเสริมที่เตรียมไว้ ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ถูกเก็บมาตรวจวัดอย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 3.2 ธาตุอาหารรองตามสูตรของ Speece (1996) ที่เติมลงในระบบของถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมสมบูรณ์ภายหลังจากช่วงเริ่มต้นการหมักแล้ว

| แร่ธาตุ | ความเข้มข้นในน้ำเข้า (มก./ล) |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| FeCl ₂ .4H ₂ O | 40 |
| CoCl ₂ .6H ₂ O | 10 |
| KI | 10 |
| (NaPO ₃) ₆ | 10 |
| MnCl ₂ .4H ₂ O NH ₄ VO ₃ | 0.5 |
| CuCl ₂ .2H ₂ O | 0.5 |
| ZnCl ₂ | 0.5 |
| AlCl ₃ .6H ₂ O | 0.5 |
| NaMoO ₄ .2H ₂ O | 0.5 |
| H ₃ BO ₃ | 0.5 |
| NiCl ₂ .6H ₂ O | 0.5 |
| NaWO ₄ .2H ₂ O | 0.5 |
| Na ₂ SeO ₃ | 0.5 |

ที่มา : Speece (1996)

3.2.4 การศึกษาการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์จากวัตถุดิบมูลสุกร

เพื่อศึกษาผลของธาตุอาหารรอง 8 ชนิดที่มีผลต่อการย่อยสลาย โดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ธาตุอาหารรองตามสูตรของ Speece (1996) 13 ชนิด ได้แก่ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ KI $(\text{NaPO}_3)_6$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ NH_4VO_3 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ZnCl_2 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ H_3BO_3 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ Na_2SeO_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 กับธาตุอาหารรอง 8 ชนิด ตาม Kayhanian และ Rich (1995) ประกอบด้วย เหล็ก ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิล ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โคบอลต์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โมลิบดีนัม ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซีลีเนียม (Na_2SeO_3) ทังสเตน ($\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2) เพิ่มปริมาณเป็น 10 เท่า ซึ่งแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 9 ชุด รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยชุดการทดลองที่ 1 ใช้ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองสูตร Speece (1996) ส่วนชุดการทดลองที่ 2-9 เพิ่มปริมาณธาตุอาหารรองแต่ละชนิดเป็น 10 เท่าตามลำดับ สำหรับถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการไฮโดรไลซิสแสดงในภาพที่ 3.2

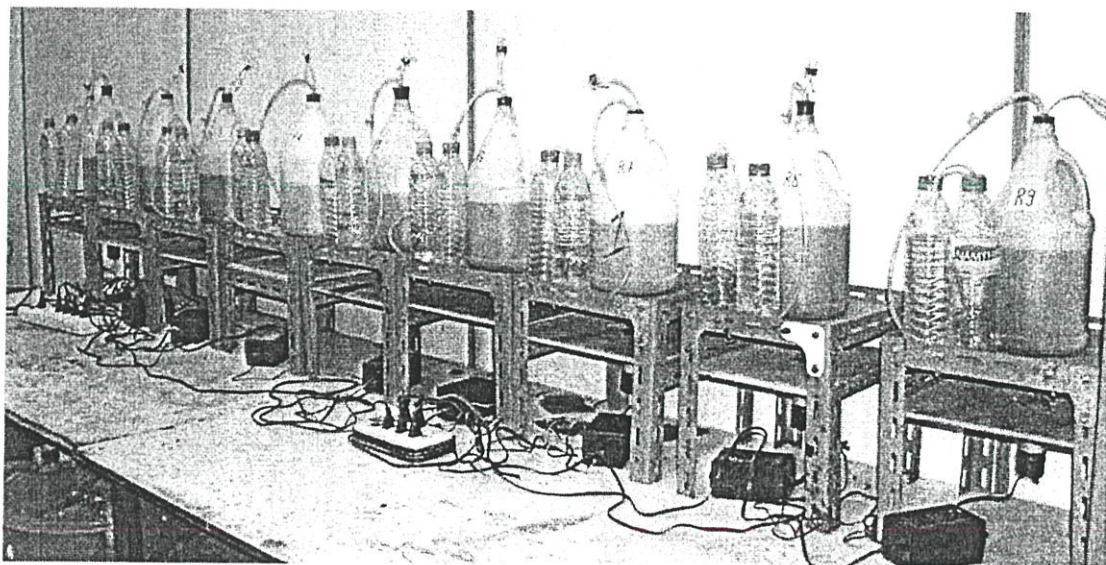
ตารางที่ 3.3 รูปแบบชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาการไฮโดรไลซิสวัตถุดิบมูลสุกร

| ถึงปฏิกรณ์ | แร่ธาตุเสริมรองที่เพิ่มปริมาณเป็น 10 เท่า | ความเข้มข้นในน้ำเข้า (มก./ล) ตามลำดับ |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| R1 (Speece 1996) | แร่ธาตุเสริมรองเต็มสูตร | - |
| R2 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 400 |
| R3 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 400+5 |
| R4 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 400+5+100 |
| R5 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SeO}_3$ | 400+5+100+5 |
| R6 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SeO}_3 + \text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 400+5+100+5+5 |
| R7 | $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SeO}_3 + \text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 400+5+100+5+5+5 |

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

| ถังปฏิกรณ์ | แร่ธาตุเสริมรองที่เพิ่มปริมาณ เป็น 10 เท่า | ความเข้มข้นในน้ำเข้า (มก./ล) ตามลำดับ |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| R8 | FeCl ₂ .4H ₂ O+ NiCl ₂ .6H ₂ O +CoCl ₂ .6H ₂ O + Na ₂ SeO ₃ + NaWO ₄ .2H ₂ O+ NaMoO ₄ .2H ₂ O+ CuCl ₂ .2H ₂ O | 400+5+100+5+5+5+5 |
| R9 | FeCl ₂ .4H ₂ O+ NiCl ₂ .6H ₂ O+ CoCl ₂ .6H ₂ O+ Na ₂ SeO ₃ + NaWO ₄ .2H ₂ O+ NaMoO ₄ .2H ₂ O+ CuCl ₂ .2H ₂ O+ ZnCl ₂ | 400+5+100+5+5+5+5+5 |

* ธาตุอาหารรองตามสูตรของ Speece (1996) 13 ชนิด ได้แก่ FeCl₂.4H₂O CoCl₂.6H₂O KI (NaPO₃)₆ MnCl₂.4H₂O NH₄VO₃ CuCl₂.2H₂O ZnCl₂ AlCl₃.6H₂O NaMoO₄.2H₂O H₃BO₃ NiCl₂.6H₂O NaWO₄.2H₂O และ Na₂SeO₃



ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการไฮโดรไลซิสมูลสุกร

3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาและวิเคราะห์

เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของการศึกษาการไฮโดรไลซิสนี้ ตัวอย่างของน้ำในถังปฏิกรณ์ถูกเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และมีความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและวิเคราะห์

| ขั้นตอน | รายการวิเคราะห์ | ความถี่ |
|---------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| เริ่มต้นระบบ | SS ของมูลสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ | เฉพาะวันแรก |
| | VSS ของมูลสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ | เฉพาะวันแรก |
| | ความชื้นของมูลสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ | เฉพาะวันแรก |
| | TKN ของมูลสุกร | เฉพาะวันแรก |
| | TP ของมูลสุกร | เฉพาะวันแรก |
| | Temperature | ทุกวัน (เวลา 14.00 น.) |
| | pH | ทุกวัน |
| | Total COD ของมูลสุกร | เฉพาะวันแรก |
| | Soluble COD | ทุกๆ 3 วัน |
| | VFA | ทุกๆ 3 วัน |
| | GAS | ทุกวัน |
| | CH ₄ | 1 ครั้ง/สัปดาห์ |
| | Fermentative bacteria | 1 ครั้ง/สัปดาห์ |
| การเดินระบบอย่างต่อเนื่อง | Temperature | ทุกวัน (เวลา 14.00 น.) |
| | pH | ทุกวัน |
| | Soluble COD | ทุกๆ 3 วัน |
| | VFA | ทุกๆ 3 วัน |
| | GAS | ทุกวัน |
| | CH ₄ | ทุกๆ 3 วัน |
| | Fermentative bacteria | 1 ครั้ง/สัปดาห์ |

3.3.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids : SS)

ของแข็งแขวนลอย คือ ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำแต่มีขนาดเล็กพอที่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ วิเคราะห์โดยการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber paper) จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เวลา 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากกระดาษกรอง

3.3.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids : VSS)

ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย คือ ของแข็งที่สลายไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500-600 °C ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์เพราะสามารถสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่เกิดการสลายตัวในอุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลือคือของแข็งคงตัวที่เป็นสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่

3.3.3 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen : TKN)

วิเคราะห์โดยวิธีเจลดาล์ โดยไม่มีการกำจัดแอมโมเนียออกจากตัวอย่างก่อน ผลที่ได้จึงเป็นผลรวมของแอมโมเนียกับออร์แกนิกไนโตรเจน โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์คือ ชุดเครื่องย่อยและกลั่นแอมโมเนีย (Micro-Kjeldahl, Distillation unit)

3.3.4 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus : TP)

วิเคราะห์ด้วยกรดซัลฟูริกและไนตริก ซึ่งวิธีการวิเคราะห์โดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ข

3.3.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัด Digital pH meter ยี่ห้อ TUV

3.3.6 ซีโอดีละลาย

วิเคราะห์ด้วยวิธี รีฟลักซ์แบบปิด ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกวัดค่าซีโอดีแทนบีโอดี เนื่องจากค่าซีโอดีมีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย เช่นเดียวกับค่าบีโอดี และมีข้อดีคือใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 3 ชั่วโมง เทียบกับบีโอดีซึ่งใช้เวลาวิเคราะห์ถึง 5 วัน อีกทั้งค่าซีโอดียังสามารถใช้ในการประเมินค่าบีโอดีได้ ทำให้สะดวกและประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ค่าซีโอดีที่ออกจากระบบเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียหากซีโอดีในน้ำออก (Effluent) มีค่าต่ำก็แสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูง

3.3.7 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

ใช้วิธี Gas Chromatography Analysis ในการวิเคราะห์ โดยเครื่อง Shimadzu Gas Chromatography Model GC-14B ซึ่งปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์เป็นตัวชี้เสถียรภาพในการทำงานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

3.3.8 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น

วัดปริมาตร โดยการแทนที่น้ำ

3.3.9 เปอร์เซนต์มีเทนที่เกิดขึ้น

วิเคราะห์โดยวิธี Gas Chromatography Analysis โดยเครื่อง Shimadzu Gas Chromatography Model GC-8A เพื่อเป็นการประเมินว่าซีโอดีในน้ำออกมีค่าต่ำเกิดจากระบบไม่สามารถเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสได้เลยตั้งแต่ต้น หรือกระบวนการมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี จึงต้องมีการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาควบคู่กันไป หากพบก๊าซมีเทนก็แสดงว่าระบบสามารถเกิดการย่อยสลายไปถึงขั้นสุดท้ายคือการสร้างก๊าซมีเทนได้

3.3.10 ตรวจสอบปริมาณเชื้อทั้งหมดของกลุ่ม Fermentative bacteria

โดยการนับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ทั้ง 9 ชุด เลือกเก็บที่ความลึก 3 ซม. 6 ซม. และ 9 ซม. จากผิวน้ำ โดยน้ำหมักมีความลึกประมาณ 15 ซม. และใช้วิธีการ Spread plate ที่ความเข้มข้น 10^{-3} - 10^{-5} บนอาหาร PCA และบ่มที่อุณหภูมิห้องในสภาวะไร้อากาศเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ตามวิธีการของ AOAC (Andrew and Messer, 1990)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของธาตุอาหารรองที่มีต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ของของเสียในรูปของแข็ง ซึ่งใช้มูลสุกรเป็นวัตถุดิบ ได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบจำลองระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่มีการกวนแบบสมบูรณ์ในภาชนะถังพลาสติกขนาดใช้งาน 2 ลิตร ทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง ประกอบด้วยชุดการทดลองที่ 1 ใช้ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองตามสูตรอาหารของ (Speece, 1996) ส่วนชุดการทดลองที่ 2-9 เพิ่มปริมาณธาตุอาหารรองแต่ละชนิดเป็น 10 เท่าตามลำดับ ได้แก่ เหล็ก ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิล ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โคบอลต์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โมลิบดีนัม ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซีลีเนียม (Na_2SeO_3) ทังสเตน ($\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2) ซึ่งงานวิจัยมีการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุดิบและตะกอนจุลินทรีย์

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือมูลสุกร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บีอินเตอร์เนชันแนล แอนด์เทคโนโลยี จำกัด โดยมูลสุกรที่ใช้เป็นมูลสุกรผสมระหว่างสุกรแม่พันธุ์และสุกรขุน ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งเกาะกันเป็นก้อน เก็บตัวอย่างโดยไม่ผสมกับน้ำ ส่วนเชื้อจุลินทรีย์นำมาจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศจากบริษัท เสริมสุข จำกัด ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบและตะกอนจุลินทรีย์ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของมูลสุกรและตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

| พารามิเตอร์ | ผลการวิเคราะห์ | |
|--------------------------------|----------------|------------------|
| | มูลสุกร | ตะกอนจุลินทรีย์* |
| Moisture (%) | 55.3 | 63 |
| SS (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 400 | 200 |
| VSS (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 300 | 80 |
| Total COD (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 800 | - |
| Soluble COD (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 100 | - |
| TKN (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 40 | - |
| TP (mg/g มูลสุกรแห้ง) | 50 | - |

หมายเหตุ : * ค่า SS และ VSS ของตะกอนจุลินทรีย์มีหน่วยเป็น mg/g ตะกอนจุลินทรีย์เปียก

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่ามลสารมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งอยู่มาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มลสารถูกย่อยสลายได้ยากขึ้น อีกทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีทั้งหมด (Total Chemical Oxygen Demand ; TCOD) ก่อนข้างสูงแต่ซีโอดีละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand ; SCOD) นั้นเมื่อเทียบกับซีโอดีทั้งหมดพบว่ามีค่าน้อยมาก โดย TCOD มีค่า 800 มิลลิกรัมต่อกรัมมลสาร ค่า SCOD มีค่า 100 มิลลิกรัมต่อกรัมมลสาร ซึ่งถือได้ว่าเป็นสัดส่วนที่น้อย (TCOD:SCOD = 8:1) แต่มีของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid; SS) ในปริมาณมากคือ 400 มิลลิกรัมต่อกรัมมลสาร ทั้งนี้ Sanchez และคณะ (2005) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียมลสารที่เข้าสู่ระบบการบำบัดแบบไร้อากาศ ซึ่งคุณลักษณะของมลสารมีความแตกต่างกับมลสารที่ใช้ในการวิจัยคือ มลสารที่ไม่มีสัดส่วนของปริมาณซีโอดีทั้งหมดกับค่าซีโอดีละลายที่มากกว่า โดย TCOD มีค่า 1,274 mg/L ส่วน SCOD มีค่า 865 mg/L (TOD:SCOD = 5:1) และมีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่น้อยกว่า โดย TSS มีค่า 278 mg/L ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาของ Sanchez และคณะ (2005) พบว่าเมื่อภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate; OLR) เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำที่ออกจากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีความสัมพันธ์กับกระบวนการย่อยสลายสารของจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต การเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งแขวนลอยให้กับระบบทำให้จุลินทรีย์ต้องทำหน้าที่ย่อยสลายเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากของแข็งแขวนลอยย่อยสลายได้ยาก ทำให้มีการตกค้างในระบบจึงพบของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของน้ำเสียมลสารที่เข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าเฉลี่ย | ความแปรปรวน |
|-------------|-------|-----------|-------------|
| TCOD | mg/L | 1,274 | 1.91 |
| SCOD | mg/L | 865 | 1.21 |
| BOD | mg/L | 779 | 1.40 |
| TSS | mg/L | 278 | 0.56 |
| VSS | mg/L | 184 | 0.39 |
| N | mg/L | 340 | 50 |
| P | mg/L | 670 | 110 |

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Sanchez และคณะ (2005)

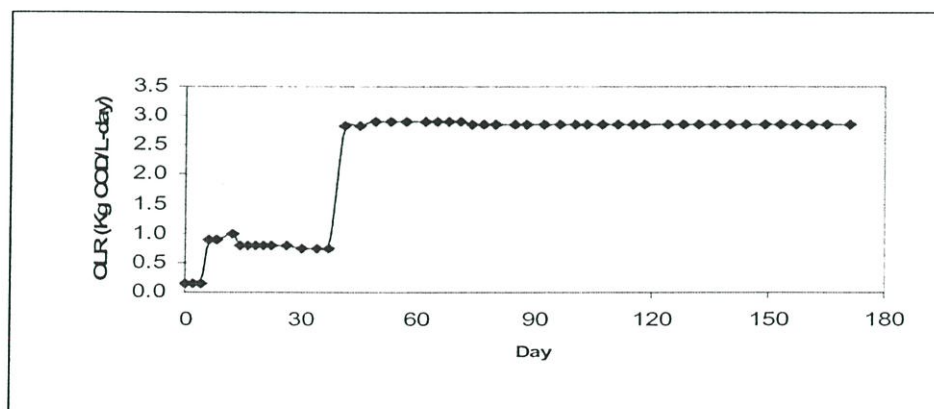
ดังนั้นมลสารที่มีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งอยู่มากเป็นสาเหตุที่ทำให้มลสารถูกย่อยสลายได้ยากขึ้นทำให้สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์พร้อมจะนำไปใช้ได้เพื่อเป็นอาหารและสร้างก๊าซชีวภาพต่อไปนั้นค่อนข้างน้อยและทำให้สารอินทรีย์ที่จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นของการผลิตก๊าซชีวภาพจากมลสารจึงเป็น

สารอินทรีย์ที่ต้องมาจากกระบวนการย่อยสลายมูลสุกรเป็นสำคัญ ถ้าหากกระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดี และเร็วก็จะส่งผลให้เกิดสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีโอดีละลายมากขึ้น จุลินทรีย์ก็จะได้รับอาหารที่พร้อมจะนำไปสร้างกิจกรรมต่างๆ ต่อไปได้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.2 ผลการย่อยสลายมูลสุกรในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมวัตถุดิบก่อนนำเข้าสู่ระบบโดยการนำมูลสุกรมาละลายน้ำให้เป็นสารละลาย เนื่องจากมูลสุกรบางส่วนนั้นมีขนาดใหญ่และมีมวลเบาทำให้ลอยอยู่บนผิวน้ำทำให้ละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงทำการผสมน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันและกรองด้วยผ้าขาวบาง 1 ชั้น นำเฉพาะส่วนที่เป็นสารละลายที่มีค่าซีโอดีตามที่กำหนดป้อนเข้าสู่ระบบ อีกทั้งเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ตะกอนของมูลสุกรเกิดการสะสมบริเวณก้นถังปฏิกรณ์ ซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณใช้งานของถังปฏิกรณ์ลดลงและส่งผลให้แท่งแม่เหล็กที่ทำหน้าที่กวนผสมทำงานได้ยากขึ้น เนื่องจากมีตะกอนสะสมบริเวณก้นถังมากเกินไป

