การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของกากส้มในระบบไร้อากาศด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

นาย วิชญ์นนท์ ธรานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCING ANAEROBIC DIGESTION PERFORMANCE OF ORANGE WASTE USING CHEMICAL PRETREATMENT

Mr. Vichanon Tharanon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของกากส้มในระบบไร้อากาศด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี
โดย	นายวิชญ์นนท์ ธรานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

……………………………………………คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

……………………………………………กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

……………………………………………กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

วิชญ์นนท์ ธรานนท์ : การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของกากส้มในระบบไร้อากาศด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี. (ENHANCING ANAEROBIC DIGESTION PERFORMANCE OF ORANGE WASTE USING CHEMICAL PRETREATMENT)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 190 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และศึกษาความเหมาะสมในการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศของน้ำย่อยกากส้มซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดกากส้มด้วยสารเคมี โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ศึกษาการย่อยสลายของกากส้ม และน้ำกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง ช่วงที่ 2 ศึกษาหาความสามารถในการลดของแข็งในกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริก และช่วงที่ 3 ศึกษาความเหมาะสมในการบำบัดน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริกด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง

ผลการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าการบำบัดกากส้มเพียงอย่างเดียวด้วยถังหมักไร้อากาศไม่เหมาะสมเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในถังหมักไร้อากาศไม่เหมาะสม และสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอต่อการทำงาน ของจุลชีพกลุ่มต่างๆ ในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ซึ่งมีการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะเท่ากับร้อยละ 19.62 และความเข้มข้นของมีเทนมีค่าเพียงร้อยละ 0.4 โดยปริมาตร

ผลการทดลองช่วงที่ 2 พบว่าชุดการทดลองที่บำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มสูงกว่าการบำบัดกากส้มด้วยไฮโดรคลอริกทุกความเข้มข้น โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 4.49 ในขณะที่ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละในการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มเพียง 0.60

ผลการทดลองช่วงที่ 3 พบว่าน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถถูกบำบัดได้ดีในระบบไร้อากาศ เนื่องจากมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เมื่อเทียบกับน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก จึงไม่มีผลในการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ภายหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบเป็นผลให้ความเข้มข้นมีเทนในก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 26.96 และ 15.35 โดยปริมาตร ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....
ปีการศึกษา 2551

4970568621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: ORANGE WASTE / CHEMICAL PRETREATMENT / ANAEROBIC DIGESTION

VICHANON THARANON : ENHANCING ANAEROBIC DIGESTION PERFORMANCE OF ORANGE WASTE USING CHEMICAL PRETREATMENT. ADVISOR : ASST.PROF. PICHAYA RACHDAWONG, ph.D., 190 pp.

The objectives of this research were to study impact of chemical pretreatment on reduction of volatile solids (VS) in orange waste and the suitability of degradation of extracted liquid from chemical pretreatment under anaerobic condition. This research was divided into 3 phases. The first phase was the study of degradation of orange waste and its leachate by using high-solid anaerobic digester. The second phase was the study of VS reduction in orange waste by using sodium hydroxide (NaOH) and hydrochloric (HCl). The final phase was the study of suitability of degradation of extracted liquid from chemical pretreatment by using anaerobic filter which had orange waste as filter media.

The results of the first phase showed that the use of orange waste as a single substrate in anaerobic degradation was not suitable for the activities of microorganisms during degradation period because of the unfitting conditions in the anaerobic digester and the lack of macro nutrients (nitrogen and phosphorus), especially the reactor no.3 which had the COD removal efficiency during steady state at 19.62%. And the concentration of methane was only 0.4% by volume.

The results of the second phase showed that the use of NaOH pretreatment provided higher efficiency in the reduction of VS in orange waste than the HCl pretreatment at all concentration levels. NaOH of 500 mg/l provided the best results in VS reduction (4.49% average VS reduction). At all concentration levels, HCl pretreatment provided relatively similar in VS reduction. The average efficiency in VS reduction by HCl pretreatment was 0.6%.

The results of the third phase showed that extracted liquid from NaOH pretreatment was more suitable for anaerobic treatment than extracted liquid from HCl pretreatment. Because extracted liquid from HCl pretreatment provided lower pH value than the other. The liquid from HCl pretreatment caused the unfitting conditions in anaerobic process. After seed addition was found higher percentage of methane in biogas from the degradation of extracted liquid from NaOH and HCl pretreatment. The percentage of methane was 26.96% and 15.35% by volume respectively.

Department : Environmental Engineering	Student's Signature ....
Field of Study : Environmental Engineering	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2008	

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ องจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลาคอยให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งช่วยเหลือ และสนับสนุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการวิจัย และห้องปฏิบัติการน้ำเสีย

ขอขอบคุณกองทุน ดร. ธีระ พันธุมวนิช และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ บริษัท แซน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณครูจิรายุ ครูอนันต์ และครูจันทรวรรณที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท รุ่นพี่นิสิตปริญญาโทและเอก รุ่นน้องนิสิตปริญญาตรีและปริญญาโททุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย และญาติพี่น้องทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ให้การดูแลอบรม สั่งสอน ให้กำลังใจและให้ความรัก ซึ่งล้วนเป็นกำลัง และสิ่งสำคัญยิ่งแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ จ
กิตติกรรมประกาศ........ ฉ
สารบัญ........ ช
สารบัญตาราง........ ฎ
สารบัญภาพ........ ฌ
บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา........ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย........ 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย........ 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 4
2.1 ปริมาณของกากส้ม........ 4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้ม........ 6
2.3 โครงสร้างของผนังเซลล์ในพืช........ 8
2.3.1 เซลลูโลส........ 8
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส........ 9
2.3.3 ลิกนิน........ 10
2.3.4 สารเพกทิกและเพกทิน........ 10
2.4 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อทำลายลิกโนเซลลูโลสในชีวมวล........ 11
2.4.1 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ........ 12
2.4.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน........ 12
2.4.2.1 การบำบัดด้วยไอน้ำและการระเบิดด้วยไอน้ำ........ 12
2.4.2.2 การบำบัดด้วยน้ำร้อน........ 13
2.4.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด........ 13
2.4.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง........ 14
2.4.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยตัวออกซิไดซ์........ 14
2.4.6 การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการผสมผสาน........ 15

หน้า

2.4.6.1 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายกรด............ 15
2.4.6.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายด่าง.............15
2.4.6.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและตัวออกซิไดซ์..............16
2.4.6.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและตัวออกซิไดซ์แบบด่าง.16
2.4.6.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์.17
2.4.7 การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนทางชีวภาพ และการใช้เอนไซม์……….. 17
2.5 กลไกพื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ...21
2.5.1 จุลชีววิทยาของกระบวนการไร้อากาศ.. 21
2.5.1.1 จุลชีพกลุ่มสร้างกรด.. 21
2.5.1.2 จุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติก... 21
2.5.1.3 จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน... 22
2.5.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ....................................22
2.5.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายด้วยน้ำหรือไฮโดรไลซีส..............23
2.5.2.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย................................25
2.5.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก...25
2.5.2.4 ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน..25
2.6 ถังหมักไร้อากาศ...26
2.6.1 รูปแบบของถังหมักไร้อากาศ..26
2.6.1.1 จำแนกตามปริมาณของแข็งในถังหมักไร้อากาศ....................26
2.6.1.2 จำแนกตามลักษณะการเติมสารอินทรีย์ให้แก่
ถังหมักไร้อากาศ...26
2.6.1.3 จำแนกตามขั้นตอนระหว่างการย่อยสลาย..............................27
2.6.1.4 กระบวนการย่อยสลายร่วม... 27
2.6.2 การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศภายในถังหมักไร้อากาศ
แบบของแข็งปริมาณสูงที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ................................28
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของถังหมักไร้อากาศ..30
2.7.1 ลักษณะ และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เติมให้แก่ถังหมักไร้อากาศ..31
2.7.2 สารอาหารหลัก.. 31
2.7.3 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ.. 32

หน้า

2.7.4 ความเป็นกรด-ด่างและสภาพด่าง 32
2.7.5 อัตราภาระสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหย 33
2.7.6 สารพิษ 33
2.7.7 อุณหภูมิ 35
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 40
3.1 แผนการทดลอง 40
3.2 กากส้มที่ใช้ในการศึกษาวิจัย 41
3.3 หัวเชื้อจุลชีพ 41
3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี 42
3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 42
3.4.1.1 รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3 42
3.4.1.2 รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2 45
3.4.1.3 อุปกรณ์อื่นๆ 46
3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 46
3.5 การจัดการและการควบคุมน้ำภายในระบบ 47
3.6 การเติมหัวเชื้อจุลชีพ 48
3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 48
3.7.1 การทดลองที่ 1 การกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง 48
3.7.2 การทดลองที่ 2 การลดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี 53
3.7.3 การทดลองที่ 3 การกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลา... 56
3.8 แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในงานวิจัยนี้ 59
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 60
4.1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากส้ม 60
4.2 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพ 60
4.3 ผลการทดลองที่ 1 การกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง 62

หน้า

4.3.1 ผลของการหมุนเวียนน้ำชะขยะต่อถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 1.... 62
4.3.2 ผลการวิเคราะห์น้ำชะขยะในการทดลองที่ 1..... 67
4.3.2.1 ซีโอดีละลาย และประสิทธิภาพการบำบัด.......67
4.3.2.2 กรดไขมันระเหย....... 72
4.3.2.3 สภาพด่าง และความเป็นกรด-ด่าง.......76
4.3.2.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน....... 77
4.3.2.5 สารอาหาร.......78
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลองที่ 1.......81
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ของแข็งในการทดลองที่ 1.......88
4.4 ผลการทดลองที่ 2 การลดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.......90
4.4.1 ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.......91
4.4.2 ซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี.......92
4.4.3 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี... 94
4.4.4 การเลือกความเข้มข้นของสารเคมีเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3....... 95
4.5 ผลการทดลองที่ 3 การกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่
ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง.......97
4.5.1 ปริมาณน้ำย่อยกากส้มที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3....... 97
4.5.2 ผลของการหมุนเวียนน้ำชะขยะต่อถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 3....98
4.5.3 ผลการวิเคราะห์น้ำชะขยะในการทดลองที่ 3....... 101
4.5.3.1 ซีโอดีละลาย และประสิทธิภาพการบำบัด.......101
4.5.3.2 กรดไขมันระเหย....... 105
4.5.3.3 สภาพด่าง และความเป็นกรด-ด่าง.......108
4.5.3.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน....... 109
4.5.3.5 สารอาหาร.......110
4.5.4 ผลการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลองที่ 3.......112
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....... 120
สรุปผลการทดลอง.......120
ข้อเสนอแนะ....... 122
รายการอ้างอิง....... 124

หน้า

ภาคผนวก... 127

ภาคผนวก ก ผลการทดลองที่ 1..128

ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ 2..164

ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่ 3..170

ภาคผนวก ง ปริมาณก๊าซทางทฤษฎี...181

ภาคผนวก จ รายงานผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็งและก๊าซที่ส่งวิเคราะห์.............183

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..190

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสถิติผลผลิตของพืชประเภทส้มในประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2543 ถึง 2547……...	4
2.2	แสดงมูลค่าการจำหน่ายน้ำผัก และผลไม้ของบริษัท มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่ พ.ศ. 2546 ถึง 2548...	5
2.3	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้ม...	6
2.4	แสดงปริมาณน้ำตาลประเภทต่างๆ ในเปลือกส้มที่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และเพกทิเนส..	7
2.5	แสดงผลทางกายภาพ และเคมีของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่ ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ……………………………………………....	19
2.6	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบไร้อากาศ................................	34
2.7	ความเข้มข้นของไอออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบไร้อากาศ................................	35
3.1	พารามิเตอร์เบื้องต้นของกากส้มที่ทำการวิเคราะห์……………………………………..	41
3.2	พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ทำการวิเคราะห์...	42
3.3	ตัวแปรในการทดลองที่ 1…………………………………………………………………	51
3.4	จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองที่ 1 และ 3...	52
3.5	ตัวแปรในการทดลองที่ 2…………………………………………………………………	55
3.6	พารามิเตอร์ที่ต้องทำการวิเคราะห์ในการทดลองที่ 2………………………………..	55
3.7	ตัวแปรในการทดลองที่ 3..	58
3.8	แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์..	59
4.1	ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากส้มที่ใช้ในการทดลอง..	60
4.2	ผลวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ และระหว่างวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการทดลองที่ 1..	61
4.3	ผลวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ระหว่าง วันที่ 57 และ 59 ของการทดลองที่ 3...	61
4.4	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1................	63
4.5	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1…………	65
4.6	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1…………	66
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศแต่ละในการทดลองที่ 1……	71

ตารางที่ หน้า

4.8 เปรียบเทียบสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในน้ำชะขยะ
จากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 80
4.9 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎี
ในแต่ละถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1 82
4.10 ผลการวิเคราะห์ของแข็งในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ 89
4.11 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์การบำบัดกากส้มทางเคมี 90
4.12 รายละเอียดน้ำย่อยกากส้มที่ใช้ในการทดลองที่ 3 98
4.13 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3 99
4.14 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3 100
4.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศที่มี
กากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3 104
4.16 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในน้ำชะขยะในการทดลองที่ 3 111
4.17 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎี
ในแต่ละถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3 113
ก-1 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 129
ก-2 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 132
ก-3 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 135
ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 138
ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 144
ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 149
ก-7 แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 155
ก-8 ออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 155
ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 156
ก-10 ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 162
ก-11 ปริมาณของแข็งในกากส้มภายในถังหมักไร้อากาศทั้งที่ 3 ในการทดลองที่ 1 163
ข-1 ปริมาณของแข็งในกากส้มเขียวหวานสดหั่นหยาบ ความเป็นกรด-ด่าง
และค่าซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม 165
ข-2 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยน้ำกลั่น 165

ตารางที่ หน้า

ข-3 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร........................166
ข-4 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร......................166
ข-5 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร......................167
ข-6 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร...................167
ข-7 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 40 มิลลิกรัมต่อลิตร..................................168
ข-8 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร................................168
ข-9 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 500 มิลลิกรัมต่อลิตร................................169
ข-10 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของ
ชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.............................169
ค-1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้ม
ที่ใช้เติมในการทดลองที่ 3.. 171
ค-2 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3................172
ค-3 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3.........173
ค-4 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3.................... 174
ค-5 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3.......... 175
ค-6 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3...................... 176
ค-7 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3...........................177
ค-8 แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3......178
ค-9 ออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3...............178
ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3................. 179
ค-11 ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3..180
จ-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์......................... 184

ตารางที่ หน้า

จ-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (28 พฤษภาคม 2551)......................... 186

จ-3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (31 กรกฎาคม 2551).......................... 187

จ-4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (8 กันยายน 2551).............................. 188

จ-5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (7 ตุลาคม 2551)................................. 189

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลโลไบโอส	8
2.2	โครงสร้างของเซลลูโลสที่แสดงพันธะไฮโดรเจน	9
2.3	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทไซโลกลูแคน	9
2.4	แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสร้างลิกนิน	10
2.5	โครงสร้างพอลิกาแลกทูโรแนนของเพกทิน	11
2.6	ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์	23
2.7	ชนิดของสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซีส และเอนไซม์ที่ใช้	24
2.8	แสดงตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน และความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในแต่ละตำแหน่งภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง	29
3.1	รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3	43
3.2	รูปถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3	44
3.3	รูปถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2	45
3.4	ขั้นตอนการทดลองที่ 1	50
3.5	ขั้นตอนการทดลองที่ 2	54
3.6	ขั้นตอนการทดลองที่ 3	57
4.1	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	62
4.2	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1	64
4.3	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1	65
4.4	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1	67
4.5	ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	68
4.6	ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	72
4.7	ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1	73
4.8	ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1	74

รูปที่		หน้า
4.9	ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1	75
4.10	ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	76
4.11	ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	77
4.12	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	78
4.13	ค่าแอมโมเนียในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	79
4.14	ค่าออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	79
4.15	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	81
4.16	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1	81
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1	84
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1	85
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1	87
4.20	กากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศในถังปฏิกิริยาถังที่ 3	88
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งระเหยในกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี	91
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี	93
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชในน้ำย่อยกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี	94
4.24	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	98
4.25	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3	100
4.26	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3	101
4.27	ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	102
4.28	ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	105
4.29	ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3	106

รูปที่		หน้า
4.30	ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3	107
4.31	ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	108
4.32	ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	109
4.33	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	110
4.34	ค่าแอมโมเนียในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	111
4.35	ค่าออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	112
4.36	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	114
4.37	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3	114
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3	116
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมอันดับต้นๆ ของโลก โดยมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิดส่งออกเป็นจำนวนมาก ผลไม้ประเภทส้มเป็นผลผลิตทางการเกษตรอย่างหนึ่งที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะกระแสความนิยมการบริโภคผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพของประชาชนเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะน้ำส้ม ทำให้อัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมผลิตน้ำส้มมีแนวโน้มสูงขึ้นมากทั้งในระดับอุตสาหกรรม และในระดับครัวเรือน (บริษัท มาลีสามพรานจำกัด (มหาชน), 2548)

จากการศึกษากระบวนการผลิตน้ำส้มในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผักผลไม้ และตามแผงขายน้ำส้มในตลาดสดพบว่าเกิดของเสียประเภทเปลือกส้ม และเม็ดสูงถึงร้อยละ 50 ของปริมาณส้มที่ใช้เป็นวัตถุดิบ โดยทั่วไปแล้วกากส้มจะถูกนำไปขายในราคาถูกเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์หรือนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังในหลุมฝังกลบมูลฝอย แต่การกำจัดกากส้มด้วยวิธีการฝังกลบจะเกิดปัญหาการค่อยๆ สลายตัวของขยะประเภทนี้หลังจากปิดการใช้งานไปแล้ว เพราะในกากส้มประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์สายโซ่ยาวประกอบขึ้นจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายโมเลกุลต่อกันเรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทจำแนกตามลักษณะการสร้างพันธะของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวประเภทต่างๆ คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) (วรรณา ตุลยธัญ, 2549) ทำให้การย่อยสลายของกากส้มใช้เวลานานมากส่งผลให้เกิดปัญหากลิ่นเน่าเหม็น นอกจากนี้ความเป็นกรดของน้ำส้ม และน้ำชะขยะจากการฝังกลบกากส้มเป็นผลให้แผ่นรองกันซึมของหลุมฝังกลบมูลฝอยเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ และอาจเกิดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษา และเฝ้าติดตามการใช้งานหลุมฝังกลบมูลฝอยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำกากส้มไปทำการบำบัดเบื้องต้น เช่น การลดขนาด การบำบัดด้วยสารละลายด่าง การบำบัดด้วยสารละลายกรดเจือจาง การใช้เอนไซม์ในการบำบัด ฯลฯ (Hendriks และ Zeeman, 2008) เพื่อให้กากส้มซึ่งมีลิกโนเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักถูกย่อยสลายได้มากขึ้นก่อนนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบหรือนำไปย่อยสลายในถังหมักไร้อากาศ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงวิธีการเร่งกระบวนการย่อยสลาย ด้วยการเพิ่มปริมาณความชื้นภายในหลุมฝังกลบมูลฝอยโดยการเติมน้ำหรือเวียนน้ำชะขยะจากก้นหลุมฝังกลบมูลฝอย เป็นผลให้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้น พื้นที่ที่ใช้

สำหรับฝังกลบลดลง สามารถลดเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาหลุมฝังกลบมูลฝอย นอกจากนี้การเพิ่มความชื้นให้แก่หลุมฝังกลบมูลฝอยทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศภายในหลุมฝังกลบมูลฝอยเกิดขึ้นเร็วขึ้น เป็นผลให้เกิดความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ที่จะติดตั้งระบบเก็บก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบมูลฝอยเพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้เป็นพลังงานทดแทน และช่วยลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศอันเป็นสาเหตุหนึ่งของสภาวะโลกร้อน (Patrick และ Philip, 2002)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการลดปริมาณของแข็งในกากส้มในรูปของแข็งระเหยด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นของเสียที่พบได้ง่ายจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ แล้วจึงนำน้ำย่อยกากส้มซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีไปย่อยสลายต่อในถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกในสภาวะวิกฤตการณ์พลังงานดังเช่นในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการลดปริมาณของแข็งในกากส้มโดยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

2. ศึกษาร้อยละการกำจัดของซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ

3. ศึกษาปริมาณ และองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกากส้มและน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้ การทดลองที่ 1 การกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง การทดลองที่ 2 การลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และการทดลองที่ 3 การกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง ซึ่งทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ

วิจัยของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

1. กากส้มที่ใช้ในการวิจัยเป็นกากส้มเขียวหวานที่ผ่านการหั่นแบบหยาบ โดยเก็บรวบรวมกากส้มมาจากร้านขายน้ำส้มคั้นในตลาดสดสามย่าน

2. หัวเชื้อจุลชีพ (seed) ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง และที่ใช้ในการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบระหว่างดำเนินการทดลอง เป็นหัวเชื้อจุลชีพจากถังหมักไร้อากาศของบริษัท แซน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด

3. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองส่วนการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) คุณภาพระดับอุตสาหกรรม (industrial grade)

4. ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3 ใช้ถังปฏิกิริยาจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale reactor) ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร มีปริมาตรประสิทธิผล (effective volume) 17 ลิตร และติดตั้งอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำซึ่งประกอบด้วยกระบอกแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร ประกอบกลับด้านกับกระบอกแก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร ส่วนถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ทำจากแก้ว มีปริมาตรประสิทธิผล 2 ลิตร

5. การประเมินประสิทธิภาพของระบบในแต่ละการทดลองจะพิจารณาในรูปของร้อยละการเพิ่ม และร้อยละการกำจัด

6. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทำตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for Examination of water and wastewater, 1998

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ และแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงวิธีการกำจัดของเสียที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

2. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผน และออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วยถังหมักไร้อากาศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปริมาณของกากส้ม

ข้อมูลผลผลิตของพืชประเภทส้มในประเทศไทยจากกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ตั้งแต่ พ.ศ. 2543 ถึง 2547 พบว่าประเทศไทยสามารถผลิตส้มในแต่ละชนิดได้เป็นปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่จะมีผลผลิตมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสถิติผลผลิตของพืชประเภทส้มในประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2543 ถึง 2547 (ศูนย์สารสนเทศกรมส่งเสริมการเกษตรกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548)