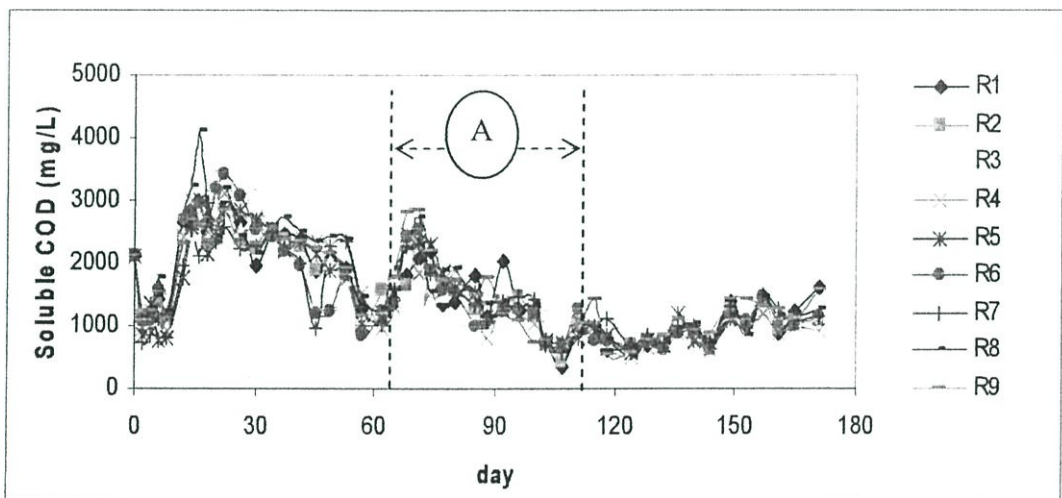
เมื่อเริ่มต้นระบบปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ที่เข้าระบบเริ่มต้นจาก 2,129 mg/L เมื่อเข้าสัปดาห์ที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10,000 mg/L และเพิ่มเป็น 38,000 mg/L ในสัปดาห์ที่ 5 และเป็นเช่นนี้ไปตลอดการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 สาเหตุที่ค่อยๆ เพิ่มปริมาณ TCOD ขึ้นเรื่อยๆ นั้น เนื่องจากต้องการให้จุลินทรีย์ทำความคุ้นเคยกับสารอินทรีย์อย่างช้าๆ โดยการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ดังกล่าวจะทำให้ระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งวัดจากปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีละลาย (SCOD) ของน้ำตัวอย่างที่ออกจากถังปฏิกรณ์มีค่าเริ่มคงที่ และสาเหตุที่เลือกเพิ่ม TCOD สูงสุดเท่ากับ 38,000 mg/L เนื่องจาก SCOD ของน้ำตัวอย่างที่ออกจากทุกๆ ถังปฏิกรณ์ มีค่าที่ไม่สูงหรือต่ำมากเกินไป ทำให้แยกความแตกต่างของแต่ละถังปฏิกรณ์ได้ง่าย ในช่วงแรกจะทำการเติมธาตุอาหารหลักและรองของ Speece (1996) เหมือนกันทุกถังปฏิกรณ์เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงเริ่มเปลี่ยนสูตรอาหารตามตารางที่ 3.4



ภาพที่ 4.1 ภาระสารอินทรีย์ที่เข้าระบบในรูปของซีโอดีทั้งหมด

4.3 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลาย

จากผลการทดลองพบว่าช่วงแรกค่า SCOD ของตัวอย่างน้ำออกของทุกๆ ถึงปฏิกรณ์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TCOD ที่ให้กับระบบ จากนั้นอีกประมาณ 30 วันค่าเริ่มลดลงเรื่อยๆ แม้ว่าค่า TCOD ที่เข้าระบบจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบเริ่มสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้นซึ่งอาจเนื่องมาจากจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมและอาหารที่ได้รับบ้างแล้ว ในช่วง 120 วันแรกก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นค่า SCOD ยังไม่คงที่ แต่หลังจากนั้นค่า SCOD เริ่มคงที่มากขึ้น เป็นที่สังเกตได้ว่าไม่ว่าค่า SCOD จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็พบว่าทุกถึงปฏิกรณ์นั้นมีแนวโน้มของค่า SCOD ของน้ำออกจากระบบที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.2



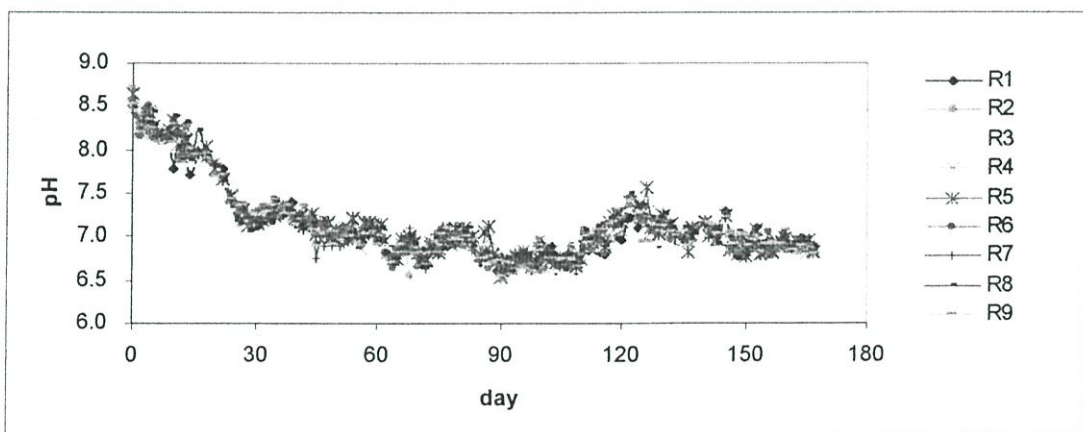
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของ SCOD ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร

ช่วงหนึ่งของการทดลองคือช่วงวันที่ 70 – 110 ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โซน A ได้ทำการปิดระบบการกวนและตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีเพื่อรอให้เกิดการตกตะกอนของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในระบบก่อนทำการดึงน้ำออกจากระบบเพื่อเป็นการทดสอบว่าการดึงน้ำออกโดยไม่ปิดระบบการกวนนั้นมีผลกระทบต่อปริมาณจุลินทรีย์ในระบบมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า SCOD มีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำกว่าน้ำที่ออกจากระบบโดยไม่หยุดระบบการกวน หมายความว่าจุลินทรีย์ในระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อปิดระบบการกวนก่อนดึงน้ำออกทำให้จุลินทรีย์ในระบบหลุดออกมากับน้ำออกน้อยกว่าไม่ปิดระบบการกวน จึงส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบมีจำนวนมากกว่า จึงสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้นนั่นเอง โดยเกิดขึ้นในทุกๆ ถึงปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีค่า SCOD ในน้ำออกมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จึงสรุปได้ว่าการหยุดระบบการกวนก่อนการ

คิงน้ำออกทำให้จุลินทรีย์ในระบบหลุดออกจากระบบน้อยลงแต่ก็ไม่ส่งผลให้แต่ละถังปฏิกรณ์นั้นมีปริมาณจุลินทรีย์แตกต่างกันมากนัก เพราะน้ำที่ออกจากระบบของทุกถังปฏิกรณ์ยังคงมีค่า SCOD ที่ใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นจึงได้กลับมาทำการทดลองเหมือนเดิมอีกครั้ง ซึ่งก็พบว่าค่า SCOD ในน้ำออกยังคงมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-1,500 mg/L ไปตลอดจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งในช่วงสุดท้ายของการทดลองค่า SCOD ของน้ำตัวอย่างที่ออกจากทุกๆ ถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันมาก จากค่า SCOD ของน้ำออกที่มีค่าดังนี้แสดงให้เห็นว่าทุกระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในช่วงสุดท้ายได้สูงสุดถึง 98% แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละระบบจะเหมือนกันด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ค่า SCOD นี้เพื่อแยกความแตกต่างของแต่ละถังปฏิกรณ์ได้ เพื่อประเมินว่าการที่ SCOD ในน้ำออกมีค่าต่ำเกิดจากระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี จึงต้องมีการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น หากพบว่าก๊าซมีเทนเกิดขึ้นแตกต่างกันก็แสดงว่า ระบบนั้นสามารถเกิดการย่อยสลายไปถึงขั้นสุดท้ายคือการสร้างก๊าซมีเทนที่แตกต่างกัน เพราะก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการดังกล่าว

4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความเป็นด่างทั้งหมด

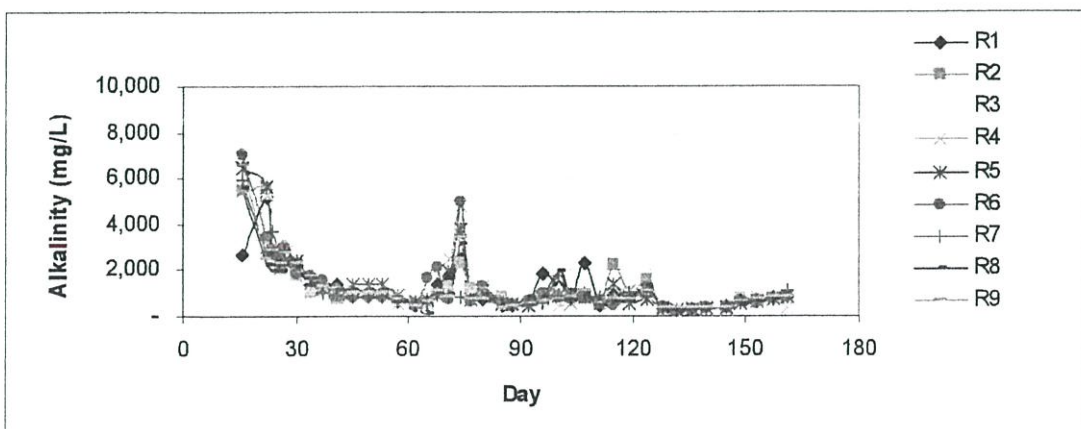
ค่า pH นั้นมีความสำคัญที่ต้องทำการตรวจติดตามตลอดการทดลอง เนื่องจากในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศประกอบด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ทำหน้าที่ในกระบวนการหมัก และกลุ่มสร้างมีเทน โดยเฉพาะกลุ่มสร้างมีเทนที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH แคบๆ เท่านั้น ถ้าระบบมีการควบคุมไม่ดีหรือมีประสิทธิภาพในการรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างได้ไม่ดีแล้ว การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนก็จะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร

จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการทดลองนั้นค่า pH ของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าสูงประมาณ 8.5 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากการเริ่มต้นระบบมีการเติมสารเสริมความเป็นด่าง คือ โซเดียมคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมและป้องกันการลดลงอย่างรวดเร็วของ pH เมื่อเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสและสร้างกรดอินทรีย์ ซึ่งตลอดการทดลองเติมเพียงครั้งเดียวเท่านั้น จากการทดลองพบว่าในช่วงหนึ่งของการทดลองคือวันที่ 90 ถึง 110 จะเห็นว่าค่า pH มีแนวโน้มลดลงมากจนเข้าใกล้ 6.5 ซึ่งโดยทั่วไปถ้าค่า pH ลดลงถึงระดับนี้ก็จะส่งผลถึงประสิทธิภาพของระบบให้ต่ำลงจนอาจถึงขั้นเกิดการล้มเหลวได้ แต่ต่อมาระบบก็สามารถรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างไม่ให้ลดลงอีกได้ ทำให้ค่า pH เริ่มสูงขึ้นและสามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติ หลังจากนั้นค่า pH ก็เริ่มคงที่โดยเฉลี่ยที่ 6.6-7.4 โดยทุกถังปฏิกรณ์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่สภาวะคงตัวหลังเติมแร่ธาตุอาหารตามสูตรที่กำหนดพบว่าค่า pH ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดิม ทั้งนี้แนวโน้มของค่า pH นั้นสอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 ค่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ส่วนค่าสภาพด่างทั้งหมด (Total alkalinity) นั้น เป็นข้อมูลที่บอกให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) เหลืออยู่เท่าใดในระบบไร้อากาศ ถ้ากำลังบัฟเฟอร์มีค่าต่ำปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ pH ลดลงได้มากและเร็ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีสภาพด่างสูงพอระบบจะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ pH มากนัก ดังนั้นระดับสภาพด่างจึงเป็นอีกพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสมดุลของระบบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าตลอดการทดลองระดับสภาพด่าง มีค่าอยู่ในช่วง 1,000 – 2,000 mg/L ในรูปคาร์บอเนต ดังแสดงในภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศนี้มีประสิทธิภาพการรักษาสภาพเป็นกลางได้ดี ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบ ทั้งนี้ pH ที่เหมาะสมสำหรับเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.6 - 7.8 (มันสิน, 2542) ส่วนค่าความเป็นด่างทั้งหมดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 1,000-5,000 mg/L ในรูปคาร์บอเนต (เกรียงศักดิ์, 2539)



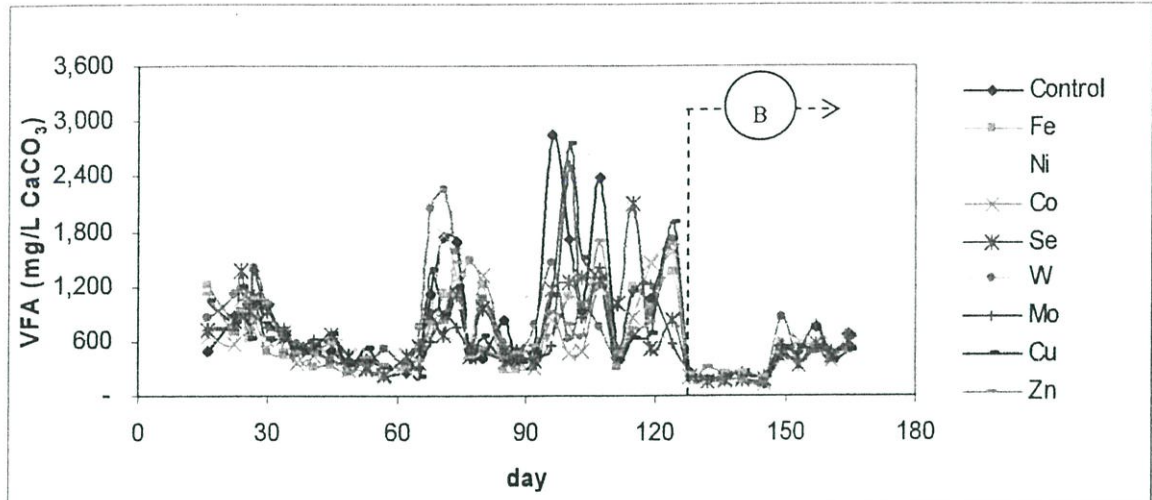
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของค่า Alkalinity ในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร

4.5 การกำจัดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid ; VFA)

ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย อาจถือเป็นสัญญาณที่แสดงว่ากระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศทำงานได้ดี (มันสิน, 2542) ซึ่งโดยปกติจะมีค่าความเข้มข้นประมาณ 200 – 400 mg/L อย่างไรก็ตาม ปริมาณของกรดไม่สำคัญเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรด ระบบอาจทำงานได้ดีแม้จะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงมากก็ตาม แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ก็เป็นสัญญาณให้เห็นถึงการเสียสมดุลที่เกิดขึ้น การเพิ่มอย่างรวดเร็วและทันทีของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์แสดงว่า มีบางอย่างเกิดขึ้นทำให้เกิดการชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนหรือทำให้การเติบโตของจุลินทรีย์สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น

จากการทดลอง VFA ที่เข้าสู่ทุกๆ ระบบ มีค่าประมาณ 725 mg/L COD ในช่วง 60 วันแรกค่า VFA ของน้ำที่ออกจากทุกๆ ถึงปฏิกรณ์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับค่า SCOD จากนั้นค่าเริ่มมีความแปรปรวนมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดจากความผิดพลาดของการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากน้ำตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นไม่ผ่านการกรองก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีโคเดรท แต่เมื่อพิจารณาช่วงสภาวะคงตัว (ตั้งแต่วันที่ 120 ของการทดลองเป็นต้นไป) และเริ่มเปลี่ยนสูตรอาหารได้ทำการปรับวิธีการวิเคราะห์มาเป็นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนทำการโคเดรท ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 โซน B ผลการทดลองพบว่าค่า VFA ของทุกถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 300-500 mg/L COD ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแร่ธาตุเสริมรองทุกชนิดที่เติมให้กับระบบนั้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนทำงานได้ดีขึ้น ในระบบจึงมีค่า VFA ลดลง

หนึ่งฤทัย (2546) รายงานว่าการเพิ่มธาตุอาหารรองสูตรคัดแปลงของ Speece (1996) คือการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารรองทุกชนิดได้แก่ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ KI $(\text{NaPO}_3)_6$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ NH_4VO_3 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ZnCl_2 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ H_3BO_3 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ Na_2SeO_3 ให้มากขึ้นเป็น 10 เท่า นั้นทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศของหมักไก่และไส้ไก่จากโรงงานชำแหละไก่มีการสะสมของของ VFA น้อยกว่าถังปฏิกรณ์ที่เติมธาตุอาหารสูตรของ Speece (1996) โดยมีปริมาณ VFA เฉลี่ย 300 – 367 mg/L COD กับ 1,792 - 3,034 mg/L COD ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าธาตุอาหารรองที่เพิ่มลงไปมีผลทำให้การสร้างและการใช้ VFA เกิดขึ้นอย่างสมดุลกัน



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสมูลสุกร

เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายนี้เป็นตัวชี้เสถียรภาพของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยปกติถ้าปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนจะสมดุลกับการสร้างกรดอินทรีย์ แต่ถ้าไม่สมดุลกันอาจเกิดภาวะการสร้างกรดอินทรีย์มากเกินไปทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ ส่งผลให้ค่า pH ของระบบต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทนในระบบได้ Palmisano และ Barlaz (1971) รายงานว่าในสถานะที่ระบบรับภาระสารอินทรีย์สูง เมื่อความเข้มข้นของ VFA สูงเกินไปจะมีผลในการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์สร้างมีเทน (Methanogens) โดยยับยั้งการกำจัดไฮโดรเจนและ VFA ที่ผลิตขึ้นได้ไม่ทันกับ VFA ที่จุลินทรีย์สร้างกรด (Acidogens) ผลิตออกมา ทำให้เกิดการสะสมทำให้ค่า pH ของระบบลดลง และยังส่งผลต่อเนื่องในการยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) อีกด้วย นอกจากนี้ Banks และ Wang (1999) รายงานว่า การสะสมของ VFA ในระบบนั้น อาจจะส่งเสริมให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทของแข็งลดลง

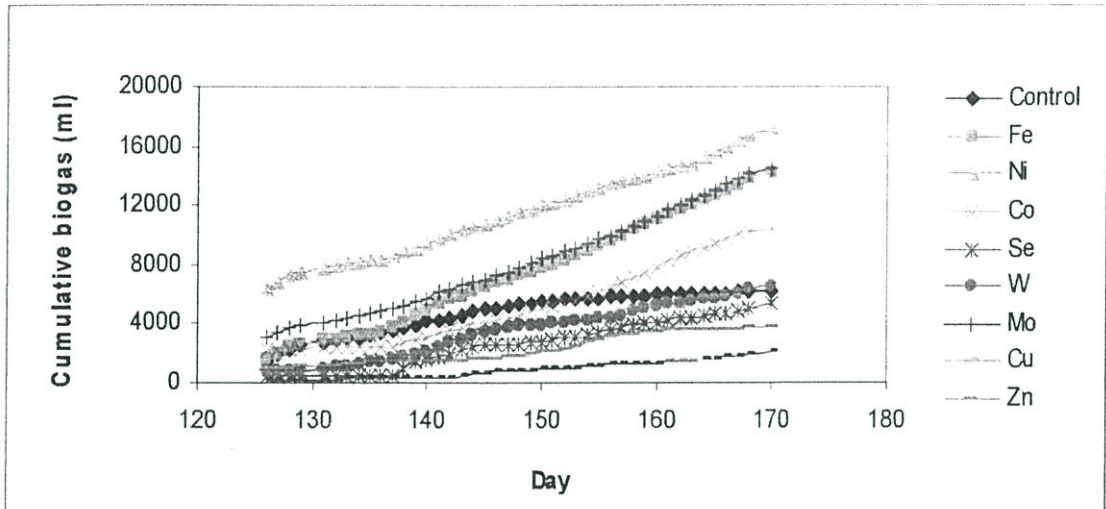
จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบของทุกถังปฏิกรณ์นั้นสามารถกำจัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดี ทำให้ไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และมีการสร้างและใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายอย่างสมดุลกัน นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างน้ำออกจากระบบมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่า ไม่มีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเลย ซึ่งเป็นไปได้ว่าเนื่องจากในน้ำออกมีกรดอินทรีย์ในปริมาณน้อยมากเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Gas chromatography จึงไม่สามารถตรวจพบได้ แสดงว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกสร้างขึ้นได้ถูกนำไปใช้ได้เกือบทั้งหมด จึงทำให้ในน้ำออกของทุกถังปฏิกรณ์มีปริมาณน้อยมาก

4.6 การเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

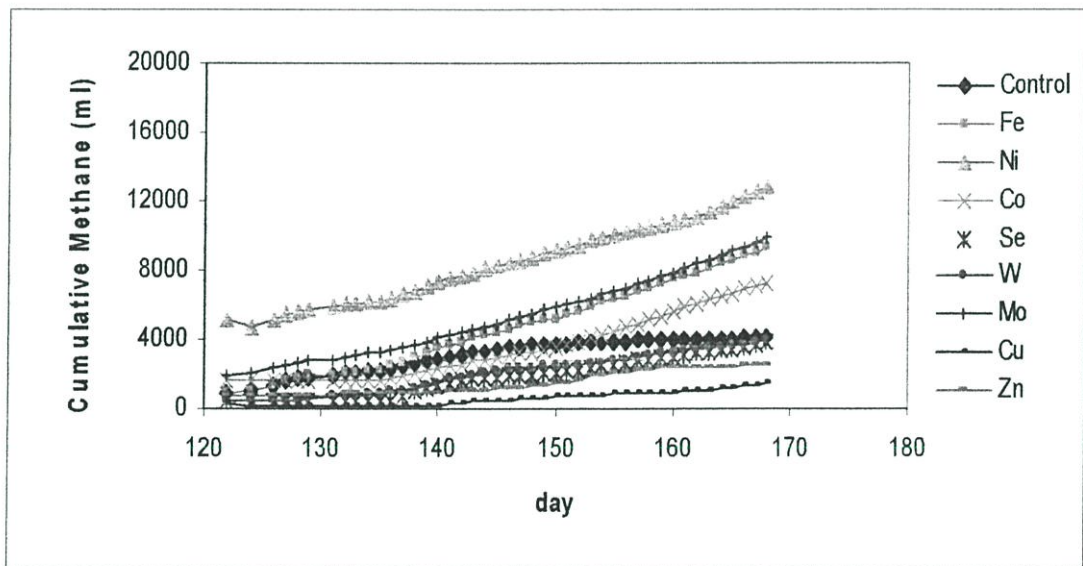
อัตราการผลิตมีเทนเป็นเครื่องวัดโดยตรงของ Metabolic activity ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนและถือว่าเป็นเครื่องชี้วัดประสิทธิภาพของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีความสำคัญมาก การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตมีเทนมีความสำคัญกว่าปริมาณการผลิตมีเทน เพราะเป็นสัญญาณที่บ่งชี้ว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นกับจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน ดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าอัตราการสลายอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบนั้นมี TCOD เท่ากับ 38,000 mg/L แต่มี SCOD ที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณน้อยเพียงประมาณ 3,456 mg/L เท่านั้น เนื่องจากวัตถุดิบมีของแข็งเป็นส่วนประกอบมากจึงละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจึงเป็นตัวชี้วัดปริมาณของ SCOD ที่เพิ่มจากกระบวนการไฮโดรไลซิสเพราะก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ทั้งนี้ในช่วง 120 วันแรกของการทดลอง พบว่าทุกถังปฏิกรณ์มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเนื่องมาจากในช่วงแรกนี้เชื้อจุลินทรีย์ในระบบยังไม่สามารถปรับตัวให้คุ้นเคยกับสารอินทรีย์ที่ให้กับระบบทำให้จุลินทรีย์ทำกิจกรรมต่างๆ ได้ไม่เต็มที่ส่งผลให้ปฏิกรณ์การย่อยสลายตลอดจนการสร้างก๊าซมีเทนเกิดได้ไม่ต่อเนื่องทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเกิดไม่ต่อเนื่องเช่นกัน อีกทั้งในช่วงแรกนั้นมีการเติมธาตุอาหารรองสูตรของ Speece (1996) เหมือนกันทั้งหมด ทำให้จุลินทรีย์ได้รับธาตุอาหารในปริมาณที่เท่ากันทำให้มีกิจกรรมต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ไม่แตกต่างกันมาก

เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว เมื่อเติมธาตุอาหารรองที่แตกต่างกันให้กับแต่ละระบบพบว่าเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากธาตุอาหารรองที่เติมให้ระบบนั้นมีผลต่อการกระตุ้นให้จุลินทรีย์เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายและสร้างกรดอินทรีย์ระเหยตลอดจนจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้แตกต่างกัน สุดท้ายจึงทำให้มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย โดยพบว่าถังปฏิกรณ์ที่เติมธาตุอาหารเหล็ก ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิล ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โมลิบดีนัม ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และโคบอลต์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่เพิ่มปริมาณเป็น 10 เท่าของสูตร Speece (1996) มีก๊าซชีวภาพเกิดในปริมาณมากและเกิดอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง ส่วนถังปฏิกรณ์ที่เติมแร่ธาตุซีลีเนียม (Na_2SeO_3) ทังสเตน ($\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2) เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณที่ต่ำกว่าและเกิดไม่สม่ำเสมอ โดยแนวโน้มของก๊าซชีวภาพที่สะสมในช่วงสภาวะคงตัวจนสิ้นสุดการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6 เมื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาร้อยละของก๊าซมีเทนพบว่าในก๊าซชีวภาพนั้นมีก๊าซมีเทนอยู่โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 60-70 ซึ่งแต่ละถังปฏิกรณ์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4.7

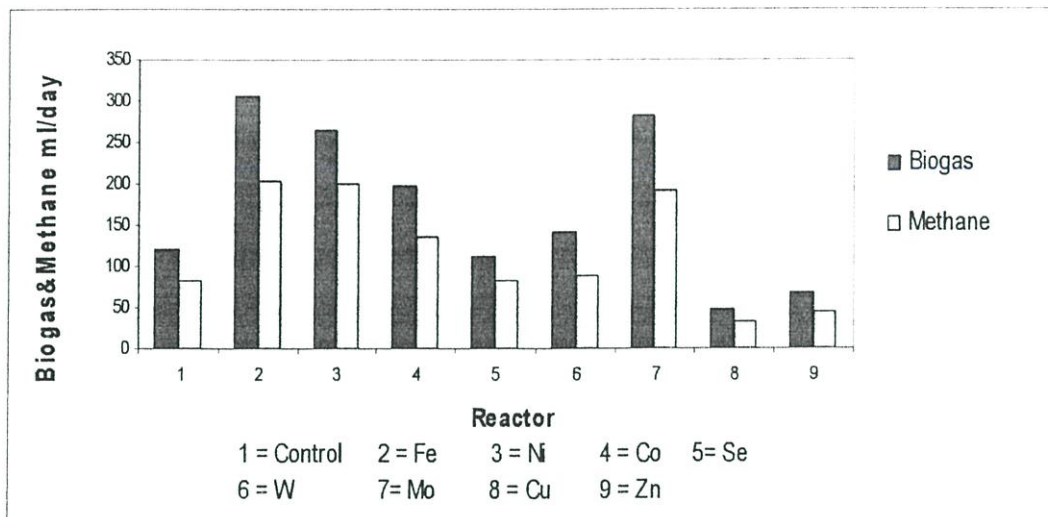


ภาพที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมระหว่างกระบวนการย่อยมูลสุกรที่สภาวะคงตัว



ภาพที่ 4.7 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมระหว่างกระบวนการย่อยมูลสุกรที่สภาวะคงตัว

โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่เติมธาตุอาหารเหล็ก ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิล ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โมลิบดินัม ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และ โคบอลต์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่เพิ่มปริมาณเป็น 10 เท่าของสูตร Speece (1996) มีปริมาณเฉลี่ย 307 265 281 และ 196 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่เติมธาตุซิลิเนียม (Na_2SeO_3) ทังสแตน ($\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2) เกิดเฉลี่ยประมาณ 113 140 46 และ 67 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.8 ทั้งนี้พบว่า การเติมธาตุทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2) นั้น มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยกว่าชุดการทดลองควบคุม



ภาพที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัวจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าธาตุอาหารรองที่เติมให้กับระบบนั้นมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ทุกกลุ่มในระบบที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens) ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มของแร่ธาตุเสริมที่มีผลต่อระบบได้ 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่สามารถกระตุ้นการทำงานของ จุลินทรีย์ในระบบได้มากกว่าธาตุอาหารเสริมรองสูตรของ Speece (1996) ซึ่งประกอบด้วยธาตุอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิล ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โมลิบดีนัม ($\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และ โคบอลต์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และกลุ่มที่ 2 คือธาตุอาหารที่สามารถกระตุ้นการทำงานของระบบได้น้อยประกอบด้วยธาตุ 4 ชนิด ได้แก่ โซลิเนียม (Na_2SeO_3) ทังสแตน ($\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทองแดง ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และสังกะสี (ZnCl_2)

กลุ่มที่ 1 นั้นสามารถกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบได้ดี เมื่อพิจารณาธาตุอาหารแต่ละชนิดพบว่าธาตุเหล็กนั้นเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างหลักของเซลล์จุลินทรีย์มากกว่าธาตุชนิดอื่นๆ โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทำการศึกษาส่วนประกอบโลหะหนักต่างๆ ของสลัดจ์ (Sludge) ที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการไร้อากาศ พบว่าธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบที่มากที่สุดอย่างเด่นชัด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากข้อมูลดังกล่าวจึงยืนยันได้ว่าธาตุเหล็กที่เติมให้กับระบบนั้นถูกจุลินทรีย์ในระบบนำไปใช้เป็นอาหารและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างเซลล์เพื่อการเจริญเติบโต และ Lin และ Lay (2005) รายงานว่าธาตุเหล็กเป็นธาตุที่สำคัญในการส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 30% อัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 66% และกำลังการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น 66% (Lin และ Lay, 2005)

นอกจากนี้ Whitman และคณะ (1982) รายงานว่าธาตุเหล็กมีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ทำให้เกิดเมตาบอลิซึมและเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนและซัลเฟต ดังนั้น

ธาตุเหล็กที่เติมให้กับระบบจึงมีผลในการส่งเสริมให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น (Whitman และคณะ, 1982)

Gavel และคณะ (1998) ศึกษาพบว่าธาตุ निकเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญของ Methyl Coenzyme M F_{420} และ F_{430} โดยโคเอนไซม์และอนุพันธ์ของโคเอนไซม์ชนิดนี้พบในเซลล์ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนทุกเซลล์ ในระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 1.2 มิลลิกรัมของโคเอนไซม์ต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของเซลล์ นอกจากนี้ยังพบว่า निकเกิลเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ ไฮโดรจิเนส (Hydrogenase) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ดีไฮโดรจิเนส (CO dehydrogenase) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน โดยทำหน้าที่ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์รีดักชัน ซึ่งทำงานร่วมกับโคเอนไซม์อีก 3 ชนิดคือ เมทาโนฟูแรน เตตระไฮดรอกซีเมทาโนพเทอริน และโคเอนไซม์ M (Gavel และคณะ, 1998 ; Leigh และคณะ, 1985)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแร่ธาตุของสลัดจ์ที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

| แร่ธาตุ | ปริมาณเฉลี่ย (มก./กก.) |
|-------------|------------------------|
| Arsenic | 10 |
| Cadmium | 10 |
| Chromium | 500 |
| Cobalt | 30 |
| Copper | 800 |
| Iron | 17,000 |
| Lead | 500 |
| Manganese | 260 |
| Molybdenum | 4 |
| Nickel | 80 |
| Selenium | 5 |
| Tin | 14 |
| Zinc | 1,700 |

ที่มา : คัดแปลงจาก Whitman และคณะ (1982)

ในส่วนของโมลิบดีนัมและโคบอลต์มักอยู่ในรูปของส่วนประกอบของเอนไซม์เป็นสิ่งสำคัญ เช่น โคบอลต์อยู่ในเอนไซม์ที่จำเพาะเจาะจงและโคเอนไซม์ต่างๆไป เช่น Carbon monoxide dehydrogenase จะใช้โคบอลต์ในกิจกรรมการสร้างอะซิเตท นอกจากนี้ Speece (1996) ศึกษาพบว่าโคบอลต์มีผลในการส่งเสริมการทำงานของเมทาโนเจนเกี่ยวกับการนำอะซิเตทไปใช้และยังมีส่วนในการสร้าง อะซิเตทของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างสารอะซิเตทด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้โคบอลต์ป้องกันการสร้าง อะซิเตทจากเมทาโนลได้อีกด้วย (Speece, 1996) ส่วนโมลิบดีนัมนั้นช่วยส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Acetoclastic methanogen และยับยั้งการผลิตซัลเฟตและเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่างๆไป เช่น Formate dehydrogenase (FDH³) แต่โมลิบดีนัมอาจจะไปยับยั้ง Sulfate reducing bacteria ทำให้การเกิดซัลไฟด์เป็นไปได้ยาก (Ronard และคณะ, 1999 ; Percheron และคณะ, 1997)

Percheron และคณะ (1997) ศึกษาพบว่า การเติมแร่ธาตุเหล็ก นิกเกิลและโบบอลต์ให้กับระบบบำบัดแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร พบว่าแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตและการสร้างเม็ดตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบ รวมทั้งการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอไลต์ได้มากกว่า 95% นอกจากนี้ยังพบว่าแร่ธาตุเหล็กและโคบอลต์ ยังช่วยส่งเสริมให้การกำจัดอะซิเตทของระบบบำบัดแบบไร้อากาศของน้ำโมลาสส์ได้ดีและช่วยลดปริมาณซัลเฟตในระบบอีกด้วย มีงานวิจัยอีกมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมแร่ธาตุเหล็ก โคบอลต์และนิกเกิล ที่มีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในระบบบำบัดแบบเป็นกะและแบบต่อเนื่องของน้ำเสียประเภทต่างๆ พบว่าล้วนแต่ให้ผลดีนวกทั้งสิ้น (Percheron และคณะ, 1997)

นอกจากนี้ Patidar และ Tare (2006) ได้ศึกษาพบว่าแร่ธาตุนิกเกิลและสังกะสี เมื่อใช้แร่ธาตุทั้งสองร่วมกันจะมีผลต่อจุลินทรีย์ในการลดปริมาณซัลไฟด์ได้น้อยกว่าการใช้แร่ธาตุนิกเกิลหรือสังกะสีเพียงชนิดเดียว ทั้งนี้เกิดจากนิกเกิลมีผลต่อการนำแร่สังกะสีไปใช้ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนกลุ่มลดปริมาณซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria) นั่นเอง (Patidar และ Tare, 2006)

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยแร่ธาตุ ซิลิเนียม ทังสแตน ทองแดงและสังกะสีนั้นพบว่าที่สภาวะคงตัว มีการผลิตก๊าซมีเทนในปริมาณเฉลี่ยต่ำกว่า 100 มิลลิลิตรต่อวัน ซึ่งน้อยกว่าปริมาณก๊าซมีเทนของชุดการทดลองควบคุม คือชุดทดลองที่เติมธาตุอาหารรองครบทุกชนิดในปริมาณที่เท่ากัน จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากเหตุผลต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ แร่ธาตุบางชนิดไม่มีผลในการส่งเสริมการเจริญเติบโตหรือการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่ง Kayhanian และคณะ (1995) ศึกษาพบว่า แม้แร่ธาตุทั้งสแตนจะเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH³ และช่วยในการเมทาบอลิซึม CO₂ และ H₂ ในลักษณะเดียวกับนิกเกิล และทองแดงเป็นส่วนประกอบของ Super dismutase (SODH) และ Hydrogenase แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลการเติม

ทั้งสเดนอย่างแน่ชัดอย่างไรและพบว่าการเติมทองแดงไม่ทำให้เกิดผลใดๆอย่างมีนัยสำคัญ (Kayhanian และคณะ, 1995)

หรืออีกสาเหตุหนึ่งคือแร่ธาตุเหล่านี้จะมีเพียงพอแล้วในระบบ จึงทำให้แร่ธาตุที่เพิ่มให้กับระบบไม่ถูกนำไปใช้จึงไม่มีผลในการส่งเสริมการเจริญเติบโตหรือการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มใดในระบบได้ หรืออาจทำให้มีการสะสมของแร่ธาตุนั้นมากเกินไปจนทำให้เกิดสภาวะเป็นพิษเกิดขึ้นในระบบได้ โดยสารพิษที่มีในระบบไม่ได้หมายถึงสารอันตรายโดยตรงเท่านั้น สารบางตัวที่เป็นสารอาหารที่จำเป็นถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะกลายเป็นสารพิษได้ ซึ่งรวมถึงอ็อกซิเจนและโลหะหนักต่างๆ หรือแร่ธาตุบางชนิดเมื่อรวมกันแล้วอาจมีผลต่อต้านกันมากกว่าส่งเสริม จึงทำให้ส่งผลต่อจุลินทรีย์ในระบบดังกล่าว

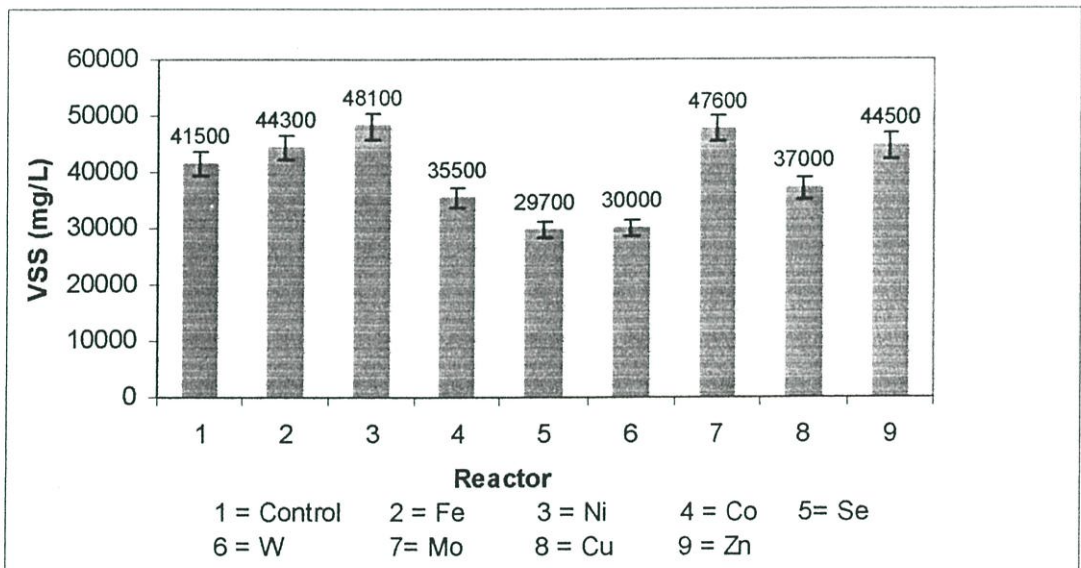
Karri และคณะ (2006) ศึกษาผลของทองแดง (Cu) ที่มีต่อปฏิกิริยาการใช้อะซิเตต (Acetoclastic) และการสร้างไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic) ของจุลินทรีย์สร้างมีเทนและตัวลดซัลเฟตของตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศ พบว่าคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ที่ความเข้มข้น 200 mg/L สามารถยับยั้งการสร้างไฮโดรเจนได้ถึง 27% และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนส่งผลให้ จุลินทรีย์สร้างมีเทนและปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็ว โดยคอปเปอร์ไอออนความเข้มข้น 63.5 mg/L สามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์สร้างมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งระดับของปฏิกิริยา Hydrogenotrophic Sulfate Reducing ลดลงมากกว่า 99% ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนที่ทำหน้าที่กำจัดซัลเฟตจะสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนเริ่มต้นนั่นเอง

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแร่ธาตุเหล็ก นิกเกิล โมลิบดีนัมและโคบอลต์ ช่วยส่งเสริมให้อัตราการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัสดุคิบที่มีของแข็งเป็นส่วนประกอบมาก ทำให้ได้ก๊าซมีเทนซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้นได้มาก ส่วนแร่ธาตุ ซิลิเนียม ทั้งสเดน ทองแดงและสังกะสี ล้วนแต่เป็นประกอบของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ไร้อากาศ แต่ทั้งสเดนและทองแดงนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่ทราบผลที่ชัดเจนว่ามีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ไร้อากาศ (Kayhanian และคณะ, 1995)