ชนิดพืช	ผลผลิต (ตัน/ปี)				
	2543	2544	2545	2546	2547
ส้มเกลี้ยง	4,078	5,090	5,751	7,775	7,987
ส้มเขียวหวาน	826,134	677,174	512,679	585,497	646,046
ส้มจุก	531	289	565	1,646	1,442
ส้มเช้ง	8,834	9,716	9,726	7,123	12,188
ส้มโอ	183,966	243,723	253,538	238,589	204,167

จากรายงานประจำปี 2548 ของบริษัท มาลีสามพรานจำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายน้ำผักและผลไม้รายใหญ่ในประเทศไทย พบว่ามูลค่าการจำหน่ายน้ำผัก และผลไม้ทั้งในประเทศ และต่างประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีมูลค่าถึง 3,653 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2548 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และคาดว่าอัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมน้ำผักและผลไม้จะมีแนวโน้มสูงขึ้นในปี พ.ศ. 2549 โดยเฉพาะน้ำส้ม เนื่องจากการแข่งขันทางด้านการตลาดของผู้ผลิตน้ำส้มรายเก่า และรายใหม่ รวมไปถึงความนิยมในการบริโภคผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพของประชาชน

ตารางที่ 2.2 แสดงมูลค่าการจำหน่ายน้ำผัก และผลไม้ของบริษัท มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่ พ.ศ. 2546 ถึง 2548 (บริษัท มาลีสามพรานจำกัด (มหาชน), 2548)

	2546		2547		2548	
	ล้านบาท	ร้อยละ	ล้านบาท	ร้อยละ	ล้านบาท	ร้อยละ
จำหน่ายในประเทศ	1,938	60.52	1,935	59.78	2,096	57.38
จำหน่ายต่างประเทศ	1,264	39.48	1,302	40.22	1,557	42.62
รวม	3,202	100.00	3,237	100.00	3,653	100.00

จากการศึกษากระบวนผลิตน้ำส้มในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผักผลไม้พบว่าเกิดของเสียประเภทเปลือกส้ม และเม็ดสูงถึงร้อยละ 50 ของปริมาณส้มที่ใช้เป็นวัตถุดิบ โดยทั่วไปแล้วกากส้มจะถูกนำไปขายในราคาถูกเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์หรือนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังในหลุมฝังกลบมูลฝอย แต่การย่อยสลายของกากส้มใช้เวลานานมากส่งผลให้เกิดปัญหากลิ่นเน่าเหม็น นอกจากนี้ความเป็นกรดของน้ำส้ม และน้ำชะขยะจากการฝังกลบกากส้มเป็นผลให้แผ่นรองกันซึมของหลุมฝังกลบมูลฝอยเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ และอาจเกิดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้มพบว่าเปลือกส้มมีปริมาณน้ำตาลอยู่สูงแต่อยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทินซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้ม

Chau และ Huang (2003) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้ม Citrus sinensis L. Cv. Liucheng พบว่าโดยทั่วไปเปลือกส้มจะประกอบไปด้วยเส้นใยอาหารประเภทต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยอาหารที่ละลายได้(soluble dietary fibers; SDF) และเส้นใยอาหารที่ไม่ละลาย (insoluble dietary fibers; IDF)

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้มส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยที่ไม่ละลายซึ่งเป็นส่วนประกอบของเพกทินและเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 12.6 และ 14.1 ตามลำดับ ส่วนประกอบอื่นๆ ในเปลือกส้มจะมีสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกส้ม (Converti และคณะ, 1989)

พารามิเตอร์	ร้อยละ
Soluble reducing sugars	30.0
Pectine	12.6
Hemicellulose	8.7
Cellulose	14.1
Lignin	6.3
Proteins	6.9
Ashes	3.3
Lipids	2.1
Humidity	16.0
Density	1.215 g/cm^3

เซลลูโลส และเพกทินเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์สายโซ่ยาวประกอบขึ้นจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายโมเลกุลต่อกันเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช Wilkins และคณะ (2006) ได้ทำการย่อยสลายเปลือกส้มแห้งด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) และเพกทิเนส (pectinase) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะได้น้ำตาลหลายประเภทซึ่งมีสัดส่วนน้ำตาลแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าภายในเปลือกส้มสะสมน้ำตาลอยู่เป็นปริมาณมากแต่จะอยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณน้ำตาลประเภทต่างๆ ในเปลือกส้มที่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) และเพกทิเนส (Pectinase) (Wilkin และคณะ, 2006)

Yields of sugars and dissolved dry matter (%peel dry matter) at different pectinase and cellulase loading										
Pectinase Loading[a]	Ara[b]	Fruc[b]	Gal[b]	GA[b]	Gluc[b]	Rham[b]	Sucr[b]	Xylose	TS[b]	DDM[b]
0	0.42	11.56	0.38	0.00	12.56	0.40	2.63	0.49	28.41	47.57
1	1.84	12.90	1.37	14.55	21.17	1.04	0.61	1.16	54.61	85.49
2	2.33	12.72	1.52	15.96	22.13	1.26	0.56	1.29	57.86	86.30
5	3.11	12.83	1.70	17.39	23.08	1.67	0.36	1.41	61.65	87.97
10	3.55	13.07	1.74	17.63	23.51	1.92	0.66	1.55	63.77	88.85
Cellulase Loading[a]										
0	2.24	12.42	1.20	13.40	13.49	1.16	1.24	0.23	45.35	69.58
1	2.39	12.93	1.38	14.15	21.61	1.37	0.67	1.31	55.90	85.93
2	2.53	12.91	1.47	14.45	22.40	1.42	0.86	1.34	57.45	87.10
5	2.35	12.49	1.44	13.82	22.45	1.32	0.80	1.44	56.14	87.83
10	2.26	12.58	1.45	13.53	22.77	1.24	0.86	1.52	56.29	87.74
[a] mg protein/g peel dry matter [b] Ara-arabinose, Fruc-fructose, Gal-galactose, GA-galacturonic acid, Gluc-glucose, Rham-rhamose, Sucr-sucrose, TS-total sugars, DDM-dissolved dry matter.										

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำลายลิกโนเซลลูโลสในเปลือกส้มซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำจะได้น้ำตาลประเภทต่างๆ ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นจุลชีพในระบบไร้อากาศจึงสามารถนำไปใช้เป็นอาหารเพื่อให้เกิดการย่อยสลายในสภาพไร้อากาศ และได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการบำบัดเบื้องต้นทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพเพื่อทำลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทินในเปลือกส้ม และชีวมวลชนิดอื่นที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เพื่อให้ชีวมวลมีศักยภาพในการนำไปผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

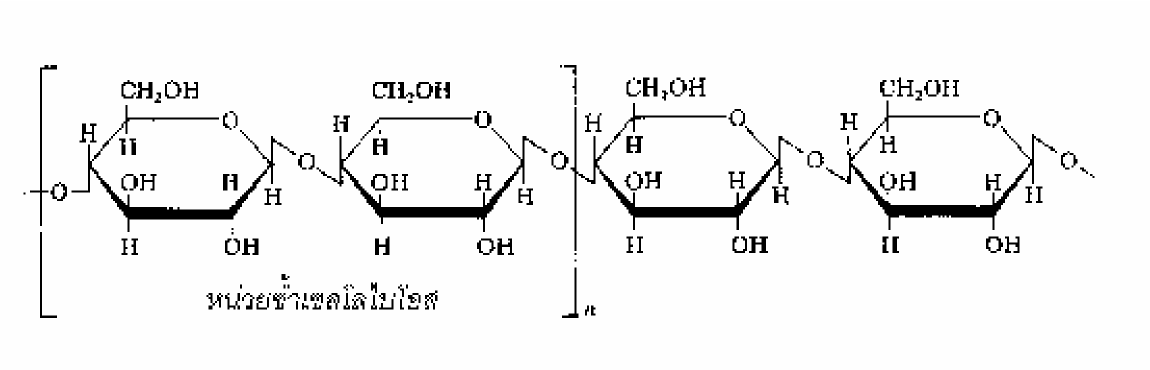
2.3 โครงสร้างของผนังเซลล์ในพืช

ในผนังเซลล์ (cell wall) ของลำต้น และเปลือกของพืชชั้นสูงจะประกอบด้วยโครงสร้างที่เรียกว่าลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งจำแนกตามลักษณะการสร้างพันธะของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวประเภทต่างๆ โดยโครงสร้างทั้ง 3 ประเภทนี้มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 90 ของน้ำหนักแห้งในผนังเซลล์ของพืช นอกจากนี้ปริมาณของโพลิเมอร์ประเภทต่างๆ จะแตกต่างกันไปตามชนิดและอายุของพืชชนิดนั้น เช่น ไม้เนื้ออ่อนจะมีองค์ประกอบของลิกนินในผนังเซลล์มากกว่าไม้เนื้อแข็ง เฮมิเซลลูโลสมีมากที่สุดในพืชจำพวกหญ้า เป็นต้น

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) (วรรณา ตุลยธัญ, 2549)

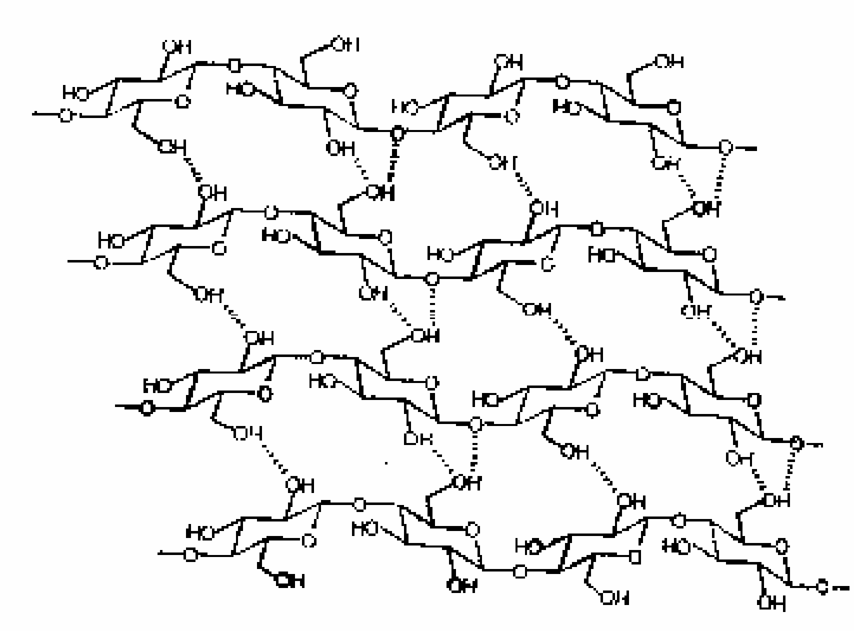
เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์พืช จัดเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลก เซลลูโลสจะพบอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกทิน ในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ มีความคงทนสูง และย่อยสลายได้ยาก มีทั้งที่มีรูปร่างเป็นผลึก (crystalline) และที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (amorphous)

โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์สายโซ่ยาวประกอบขึ้นจากหน่วยซ้ำของเซลโลไบโอส (cellobiose) ซึ่งมี D–กลูโลส จับต่อกันด้วยพันธะ β (1,4)–กลูโคซิดิก (β (1,4)–glycosidic bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลโลไบโอส (วรรณา ตุลยธัญ, 2549)

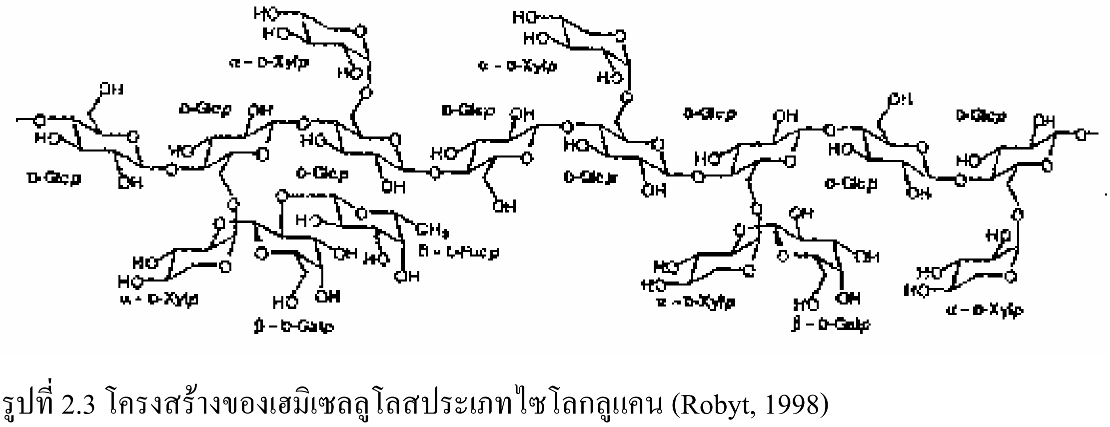
เซลลูโลสประกอบขึ้นจากเซลโลไบโอส (cellobiose) เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลยาว และที่ทุกๆหน่วยที่สองของ β – D – กลูโคส จะหมุน 180° จึงทำให้สายเซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ซึ่งมีความเป็นระเบียบสูง มีความแข็งแรง สามารถทนต่อสารเคมีและเอนไซม์ได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลสที่แสดงพันธะไฮโดรเจน (Robyt, 1998)

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) (วรรณา ตุลยธัญ, 2549)

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิแซ็กคาไรด์ที่มีความหลากหลายแตกต่างกันระหว่างพืชต่างชนิดไม่เหมือนเซลลูโลส โดยลักษณะของเฮมิเซลลูโลสจะเป็นโพลิเมอร์ที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกาะอยู่บนสายโซ่หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้สามารถจำแนกเฮมิเซลลูโลสตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลักในโมเลกุลได้ เช่น D–ไซโลกลูแคน ประกอบด้วย D – ไซโลไพแรโนส จับกับสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส เป็นต้น เฮมิเซลลูโลสจึงเป็นโพลิแซ็กคาร์ไรด์ที่มีความซับซ้อน แต่ละชนิดแตกต่างกันที่โมโนแซ็กคาไรด์ของสายโซ่หลัก และยังมีสายกิ่งที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ

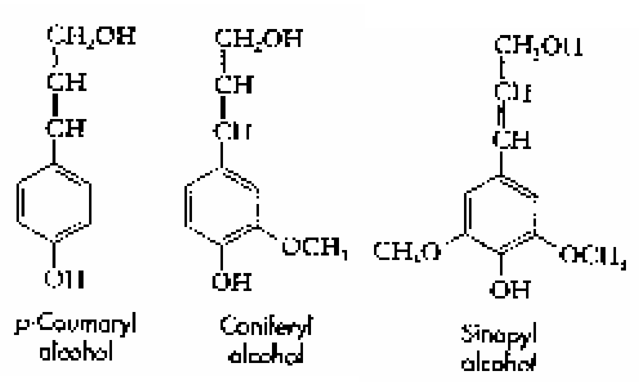


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทไซโลกลูแคน (Robyt, 1998)

2.3.3 ลิกนิน (Lignin) (วรรณา ตุลยธัญ, 2549)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นโพลิเมอร์แบบวง (aromatic polymer) ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น และมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ทั้งในไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อน รวมไปถึงเฟิร์น และคลับมอส โดยลิกนินทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ลำต้นโดยการแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ต้นไม้ที่มีขนาดใหญ่สามารถยืนต้นได้โดยไม่หักล้มลงมา

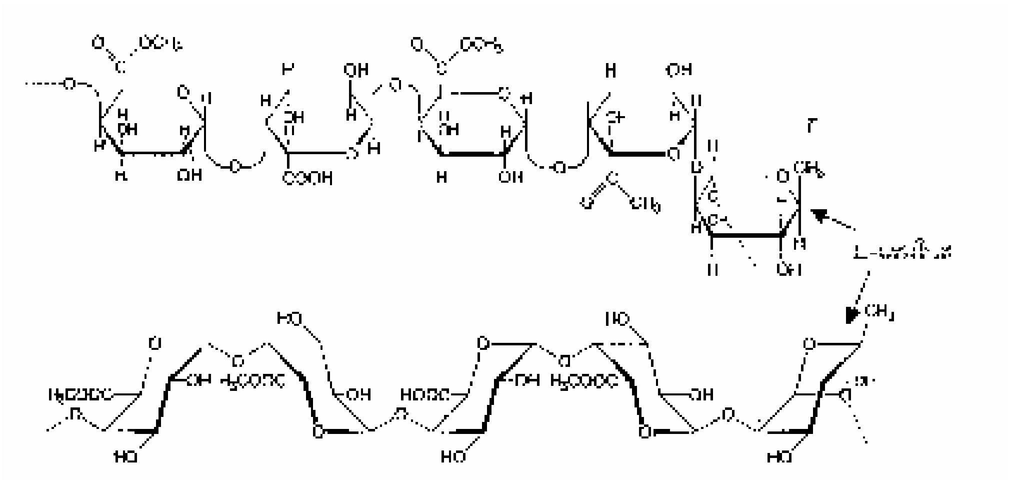
ลิกนินเป็นโพลิเมอร์แบบวง (aromatic polymer) ที่มีมากที่สุดในโลก ลิกนินจะเกิดจากการสร้างพันธะแบบสุ่มของ โคนิเฟอริล แอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) ซินาฟิล แอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) และ พี-โคลมาริล แอลกอฮอล์ (p-coumary alcohol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่ได้มาจาก พี-ไฮดรอกซิลไซนามาย แอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสร้างลิกนิน (Glazer และ Nikaido,1995)

2.3.4 สารเพกทิก และเพกทิน (Pectic substance and Pectin) (วรรณา ตุลยธัญ, 2549)

สารกลุ่มเพกทิกคือกลุ่มของโพลิแซ็กคาไรด์ในพืชชั้นสูงมีกรด D-กาแลกทูโรนิกเป็นโมโนเมอร์ต่อกันเป็นโซ่ยาว ในกลุ่มนี้จะประกอบด้วยโพรโทเพกทิน (protopectin) เพกทิน (pectin) กรดเพกทินิก (pectinic acid) และกรดเพกทิก (pectin acid) ซึ่งสารในกลุ่มเพกทินนี้มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ โดยโมเลกุลของเพกทินประกอบขึ้นจากกรด α-D-กาแลกโทไพแรโนซิลยูโรนิก ต่อเชื่อมกันเป็นสายโซ่ตรง และยาว โดยจับระหว่างกันด้วยพันธะ α-1,4-ไกลโคซิดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพอลิกาแลกทูโรแนนของเพกทิน (Coultate, 2002)

เพกทินทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้าง พบในพืชทุกชนิดโดยเฉพาะที่ผนังเซลล์ และที่ระหว่างเซลล์ (intercellular) มีมากในผลไม้หลายชนิด ตัวอย่างเช่นเปลือกส้มและมะนาวจะมีสูงร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนัก แอปเปิลประมาณร้อยละ 15 ในพืชเพกทินทำหน้าที่เปรียบเหมือนซีเมนต์เชื่อมยึดติดเซลล์ต่างๆ ของเนื้อเยื่อไว้ ทำให้ผลไม้คงรูปอยู่ได้ ทำให้ผลไม้มีลักษณะเนื้อสัมผัสแน่น

2.4 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อทำลายลิกโนเซลลูโลสในชีวมวล (Hendriks และ Zeeman, 2008)

ชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ (lignocellulosic biomass) เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) หรือเอทานอล (ethanol) ได้ยาก เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถย่อยสลายด้วยจุลชีพในระบบไร้อากาศ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ปริมาณลิกนิน ระดับโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ขนาดของชีวมวล และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นกระบวนการบำบัดเบื้องต้นไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพ เคมี และ/หรือชีวภาพต่างมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบให้สามารถย่อยสลายได้มากขึ้น อันเป็นผลให้ชีวมวลนั้นมีศักยภาพในการนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ และ/หรือเอทานอลเพิ่มขึ้น

2.4.1 การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ (Mechanical pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพคือการลดขนาดชีวมวล (size reduction) เป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อลดขนาดโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสซึ่งมีลักษณะเป็นมัดเส้นใยของโครงสร้างผลึก และลดระดับโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส เป็นผลให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น ทำให้จุลชีพ และ/หรือเอนไซม์สามารถสัมผัสกับเซลลูโลสได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการลดระยะเวลาในขั้นตอนไฮโดรไลซีส (hydrolysis) ของชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไฮโดรไลซีสของชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการลดขนาด อุปกรณ์ และระยะเวลาที่ใช้ในการลดขนาดอีกด้วย (Chynoweth และ Isaacson, 1989)

2.4.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน (Thermal pretreatment)

ชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบเมื่อถูกความร้อนประมาณ 150-180 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินบางส่วนจะเริ่มละลาย เนื่องจากกลูโคแมนแนน (glucomannans) และไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นโพลิแซกคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสจะสูญเสียเสถียรภาพ ณ อุณหภูมิ 150-180 องศาเซลเซียส และกลายเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งกรดอินทรีย์นี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในขั้นตอนไฮโดรไลซีสของเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า จะเป็นผลให้เกิดการละลายของลิกนินเป็นสารประกอบของฟีนอล (phenolic compounds) และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะได้เฟอร์ฟูรอล (furfural) ซึ่งเป็นสารยับยั้งการทำงาน (inhibitor) ของแบคทีเรีย ยีสต์ และจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และอาจสามารถเกิดการสร้างผลึกใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้อีกด้วย

2.4.2.1 การบำบัดด้วยไอน้ำ และการระเบิดด้วยไอน้ำ
(Steam pretreatment and Steam explosion)

การบำบัดด้วยไอน้ำ และการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นการนำชีวมวลบรรจุลงในถังปฏิกิริยาที่มีความดัน และไอน้ำอุณหภูมิสูง (ประมาณ 240 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า) แล้วจึงทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มมัดของเซลลูโลสภายในชีวมวลเกิดการละลาย ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บางส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่ถูกละลายจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดอินทรีย์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสระหว่างทำการบำบัดด้วยไอน้ำ หรือการระเบิดด้วยไอน้ำได้อีกด้วย

ข้อแตกต่างระหว่างการบำบัดชีวมวลด้วยวิธีการบำบัดด้วยไอน้ำ และวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำคือ วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำจะลดอุณหภูมิของชีวมวลที่ทำการบำบัดโดยใช้วิธีลดความดันลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการระเบิดของน้ำภายในชีวมวล ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสภายในชีวมวล

2.4.2.2 การบำบัดด้วยน้ำร้อน (Liquid hot water)