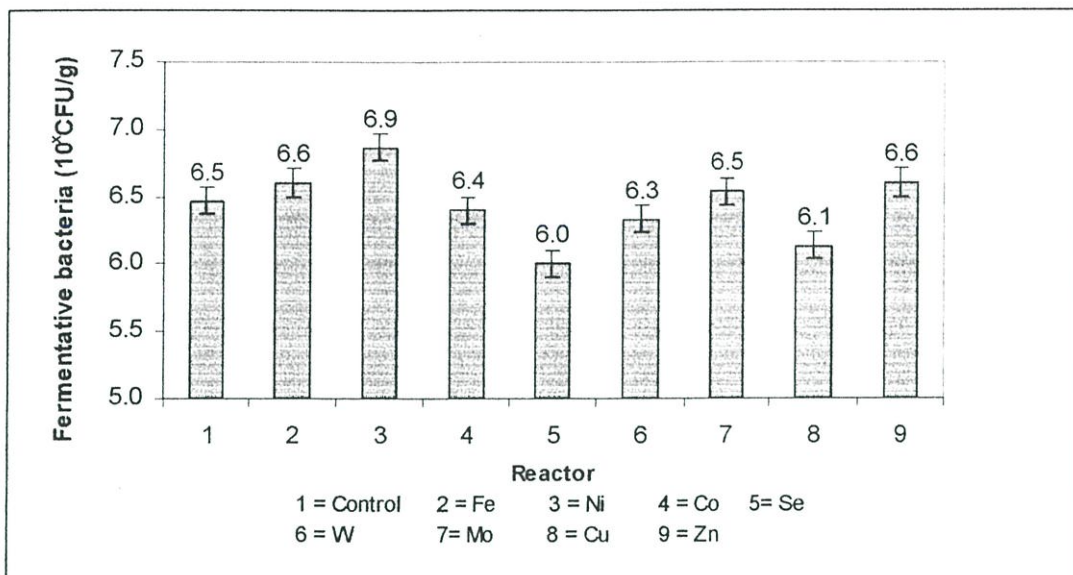
4.7 ปริมาณและคุณภาพของจุลินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การศึกษาปริมาณของจุลินทรีย์โดยวัดจากค่าของแข็งระเหยง่าย (VSS) และการนับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) พบว่าทุกถังปฏิกรณ์นั้นมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 โดยถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณจุลินทรีย์ (Fermentative bacteria) เฉลี่ยสูงที่สุดคือถังปฏิกรณ์ที่ 3 ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 2 กับ 9 นั้นมีปริมาณเฉลี่ยของจุลินทรีย์เท่ากัน ทั้งนี้นอกจากการเจริญที่แตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกรณ์แล้วนี้

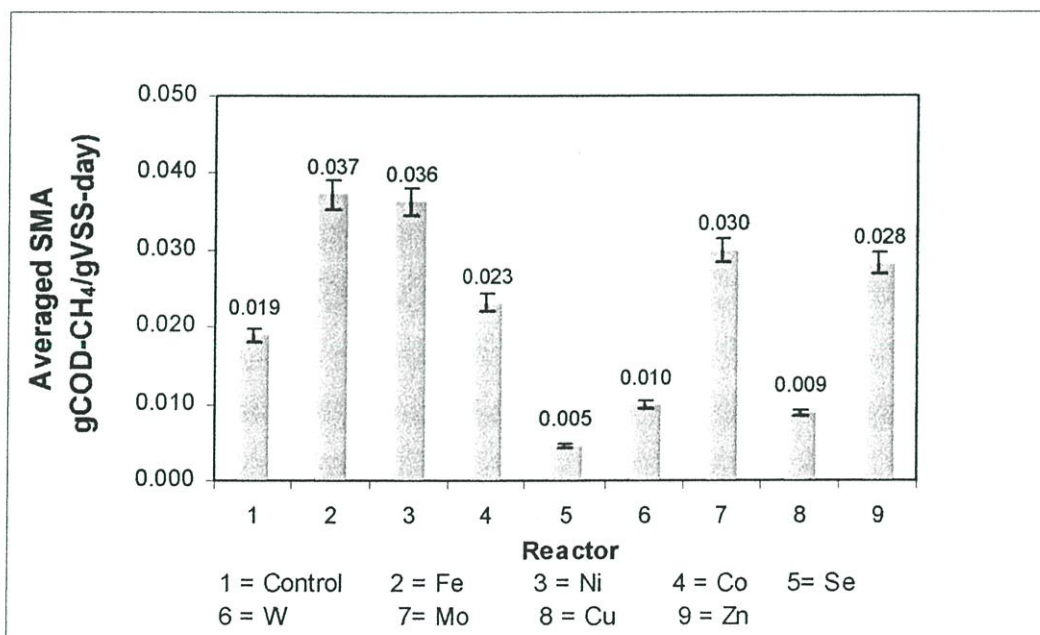
อาจเนื่องมาจากจุลินทรีย์มีการหลุดออกมาพร้อมกับน้ำที่ดึงออกจากระบบ เพราะไม่มีการหยุดระบบการกวนทำให้จุลินทรีย์หลุดออกมามากน้อยต่างกันบ้าง ในส่วนของคุณภาพจุลินทรีย์นั้นวัดโดยการคำนวณค่าความสามารถจำเพาะของการสร้างมีเทนของแบคทีเรีย (Specific Methanogenic Activity; SMA) พบว่าจุลินทรีย์ของแต่ละถังปฏิกรณ์นั้นสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 2 3 7 และ 9 ซึ่งเติมแร่ธาตุแร่ธาตุเหล็ก นิกเกิล โมลิบดีนัมและสังกะสี ตามลำดับนั้นจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ใกล้เคียงกัน ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 6 ซึ่งเติมแร่ธาตุ ซิลิเนียมนั้นจุลินทรีย์สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยที่สุด ประมาณ $0.0046 \text{ gCOD-CH}_4/\text{gVSS-day}$ แม้ว่าจะมีค่า VSS ใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์อื่นๆ ดังนั้นคุณภาพของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจึงเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบได้ โดยมีคุณภาพของจุลินทรีย์เป็นผลมาจากแร่ธาตุเสริมที่เติมให้ระบบนั่นเอง



ภาพที่ 4.9 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VSS) ในถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัวจนถึงสิ้นสุดการทดลอง



ภาพที่ 4.10 ปริมาณ Fermentative bacteria ในทุกๆถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัวจนสิ้นสุดการทดลอง



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทน (SMA) ของแต่ละถังปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสภาวะคงตัวจนสิ้นสุดการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1. ประสิทธิภาพของระบบ

ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศของทุกถังปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดี โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นดัชนีชี้บ่งประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ค่า pH ค่าความเป็นด่างทั้งหมด (Alkalinity) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและค่าซีโอดีละลายของตัวอย่างน้ำออกล้วนอยู่ในเกณฑ์ปกติ

กล่าวคือในช่วงแรกของการเริ่มต้นระบบค่า pH และค่าความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าค่อนข้างสูงโดยค่า pH เท่ากับ 8.5 และค่าความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าประมาณ 7,000 mg/L ในรูปคาร์บอเนต นั้นเป็นเพราะว่าในช่วงเริ่มต้นระบบได้เติมสารโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงในระบบเพื่อป้องกันไม่ให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว จนอาจส่งผลต่อจุลินทรีย์ในระบบได้ เมื่อเกิดกระบวนการหมักค่า pH และค่าความเป็นด่างทั้งหมดจึงเริ่มลดลงและเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงวันที่ 30 – 90 ของการทดลอง โดย pH มีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.0 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างกรด เมื่อการทดลองดำเนินไปจนถึงวันที่ 120 ค่า pH เริ่มสูงขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.8 – 7.5 ใกล้เคียงจนสิ้นสุดการทดลองในขณะที่ค่าความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าประมาณ 1,000 – 2,000 mg/L ในรูปคาร์บอเนต ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทน จะเห็นว่าค่า pH และค่าความเป็นด่างทั้งหมดของทุกชุดการทดลองอยู่ในระดับปกติและความสมดุลกันทำให้จุลินทรีย์ทุกกลุ่มในระบบสามารถทำงานได้ดี

ในขณะเดียวกันก็ไม่พบการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ในระบบโดยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำออกมีค่าอยู่ในช่วง 300-500 mg/L COD ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่ในเกณฑ์ที่ปกติ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกรดอินทรีย์ที่ถูกสร้างโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดมีความสมดุลกับปริมาณกรดอินทรีย์ที่ถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ทำให้มีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายหลงเหลืออยู่ในน้ำออกในปริมาณต่ำและไม่ส่งผลต่อสภาวะสมดุลของ pH และค่าความเป็นด่างทั้งหมดในระบบ

ส่วนซีโอดีละลายของตัวอย่างน้ำออกก็พบว่ามีค่าน้อยเช่นนั้น สืบเนื่องมาจากสภาวะต่างๆในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพมีความสมดุลกันทำให้จุลินทรีย์ทุกกลุ่มทำงานร่วมกันได้ดีจึงส่งผลให้เกิดกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ในระบบได้ดีไปด้วย ทำให้พบซีโอดีละลายในน้ำน้อยออกในปริมาณต่ำโดยที่สภาวะคงตัวจนสิ้นสุดการทดลองซีโอดีละลายมีค่าประมาณ 1,000-1,500 mg/L และทุกระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีได้สูงสุดถึง 98%

5.1.2. ผลของธาตุอาหารเสริมรองต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสและสร้างกรดอินทรีย์

เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรธาตุอาหารรองของ Speece (1996) ที่มีส่วนประกอบของแร่ธาตุทั้งหมด 13 ชนิด พบว่าธาตุอาหารรองที่สามารถเร่งการผลิตก๊าซมีเทนได้มาก 3 อันดับแรกตามลำดับ คือ แร่ธาตุเหล็ก นิกเกิล และ โมลิบดีนัม โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 203 199 และ 135 มิลลิลิตรตามลำดับ ส่วนโคบอลต์และสังกะสีให้ผลที่ใกล้เคียงกันกับสูตรของ Speece (1996) โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 191 และ 87 ในขณะที่ถึงปฏิกรณ์ที่เติมแร่ธาตุซิลิเนียม ทองแดงและสังกะสีนั้น เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณต่ำและไม่สม่ำเสมอโดยเกิดเฉลี่ยน้อยกว่า 100 มิลลิลิตรต่อวัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. เวลาในการเตรียมตัวอย่างสารอินทรีย์

ในการศึกษาการไฮโดรไลซิสของตัวอย่างวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง การเตรียมตัวอย่างสารอินทรีย์โดยการผสมน้ำทำให้สารอินทรีย์บางส่วนเกิดการละลาย เนื่องจากเวลาที่มีผลในการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของของแข็ง โดยหากใช้เวลาผสมนานอนุภาคของแข็งก็จะมึขนาดเล็กลงกว่าใช้เวลาผสมสั้นซึ่งอาจมีผลต่อการศึกษาระบวนการไฮโดรไลซิสได้ จึงควรมีการกำหนดเวลาการเตรียมตัวอย่างที่แน่นอน

5.2.2. การเลือกและปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้เหมาะกับชนิดของน้ำเสีย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอสบี จาก บริษัท เสริมสุข จำกัด ซึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตสูง เมื่อนำมาใช้ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลสุกรที่มีสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนสูงทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร ดังนั้นในการเลือกใช้จุลินทรีย์นั้นควรเลือกจุลินทรีย์ที่มาจากระบบที่มีสารอินทรีย์ประเภทเดียวกันเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สมบูรณ์มากขึ้น หรือหากนำมาจากระบบที่ต่างกันควรมีการปรับสภาพจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับสารอินทรีย์นั้นๆก่อน โดยนำมาเลี้ยงด้วยสารอินทรีย์นั้นจนกว่าจุลินทรีย์จะพร้อมไปนำไปใช้งาน

5.2.3. การตกค้างของโลหะหนักในน้ำออกจากระบบ (effluent)

จากผลการทดลองพบว่า การเติมธาตุอาหารรองบางชนิดให้กับระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเร่งอัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่ในการนำไปใช้งานจริงควรมีข้อจำกัดในการใช้ คือ มีการควบคุมการนำไปใช้งานและใช้ในปริมาณที่จำกัด พร้อมกับให้ความรู้กับผู้ที่จะนำธาตุอาหารเหล่านี้ไปใช้ เนื่องจากธาตุอาหารบางชนิดเป็นแร่ธาตุประเภทโลหะหนักซึ่งหากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไปอาจมีการปนเปื้อนและสะสมในน้ำที่ออกจากระบบหลังการบำบัด เมื่อน้ำเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและประชาชนที่อาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำนั้นได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “ศักยภาพ” [Online]. 2549 . เข้าถึงได้จาก
: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=251>.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ, กระทรวงอุตสาหกรรมและสมาคม
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย. นนทบุรี. 442 น.
- ชาญศักดิ์ จิตติพันธ์พรณี. 2546. ไฮโดรไลซิสและการเกิดกรดจากเลือดและมูลไก่จากโรงงาน
ชำแหละไก่. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, พิมพ์ครั้งที่ 3, สมาคม
วิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธีระ เกรอด. 2535. วิศวกรรมน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพ, กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- นิสากร โขมิตรรัตน์ (ผู้รวบรวม). 2538. คู่มือการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ.
กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิชย์.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2523. การออกแบบขั้นกระบวนการของระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวเคมี.
เล่ม 1 และ 3 . พิมพ์เอง,
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หนึ่งฤทัย ศรีพิมพ์ยิ้ม. 2546. การไฮโดรไลซิสและการเกิดกรดของหนังไก่และไส้ไก่จากโรงงานชำแหละ
ไก่. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Andrew, W.H., and Messer, J. 1993. **Microbiology Methods**. In : Helrich, K. (ed.) Official Method
of Analysis of Official Analytical Chemists (AOAC) Inc. Arlinton, USA.
- Balch, W.E. et al. 1979. **Methanogens : Re-evaluation of a unique biological group**. Microbiol.
Reviews.3,2.

- Banks, C.J. and Wang, Z. 1999. **Development of two phase anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir waste.** Water Sci Technol. 40:69-76.
- Boopathy R. 1998. **Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactor.** Bioresour Technol. 64;1-6.
- Busswell, A.M. and Mueller, H.F. 1952. **Mechanisms of methane fermentation.** Industrial Engineering Chemistry, 44;50.
- Callaghan, J.K., D.A.J., Wase, K., Thayanithy and Forter, C.F. 1999. **Co-digestion of waste organic solid: Batch studies.** Bioresource Technology. 67; 117-120.
- Cho, J.K., S.C., Park and Chang, H.N. 1999. **Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes.** Bioresource Technology. 52;245-253.
- Gamze Gungor-Demirci and Goksel N. Demirel. 2004. **Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure.** Bioresour Technol. 93;109-117.
- Gallert, C., Bauer, S. and Winter, J. 1998. **Effect of ammonia on the Anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population.** Microbial Biotechnology, 44:495-501.
- Gavel, O.Y., Bursakov, S.A., Calvete, J.J., George, G.N., Moura, J.J.G. and Moura, I. 1998. **ATP sulfurylase from sulfate-reducing bacteria of genus *Desulfovibrio*: A novel metalloprotein containing cobalt and zinc.** Biochemistry. 37:16,225-32.
- Grady, C.P.L.Jr., and Lim, H.C. 1980. **Biological Wastewater Treatment.** Marcel Dekker, New York, 852 p.
- Jensen, S., Gonzalez-Gill, G. and Van Leeuwen, H.P. 2006. **The impact of Co and Ni speciation on methanogenesis in sulfidic Media-biouptake versus metal dissolution.** Enzyme and Microbial Technology. Available online at www.sciencedirect.com. Accessed Date 27 January .
- Jewell, W.J. 1980. **Biological production of methane from organic wastes.** UK. Patent Application, GB059-938A, 30 Sept.

- Karri, S., Sierra-Alvarez, R. and Field, J.A. 2006. **Toxicity of copper to acetoclastic and hydrogenotrophic activities of methanogens and sulfate reducers in anaerobic sludge.** *Chemosphere* 62:121-127.
- Kayhanian, M. and Rich, D. 1995. **Pilot-scale high solid thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements.** *Biomass and Bioenergy*. 8:433-444.
- Lettinga G. 1995. **Anaerobic digestion and wastewater treatment systems.** *Antonie van Leeuwenhoek*. 67:3-28.
- Leigh, J.A., Rinehart, K.L.J.R., and Wolfe, R.S. 1985. **The Methanofulan (carbon dioxide reduction factor), a formerly carrier in methane production from carbon dioxide in *Methanobacterium*.** *Biochem*. 24:955-999.
- Lin, C.Y. and Lay, C.H. 2005. **A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora.** *Hydrogen energy*. 30:285-292.
- Mah, R.A., Smith, M.R. and Baresi, L. 1978. **Studies on an acetate-fermenting strain of *Methanosacina*.** *Appl. Envir. Microbiol*. 35:1174-1184.
- Miron, Y., Zeeman, G., Van-Lier, J.B. and Lettinga, G. 2000. **The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR System.** *Water Research*. 34:1705-1713.
- Palmisano, A.C. and Barlaz, M.A. 1971. **Microbiology of solid waste.** In: Vreeland RH, editor. *Microbiology of extreme and unusual environments*. London :CRC Press. P.72-104.
- Patidar S.K., and Tare, V. 2006. **Effect of nutrients on biomass activity in degradation of sulfate laden organics.** *Probio* 41:489-495.
- Percheron, G., Bernet, N. and Moletta, R. 1997. **Start-up of anaerobic digestion of sulfate waste water.** *Bioresource Tech*. 61:21-7.
- Ronard D.R., Dighe, A.S., Bhirangi, S.S., Panhalkar, V.S. and Yeole, T.Y. 1999. **Evaluation of the use of sodium molybdate to inhibit sulphate reduction during anaerobic digestion of distillery waste.** *Bioresource Tech*. 8:287-291.

- Scherer, P. H., Lipper and Wolff, G. 1983. **The composition of the major elements and trace elements of 10 methanogenic bacteria determined by inductivity coupled plasma emission spectroscopy.** Bio Trace Element Res. 5;149-63.
- Speece, R.E. 1996. **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters.** United State of America :Archae press.
- Sanchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martin, A. and Colmenarejo, M.F. 2005. **Effect of influent substrate concentration and hydraulic retention time on the performance of down-flow anaerobic fixed bed reactors treating piggery wastewater in a tropical climate.** ProBiochem. 40:817-829.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20thed, APHA, AWWA & WEF, 1998.
- Takashima, M. and Speece, R.E. 2003. **Mineral Nutrient Requirements for High-Rate Methane Fermentation of Acetate at Low SRT.** Japan : Vanderbilt University.
- Van Leeuwen, H.P., Gonzalez-Gil, G. and Jansen, S. 2006. **The impact of Co and Ni speciation on methanogenesis in sulfidic Media-biouptake versus metal dissolution.** Enzyme and Microbial Tech. 2006. Available online at www.sciencedirect.com. Accessed date 17 January .
- Whitman, W.B., Ankwanda, E. and Wolfe, R.S. 1982. **Nutrition and carbon metabolism in *Methanosarcina voltae*.** J. Bacteriol. 149:852-63.
- Yansheng Zhang, Zhenya Zhang, Keitarou Suzuki and Takaaki Maekawa. 2003. **Uptake and mass balance of trace methane producing bacteria.** Biomass & Bioenergy. 25;427-433
- Zeeman, G, Palenzuela, A.R., Sander, W., Miron, Y. and Letting, G. 1999. **Anaerobic hydrolysis and acidification of lipids, proteins and carbohydrates under methanogenic and acidogenic condition.** Bioresour Technol. 74;16.