การบำบัดด้วยน้ำร้อนจะแตกต่างจากการบำบัดด้วยไอน้ำ และการระเบิดด้วยไอน้ำที่การใช้น้ำร้อนแทนไอน้ำ เพื่อที่จะให้น้ำร้อนทำหน้าที่เป็นตัวละลาย และชะล้างสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเนื่องจากความร้อน เป็นผลให้พื้นผิวสัมผัสเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้น้ำร้อนจะมีส่วนช่วยในการชะล้างสารพิษที่เกิดขึ้นระหว่างทำการบำบัดด้วยความร้อนได้อีกด้วย แต่การบำบัดด้วยน้ำร้อนจำเป็นต้องควบคุมความเป็นกรด-ด่างระหว่างทำการบำบัดให้อยู่ในช่วง 4 ถึง 7 เพื่อป้องกันการสร้างผลึกใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอล

ในแง่ของความเหมาะสมในการบำบัดชีวมวลเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอล การบำบัดด้วยน้ำร้อนจะดีกว่าการบำบัดด้วยไอน้ำ และการระเบิดด้วยไอน้ำในเรื่องของการลดความเสี่ยงในการสร้างผลึกใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และลดความเข้มข้นของสารพิษที่เกิดขึ้นระหว่างทำการบำบัดด้วยความร้อน

2.4.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรด (Acid pretreatment)

การบำบัดชีวมวลที่ลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วยสารละลายกรด ณ อุณหภูมิห้อง มีจุดประสงค์เพื่อทำลายเฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มมัดของเซลลูโลสภายในชีวมวลเกิดการละลาย ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดสามารถทำได้ทั้งการใช้สารละลายกรดเข้มข้น (strong acid pretreatment) และสารละลายกรดเจือจาง (dilute acid pretreatment)

การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวหลักของการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดคือการสลายตัวของกลูโคแมนแนน (glucomannans) และไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นโพลิแซกคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในสภาวะที่เป็นกรด แต่ข้อควรระวังของการบำบัดชีวมวลด้วยสารละลายกรดคืออาจเกิดสารพิษ เช่น เฟอร์ฟูรอล ใน

ระหว่างทำการบำบัดด้วยสารละลายกรด และการสร้างผลึกใหม่ของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส โดยการบำบัดด้วยสารละลายกรดเข้มข้นจะมีโอกาสในการเกิดการตกตะกอน และสร้างผลึกใหม่ของน้ำตาลมากกว่าการบำบัดด้วยสารละลายกรดเจือจาง นอกจากนี้การใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ในการบำบัดชีวมวลที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพจะส่งผลให้สัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงหรือไม่มี เนื่องจากเกิดการแย่งรับอิเล็กตรอนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) และไนเตรท (NO^{3-}) ในสภาวะไร้อากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) แทน

2.4.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง (Alkaline pretreatment)

การบำบัดชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วยสารละลายด่างจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของโพลิแซกคาไรด์ในเฮมิเซลลูโลส และเกิดการพองของชีวมวล นอกจากนี้สารละลายด่างยังสามารถสลายลิกนิน และเปลี่ยนแปลงการจัดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในชีวมวล เป็นผลให้ความหนาแน่นของโครงสร้างผลึกภายในชีวมวลที่ถูกบำบัดด้วยสารละลายด่างลดลง ทำให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของชีวมวลเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดการสูญเสียอินทรีย์คาร์บอนจากการสลายตัวของสารละลายน้ำตาลที่เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสระหว่างทำการบำบัดชีวมวลด้วยสารละลายด่าง และการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจากการบำบัดด้วยสารละลายด่างอาจก่อให้เกิด เฟอร์ฟูรอล ซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้งการทำงานของยีสต์ในกระบวนการผลิตเอทานอล แต่ส่งผลกระทบต่ำต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนในกระบวนการไร้อากาศ ดังนั้นวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างจึงเหมาะกับการการบำบัดชีวมวลที่จะนำไปวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่านำไปผลิตเอทานอล

2.4.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยตัวออกซิไดซ์ (Oxidative pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยตัวออกซิไดซ์เป็นการเติมตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และอะซิติกเพอร์ออกไซด์ ($C_2H_4O_3$) ลงในชีวมวลที่อยู่ในน้ำ โดยมีจุดประสงค์ที่จะทำลายเฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล เพื่อให้พื้นผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสในชีวมวลเพิ่มขึ้น แต่การบำบัดชีวมวลด้วยวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยตัวออกซิไดซ์มักทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำตาลจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) เนื่องจากตัวออกซิไดซ์ที่ใช้เป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-selective oxidizing agent) ซึ่งทำให้ไม่เกิดความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการบำบัด

เบื้องต้นด้วยวิธีนี้ นอกจากนี้การสลายตัวของลิกนินด้วยตัวออกซิไดซ์ก่อให้เกิดสารประกอบของลิกนินที่มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของจุลชีพที่ใช้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอล

2.4.6 การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการผสมผสาน (Combinations pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการผสมผสานเป็นวิธีการบำบัดที่ผสมผสานกระบวนการบำบัดชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบวิธีต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้น

2.4.6.1 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายกรด (Thermal pretreatment in combination with acid pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายกรดเป็นวิธีการปรับปรุงกระบวนการบำบัดด้วยความร้อนด้วยการเติมสารละลายกรด เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล โดยมีหลักการทำงานเหมือนการบำบัดด้วยไอน้ำคือทำการบำบัดที่อุณหภูมิและความดันสูง เพียงแต่มีการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เข้าไปในไอน้ำที่ใช้ในการบำบัด เป็นผลให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเวลาต่อมา การบำบัดด้วยไอน้ำผสมซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีข้อได้เปรียบกว่าการบำบัดด้วยสารละลายด่างตรงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย (Chynoweth และ Isaacson, 1989) แต่การบำบัดด้วยวิธีนี้ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดของเฟอร์ฟูรอล ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของจุลชีพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอล (Grohmann และคณะ, 1985)

2.4.6.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายด่าง (Thermal pretreatment in combination with alkaline pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายด่างมีหลักการทำงานเหมือนการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายกรด เพียงแต่ใช้สารละลายด่างแทนสารละลายกรดในการบำบัด โดยทั่วไปแล้วการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และสารละลายด่างทำ ณ อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส และมีการเติมปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ในสัดส่วน 0.1 กรัม ของปูนขาว ต่อ 1 กรัม ของชีวมวล (Chang และคณะ, 2001) โดยการบำบัดชีวมวลด้วยวิธีนี้เป็นผลให้เกิดการสลายตัวของลิกนินในชีวมวลที่ถูกบำบัด แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายด่างไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของชีวมวลที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงได้ (Kaar และ Holtzapple, 2000)

ข้อดีของการใช้สารละลายด่างในการบำบัดชีวมวลด้วยวิธีนี้คือ สารเคมีราคาถูก และปลอดภัย นอกจากนี้การนำหินปูนกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายหลังการบำบัด และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูน ($CaCO_3$) ซึ่งไม่ละลายน้ำ แล้วจึงนำไปเผาเพื่อให้ได้ปูนขาว

2.4.6.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์

(Thermal pretreatment in combination with oxidative pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์เป็นการนำชีวมวลที่ต้องการบำบัดไปแช่ในตัวออกซิไดซ์ เช่น อะซิติกเพอร์ออกไซด์ ก่อนนำไปบำบัดด้วยไอน้ำ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์จะไม่ใช่น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหมือนผลิตภัณฑ์ที่ได้จาการบำบัดชีวมวลด้วยไอน้ำ หรือการบำบัดด้วยสารละลายกรด นอกจากนี้สารประกอบของฟีนอลที่เกิดขึ้นระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์จะสลายตัวเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) เป็นผลให้ปริมาณของเฟอร์ฟูรอลที่เกิดระหว่างการบำบัดมีปริมาณต่ำ แต่อย่างไรก็ตามยังมีการสลายตัวของน้ำตาลระหว่างการบำบัดด้วยวิธีนี้อยู่

2.4.6.4 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์แบบด่าง

(Thermal pretreatment in combination with alkaline oxidative)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์แบบด่างมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับการบำบัดชีวมวลด้วยความร้อน และสารละลายด่าง แต่มีการเติมออกซิเจน (O_2) เป็นทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) การบำบัดชีวมวลด้วยวิธีนี้ทำให้การสูญเสียน้ำตาลระหว่างการบำบัดน้อย และพบว่าชีวมวลที่ถูกนำไปบำบัดเบื้องด้วยวิธีนี้มีความสามารถที่จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์มากขึ้นถึง 13 เท่าของชีวมวลที่ไม่ได้ทำการบำบัดเบื้องต้น แต่วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และตัวออกซิไดซ์แบบด่างใช้ไม่ได้ผลกับชีวมวลที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (Chang และคณะ, 2001)

2.4.6.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ (Ammonia and carbon dioxide pretreatment)

การบำบัดเบื้องต้นด้วยแอมโมเนียมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับวิธีการบำบัดด้วยไอน้ำคือทำการบำบัดที่อุณหภูมิ และความดันสูง แต่จะมีการนำชีวมวลไปแช่ในแอมโมเนียเหลวก่อนทำการบำบัดด้วยไอน้ำ ซึ่งแอมโมเนียมีคุณสมบัติในการทำให้เส้นใยเซลลูโลสขยายตัว และเมื่อทำการลดความดันของระบบลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้เกิดการระเหยของแอมโมเนีย (NH_3) จะทำให้โครงสร้างโพลิเมอร์ในชีวมวลเกิดการแตกหัก

การบำบัดเบื้องต้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการบำบัดชีวมวลด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในสภาวะที่มีความดัน และอุณหภูมิสูง (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) เป็นผลให้เกิดของเหลวที่มีสภาพเป็นกรดเกิดขึ้นระหว่างทำการบำบัด อันเป็นผลมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นสามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสภายในชีวมวลได้

2.4.7 การบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนทางชีวภาพ และการใช้เอนไซม์ (Biological pretreatment and enzymatic pretreatment)

ลิกโนเซลลูโลสเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ที่มีความสลับซับซ้อน และจุลชีพในระบบไร้อากาศไม่สามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงหมายถึงการใช้จุลชีพชนิดเจาะจงในการย่อยสลายลิกนินในชีวมวล เช่น การใช้ *Lentinus edodes* ซึ่งเป็นเชื้อราชนิดหนึ่งในกลุ่มเชื้อราสีขาว (white–rot fungi) ที่มีความสามารถในการย่อยสลายลิกนินเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน แต่เชื้อราสีขาวกลุ่มนี้ไม่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสได้ หรือการใช้ *Phanerochaete chrysosporum* ซึ่งเป็นราชนิดหนึ่งที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ในสภาวะที่มีอากาศ เป็นต้น (Chynoweth และ Isaacson, 1989)

ต่อมาจึงเริ่มมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำลายสารลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ชนิดต่างๆ เพื่อให้ชีวมวลที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอลมีศักยภาพในการผลิตผลิตก๊าซชีวภาพ และเอทานอลมากขึ้น ถึงแม้การใช้เอนไซม์จะมีประสิทธิภาพในการสลายโครงสร้างโพลิเมอร์ในชีวมวลสูงมาก แต่เมื่อพิจารณาความคุ้มทุนในทางเศรษฐศาสตร์จึงมีความเป็นไปได้น้อยในการนำมาใช้จริง (Chynoweth และ Isaacson, 1989)

วิธีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อทำลายลิกโนเซลลูโลสในชีวมวลมีหลายวิธีดังที่กล่าวไปข้างต้น นอกจากนี้แต่ละวิธียังมีผลกระทบต่อโครงสร้างของชีวมวลแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และการจะเลือกใช้วิธีการใดนั้นต้องพิจารณาถึงชนิดหรือประเภทของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวลที่ต้องการทำการบำบัดเบื้องต้น จุดประสงค์ในการบำบัดชีวมวลไปเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพหรือเอทานอล ฯลฯ เพราะผลพลอยได้ (by-product) ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดบางวิธีมีสารพิษที่ยับยั้งการทำงานของจุลชีพในกระบวนการผลิตเอทานอล และต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการบำบัดชีวมวล

ตารางที่ 2.5 แสดงผลทางกายภาพ และเคมีของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ (Hendriks และ Zeeman, 2008)

	Increase accessible Surface area	Decrystalization cellulose	Solubilization hemicellulose	Solubilization lignin	Formation furfural / HMF	Alteration lignin structure
Mechanical	major effect	major effect				
Steam treatment / steam explosion	major effect		major effect	minor effect	major effect	major effect
LHW (batch)	major effect	not determined	major effect	minor effect	minor effect	minor effect
LHW (flow through)	major effect	not determined	major effect	major /minor	minor effect	minor effect
Acid	major effect		major effect	minor effect	major effect	major effect
Alkaline	major effect		minor effect	major /minor	minor effect	major effect
Oxidative	major effect		major effect	major /minor	minor effect	major effect
Thermal + acid	major effect	not determined		major /minor	major effect	major effect
Thermal + alkaline (lime)	major effect	not determined	minor effect	major /minor	minor effect	major effect

ตารางที่ 2.5 แสดงผลทางกายภาพ และเคมีของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ (Hendriks และ Zeeman, 2008) (ต่อ)

	Increase accessible Surface area	Decrystalization cellulose	Solubilization hemicellulose	Solubilization lignin	Formation furfural / HMF	Alteration lignin structure
Thermal + oxidative	major effect	not determined	minor effect	major /minor	minor effect	major effect
Thermal + alkaline + oxidative	major effect	not determined	minor effect	major /minor	minor effect	major effect
Ammonia (AFEX)	major effect	major effect	minor effect	major effect	minor effect	major effect
CO_2 explosion	major effect		major effect			

2.5 กลไกพื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2546)

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมีกลุ่มจุลชีพอาศัยอยู่ร่วมกันหลายกลุ่ม สารอินทรีย์ที่เข้าสู่กระบวนการไร้อากาศจะถูกเปลี่ยนรูปเนื่องจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายโดยกลุ่มจุลชีพกลุ่มต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายของกลุ่มจุลชีพหนึ่งจะถูกย่อยสลายต่อโดยกลุ่มจุลชีพอีกกลุ่มหนึ่ง กลุ่มจุลชีพหลายกลุ่มที่อาศัยอยู่ร่วมกัน และมีปฏิสัมพันธ์กันเหล่านี้เองที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) และเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในของเสียให้อยู่ในรูปต่างๆ เช่น กรดอินทรีย์ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แต่สารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศจะถูกใช้โดยจุลชีพกลุ่มใด และถูกใช้ไปในสัดส่วนเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมซึ่งจะส่งผลให้จุลชีพกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งโดดเด่นที่สุดในระบบถ้าหากพิจารณาในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยทั่วไปที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทน จุลชีพกลุ่มที่โดดเด่นที่สุดในระบบก็คือจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน และจุลชีพกลุ่มสร้างกรดที่ทำงานร่วมกันได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทน

2.5.1 จุลชีววิทยาของกระบวนการไร้อากาศ

กระบวนการไร้อากาศเป็นกระบวนการที่มีจุลชีพอาศัยอยู่ร่วมกันหลายกลุ่ม โดยปฏิสัมพันธ์ของจุลชีพเหล่านี้มีทั้งการพึ่งพาอาศัยกัน และแข่งขันกัน จุลชีพในระบบไร้อากาศสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

2.5.1.1 จุลชีพกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic microorganism)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไร้อากาศ กรดจะถูกผลิตขึ้นโดยจุลชีพไม่ใช้อากาศชนิดเด็ดขาด (obligate anaerobes) มากกว่าชนิดใช้อากาศได้บางส่วน (facultative) ทั้งนี้เพราะจุลชีพไม่ใช้อากาศชนิดเด็ดขาดมีเมตาบอลิซึม (metabolism) หลายแบบจึงสามารถใช้สารอาหารที่เป็นแป้งหรือโปรตีนได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการย่อยสลายที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น (Finchel และ Finlay, 1995)

2.5.1.2 จุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic microorganism) ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยจุลชีพกลุ่มสร้างกรดมีหลายชนิด และบางผลิตภัณฑ์เป็นสารโมเลกุลใหญ่ ซึ่งจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganism) ไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายที่

จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งจุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติกสามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.5.1.3 จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic microorganism)

จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนสามารถจำแนกประเภทตามสารอาหารที่ใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetoclastic methanogenesis) เป็นจุลชีพกลุ่มที่ใช้กรดอะซิติก (CH_3COOH) เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการสร้างมีเทน และการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากจุลชีพกลุ่มนี้ ตามปฏิกิริยา

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (hydrogenotrophic methanogenesis) คือจุลชีพกลุ่มนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ตามปฏิกิริยา

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$$

จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนจากสารตั้งต้นอื่น เช่น กรดฟอร์มิค หรือเมธานอล ซึ่งปฏิกิริยาของจุลชีพในกลุ่มนี้เกิดขึ้นน้อยมาก

2.5.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

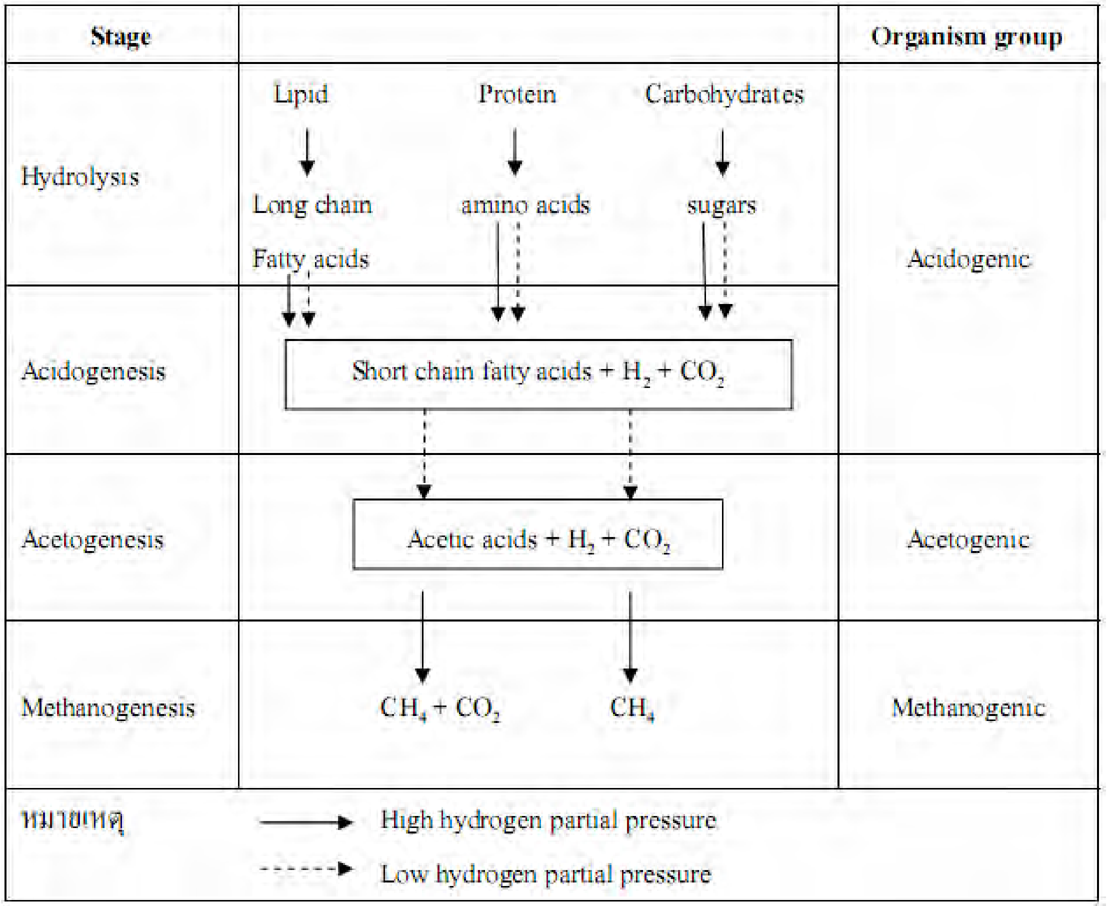
ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายด้วยน้ำหรือไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

โดยขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์แสดงดังรูปที่ 2.6



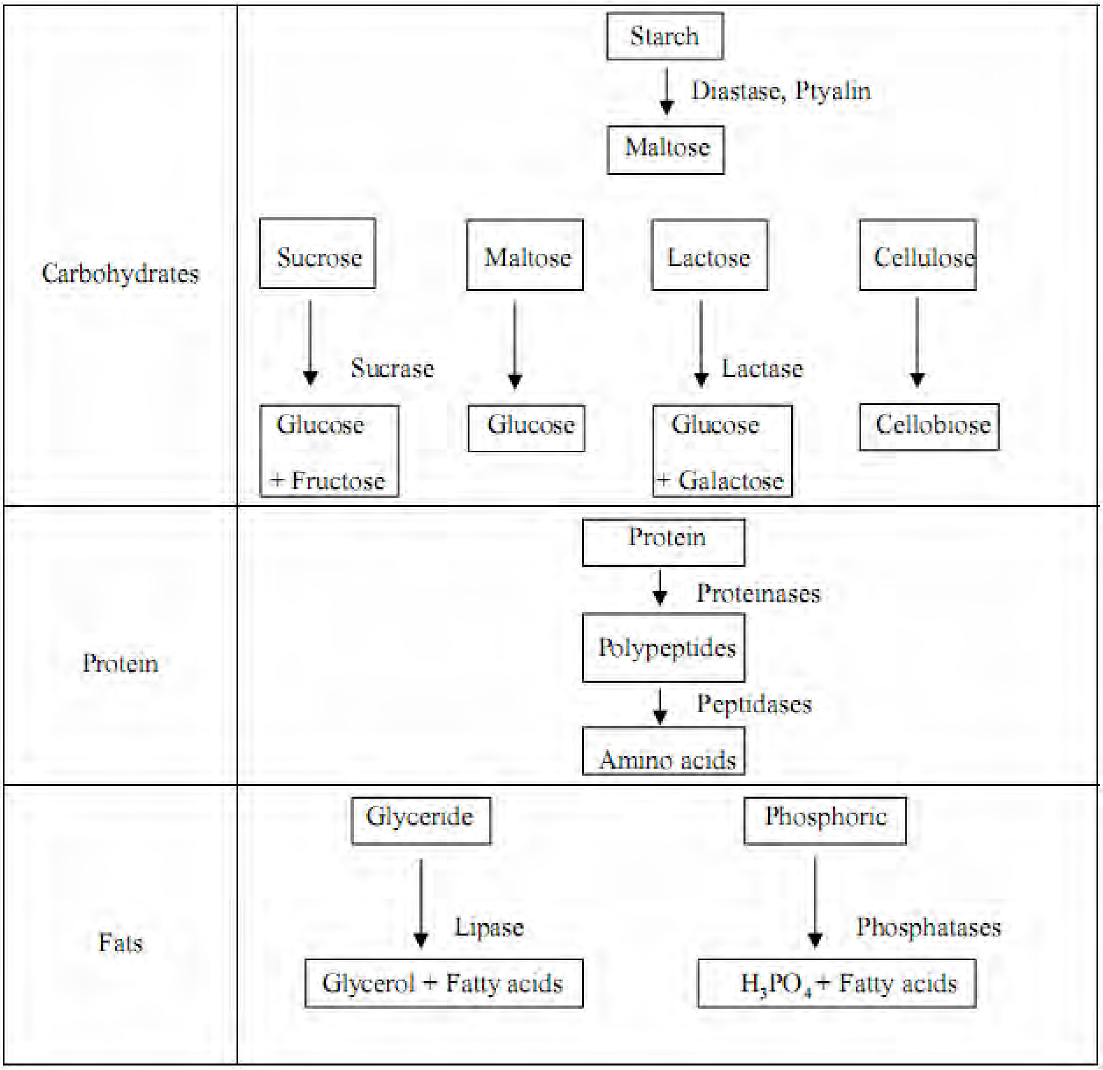
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ (Sam-soon และคณะ, 1990)