ภาคผนวก ก

การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในช่วงเวลาต่างๆ

ตาราง ก.1 ค่าซีโอดีตามระยะเวลาและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%) ของระบบ

| วัน | TCOD (mg/L) | R1 | % | R2 | % | R3 | % | R4 | % | R5 | % | R6 | % | R7 | % | R8 | % | R9 | % |
|-----|----------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 0 | 2129 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 | 2129 | 0 |
| 2 | 2129 | 1132 | 47% | 1166 | 45% | 1082 | 49% | 963 | 55% | 862 | 60% | 1082 | 49% | 744 | 65% | 1115 | 48% | 1082 | 49% |
| 4 | 2129 | 1132 | 47% | 1031 | 52% | 1099 | 48% | 1217 | 43% | 1335 | 37% | 1082 | 49% | 862 | 60% | 1268 | 40% | 1217 | 43% |
| 6 | 12000 | 1426 | 88% | 1352 | 89% | 1183 | 90% | 1149 | 90% | 777 | 94% | 1589 | 87% | 1115 | 91% | 1758 | 85% | 1555 | 87% |
| 8 | 12000 | 1145 | 90% | 1071 | 91% | 978 | 92% | 923 | 92% | 812 | 93% | 1145 | 90% | 812 | 93% | 1237 | 90% | 1108 | 91% |
| 12 | 13200 | 2658 | 80% | 2400 | 82% | 2474 | 81% | 2437 | 82% | 1772 | 87% | 2695 | 80% | 1957 | 85% | 2806 | 79% | 2326 | 82% |
| 14 | 10557 | 2622 | 75% | 2769 | 74% | 2474 | 77% | 2991 | 72% | 2585 | 76% | 2806 | 73% | 2548 | 76% | 3212 | 70% | 2695 | 74% |
| 16 | 10557 | 2695 | 74% | 2622 | 75% | 2732 | 74% | 2658 | 75% | 2991 | 72% | 2954 | 72% | 2105 | 80% | 4098 | 61% | 2622 | 75% |
| 18 | 10557 | 2511 | 76% | 2289 | 78% | 2474 | 77% | 2511 | 76% | 2142 | 80% | 2658 | 75% | 2954 | 72% | 2658 | 75% | 2363 | 78% |
| 20 | 10557 | 2511 | 76% | 2400 | 77% | 2548 | 76% | 2437 | 77% | 2511 | 76% | 3175 | 70% | 2363 | 78% | 2437 | 77% | 2658 | 75% |
| 22 | 10557 | 3028 | 71% | 3102 | 71% | 3102 | 71% | 3102 | 71% | 2843 | 73% | 3434 | 67% | 2585 | 76% | 3175 | 70% | 2843 | 73% |
| 26 | 10557 | 2658 | 75% | 2437 | 77% | 2548 | 76% | 2437 | 77% | 2843 | 73% | 3065 | 71% | 2215 | 79% | 2437 | 77% | 2326 | 78% |
| 30 | 10010 | 1970 | 80% | 2221 | 78% | 2579 | 74% | 2722 | 73% | 2687 | 73% | 2543 | 75% | 2257 | 77% | 2149 | 79% | 2293 | 77% |
| 34 | 10010 | 2516 | 75% | 2555 | 74% | 2477 | 75% | 2477 | 75% | 2555 | 74% | 2439 | 76% | 2516 | 75% | 2594 | 74% | 2594 | 74% |

ตาราง ก.1 (ต่อ)

| ชั้น | TCOD (mg/L) | R1 | % | R2 | % | R3 | % | R4 | % | R5 | % | R6 | % | R7 | % | R8 | % | R9 | % |
|------|----------------|------|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | | 37 | 10010 | 2477 | 75% | 2400 | 76% | 2361 | 76% | 2206 | 78% | 2245 | 78% | 2206 | 78% | 2245 | 78% | 2748 | 73% |
| 41 | 37788 | 2400 | 94% | 2284 | 94% | 2052 | 94% | 2439 | 94% | 2361 | 94% | 1974 | 94% | 2013 | 95% | 2516 | 93% | 2361 | 94% |
| 45 | 37788 | 1897 | 95% | 1897 | 95% | 1335 | 95% | 2361 | 96% | 2168 | 94% | 1200 | 94% | 968 | 97% | 2361 | 94% | 2245 | 94% |
| 49 | 38877 | 2090 | 95% | 1974 | 95% | 2052 | 95% | 2284 | 94% | 1897 | 95% | 1239 | 95% | 2284 | 94% | 2439 | 94% | 2168 | 94% |
| 53 | 38877 | 1920 | 95% | 1732 | 96% | 1769 | 95% | 1769 | 95% | 1882 | 95% | 1807 | 95% | 2334 | 94% | 2372 | 94% | 1920 | 95% |
| 57 | 38877 | 1280 | 97% | 979 | 97% | 1167 | 97% | 1544 | 96% | 1054 | 97% | 828 | 98% | 1318 | 97% | 1468 | 96% | 1167 | 97% |
| 62 | 38877 | 1030 | 97% | 1566 | 96% | 1030 | 97% | 948 | 98% | 1112 | 97% | 1236 | 97% | 1030 | 97% | 1277 | 97% | 1195 | 97% |
| 65 | 38877 | 1648 | 96% | 1648 | 96% | 1772 | 96% | 1318 | 97% | 1524 | 97% | 1360 | 96% | 1566 | 96% | 1936 | 95% | 1772 | 95% |
| 68 | 38877 | 1813 | 95% | 1648 | 96% | 2431 | 94% | 2390 | 94% | 2472 | 94% | 2431 | 94% | 2266 | 94% | 2225 | 94% | 2802 | 93% |
| 71 | 38877 | 2060 | 95% | 2307 | 94% | 1895 | 95% | 1854 | 95% | 2348 | 95% | 2555 | 93% | 2307 | 94% | 2719 | 93% | 2843 | 93% |
| 74 | 38000 | 2178 | 94% | 1403 | 96% | 1440 | 96% | 1883 | 95% | 2326 | 94% | 1883 | 95% | 1846 | 95% | 1551 | 96% | 2178 | 94% |
| 77 | 38000 | 1329 | 97% | 1662 | 96% | 1514 | 96% | 1735 | 95% | 1864 | 95% | 1588 | 96% | 1772 | 95% | 1883 | 95% | 1735 | 95% |
| 80 | 38000 | 1403 | 96% | 1662 | 96% | 1662 | 96% | 1883 | 95% | 1625 | 96% | 1551 | 96% | 1551 | 96% | 1920 | 95% | 1735 | 95% |
| 85 | 38000 | 1795 | 95% | 1288 | 97% | 1522 | 96% | 1366 | 96% | 1522 | 96% | 1015 | 97% | 1327 | 97% | 1366 | 96% | 1483 | 96% |
| 88 | 38000 | 1171 | 97% | 1405 | 96% | 1522 | 96% | 820 | 98% | 1171 | 97% | 1054 | 97% | 1093 | 97% | 1327 | 97% | 1756 | 95% |
| 92 | 38000 | 2029 | 95% | 1366 | 96% | 1483 | 96% | 1366 | 96% | 1288 | 97% | 1249 | 97% | 1366 | 96% | 1366 | 96% | 1205 | 97% |

ตาราง ก.1 (ต่อ)

| วัน | TCOD (mg/L) | R1 | % | R2 | % | R3 | % | R4 | % | R5 | % | R6 | % | R7 | % | R8 | % | R9 | % |
|-----|----------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 96 | 38000 | 1288 | 97% | 1444 | 96% | 1405 | 96% | 1210 | 96% | 1210 | 97% | 1288 | 97% | 1444 | 96% | 1288 | 97% | 1093 | 97% |
| 100 | 38000 | 1302 | 97% | 1191 | 97% | 1451 | 97% | 1042 | 96% | 1191 | 97% | 1228 | 97% | 1414 | 96% | 1340 | 96% | 744 | 98% |
| 103 | 38000 | 713 | 98% | 675 | 98% | 825 | 98% | 713 | 98% | 788 | 98% | 750 | 98% | 675 | 98% | 788 | 98% | 788 | 98% |
| 118 | 38000 | 624 | 98% | 775 | 98% | 775 | 98% | 661 | 98% | 831 | 98% | 756 | 98% | 1134 | 97% | 756 | 98% | 548 | 99% |
| 124 | 38000 | 636 | 98% | 680 | 98% | 605 | 98% | 510 | 99% | 586 | 98% | 661 | 98% | 680 | 98% | 510 | 99% | 567 | 99% |
| 128 | 38000 | 708 | 98% | 779 | 98% | 779 | 98% | 673 | 98% | 779 | 98% | 743 | 98% | 832 | 98% | 761 | 98% | 761 | 98% |
| 132 | 38000 | 730 | 98% | 730 | 98% | 768 | 98% | 710 | 98% | 710 | 98% | 634 | 98% | 749 | 98% | 787 | 98% | 864 | 98% |
| 136 | 38000 | 998 | 97% | 1018 | 97% | 1075 | 97% | 902 | 98% | 1210 | 97% | 902 | 98% | 1018 | 97% | 960 | 97% | 1133 | 97% |
| 140 | 38000 | 866 | 98% | 866 | 98% | 885 | 98% | 734 | 98% | 753 | 98% | 941 | 98% | 998 | 97% | 1054 | 97% | 922 | 98% |
| 144 | 38000 | 744 | 98% | 627 | 98% | 823 | 98% | 607 | 98% | 744 | 98% | 705 | 98% | 744 | 98% | 744 | 98% | 882 | 98% |
| 149 | 38000 | 1377 | 96% | 1265 | 96% | 1209 | 97% | 1060 | 97% | 1116 | 97% | 1153 | 97% | 1321 | 97% | 1153 | 97% | 1433 | 96% |
| 153 | 38000 | 986 | 97% | 1023 | 97% | 1153 | 97% | 930 | 97% | 986 | 97% | 1079 | 97% | 967 | 97% | 856 | 98% | 1414 | 96% |
| 157 | 38000 | 1429 | 96% | 1376 | 96% | 1341 | 96% | 1182 | 97% | 1306 | 97% | 1447 | 96% | 1518 | 96% | 1447 | 96% | 1306 | 97% |
| 161 | 38000 | 900 | 98% | 935 | 98% | 1165 | 98% | 882 | 98% | 1076 | 97% | 1024 | 97% | 1253 | 97% | 1147 | 97% | 1288 | 97% |
| 165 | 38000 | 1218 | 97% | 1059 | 97% | 1094 | 97% | 992 | 97% | 1129 | 97% | 1002 | 97% | 1094 | 97% | 1147 | 97% | 1133 | 97% |
| 171 | 38000 | 1613 | 96% | 1094 | 96% | 1190 | 97% | 941 | 97% | 1613 | 96% | 1152 | 97% | 1171 | 97% | 1286 | 97% | 1574 | 96% |

ตาราง ก.2 กรดอินทรีย์ระเหย (VFA mg/L)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 16 | 10/7/49 | 500 | 1,225 | 800 | 646 | 733 | 867 | 738 | 1,042 | 1,108 |
| 22 | 16/7/49 | 875 | 779 | 708 | 563 | 817 | 1,125 | 733 | 808 | 667 |
| 24 | 18/7/49 | 958 | 925 | 1,033 | 1,063 | 1,383 | 1,167 | 879 | 1,192 | 929 |
| 26 | 20/7/49 | 808 | 629 | 975 | 742 | 925 | 1,033 | 958 | 625 | 713 |
| 27 | 21/7/49 | 1,042 | 825 | 1,458 | 933 | 1,088 | 1,396 | 1,371 | 1,017 | 1,071 |
| 30 | 24/7/49 | 817 | 483 | 875 | 625 | 938 | 1,000 | 742 | 633 | 1,000 |
| 34 | 28/7/49 | 642 | 442 | 692 | 696 | 658 | 663 | 742 | 638 | 496 |
| 37 | 31/7/49 | 533 | 400 | 388 | 375 | 525 | 558 | 513 | 467 | 471 |
| 41 | 4/8/49 | 491 | 318 | 579 | 433 | 538 | 525 | 629 | 542 | 475 |
| 45 | 8/8/49 | 500 | 338 | 421 | 408 | 671 | 388 | 579 | 675 | 567 |
| 49 | 12/8/49 | 371 | 250 | 379 | 275 | 450 | 371 | 392 | 342 | 250 |
| 53 | 16/8/49 | 399 | 383 | 367 | 296 | 321 | 371 | 404 | 513 | 408 |
| 57 | 20/8/49 | 233 | 217 | 283 | 208 | 233 | 513 | 300 | 304 | 325 |
| 62 | 25/8/49 | 271 | 325 | 379 | 317 | 450 | 350 | 317 | 313 | 308 |
| 65 | 28/8/49 | 413 | 329 | 400 | 354 | 550 | 742 | 317 | 204 | 396 |
| 68 | 31/8/49 | 1,108 | 607 | 613 | 796 | 879 | 2,033 | 592 | 1,375 | 792 |

ตาราง ก.2 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 71 | 3/9/49 | 1,729 | 1,125 | 842 | 1,750 | 679 | 2,250 | 879 | 883 | 800 |
| 74 | 6/9/49 | 1,696 | 1,092 | 1,004 | 1,292 | 1,104 | 1,571 | 754 | 1,200 | 1,454 |
| 77 | 9/9/49 | 517 | 1,475 | 742 | 500 | 446 | 458 | 488 | 400 | 425 |
| 80 | 12/9/49 | 425 | 1,208 | 1,042 | 1,308 | 971 | 1,071 | 500 | 654 | 511 |
| 85 | 17/9/49 | 842 | 283 | 475 | 400 | 483 | 567 | 379 | 350 | 413 |
| 88 | 20/9/49 | 354 | 296 | 475 | 379 | 504 | 442 | 404 | 375 | 454 |
| 92 | 24/9/49 | 471 | 308 | 454 | 313 | 383 | 775 | 425 | 475 | 542 |
| 96 | 28/9/49 | 2,854 | 629 | 617 | 817 | 1,171 | 1,458 | 533 | 1,086 | 900 |
| 100 | 2/10/49 | 1,717 | 1,083 | 1,367 | 471 | 1,238 | 617 | 2,500 | 2,742 | 767 |
| 103 | 5/10/49 | 938 | 992 | 798 | 498 | 1,292 | 983 | 863 | 1,500 | 654 |
| 107 | 9/10/49 | 2,371 | 1,171 | 1,158 | 1,183 | 1,267 | 754 | 1,392 | 1,271 | 1,683 |
| 111 | 13/10/49 | 458 | 317 | 433 | 479 | 1,017 | 400 | 517 | 383 | 454 |
| 115 | 17/10/49 | 1,158 | 1,192 | 954 | 854 | 2,108 | 650 | 1,138 | 633 | 717 |
| 119 | 21/10/49 | 1,050 | 950 | 1,504 | 1,454 | 517 | 908 | 1,213 | 675 | 804 |
| 124 | 26/10/49 | 1,708 | 1,350 | 1,083 | 1,592 | 817 | 1,708 | 558 | 1,883 | 1,646 |
| 128 | 30/10/49 | 267 | 192 | 208 | 200 | 200 | 208 | 250 | 208 | 229 |
| 132 | 3/11/49 | 158 | 158 | 158 | 150 | 167 | 175 | 175 | 175 | 308 |

ตาราง ก.2 ต่อ

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 136 | 7/11/49 | 188 | 192 | 196 | 154 | 171 | 192 | 183 | 217 | 250 |
| 140 | 11/11/49 | 208 | 242 | 213 | 204 | 183 | 192 | 267 | 267 | 250 |
| 145 | 16/11/49 | 138 | 146 | 200 | 125 | 175 | 167 | 233 | 204 | 200 |
| 149 | 20/11/49 | 471 | 579 | 529 | 417 | 454 | 846 | 550 | 508 | 779 |
| 153 | 24/11/49 | 479 | 371 | 538 | 588 | 346 | 350 | 475 | 513 | 488 |
| 157 | 28/11/49 | 754 | 521 | 550 | 521 | 563 | 500 | 783 | 513 | 758 |
| 161 | 2/12/49 | 408 | 375 | 375 | 388 | 446 | 396 | 488 | 396 | 542 |
| 165 | 6/12/49 | 667 | 500 | 633 | 567 | 608 | 675 | 625 | 483 | 550 |

ตาราง ก.3 Alkalinity mg/L CaCO₃

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 16 | 10/7/49 | 2,708 | 5,500 | 8,417 | 5,475 | 6,463 | 7,000 | 5,883 | 5,542 | 6,550 |
| 22 | 16/7/49 | 5,188 | 5,546 | 5,358 | 5,308 | 5,629 | 3,417 | 2,750 | 2,188 | 2,517 |
| 24 | 18/7/49 | 2,829 | 2,854 | 1,096 | 2,729 | 2,842 | 2,913 | 3,717 | 1,917 | 2,867 |
| 26 | 20/7/49 | 2,471 | 2,058 | 2,442 | 2,142 | 2,271 | 2,542 | 2,258 | 1,954 | 2,292 |
| 27 | 21/7/49 | 2,892 | 2,283 | 2,892 | 2,438 | 2,446 | 3,029 | 2,854 | 2,288 | 2,821 |

ตาราง ก.3 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 24/7/49 | 2,417 | 1,792 | 2,513 | 2,204 | 2,375 | 1,817 | 2,400 | 2,146 | 2,346 |
| 34 | 28/7/49 | 1,375 | 1,000 | 1,750 | 1,492 | 1,450 | 1,750 | 1,679 | 1,413 | 1,775 |
| 37 | 31/7/49 | 1,267 | 1,117 | 1,175 | 1,017 | 1,200 | 1,567 | 1,038 | 1,325 | 1,300 |
| 41 | 4/8/49 | 1,358 | 829 | 1,233 | 900 | 992 | 1,171 | 921 | 1,117 | 567 |
| 45 | 8/8/49 | 1,029 | 854 | 958 | 1,083 | 1,358 | 867 | 850 | 1,150 | 1,033 |
| 49 | 12/8/49 | 1,029 | 854 | 958 | 1,083 | 1,358 | 867 | 850 | 1,150 | 1,033 |
| 53 | 16/8/49 | 1,029 | 854 | 958 | 1,083 | 1,358 | 867 | 850 | 1,150 | 1,033 |
| 57 | 20/8/49 | 617 | 646 | 700 | 575 | 938 | 713 | 646 | 767 | 721 |
| 62 | 25/8/49 | 504 | 533 | 583 | 513 | 608 | 476 | 438 | 496 | 421 |
| 65 | 28/8/49 | 504 | 571 | 563 | 517 | 704 | 1,667 | 558 | 125 | 650 |
| 68 | 31/8/49 | 1,375 | 908 | 975 | 954 | 950 | 2,167 | 933 | 983 | 1,129 |
| 71 | 3/9/49 | 1,717 | 1,258 | 607 | 2,517 | 1,917 | 704 | 875 | 917 | 833 |
| 74 | 6/9/49 | 2,525 | 2,317 | 1,838 | 4,792 | 3,771 | 4,988 | 833 | 3,125 | 3,454 |
| 77 | 9/9/49 | 717 | 1,238 | 904 | 767 | 725 | 679 | 742 | 821 | 746 |
| 80 | 12/9/49 | 704 | 1,021 | 1,058 | 1,254 | 1,075 | 1,267 | 808 | 883 | 704 |
| 85 | 17/9/49 | 433 | 858 | 579 | 600 | 521 | 583 | 508 | 450 | 375 |
| 88 | 20/9/49 | 500 | 438 | 538 | 483 | 529 | 454 | 504 | 463 | 458 |

ตาราง ก.3 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 92 | 24/9/49 | 550 | 467 | 575 | 433 | 458 | 638 | 492 | 871 | 521 |
| 96 | 28/9/49 | 1,821 | 675 | 692 | 754 | 804 | 1,004 | 546 | 850 | 675 |
| 100 | 2/10/49 | 1,304 | 1,038 | 1,229 | 500 | 950 | 817 | 1,800 | 1,933 | 700 |
| 103 | 5/10/49 | 750 | 804 | 742 | 543 | 967 | 767 | 775 | 1,071 | 792 |
| 107 | 9/10/49 | 2,275 | 942 | 875 | 950 | 871 | 725 | 1,058 | 967 | 1,154 |
| 111 | 13/10/49 | 442 | 442 | 679 | 588 | 842 | 492 | 442 | 571 | 529 |
| 115 | 17/10/49 | 892 | 2,208 | 792 | 750 | 1,400 | 453 | 873 | 633 | 725 |
| 119 | 21/10/49 | 917 | 921 | 1,304 | 1,088 | 558 | 725 | 975 | 692 | 758 |
| 124 | 26/10/49 | 1,183 | 1,583 | 850 | 1,133 | 696 | 1,183 | 834 | 1,257 | 1,117 |
| 128 | 30/10/49 | 488 | 304 | 892 | 342 | 333 | 392 | 375 | 321 | 346 |
| 132 | 3/11/49 | 183 | 192 | 175 | 242 | 242 | 217 | 250 | 158 | 383 |
| 136 | 7/11/49 | 333 | 317 | 329 | 325 | 292 | 308 | 317 | 350 | 325 |
| 140 | 11/11/49 | 400 | 300 | 367 | 317 | 350 | 388 | 279 | 367 | 408 |
| 145 | 16/11/49 | 346 | 388 | 342 | 308 | 371 | 408 | 421 | 325 | 350 |
| 149 | 20/11/49 | 638 | 779 | 650 | 567 | 533 | 617 | 683 | 496 | 646 |
| 153 | 24/11/49 | 729 | 621 | 738 | 792 | 638 | 596 | 650 | 638 | 763 |
| 157 | 28/11/49 | 867 | 775 | 742 | 775 | 750 | 758 | 838 | 746 | 817 |