2.5.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายด้วยน้ำหรือไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

จุลชีพในระบบไร้อากาศใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน แต่การนำเอาสารอินทรีย์ไปใช้ของจุลชีพจะต้องขนส่งสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์เสียก่อน จากนั้นจึงจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นภายในเซลล์ และได้พลังงานในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต ดังนั้นสารอินทรีย์ขนาดใหญ่จะไม่สามารถขนส่งเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงเสียก่อน

การย่อยสลายด้วยน้ำหรือไฮโดรไลซีสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ให้มีขนาดเล็กลงโดยจุลชีพหลายจำพวกซึ่งจุลชีพส่วนใหญ่เป็นจุลชีพกลุ่มสร้างกรดด้วยการผลิตเอนไซม์ขึ้นภายในเซลล์และปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์ ซึ่งจะลดพลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่เอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยา และตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นจุลชีพต้องสร้างเอนไซม์ที่ใช้ได้เฉพาะกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย เช่น ต้องใช้อะไมเลส (amylase) ย่อยสลายแป้งและไกลโคเจนให้เป็นน้ำตาล หรือใช้เอนไซม์ไลเปส (lipase) ย่อยสลายไขมัน และไลปิด

ให้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมัน หรือต้องใช้เอนไซม์โปรตีเนส (proteinase) และเปปติเดส (peptidase) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ชนิดของสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซีส และเอนไซม์ที่ใช้

(Sawyer และ McCarty, 1993)

ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยน้ำเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างช้า และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ความเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมี ความเข้มข้นเอนไซม์ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน

2.5.2.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนไฮโดรไลซีสจะเป็นสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ตั้งต้น จากนั้นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจะถูกจุลชีพกลุ่มสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานโดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) ภายในเซลล์แล้วเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก เป็นต้น ซึ่งการที่จะเกิดกรดไขมันระเหยชนิดใดนั้นจะขึ้นอยู่กับความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ถ้าหากระบบมีความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจนสูงจะเกิดกรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริกมาก แต่ในการผลิตมีเทนจากระบบไร้อากาศต้องการให้ระบบมีความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจนต่ำ เพื่อให้เกิดกรดอะซิติกมาก เพราะกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาหลักของการสร้างมีเทน

2.5.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นอาหารของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน แต่เนื่องจากจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริกเป็นอาหารได้ จึงต้องอาศัยจุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติกทำการย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก เพื่อให้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นอาหารได้ โดยในขั้นตอนนี้จะเกิดไฮโดรเจนด้วย

2.5.2.4 ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน แล้วจึงได้ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนสารอื่นนอกเหนือจากกรดอะซิติก และไฮโดรเจนแล้ว จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนบางชนิดอาจใช้สับเสตรท (substrate) อย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตก๊าซมีเทน เช่น เมทธานอล และกรดฟอร์มิก (HCOOH)

2.6 ถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic digester)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศโดยทั่วไปสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติเมื่อเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ มีความชื้น และจุลชีพในระบบไร้อากาศ (anaerobic microorganisms) ที่เพียงพอ ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) เมื่อทำการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากก๊าซชีวภาพแล้วสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่เหลือหลังจากสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสามารถนำไปใช้เป็นสารบำรุงดิน (soil conditioner material) ได้อีกด้วย

ในปัจจุบันมีการทำการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศภายในถังปฏิกิริยา ซึ่งระบบปิด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของมลสารออกสู่สิ่งแวดล้อม กักเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ง่ายต่อการควบคุม และปรับปรุงอัตราการย่อยสลายเพื่อให้ได้มีเทนสูงขึ้น

2.6.1 รูปแบบของถังหมักไร้อากาศ

ถังหมักไร้อากาศถูกพัฒนารูปแบบอย่างต่อเนื่องจากถังปฏิกิริยาที่เป็นถังหมักธรรมดาจนถึงถังปฏิกิริยาที่มีอัตราการย่อยสลายสูง (high-rate digester) โดยมีเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของถังหมักไร้อากาศดังต่อไปนี้

2.6.1.1 จำแนกตามปริมาณของแข็งในถังหมักไร้อากาศ (wet or dry digester) โดยถังหมักไร้อากาศแบบเปียก (wet anaerobic digester) คือถังหมักที่มีปริมาณของแข็งในสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยปริมาตรของถังปฏิกิริยา ส่วนถังหมักไร้อากาศแบบแห้ง (dry anaerobic digester) จะมีปริมาณของแข็งในสารอินทรีย์สูงถึงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยปริมาตรของถังปฏิกิริยา

2.6.1.2 จำแนกตามลักษณะการเติมสารอินทรีย์ให้แก่ถังหมักไร้อากาศ (batch or continuous digester) โดยถังหมักไร้อากาศแบบทีละเท (batch anaerobic digester) คือถังหมักที่มีการบรรจุสารอินทรีย์ และจุลชีพในระบบไร้อากาศลงในถังปฏิกิริยาแล้วรอให้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสิ้นสุดจึงทำการเปิดถังปฏิกิริยา และนำสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายออกจากถังปฏิกิริยาก่อนทำการเติมสารอินทรีย์เพื่อเริ่มการย่อยสลายรอบใหม่

ถังหมักไร้อากาศแบบต่อเนื่อง (continuous anaerobic digester) คือถังหมักไร้อากาศที่มีการเติมสารอินทรีย์ที่ต้องการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องให้แก่ถังปฏิกิริยา โดยสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายจะถูกนำออกทางก้นถังปฏิกิริยาทาง

2.6.1.3 จำแนกตามขั้นตอนระหว่างการย่อยสลาย (single step or multi-step digester) ซึ่งถังหมักไร้อากาศแบบหลายขั้นตอน (multi-step anaerobic digester) คือถังหมักไร้อากาศที่มีการแบ่งขั้นตอน และเลือกปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดในแต่ละถังปฏิกิริยา โดยใช้ปัจจัยต่างๆ เช่น สารอาหาร ชนิดของจุลชีพ และอุณหภูมิ เป็นต้น ในการแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายเพื่อให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (two-phase anaerobic digester) คือถังหมักไร้อากาศที่มีการแยกกระบวนการสร้างกรดและกระบวนการสร้างมีเทนออกจากกันโดยใช้ถังหมัก 2 ถัง แต่ละถังมีการเติมอาหาร และปรับสภาวะให้เหมาะสมในแต่ละกระบวนการ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่าถังหมักที่กระบวนการสร้างกรด และกระบวนการสร้างมีเทนรวมอยู่ในถังปฏิกิริยาใบเดียวกัน (single-step anaerobic digester)

2.6.1.4 กระบวนการย่อยสลายร่วม (co-digestion with animal manure) คือกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีการผสมมูลสัตว์ เช่น มูลสุกร มูลวัว มูลไก่ ฯลฯ ร่วมกับขยะอินทรีย์ (municipal solid waste) เพื่อปรับปรุงสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่าการหมักขยะอินทรีย์เพียงอย่างเดียว

นอกจากการจำแนกรูปแบบของถังหมักอากาศดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีถังหมักไร้อากาศรูปแบบอื่นที่ได้รับความสนใจจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากถังหมักไร้อากาศที่จะกล่าวต่อไปนี้มีอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์สูง

ถังหมักไร้อากาศแบบแห้งที่มีการเติมสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง (dry continuous anaerobic digester) เป็นถังหมักไร้อากาศที่มีการเติมสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 โดยปริมาตร อย่างต่อเนื่อง และมีการเติมน้ำให้แก่ถังหมักไร้อากาศระหว่างเดินระบบ โดยทั่วไปจะเดินระบบที่อุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 65 องศาเซลเซียส (Thermophilic temperature)

ถังหมักไร้อากาศแบบแห้งที่มีการเติมสารอินทรีย์แบบทีละเท (dry batch anaerobic digester) เป็นถังหมักไร้อากาศที่มีการเติมสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งประมาณ

ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยปริมาตร และมีการหมุนเวียนน้ำชะขยะที่เกิดจากความชื้นภายในสารอินทรีย์และน้ำที่เติมให้แก่ถังหมักไร้อากาศ จากก้นถังปฏิกิริยา เพื่อให้จุลชีพภายในระบบได้รับอาหารอย่างทั่วถึง และเพิ่มการกระจายตัวของจุลชีพภายในถังปฏิกิริยา