ตาราง ก.3 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-------|-----|-------|
| 161 | 2/12/49 | 817 | 717 | 792 | 417 | 792 | 842 | 1,079 | 792 | 804 |
| 165 | 6/12/49 | 917 | 975 | 1,017 | 892 | 867 | 1,025 | 867 | 900 | 8,283 |

ตาราง ก.4 ค่า pH

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 24/6/49 | 8.45 | 8.70 | 8.50 | 8.49 | 8.64 | 8.57 | 8.48 | 8.48 | 8.52 |
| 2 | 26/6/49 | 8.22 | 8.24 | 8.20 | 8.20 | 8.25 | 8.16 | 8.24 | 8.33 | 8.20 |
| 3 | 27/6/49 | 8.41 | 8.21 | 8.46 | 8.24 | 8.44 | 8.41 | 8.49 | 8.48 | 8.28 |
| 4 | 28/6/49 | 8.30 | 8.49 | 8.41 | 8.39 | 8.44 | 8.50 | 8.40 | 8.35 | 8.34 |
| 5 | 29/6/49 | 8.29 | 8.17 | 8.21 | 8.19 | 8.27 | 8.16 | 8.30 | 8.44 | 8.24 |
| 6 | 30/6/49 | 8.21 | 8.20 | 8.17 | 8.20 | 8.18 | 8.16 | 8.15 | 8.15 | 8.08 |
| 9 | 3/7/49 | 8.22 | 8.08 | 8.03 | 8.17 | 8.22 | 8.11 | 8.18 | 8.19 | 8.08 |
| 10 | 4/7/49 | 7.79 | 8.32 | 8.22 | 8.16 | 8.35 | 8.32 | 8.33 | 8.38 | 8.30 |
| 11 | 5/7/49 | 8.15 | 8.10 | 8.09 | 8.06 | 8.25 | 8.18 | 8.16 | 8.04 | 8.09 |
| 12 | 6/7/49 | 7.89 | 7.97 | 7.95 | 7.93 | 7.97 | 7.88 | 8.02 | 7.88 | 7.86 |
| 13 | 7/7/49 | 8.02 | 8.24 | 8.18 | 8.26 | 8.11 | 8.12 | 8.15 | 8.31 | 8.28 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 14 | 8/7/49 | 7.72 | 7.96 | 7.88 | 7.96 | 8.01 | 7.93 | 3.02 | 7.88 | 8.01 |
| 16 | 10/7/49 | 7.92 | 7.93 | 7.94 | 7.97 | 7.98 | 7.96 | 7.96 | 8.22 | 7.94 |
| 18 | 12/7/49 | 7.92 | 7.94 | 7.91 | 7.93 | 8.03 | 7.89 | 7.91 | 7.92 | 7.89 |
| 20 | 14/7/49 | 7.80 | 7.85 | 7.82 | 7.85 | 7.77 | 7.83 | 7.83 | 7.80 | 7.68 |
| 22 | 16/7/49 | 7.78 | 7.68 | 7.65 | 7.66 | 7.66 | 7.64 | 7.69 | 7.64 | 7.71 |
| 24 | 18/7/49 | 7.36 | 7.35 | 7.36 | 7.46 | 7.47 | 7.41 | 7.44 | 7.34 | 7.43 |
| 26 | 20/7/49 | 7.19 | 7.13 | 7.34 | 7.34 | 7.33 | 7.29 | 7.19 | 7.15 | 7.35 |
| 27 | 21/7/49 | 7.31 | 7.25 | 7.32 | 7.31 | 7.32 | 7.35 | 7.31 | 7.35 | 7.37 |
| 28 | 22/7/49 | 7.14 | 7.21 | 7.18 | 7.22 | 7.13 | 7.21 | 7.21 | 7.05 | 7.18 |
| 29 | 23/7/49 | 7.10 | 7.16 | 7.21 | 7.27 | 7.20 | 7.23 | 7.27 | 7.07 | 7.24 |
| 30 | 24/7/49 | 7.21 | 7.22 | 7.19 | 7.24 | 7.19 | 7.21 | 7.24 | 7.15 | 7.26 |
| 31 | 25/7/49 | 7.13 | 7.16 | 7.20 | 7.17 | 7.14 | 7.28 | 7.19 | 7.12 | 7.24 |
| 32 | 26/7/49 | 7.22 | 7.19 | 7.20 | 7.24 | 7.20 | 7.34 | 7.27 | 7.15 | 7.26 |
| 33 | 27/7/49 | 7.25 | 7.28 | 7.31 | 7.29 | 7.31 | 7.34 | 7.30 | 7.25 | 7.28 |
| 34 | 28/7/49 | 7.23 | 7.24 | 7.32 | 7.31 | 7.27 | 7.33 | 7.27 | 7.14 | 7.37 |
| 35 | 29/7/49 | 7.32 | 7.37 | 7.35 | 7.40 | 7.25 | 7.42 | 7.35 | 7.40 | 7.42 |
| 37 | 31/7/49 | 7.24 | 7.30 | 7.35 | 7.27 | 7.36 | 7.21 | 7.26 | 7.25 | 7.27 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 38 | 1/8/49 | 7.34 | 7.32 | 7.33 | 7.33 | 7.31 | 7.37 | 7.36 | 7.32 | 7.35 |
| 39 | 2/8/49 | 7.40 | 7.32 | 7.27 | 7.23 | 7.34 | 7.30 | 7.27 | 7.29 | 7.26 |
| 40 | 3/8/49 | 7.16 | 7.23 | 7.24 | 7.19 | 7.21 | 7.20 | 7.17 | 7.23 | 7.16 |
| 41 | 4/8/49 | 7.19 | 7.21 | 7.20 | 7.23 | 7.24 | 7.18 | 7.11 | 7.13 | 7.19 |
| 42 | 5/8/49 | 7.21 | 7.22 | 7.21 | 7.23 | 7.13 | 7.19 | 7.08 | 7.08 | 7.36 |
| 44 | 7/8/49 | 7.25 | 7.23 | 7.22 | 7.20 | 7.26 | 7.19 | 7.12 | 7.15 | 7.08 |
| 45 | 8/8/49 | 7.02 | 7.09 | 7.03 | 7.06 | 7.04 | 7.03 | 5.76 | 6.92 | 6.89 |
| 46 | 9/8/49 | 7.10 | 7.10 | 7.12 | 7.14 | 7.17 | 7.15 | 7.00 | 7.06 | 7.05 |
| 47 | 10/8/49 | 7.02 | 7.01 | 7.07 | 7.11 | 7.07 | 7.08 | 5.90 | 7.06 | 7.03 |
| 48 | 11/8/49 | 7.10 | 7.10 | 7.12 | 7.14 | 7.17 | 7.15 | 7.00 | 7.06 | 7.05 |
| 49 | 12/8/49 | 6.99 | 7.00 | 7.00 | 6.98 | 7.00 | 7.01 | 5.90 | 6.93 | 6.92 |
| 50 | 13/8/49 | 7.01 | 7.05 | 7.04 | 7.05 | 7.08 | 7.00 | 5.94 | 6.97 | 7.05 |
| 51 | 14/8/49 | 6.97 | 7.01 | 7.01 | 7.04 | 7.04 | 7.05 | 5.88 | 6.95 | 6.95 |
| 52 | 15/8/49 | 7.05 | 7.08 | 7.01 | 7.09 | 7.06 | 7.03 | 6.92 | 6.97 | 7.01 |
| 53 | 16/8/49 | 7.05 | 7.04 | 7.03 | 7.08 | 7.11 | 7.07 | 6.94 | 7.02 | 7.01 |
| 54 | 17/8/49 | 7.10 | 7.12 | 7.18 | 7.20 | 7.22 | 7.07 | 6.97 | 7.03 | 7.00 |
| 55 | 18/8/49 | 6.95 | 6.98 | 6.97 | 7.05 | 7.04 | 7.03 | 6.99 | 6.86 | 6.94 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 56 | 19/8/49 | 6.98 | 6.93 | 6.93 | 6.86 | 7.00 | 7.01 | 6.94 | 6.95 | 6.90 |
| 57 | 20/8/49 | 7.04 | 7.04 | 7.09 | 7.14 | 7.17 | 7.01 | 7.00 | 7.07 | 7.04 |
| 58 | 21/8/49 | 7.04 | 7.04 | 7.09 | 7.14 | 7.17 | 7.01 | 7.00 | 7.07 | 7.04 |
| 59 | 22/8/49 | 7.03 | 7.04 | 7.05 | 7.10 | 7.14 | 7.03 | 7.07 | 7.07 | 7.05 |
| 60 | 23/8/49 | 6.93 | 6.93 | 6.97 | 7.06 | 7.07 | 6.97 | 7.00 | 6.93 | 6.92 |
| 61 | 24/8/49 | 7.11 | 7.02 | 7.06 | 7.14 | 7.15 | 6.95 | 7.04 | 7.10 | 7.00 |
| 62 | 25/8/49 | 6.89 | 6.88 | 6.91 | 6.95 | 6.97 | 6.83 | 5.82 | 6.81 | 6.76 |
| 64 | 27/8/49 | 6.75 | 6.74 | 6.67 | 6.75 | 6.74 | 6.64 | 5.73 | 6.69 | 6.71 |
| 65 | 28/8/49 | 6.86 | 6.77 | 6.79 | 6.85 | 6.74 | 6.87 | 5.75 | 6.83 | 6.82 |
| 66 | 29/8/49 | 6.91 | 6.93 | 6.93 | 6.91 | 6.98 | 6.83 | 5.86 | 6.98 | 6.92 |
| 67 | 30/8/49 | 6.87 | 6.93 | 6.85 | 6.94 | 6.89 | 6.82 | 5.87 | 6.92 | 6.82 |
| 68 | 31/8/49 | 6.86 | 6.55 | 6.85 | 6.91 | 7.00 | 6.84 | 7.09 | 7.00 | 6.79 |
| 69 | 1/9/49 | 6.85 | 7.00 | 6.91 | 6.92 | 6.94 | 6.87 | 6.90 | 6.91 | 6.87 |
| 70 | 2/9/49 | 6.83 | 6.77 | 6.81 | 6.82 | 6.82 | 6.65 | 6.76 | 6.82 | 6.82 |
| 71 | 3/9/49 | 6.67 | 6.77 | 6.89 | 6.76 | 6.76 | 6.80 | 6.84 | 6.85 | 6.79 |
| 72 | 4/9/49 | 6.67 | 6.76 | 6.74 | 6.74 | 6.72 | 6.70 | 6.64 | 6.83 | 6.68 |
| 73 | 5/9/49 | 6.92 | 6.93 | 6.85 | 6.94 | 6.89 | 6.82 | 6.87 | 6.92 | 6.82 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 74 | 6/9/49 | 6.94 | 6.95 | 6.98 | 6.82 | 6.86 | 6.84 | 7.03 | 6.99 | 6.94 |
| 75 | 7/9/49 | 6.87 | 6.79 | 7.06 | 6.86 | 6.83 | 6.90 | 7.07 | 7.08 | 6.83 |
| 77 | 9/9/49 | 6.90 | 6.98 | 7.02 | 6.93 | 7.00 | 6.95 | 6.98 | 7.12 | 7.09 |
| 78 | 10/9/49 | 6.93 | 6.96 | 6.95 | 6.92 | 6.96 | 6.95 | 6.91 | 6.98 | 6.95 |
| 79 | 11/9/49 | 6.91 | 6.96 | 7.06 | 7.03 | 7.09 | 7.03 | 7.13 | 7.11 | 6.99 |
| 80 | 12/9/49 | 6.95 | 6.90 | 6.90 | 6.91 | 6.94 | 6.95 | 6.95 | 6.99 | 6.95 |
| 81 | 13/9/49 | 7.01 | 7.04 | 7.05 | 7.02 | 7.09 | 6.98 | 7.02 | 7.06 | 7.01 |
| 82 | 14/9/49 | 6.97 | 6.90 | 6.91 | 6.94 | 6.98 | 7.02 | 6.98 | 7.09 | 7.00 |
| 83 | 15/9/49 | 6.96 | 6.91 | 6.91 | 6.97 | 7.01 | 6.90 | 6.84 | 6.88 | 6.96 |
| 85 | 17/9/49 | 6.71 | 6.77 | 6.75 | 6.77 | 6.79 | 6.72 | 6.72 | 6.78 | 6.74 |
| 86 | 18/9/49 | 6.85 | 6.85 | 6.79 | 6.84 | 7.05 | 6.80 | 6.78 | 6.82 | 6.75 |
| 87 | 19/9/49 | 6.72 | 6.75 | 6.76 | 6.99 | 7.12 | 6.64 | 5.76 | 6.76 | 6.78 |
| 88 | 20/9/49 | 6.77 | 6.78 | 6.77 | 6.81 | 6.80 | 6.74 | 5.76 | 6.75 | 6.70 |
| 89 | 21/9/49 | 6.61 | 6.76 | 6.72 | 6.77 | 6.72 | 6.70 | 5.75 | 6.70 | 6.73 |
| 90 | 22/9/49 | 6.56 | 6.57 | 6.50 | 6.62 | 6.55 | 6.53 | 5.62 | 6.61 | 6.55 |
| 91 | 23/9/49 | 6.62 | 6.60 | 6.62 | 6.64 | 6.62 | 6.57 | 5.57 | 6.62 | 6.50 |
| 92 | 24/9/49 | 6.71 | 6.75 | 6.71 | 6.70 | 6.73 | 6.65 | 6.70 | 6.75 | 6.71 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 93 | 25/9/49 | 6.68 | 6.62 | 6.64 | 6.65 | 6.64 | 6.59 | 6.60 | 6.61 | 6.57 |
| 94 | 26/9/49 | 6.71 | 6.78 | 6.76 | 6.80 | 6.77 | 6.74 | 6.82 | 6.78 | 6.63 |
| 95 | 27/9/49 | 6.77 | 6.74 | 6.81 | 6.74 | 6.75 | 6.75 | 6.83 | 6.81 | 6.66 |
| 96 | 28/9/49 | 6.66 | 6.81 | 6.65 | 6.68 | 6.85 | 6.80 | 6.75 | 6.79 | 6.63 |
| 97 | 29/9/49 | 6.72 | 6.75 | 6.75 | 6.79 | 6.77 | 6.75 | 6.82 | 6.67 | 6.67 |
| 98 | 30/9/49 | 6.60 | 6.64 | 6.66 | 6.62 | 6.65 | 6.68 | 6.75 | 6.61 | 6.62 |
| 99 | 1/10/49 | 6.66 | 6.68 | 6.71 | 6.64 | 6.72 | 6.66 | 6.71 | 6.64 | 6.59 |
| 100 | 2/10/49 | 6.94 | 6.95 | 6.87 | 6.95 | 6.86 | 6.90 | 6.85 | 6.79 | 6.85 |
| 101 | 3/10/49 | 6.66 | 6.62 | 6.73 | 6.65 | 6.77 | 6.73 | 6.83 | 6.81 | 6.64 |
| 102 | 4/10/49 | 6.72 | 6.79 | 6.80 | 6.79 | 6.81 | 6.76 | 6.82 | 6.88 | 6.76 |
| 103 | 5/10/49 | 6.90 | 6.68 | 6.78 | 6.84 | 6.75 | 6.81 | 6.76 | 6.80 | 6.76 |
| 104 | 6/10/49 | 6.60 | 6.63 | 6.66 | 6.65 | 6.70 | 6.76 | 6.72 | 6.72 | 6.76 |
| 105 | 7/10/49 | 6.65 | 6.67 | 6.67 | 6.71 | 6.78 | 6.67 | 6.65 | 6.74 | 6.72 |
| 106 | 8/10/49 | 6.67 | 6.71 | 6.74 | 6.69 | 6.70 | 6.69 | 6.76 | 6.62 | 6.76 |
| 107 | 9/10/49 | 6.69 | 6.70 | 6.75 | 6.72 | 6.75 | 6.80 | 6.83 | 6.78 | 6.75 |
| 108 | 10/10/49 | 6.76 | 6.63 | 6.76 | 6.71 | 6.70 | 6.88 | 6.75 | 6.69 | 6.72 |
| 109 | 11/10/49 | 6.62 | 6.65 | 6.65 | 6.67 | 6.66 | 6.68 | 6.67 | 6.79 | 6.65 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 110 | 12/10/49 | 6.68 | 6.75 | 6.72 | 6.80 | 6.76 | 6.70 | 6.82 | 6.85 | 6.79 |
| 111 | 13/10/49 | 6.88 | 7.03 | 6.88 | 6.91 | 6.90 | 7.08 | 6.95 | 7.08 | 7.00 |
| 112 | 14/10/49 | 6.85 | 6.90 | 6.89 | 6.90 | 6.99 | 6.98 | 6.97 | 6.95 | 6.93 |
| 113 | 15/10/49 | 6.89 | 6.93 | 6.93 | 7.04 | 7.01 | 6.84 | 7.02 | 7.04 | 7.04 |
| 114 | 16/10/49 | 6.85 | 6.87 | 6.89 | 6.88 | 6.95 | 6.97 | 7.00 | 7.13 | 7.08 |
| 115 | 17/10/49 | 6.82 | 6.90 | 7.06 | 7.04 | 7.00 | 7.05 | 7.07 | 7.16 | 7.08 |
| 116 | 18/10/49 | 6.80 | 6.80 | 6.90 | 6.80 | 6.90 | 6.80 | 6.90 | 6.90 | 7.00 |
| 117 | 19/10/49 | 7.14 | 7.05 | 7.09 | 7.13 | 7.18 | 7.16 | 7.14 | 7.16 | 7.15 |
| 118 | 20/10/49 | 7.23 | 6.95 | 7.13 | 7.08 | 7.24 | 7.15 | 7.12 | 7.16 | 7.17 |
| 119 | 21/10/49 | 7.01 | 7.28 | 7.18 | 7.24 | 7.27 | 7.26 | 7.25 | 7.31 | 7.31 |
| 120 | 22/10/49 | 6.97 | 7.04 | 7.20 | 7.08 | 7.18 | 7.16 | 7.18 | 7.18 | 7.21 |
| 122 | 24/10/49 | 7.21 | 7.31 | 7.35 | 7.38 | 7.40 | 7.36 | 7.48 | 7.50 | 7.40 |
| 124 | 26/10/49 | 7.10 | 7.24 | 7.25 | 7.25 | 7.37 | 7.22 | 7.34 | 7.37 | 7.26 |
| 125 | 27/10/49 | 7.01 | 6.97 | 7.05 | 7.22 | 7.30 | 7.18 | 7.32 | 7.37 | 7.28 |
| 126 | 28/10/49 | 7.07 | 7.11 | 7.13 | 7.15 | 7.56 | 7.22 | 7.21 | 7.12 | 7.22 |
| 127 | 29/10/49 | 7.01 | 6.95 | 7.05 | 7.05 | 7.11 | 7.07 | 7.13 | 7.23 | 7.15 |
| 128 | 30/10/49 | 7.15 | 7.19 | 7.12 | 7.13 | 7.16 | 7.13 | 7.17 | 7.11 | 7.13 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 129 | 31/10/49 | 6.92 | 6.95 | 6.97 | 7.30 | 7.04 | 7.02 | 7.06 | 7.22 | 7.05 |
| 130 | 1/11/49 | 7.28 | 7.23 | 7.32 | 7.19 | 7.24 | 7.17 | 7.15 | 7.27 | 7.13 |
| 131 | 2/11/49 | 7.04 | 7.12 | 6.99 | 7.07 | 7.13 | 7.16 | 7.13 | 7.16 | 7.17 |
| 132 | 3/11/49 | 6.92 | 6.90 | 6.89 | 7.05 | 7.14 | 6.97 | 7.08 | 7.10 | 7.06 |
| 133 | 4/11/49 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| 135 | 6/1/43 | 6.95 | 6.98 | 7.00 | 7.06 | 6.97 | 6.98 | 6.97 | 7.10 | 7.05 |
| 136 | 7/11/49 | 6.84 | 6.92 | 6.87 | 7.02 | 6.81 | 6.96 | 6.90 | 7.07 | 6.90 |
| 137 | 8/11/49 | 7.00 | 7.03 | 7.03 | 7.07 | 7.10 | 6.98 | 7.04 | 7.03 | 6.94 |
| 140 | 11/11/49 | 7.11 | 7.13 | 7.11 | 7.16 | 7.18 | 7.18 | 7.16 | 7.13 | 7.17 |
| 141 | 12/11/49 | 7.00 | 7.10 | 7.02 | 7.05 | 7.01 | 7.10 | 6.98 | 6.98 | 7.15 |
| 142 | 13/11/49 | 6.99 | 7.08 | 7.00 | 7.10 | 7.06 | 7.05 | 7.03 | 7.08 | 7.13 |
| 143 | 14/11/49 | 7.05 | 6.95 | 6.94 | 6.98 | 6.96 | 6.91 | 6.98 | 6.91 | 7.04 |
| 145 | 16/11/49 | 7.28 | 7.24 | 7.21 | 7.32 | 7.24 | 7.21 | 7.21 | 7.22 | 7.22 |
| 146 | 17/11/49 | 6.89 | 7.00 | 6.93 | 6.95 | 6.85 | 6.83 | 6.88 | 6.98 | 7.05 |
| 147 | 18/11/49 | 6.87 | 6.90 | 6.98 | 6.91 | 6.87 | 6.92 | 6.95 | 6.90 | 6.92 |
| 148 | 19/11/49 | 6.78 | 6.87 | 6.94 | 6.93 | 6.80 | 6.81 | 6.98 | 7.05 | 7.00 |
| 149 | 20/11/49 | 6.90 | 6.96 | 6.89 | 7.00 | 6.85 | 6.81 | 6.96 | 6.90 | 7.04 |

ตาราง ก.4 (ต่อ)

| วัน | วันที่ | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 150 | 21/11/49 | 6.82 | 6.91 | 6.99 | 6.84 | 6.77 | 6.80 | 6.83 | 6.92 | 7.00 |
| 151 | 22/11/49 | 6.85 | 6.80 | 6.88 | 6.88 | 6.93 | 6.87 | 6.82 | 6.90 | 6.88 |
| 152 | 23/11/49 | 6.86 | 6.90 | 6.89 | 6.87 | 6.88 | 6.90 | 6.91 | 7.08 | 6.96 |
| 153 | 24/11/49 | 7.09 | 7.03 | 7.04 | 7.01 | 7.08 | 7.02 | 7.09 | 7.09 | 7.01 |
| 154 | 25/11/49 | 6.85 | 6.87 | 6.81 | 6.90 | 6.80 | 6.89 | 6.86 | 6.88 | 6.81 |
| 155 | 26/11/49 | 6.86 | 6.92 | 6.85 | 6.85 | 6.81 | 6.89 | 6.88 | 6.94 | 6.92 |
| 156 | 27/11/49 | 6.85 | 6.89 | 6.89 | 6.84 | 6.88 | 7.05 | 6.94 | 6.93 | 6.91 |
| 157 | 28/11/49 | 6.90 | 6.91 | 6.92 | 6.80 | 6.83 | 6.93 | 6.93 | 6.92 | 6.93 |
| 158 | 29/11/49 | 6.88 | 6.88 | 6.89 | 6.90 | 6.92 | 6.89 | 6.95 | 6.94 | 6.92 |
| 159 | 30/11/49 | 6.89 | 6.91 | 6.89 | 6.87 | 6.94 | 6.90 | 6.98 | 6.99 | 6.92 |
| 160 | 1/12/49 | 6.98 | 6.96 | 6.98 | 6.90 | 6.98 | 7.02 | 6.98 | 6.93 | 7.08 |
| 161 | 2/12/49 | 6.92 | 6.89 | 6.89 | 6.90 | 6.89 | 6.89 | 6.89 | 6.81 | 6.85 |
| 162 | 3/12/49 | 6.85 | 6.92 | 6.90 | 6.87 | 6.88 | 6.85 | 6.86 | 6.92 | 6.84 |
| 163 | 4/12/49 | 6.84 | 6.89 | 6.85 | 6.96 | 6.94 | 6.86 | 6.88 | 6.91 | 6.80 |
| 164 | 5/12/49 | 6.98 | 6.88 | 6.84 | 6.91 | 6.93 | 6.85 | 6.94 | 6.93 | 6.90 |
| 165 | 6/12/49 | 6.88 | 6.82 | 6.80 | 6.80 | 6.93 | 6.90 | 6.93 | 6.92 | 6.88 |
| 166 | 7/12/49 | 6.82 | 6.82 | 6.84 | 6.88 | 6.96 | 6.88 | 6.83 | 6.82 | 6.87 |

ตาราง ก.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (mL)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 6 | 6 | 70 | 70 | 25 | 25 | 70 | 70 | 44 | 44 | 0 | 44 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 6 | 38 | 108 | 12 | 37 | 20 | 90 | 2 | 46 | 0 | 46 | 1 | 51 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 8 | 14 | 0 | 108 | 26 | 63 | 0 | 90 | 0 | 46 | 0 | 46 | 44 | 95 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 14 | 38 | 146 | 28 | 91 | 54 | 144 | 6 | 52 | 0 | 52 | 48 | 143 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 14 | 60 | 206 | 11 | 102 | 0 | 144 | 0 | 52 | 0 | 52 | 28 | 171 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 14 | 26 | 232 | 14 | 116 | 35 | 179 | 0 | 52 | 0 | 52 | 35 | 206 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 14 | 60 | 292 | 51 | 167 | 70 | 249 | 0 | 52 | 0 | 52 | 0 | 206 | 0 | 0 | 70 | 70 |
| 19 | 0 | 14 | 40 | 332 | 15 | 182 | 45 | 294 | 20 | 72 | 22 | 22 | 30 | 236 | 0 | 0 | 35 | 105 |
| 20 | 0 | 14 | 70 | 402 | 70 | 252 | 70 | 364 | 23 | 95 | 11 | 33 | 70 | 306 | 0 | 0 | 70 | 175 |
| 21 | 32 | 46 | 0 | 402 | 70 | 322 | 0 | 364 | 0 | 95 | 12 | 45 | 70 | 376 | 0 | 0 | 70 | 245 |
| 22 | 41 | 87 | 70 | 472 | 70 | 392 | 70 | 434 | 0 | 95 | 0 | 45 | 70 | 446 | 0 | 0 | 0 | 245 |
| 23 | 2 | 89 | 80 | 552 | 70 | 462 | 80 | 514 | 0 | 95 | 50 | 95 | 80 | 526 | 0 | 0 | 80 | 325 |
| 24 | 0 | 89 | 70 | 622 | 64 | 526 | 70 | 584 | 0 | 95 | 15 | 110 | 70 | 596 | 0 | 0 | 0 | 325 |
| 26 | 0 | 89 | 0 | 622 | 70 | 596 | 49 | 633 | 0 | 95 | 0 | 110 | 38 | 634 | 0 | 0 | 0 | 325 |

ตาราง ก.5 (ต่อ)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|-----|------|
| 27 | 12 | 101 | 0 | 622 | 0 | 596 | 80 | 713 | 89 | 184 | 0 | 110 | 11 | 645 | 0 | 0 | 0 | 325 |
| 29 | 20 | 121 | 0 | 622 | 124 | 720 | 6 | 719 | 10 | 194 | 8 | 118 | 22 | 667 | 0 | 0 | 80 | 405 |
| 31 | 35 | 156 | 5 | 627 | 122 | 842 | 0 | 719 | 5 | 199 | 0 | 118 | 0 | 667 | 0 | 0 | 0 | 405 |
| 33 | 20 | 176 | 0 | 627 | 317 | 1159 | 328 | 1047 | 0 | 199 | 10 | 128 | 0 | 667 | 0 | 0 | 0 | 405 |
| 34 | 0 | 176 | 0 | 627 | 250 | 1409 | 320 | 1367 | 0 | 199 | 40 | 168 | 0 | 667 | 0 | 0 | 0 | 405 |
| 35 | 0 | 176 | 0 | 627 | 300 | 1709 | 390 | 1757 | 5 | 204 | 10 | 178 | 300 | 967 | 0 | 0 | 0 | 405 |
| 36 | 7 | 183 | 0 | 627 | 288 | 1997 | 226 | 1983 | 10 | 214 | 120 | 298 | 200 | 1167 | 0 | 0 | 110 | 515 |
| 39 | 0 | 183 | 0 | 627 | 28 | 2025 | 10 | 1993 | 90 | 304 | 0 | 298 | 100 | 1267 | 0 | 0 | 0 | 515 |
| 43 | 0 | 183 | 100 | 727 | 65 | 2090 | 0 | 1993 | 5 | 309 | 0 | 298 | 188 | 1455 | 0 | 0 | 100 | 615 |
| 44 | 2 | 185 | 80 | 807 | 45 | 2135 | 0 | 1993 | 0 | 309 | 0 | 298 | 30 | 1485 | 0 | 0 | 100 | 715 |
| 45 | 0 | 185 | 120 | 927 | 35 | 2170 | 0 | 1993 | 0 | 309 | 0 | 298 | 28 | 1513 | 0 | 0 | 53 | 768 |
| 46 | 0 | 185 | 0 | 927 | 48 | 2218 | 14 | 2007 | 122 | 431 | 0 | 298 | 320 | 1833 | 0 | 0 | 0 | 768 |
| 49 | 45 | 230 | 0 | 927 | 58 | 2276 | 0 | 2007 | 90 | 521 | 20 | 318 | 80 | 1913 | 0 | 0 | 0 | 768 |
| 53 | 20 | 250 | 0 | 927 | 423 | 2699 | 10 | 2017 | 0 | 521 | 5 | 323 | 37 | 1950 | 0 | 0 | 0 | 768 |
| 54 | 26 | 276 | 0 | 927 | 205 | 2904 | 0 | 2017 | 0 | 521 | 0 | 323 | 0 | 1950 | 11 | 11 | 0 | 768 |
| 55 | 55 | 331 | 0 | 927 | 215 | 3119 | 0 | 2017 | 0 | 521 | 0 | 323 | 223 | 2173 | 14 | 25 | 0 | 768 |
| 57 | 58 | 389 | 0 | 927 | 200 | 3319 | 0 | 2017 | 0 | 521 | 50 | 373 | 25 | 2198 | 28 | 53 | 25 | 793 |

ตาราง ก.5 (ต่อ)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|-----|------|-----|------|----|------|----|------|
| 59 | 80 | 469 | 0 | 927 | 228 | 3547 | 5 | 2022 | 9 | 530 | 0 | 373 | 8 | 2206 | 0 | 53 | 0 | 793 |
| 60 | 37 | 506 | 0 | 927 | 103 | 3650 | 5 | 2027 | 0 | 530 | 65 | 438 | 0 | 2206 | 0 | 53 | 0 | 793 |
| 62 | 65 | 571 | 137 | 1064 | 5 | 3655 | 0 | 2027 | 0 | 530 | 34 | 472 | 0 | 2206 | 0 | 53 | 0 | 793 |
| 64 | 45 | 616 | 5 | 1069 | 400 | 4055 | 0 | 2027 | 0 | 530 | 9 | 481 | 0 | 2206 | 26 | 79 | 5 | 798 |
| 65 | 64 | 680 | 5 | 1074 | 180 | 4235 | 22 | 2049 | 0 | 530 | 80 | 561 | 75 | 2281 | 10 | 89 | 80 | 878 |
| 66 | 80 | 760 | 78 | 1152 | 173 | 4408 | 5 | 2054 | 0 | 530 | 90 | 651 | 155 | 2436 | 9 | 98 | 20 | 898 |
| 67 | 100 | 860 | 5 | 1157 | 210 | 4618 | 10 | 2064 | 0 | 530 | 0 | 651 | 10 | 2446 | 0 | 98 | 0 | 898 |
| 68 | 6 | 866 | 90 | 1247 | 182 | 4800 | 10 | 2074 | 5 | 535 | 90 | 741 | 10 | 2456 | 0 | 98 | 0 | 898 |
| 69 | 10 | 876 | 100 | 1347 | 460 | 5260 | 15 | 2089 | 0 | 535 | 100 | 841 | 5 | 2461 | 60 | 158 | 0 | 898 |
| 71 | 0 | 876 | 90 | 1437 | 450 | 5710 | 5 | 2094 | 0 | 535 | 120 | 961 | 20 | 2481 | 0 | 158 | 0 | 898 |
| 72 | 0 | 876 | 100 | 1537 | 460 | 6170 | 0 | 2094 | 0 | 535 | 0 | 961 | 30 | 2511 | 80 | 238 | 90 | 988 |
| 73 | 0 | 876 | 25 | 1562 | 564 | 6734 | 0 | 2094 | 0 | 535 | 100 | 1061 | 10 | 2521 | 0 | 238 | 57 | 1045 |
| 126 | 300 | 1176 | 380 | 1942 | 350 | 7084 | 100 | 2194 | 0 | 535 | 180 | 1241 | 430 | 2951 | 0 | 238 | 0 | 1045 |
| 127 | 470 | 1646 | 420 | 2362 | 500 | 7584 | 0 | 2194 | 0 | 535 | 0 | 1241 | 300 | 3251 | 0 | 238 | 0 | 1045 |
| 128 | 420 | 2066 | 350 | 2712 | 380 | 7964 | 0 | 2194 | 0 | 535 | 0 | 1241 | 300 | 3551 | 0 | 238 | 0 | 1045 |
| 129 | 220 | 2286 | 290 | 3002 | 250 | 8214 | 0 | 2194 | 0 | 535 | 0 | 1241 | 190 | 3741 | 0 | 238 | 90 | 1135 |
| 131 | 150 | 2436 | 210 | 3212 | 249 | 8463 | 110 | 2304 | 0 | 535 | 180 | 1421 | 150 | 3891 | 0 | 238 | 20 | 1155 |

ตาราง ก.5 (ต่อ)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| 132 | 210 | 2646 | 100 | 3312 | 180 | 8643 | 0 | 2304 | 0 | 535 | 100 | 1521 | 180 | 4071 | 0 | 238 | 100 | 1255 |
| 133 | 100 | 2746 | 100 | 3412 | 140 | 8783 | 0 | 2304 | 0 | 535 | 100 | 1621 | 180 | 4251 | 50 | 288 | 50 | 1305 |
| 134 | 80 | 2826 | 120 | 3532 | 100 | 8883 | 0 | 2304 | 0 | 535 | 90 | 1711 | 130 | 4381 | 10 | 298 | 50 | 1355 |
| 135 | 130 | 2956 | 100 | 3632 | 100 | 8983 | 0 | 2304 | 0 | 535 | 90 | 1801 | 160 | 4541 | 0 | 298 | 100 | 1455 |
| 136 | 150 | 3106 | 90 | 3722 | 100 | 9083 | 0 | 2304 | 0 | 535 | 90 | 1891 | 170 | 4711 | 20 | 318 | 20 | 1475 |
| 137 | 130 | 3236 | 380 | 4102 | 220 | 9303 | 100 | 2404 | 0 | 535 | 90 | 1981 | 160 | 4871 | 0 | 318 | 0 | 1475 |
| 138 | 200 | 3436 | 370 | 4472 | 380 | 9683 | 270 | 2674 | 450 | 985 | 180 | 2161 | 150 | 5021 | 0 | 318 | 0 | 1475 |
| 139 | 210 | 3646 | 430 | 4902 | 180 | 9863 | 210 | 2884 | 450 | 1435 | 120 | 2281 | 310 | 5331 | 0 | 318 | 0 | 1475 |
| 140 | 250 | 3896 | 350 | 5252 | 300 | 10163 | 150 | 3034 | 200 | 1635 | 280 | 2561 | 250 | 5581 | 0 | 318 | 0 | 1475 |
| 141 | 140 | 4036 | 450 | 5702 | 380 | 10543 | 200 | 3234 | 200 | 1835 | 300 | 2861 | 420 | 6001 | 0 | 318 | 0 | 1475 |
| 142 | 150 | 4186 | 285 | 5987 | 250 | 10793 | 200 | 3434 | 200 | 2035 | 300 | 3161 | 220 | 6221 | 100 | 418 | 50 | 1525 |
| 143 | 180 | 4366 | 280 | 6267 | 250 | 11043 | 190 | 3624 | 200 | 2235 | 220 | 3381 | 210 | 6431 | 100 | 518 | 30 | 1555 |
| 144 | 180 | 4546 | 300 | 6567 | 230 | 11273 | 250 | 3874 | 200 | 2435 | 220 | 3601 | 180 | 6611 | 100 | 618 | 50 | 1605 |
| 145 | 150 | 4696 | 290 | 6857 | 250 | 11523 | 150 | 4024 | 120 | 2555 | 180 | 3781 | 200 | 6811 | 100 | 718 | 50 | 1655 |
| 146 | 130 | 4826 | 280 | 7137 | 250 | 11773 | 150 | 4174 | 0 | 2555 | 150 | 3931 | 270 | 7081 | 50 | 768 | 50 | 1705 |
| 147 | 120 | 4946 | 260 | 7397 | 230 | 12003 | 150 | 4324 | 50 | 2605 | 220 | 4151 | 300 | 7381 | 0 | 768 | 100 | 1805 |
| 148 | 110 | 5056 | 280 | 7677 | 210 | 12213 | 190 | 4514 | 50 | 2655 | 100 | 4251 | 280 | 7661 | 50 | 818 | 50 | 1855 |

ตาราง ก.5 (ต่อ)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|-----|------|-----|-------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|------|-----|------|
| 149 | 100 | 5156 | 210 | 7887 | 250 | 12463 | 180 | 4694 | 70 | 2725 | 80 | 4331 | 280 | 7941 | 80 | 898 | 100 | 1955 |
| 150 | 80 | 5236 | 200 | 8087 | 230 | 12693 | 180 | 4874 | 80 | 2805 | 50 | 4381 | 300 | 8241 | 60 | 958 | 120 | 2075 |
| 151 | 80 | 5316 | 200 | 8287 | 230 | 12923 | 170 | 5044 | 180 | 2985 | 100 | 4481 | 280 | 8521 | 50 | 1008 | 120 | 2195 |
| 152 | 50 | 5366 | 300 | 8587 | 200 | 13123 | 200 | 5244 | 80 | 3065 | 50 | 4531 | 270 | 8791 | 80 | 1088 | 160 | 2355 |
| 153 | 20 | 5386 | 300 | 8887 | 320 | 13443 | 200 | 5444 | 80 | 3145 | 50 | 4581 | 200 | 8991 | 0 | 1088 | 200 | 2555 |
| 154 | 50 | 5436 | 400 | 9287 | 300 | 13743 | 370 | 5814 | 100 | 3245 | 80 | 4661 | 300 | 9291 | 80 | 1168 | 300 | 2855 |
| 155 | 50 | 5486 | 380 | 9667 | 180 | 13923 | 300 | 6114 | 220 | 3465 | 120 | 4781 | 320 | 9611 | 40 | 1208 | 120 | 2975 |
| 156 | 50 | 5536 | 270 | 9937 | 270 | 14193 | 290 | 6404 | 100 | 3565 | 80 | 4861 | 200 | 9811 | 50 | 1258 | 150 | 3125 |
| 157 | 50 | 5586 | 380 | 10317 | 180 | 14373 | 300 | 6704 | 220 | 3785 | 150 | 5011 | 320 | 10131 | 40 | 1298 | 120 | 3245 |
| 158 | 40 | 5626 | 350 | 10667 | 200 | 14573 | 350 | 7054 | 100 | 3885 | 220 | 5231 | 310 | 10441 | 20 | 1318 | 100 | 3345 |
| 159 | 20 | 5646 | 320 | 10987 | 200 | 14773 | 350 | 7404 | 120 | 4005 | 200 | 5431 | 320 | 10761 | 30 | 1348 | 120 | 3465 |
| 160 | 30 | 5676 | 360 | 11347 | 200 | 14973 | 310 | 7714 | 110 | 4115 | 180 | 5611 | 360 | 11121 | 20 | 1368 | 30 | 3495 |
| 161 | 20 | 5696 | 350 | 11697 | 200 | 15173 | 390 | 8104 | 100 | 4215 | 90 | 5701 | 350 | 11471 | 50 | 1418 | 50 | 3545 |
| 162 | 20 | 5716 | 350 | 12047 | 200 | 15373 | 380 | 8484 | 120 | 4335 | 120 | 5821 | 390 | 11861 | 50 | 1468 | 20 | 3565 |
| 163 | 30 | 5746 | 270 | 12317 | 200 | 15573 | 280 | 8764 | 100 | 4435 | 100 | 5921 | 320 | 12181 | 50 | 1518 | 20 | 3585 |
| 164 | 20 | 5766 | 350 | 12667 | 360 | 15933 | 290 | 9054 | 120 | 4555 | 150 | 6071 | 370 | 12551 | 80 | 1598 | 20 | 3605 |
| 165 | 20 | 5786 | 360 | 13027 | 400 | 16333 | 300 | 9354 | 100 | 4655 | 100 | 6171 | 350 | 12901 | 100 | 1698 | 20 | 3625 |

ตาราง ก.5 (ต่อ)

| วัน | R1 | สะสม | R2 | สะสม | R3 | สะสม | R4 | สะสม | R5 | สะสม | R6 | สะสม | R7 | สะสม | R8 | สะสม | R9 | สะสม |
|-----|----|------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|------|----|------|
| 166 | 30 | 5816 | 350 | 13377 | 350 | 16683 | 280 | 9634 | 100 | 4755 | 100 | 6271 | 360 | 13261 | 100 | 1798 | 20 | 3645 |
| 167 | 40 | 5856 | 350 | 13727 | 400 | 17083 | 270 | 9904 | 150 | 4905 | 130 | 6401 | 360 | 13621 | 100 | 1898 | 50 | 3695 |
| 168 | 50 | 5906 | 350 | 14077 | 400 | 17483 | 220 | 10124 | 200 | 5105 | 320 | 6721 | 370 | 13991 | 150 | 2048 | 90 | 3785 |
| 170 | 60 | 5966 | 360 | 14437 | 400 | 17883 | 210 | 10334 | 190 | 5295 | 230 | 6951 | 350 | 14341 | 120 | 2168 | 70 | 3855 |

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

1. การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS)

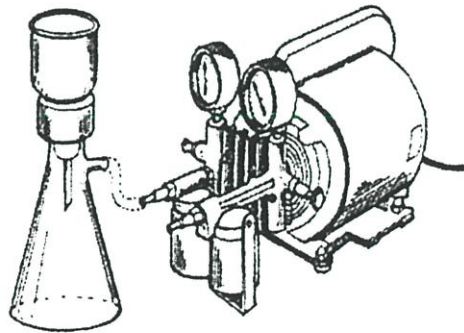
(ธงชัยและวิบูลย์ลักษณ์, 2540)

1.1 เครื่องมืออุปกรณ์

- กระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
- กรวยบุคเนอร์ (Buckner funnel) ความจุ 100 มล.
- เครื่องดูดอากาศ (Suction pump)
- ขวดดูด (Suction flask)
- ตู้อบแห้ง (Oven)
- โถทำแห้ง (Desiccator)
- เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

1.2 วิธีการวิเคราะห์

อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองและบันทึกไว้ (X) เป็นมก. สำหรับใช้ในการคำนวณ



ภาพผนวก ข ที่ 1 การติดตั้งชุดกรองน้ำตัวอย่าง



วางกระดาษกรองลงในกรวยบุคเนอร์ นำกรวยบุคเนอร์วางบนขวดดูดที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ ดังแสดงในภาพผนวก ข ที่ 1



ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียก และเปิดเครื่องดูดอากาศเพื่อให้
ดูดตัวอย่างน้ำตามปริมาณที่กำหนดโดยปิเปตวัดปริมาตร แล้วปล่อยลงบนกระดาษ
กรอง ใช้น้ำกลั่นล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรองจนกว่าจะแห้ง



ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้ปากคีบคีบกระดาษกรองใส่ด้วยอะลูมิเนียมแล้วนำไป
อบในตู้อบแห้งอุณหภูมิ 103-105°C ประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะแห้ง



ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนักกระดาษกรองใหม่ บันทึกน้ำหนัก
กระดาษกรองที่มีตะกอนของแข็งอยู่ (Y) เป็นมก.

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./มล.)} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Y-X) x 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

X = น้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง (มก.)

Y = น้ำหนักแห้งของกระดาษกรองที่มีของแข็งแขวนลอยอยู่ (มก.)

2. การวิเคราะห์ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids; VSS)

(ธงชัยและวิบูลย์ลักษณ์, 2540)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องมือวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย
- เตาเผาอุณหภูมิ $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$

2.2 วิธีการวิเคราะห์

เตรียมจานระเหย โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
และปล่อยให้เย็นและชั่งน้ำหนัก



นำจานระเหยที่ชั่งน้ำหนักปริมาณของแข็งแขวนลอยแล้ว ไปเผาในเตาเผา
อุณหภูมิ $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนักสารที่เหลืออยู่

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งคงตัว (มก./มล.)} = \frac{\text{มิลลิกรัมปริมาณสารที่เหลืออยู่} \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

$$\text{ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)} = \text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)} - \text{ของแข็งคงตัว (มก./ล.)}$$

3. การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธีเจลดาค์ (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN)

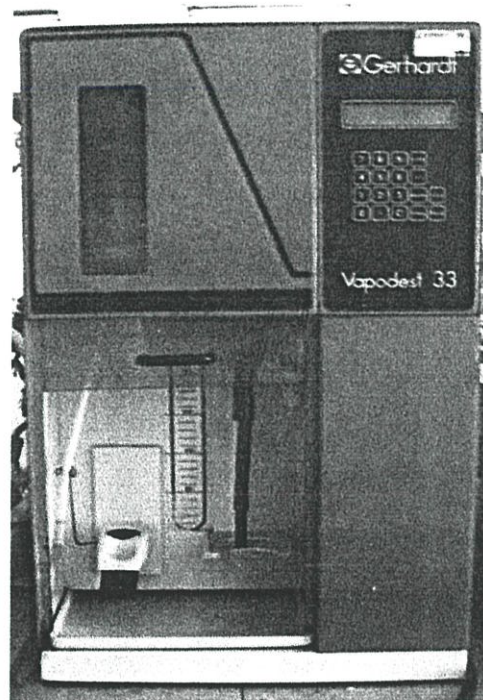
(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

- เครื่องมือในการย่อยสลายและเครื่องดูดอากาศเพื่อดูดไอน้ำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกไป ซึ่งแสดงในภาพผนวก ข ที่ 2
- เครื่องกลั่นประกอบด้วยหลอดเจลดาค์ ขนาด 250 มล. ต่อเข้ากับกระเปาะแก้วคอนเนคติง บัลบ์แล้วจึงต่อเข้ากับเครื่องควบแน่นชนิดตรง (Vertical condenser) แสดงในภาพผนวก ข ที่ 3
- สารเคมีบอเรตบัฟเฟอร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล โซเดียมเททราโบเรตเดคาไฮเดรต 0.025 โมลล์ และสารละลายกำจัดคลอรีน
- รีเอเจนต์สำหรับการย่อยสลาย : เจลแท็บ ซึ่งประกอบด้วยโปแทสเซียมซัลเฟต 3.5 กรัม และ คอปเปอร์ซัลเฟต 0.4 กรัม
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 กรัม เจือจางเป็น 1 ลิตร



ภาพผนวก ข ที่ 2 เครื่องย่อยสลายและสำหรับวิเคราะห์ TKN



ภาพผนวก ข ที่ 3 เครื่องกลั่นสำหรับวิเคราะห์ TKN

3.2 วิธีวิเคราะห์

เปิดน้ำตัวอย่างให้หลอดเจลดาค่า 50-100 มล. แล้วปรับ pH ให้เท่ากับ 7



เติมเจลด่าง 1 เม็ด และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มล.



นำเข้าเครื่องย่อยสลายและเปิดเครื่องดูดอากาศ ย่อยที่อุณหภูมิ 390°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงปิดเครื่องย่อยสลาย ทิ้งไว้ให้เย็น โดยเปิดเครื่องดูดอากาศ จนควันขาวของซัลเฟอร์ไดรอกไซด์หมดไป



นำหลอดเจลดาค่าที่บรรจุตัวอย่างที่ผ่านการย่อยสลายเข้าเครื่องกลั่น เครื่องกลั่นจะเติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มล. และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 40 ประมาณ 50 มล.



ทำการกลั่นและไตเตรททำแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและทำทุก
ขั้นตอนเหมือนกับน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{TKN} &= \text{NH}_3\text{-N} + \text{Organic-N} \\ \text{TKN (mg/l NH}_3\text{-N)} &= \frac{(A-B) \times 1,000 \times N \times 14}{\text{มล. ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการย่อย}} \end{aligned}$$

เมื่อ A = มล. ของกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง
B = มล. ของกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์
C = ความเข้มข้นที่แน่นอนเป็นนอร์มัลของกรดซัลฟูริก

4. การวิเคราะห์ซีไอดีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

4.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารละลายเคมี

- ตู้อบอุณหภูมิ 150 ± 2 °C
- สารละลายย่อยสลายมาตรฐาน โปแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์
- รีเอเจนต์กรดซัลฟูริก
- สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์
- สารไตเตรนเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

4.2 วิธีการวิเคราะห์

คือน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลายและเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 10 มล. เติมสารละลายย่อยสลายมาตรฐาน โปแทสเซียมไดโครเมต 2 มล.



ค่อยๆเทรีเอเจนต์กรดซัลฟูริกลงในหลอดย่อยสลาย แล้วปิดฝาหลอดย่อยสลายให้แน่นเขย่าให้เข้ากัน



นำหลอดย่อยสลายเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 ± 2 °C ใช้เวลาฟลักซ์ 2 ชั่วโมง นำหลอดออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง



เปิดฝาหลอดย่อยสลายแล้วใส่แท่งแม่เหล็กที่หุ้มด้วยทีเอฟอีเดิมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ผสมให้ทั่ว โดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก ไตเตรทด้วย 0.1 นอร์มัลเอเฟเอส อินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นสีเขียวอมเหลือง สีฟ้าอ่อนและสีน้ำตาลแดง ซึ่งเป็นจุดยุติ จดปริมาตรเอเฟเอสที่ใช้ไตเตรท

การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี (มก./ล)} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{มล. ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

- เมื่อ A = มล. ของเฟอแอสที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์
 B = มล. ของเฟอแอสที่ใช้ในการไตเตรทน้ำตัวอย่าง
 C = นอร์มัลของเฟอแอส

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ซีไอดีละลายทำการกรองน้ำตัวอย่างและนำส่วนที่ใสมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ
 เหมือนกัน

5. การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) โดยวิธีไตเตรท

(ธงชัยและวิบูลย์ลักษณ์, 2540)

5.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- เครื่องวัด pH
- เครื่องกวนผสม พร้อมแท่งแม่เหล็ก
- สารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 นอร์มัล

5.2 วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์ความเป็นด่างทั้งหมด โดยดูดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองมา 50-200 มล. ใส่ในบีกเกอร์ 300 มล. วัด pH ของน้ำตัวอย่างแล้วไตเตรทตัวอย่างน้ำจนถึง pH 4.0 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 นอร์มัล จดปริมาตรสารละลายกรดที่ใช้ = A มล.



ไตเตรทตัวอย่างน้ำต่อไปจน pH อยู่ระหว่าง 3.3-3.5 ไม่ต้องจดปริมาตรที่ใช้
หลังจากนั้นต้มตัวอย่างน้ำจนเดือดประมาณ 2-3 นาที



ไตเตรทกลับเพื่อปรับ pH ให้ถึง 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล แล้วไตเตรทต่อจาก pH 4 ถึง 7 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงหลังนี้คือ B

การคำนวณ

ความเป็นด่างทั้งหมด, mg/l as CaCO₃ = $\frac{A \times \text{นอร์มัลลิตีของกรดซัลฟูริก} \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$

ความเป็นด่าง VFA, mg/l as CaCO₃ = $\frac{B \times \text{นอร์มัลลิตีของโซเดียมไฮดรอกไซด์} \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$

6. การวิเคราะห์ก๊าซมีเทนด้วย- Gas chromatography

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

6.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- กระจกน็อคติยา ปริมาตร 10 มล.
- Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 8A (TCD detector) ดังแสดงในภาพผนวก ข ที่ 4

Pack column : port 1. Unibeads C Max.Temp 270^oซ

Port 2. Unisole 30T (Reference) Max.Temp 280^oซ

Injet 160^oซ

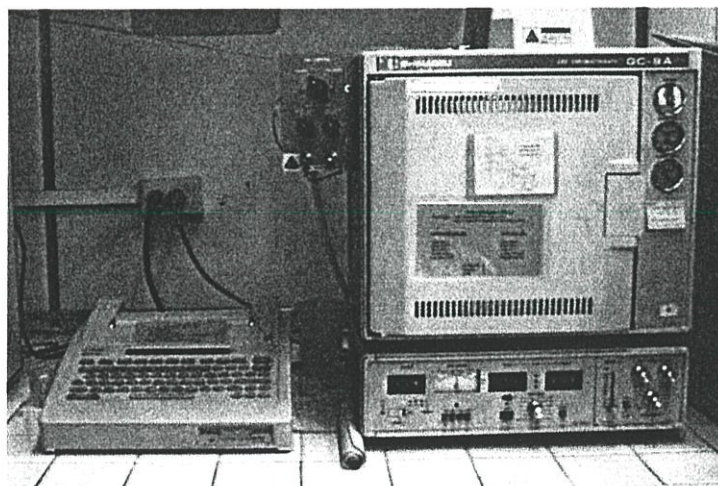
Initial 110^oซ

Final 110^oซ

Current 100 mA

Stop time 22 นาที

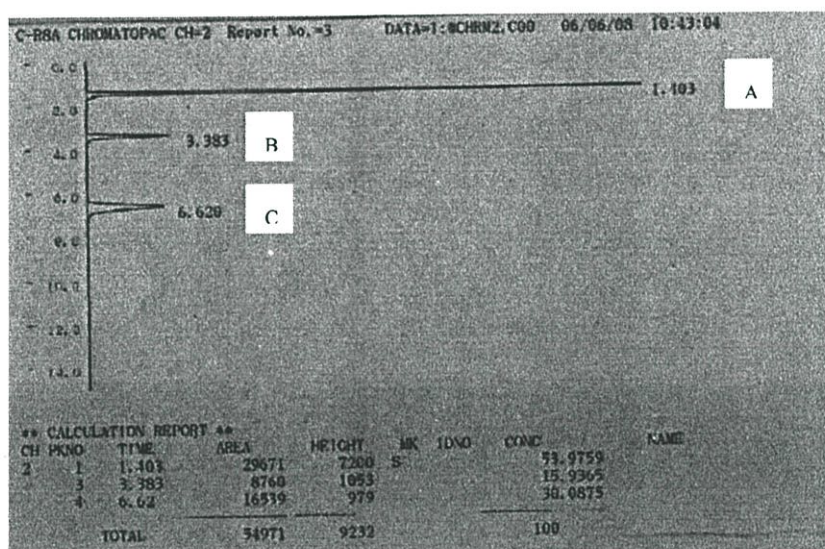
- MIX 218 (% by mole) CO₂ 1.0% CO 1.0% H₂ 1.0% และ CH₄ 1.0% Balance of Nitrogen



ภาพผนวก ข ที่ 4 Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 8A

6.2 วิธีการวิเคราะห์

เปิดเครื่องและตั้งค่ามาตรฐานทิ้งไว้ประมาณ 45 นาที จากนั้นฉีดก๊าซตัวอย่างปริมาตร 3 มล. เข้าเครื่อง GC และรอผลที่แสดงออกด้วยกระดาษกราฟ



ภาพผนวก ข ที่ 5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง GC รุ่น 8A

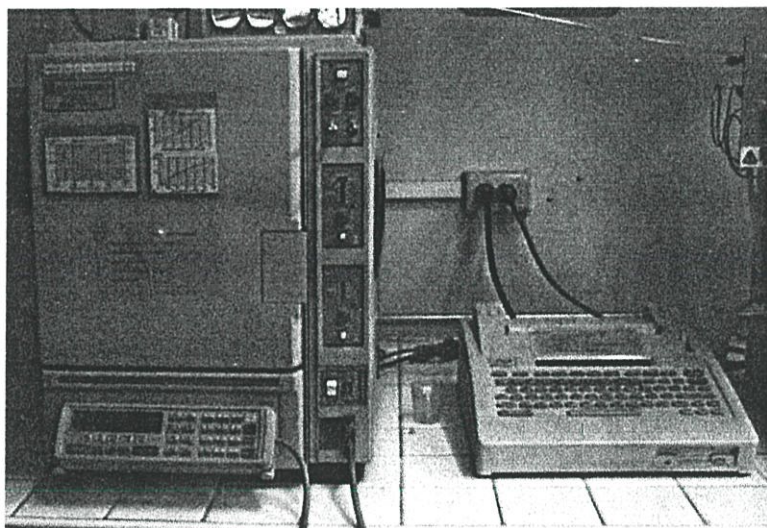
A: CH₄, B:CO₂ และ C:CO

7. การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ด้วย Gas chromatography

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

7.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- กระบอกฉีดยา ปริมาตร 10 มล.
- Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 14B (FID detector) ดังแสดงในภาพผนวก ข ที่ 5
Pack column Unisole 30T Max.Temp 280^oซ
- สารละลายมาตรฐาน คือสารละลายผสมของ Formic acid Acetic acid Propionic acid
Butyric acid Isobutyric acid Valeric acid Isocaproic acid Isovaleric acid Hexanoic acid
และ Heptanoic acid



ภาพผนวก ข ที่ 5 Gas chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 14B

7.2 วิธีการวิเคราะห์

เปิดเครื่องและตั้งค่ามาตรฐานทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นฉีดน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 - 3 มล. เข้าเครื่อง GC และรอผลที่แสดงออกด้วยกระดาษกราฟ

8 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยวิธีการย่อยด้วยกรดซัลฟูริกและไนตริก

(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998)

8.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

- ชุดย่อยสลายประกอบด้วยเตาและตู้ดูดควัน
- ขวดรูปชมพู่
- ลูกแก้ว
- กรดซัลฟูริกเข้มข้น
- กรดไนตริกเข้มข้น
- สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
- โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 นอร์มัล
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8.2 วิธีการวิเคราะห์

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 50 มล. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มล. เติมน้ำกลั่น

จนได้ 50 มล.



ใส่ลูกแก้ว 2-3 เม็ด ปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 มล. และกรดไนตริกเข้มข้น 5 มล. ลงในน้ำตัวอย่างในขวดรูปชมพู่ และเติมน้ำตัวอย่างในตู้ดูดควันให้ เหลือปริมาตร 1-2 มล.



ทิ้งให้เย็น เติมน้ำกลั่นประมาณ 10 มล. แล้วหยดอินดิเคเตอร์ 2 หยด และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัลลงไปทีละหยด จนกระทั่ง สารละลายมีสีชมพูอ่อน



นำตัวอย่างใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มล. แล้วใช้น้ำกลั่นล้างเทอมไว้ ในขวดวัดปริมาตร แล้วนำไปวิเคราะห์อโทฟอสเฟตแล้วอ่านค่า แอบซอร์บแนนซ์ที่ความยาวคลื่น 400 420 และ 470 นาโนเมตร

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกัลยาณี มีทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม 2525 ที่จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (อุตสาหกรรมเกษตร) จากมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2547

ปี พ.ศ. 2548 เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ประจำศูนย์บูรณาการเทคโนโลยีเพื่อ
อุตสาหกรรมไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และปัจจุบันทำงานในตำแหน่งที่
ปรึกษาเทคโนโลยี (ITA) ในโครงการสนับสนุนและพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย เครือข่าย
มจร. มีผลงานทางวิชา 2 เรื่องคือ การออกแบบและสร้างระบบต้นแบบของคั้นแบบโรงงาน
พร้อมสรรพสำหรับ SMEs เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทระบบสเตอริไลส์ และ การอบปลาข้าง
เหลืองด้วยเตาอบอินฟราเรดแบบสายการผลิตต่อเนื่อง