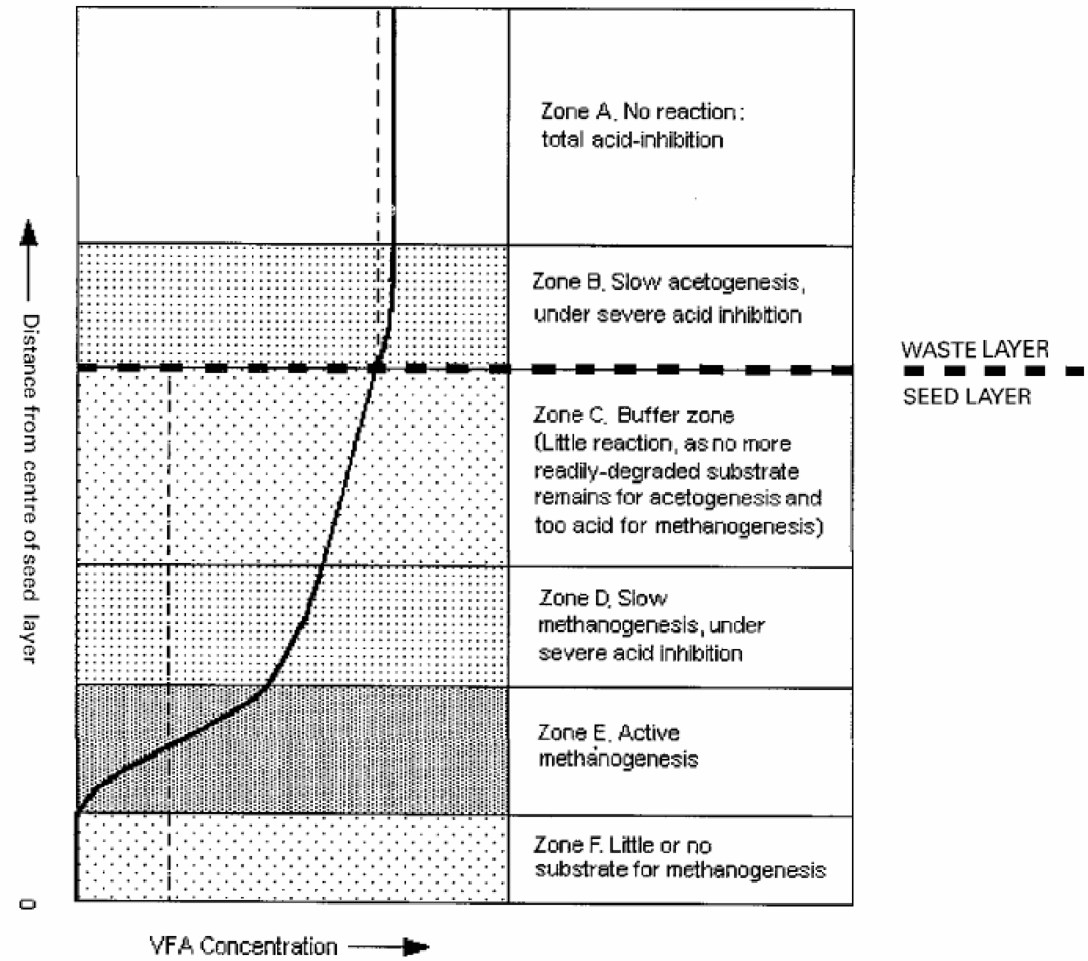
ถังหมักไร้อากาศแบบลำดับขั้น (sequential batch anaerobic composting) มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับถังหมักไร้อากาศของแข็งปริมาณสูงแบบทีละเท เพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนน้ำชะขยะระหว่างถังหมักไร้อากาศที่เข้าสู่ขั้นตอนการสร้างมีเทน และถังหมักไร้อากาศที่เริ่มหมัก เพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ในถังปฏิกิริยาที่เริ่มหมัก และลดการสะสมตัวของกรดไขมันระเหยภายในถังปฏิกิริยาที่เข้าสู่ขั้นตอนการสร้างมีเทน

ถังหมักไร้อากาศแบบเปียกขั้นตอนเดียว (wet continuous single-step anaerobic digester) จะรับสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร โดยอาศัยการเติมน้ำ มูลสัตว์ หรือสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย สารอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายด้วยถังหมักไร้อากาศประเภทนี้ต้องทำการรีดน้ำออกก่อนนำไปฝังกลบ หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

ถังหมักไร้อากาศแบบเปียกหลายขั้นตอน (wet continuous multi-step anaerobic digester) เป็นระบบที่มีถังปฏิกิริยาต่อกันเป็นชุด โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแยกกระบวนการสร้างกรดและกระบวนการสร้างมีเทนให้เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกิริยา ส่วนสารอินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายมีลักษณะเหมือนที่ใช้ในถังหมักไร้อากาศแบบเปียกขั้นตอนเดียว

2.6.2 การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ (Martin, 2001)

ถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ (solid-state / high-solid anaerobic digester with leachate recicurlation) คือถังหมักไร้อากาศที่มีปริมาณของแข็งภายในถังปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร หรือสูงกว่า ซึ่งยากแก่การกวนผสม (mixing) ให้สารอินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) แต่จะมีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ (leachate recirculation) จากก้นถังปฏิกิริยากลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีส่วนช่วยในการสร้างความเป็นเนื้อเดียวกัน และเร่งอัตราการย่อยสลายแบบไร้อากาศ แต่ความสามารถในการอุ้มน้ำ (field capacity) ของสารอินทรีย์ ทำให้การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) ภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงอาศัยการแพร่ (diffusion) และการพา (convection) เป็นหลัก ดังนั้นจึงยากที่จะทำการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการเกิดปฏิกิริยาภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงได้ แต่สามารถอธิบายรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศของถังหมักประเภทนี้อย่างง่าย โดยอาศัยลักษณะของถังปฏิกิริยาซึ่งเป็นแบบท่อไหล (plug flow) ในแนวดิ่ง และการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน และความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในแต่ละตำแหน่งภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง (Martin, 2001)

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงมีการแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ตามความลึกของถังปฏิกิริยา โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ส่วน A เป็นบริเวณที่มีสภาวะเป็นกรด เนื่องจากบริเวณนี้เต็มไปด้วยกรดไขมันระเหยจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ (rapidly biodegradable) กลุ่มจุลชีพหลักในบริเวณนี้คือจุลชีพกลุ่มไฮโดรไลซีส และจุลชีพกลุ่มสร้างกรด ส่วนปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนยังไม่เกิดในบริเวณนี้เนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม

ส่วน B เป็นบริเวณที่ยังคงมีสภาวะเป็นกรดสูง เนื่องจากเป็นชั้นตัวกลาง (intermediate zone) ที่จุลชีพกลุ่มสารกรด (acidogenic microorganism) เริ่มทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นกรดไขมันระเหย ในบริเวณนี้อาจเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติก (inhibited acetogenesis zone) เนื่องจากสภาพความเป็นกรดภายในบริเวณนี้ แต่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในบริเวณนี้จะเริ่มลดลงเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสารของกรดไขมัน

ระเหยโดยการแพร่ และการพาเข้าสู่ส่วน C ส่วนปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนยังคงไม่เกิดในบริเวณนี้

ส่วน C เป็นส่วนบัฟเฟอร์ (buffer zone) ของถังปฏิกิริยา โดยเริ่มมีการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ให้กลายเป็นกรดอะซิติก โดยจุลชีพกลุ่มสร้างกรดอะซิติก (acetogenic microorganism) ในบริเวณนี้ นอกจากนี้บริเวณนี้ยังเป็นส่วนที่มีการปรับให้อัตราการใช้กรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganism) สมดุลกับปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดจากกระบวนการสร้างกรดโดยอาศัยการแพร่ และการพาของกรดไขมันระเหยซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการสร้างมีเทน

ส่วน D เป็นบริเวณที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนเริ่มมีการใช้กรดไขมันระเหยที่แพร่มากจากส่วนบัฟเฟอร์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนยังต่ำ และอาจเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนในบริเวณนี้ (inhibited methanogenesis zone)

ส่วน E เป็นบริเวณที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ดี และปริมาณกรดไขมันระเหยในบริเวณนี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากถูกใช้โดยจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน

ส่วน F เป็นบริเวณที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนต่ำเนื่องจากสารอินทรีย์ที่จุลชีพในระบบไร้อากาศสามารถนำมาใช้ได้เริ่มขาดแคลน และเมื่อเฟสของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศผ่านไปสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยาเริ่มจะเริ่มเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในบริเวณ B จะถูกใช้โดยจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนในบริเวณ D และ E ดังนั้นขั้นตอนจำกัดความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้คือขั้นตอนไฮโดรไลซีสของสารที่ไม่ย่อยสลาย (inert / recalcitrant substrate) และ/หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ (non-biodegradable substance) นอกจากนี้สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในบริเวณนี้จะไม่สามารถย่อยสลายต่อได้อีกแล้ว (stabilized waste)

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของถังหมักไร้อากาศ

จุลชีพในระบบไร้อากาศนั้นอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยา โดยเฉพาะจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่ำ และสามารถเจริญเติบโตได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นในการเดินระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศควรคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

2.7.1 ลักษณะ และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เติมให้แก่ถังหมักไร้อากาศ (characteristics and composition of feedstock)

สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์นั้นสามารถใช้ได้หลายประเภท เช่น ขยะชุมชน (municipal solid wastes) มูลสัตว์ (animal manure) และของเสียจากการเกษตร (agricultural wastes) เป็นต้น แต่สารอินทรีย์แต่ละประเภทนั้นมีลักษณะ และองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (methane potential) ของสารอินทรีย์แต่ละประเภทไม่เท่ากัน

สำหรับระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีมุ่งเน้นในการผลิตก๊าซชีวภาพควรทำการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์นั้นด้วยการบำบัดเบื้องต้นก่อน เช่น ของเสียจากการเกษตรซึ่งส่วนใหญ่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่ำ ดังนั้นควรทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ก่อนนำไปย่อยสลายแบบไร้อากาศ

2.7.2 สารอาหารหลัก (macro nutrient)

สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศคือไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งสารอาหารเหล่านี้จะถูกจุลชีพนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ โดยสัดส่วนการใช้สารอาหารหลักของจุลชีพในระบบไร้อากาศจะสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบ

ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีของแข็งในปริมาณสูง (ประมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร หรือสูงกว่า) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 ในกรณีที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงเกินไป ระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศไนโตรเจนจะถูกใช้อย่างรวดเร็วในการสร้างเซลล์ของจุลชีพ และเมื่อไนโตรเจนภายในระบบไม่เพียงพอต่อการนำไปสร้างเซลล์ของจุลชีพจะทำให้กระบวนการย่อยสลายลดต่ำผล เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นลดลงตาม แต่ถ้าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าต่ำเกินไปจะเกิดการสะสมของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสูงขึ้น และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงถึง 8.5 จะเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนได้

สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศในน้ำเสียหรือระบบที่มีของแข็งปริมาณต่ำ (ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยปริมาตร) ค่าสัดส่วนของสารอาหารที่จุลชีพในระบบ

ไร้อากาศจำเป็นต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการสร้างเซลล์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 : 2 : 0.4 (Speece, 1996)

2.7.3 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ

ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังหมักไร้อากาศ เพราะน้ำเป็นสถานะหลักของสสารที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลชีพ ดังนั้นถ้าภายในถังหมักไร้อากาศมีปริมาณน้ำที่เพียงพอจะทำให้อัตราการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นตาม (Patrick และ Philip, 2002)

2.7.4 ความเป็นกรด-ด่างและสภาพด่าง (pH and alkalinity)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6 ถึง 7 การตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างภายในระบบสามารถบอกถึงเสถียรภาพของระบบไร้อากาศได้ เช่น เมื่อความเป็นกรด-ด่างต่ำ อาจจะเกิดจากการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดต่ำลง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน

สภาพด่าง (alkalinity) คือความสามารถในการสะเทินกรด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อใช้ในการควบคุมความเป็นกรด-ด่างของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันการลดลงของความเป็นกรด-ด่างอย่างรวดเร็ว (pH drop) ซึ่งสมดุลหลักในการควบคุมความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศคือสมดุลของไบคาร์บอเนต (bicarbonate system) ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ตามปฏิกิริยา

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ ควรมีสภาพด่างที่เพียงพอสำหรับป้องกันการลดลงของความเป็นกรด-ด่างอย่างรวดเร็ว อันเกิดจากการสะสมของกรดไขมันระเหยในขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) โดยทั่วไปการเพิ่มสภาพด่างให้แก่ระบบจะทำโดยการเติมในรูปของโซเดียมคาร์บอเนต ($NaCO_3$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ/หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แต่ต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพราะหากเติมสารเหล่านี้มากเกินไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลชีพในระบบไร้อากาศ

2.7.5 อัตราภาระสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหย

(organic loading rate and volatile fatty acid)

อัตราภาระสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับถังหมักไร้อากาศแบบต่อเนื่อง (continuous anaerobic digester) และมักเป็นสาเหตุของการติดขัดหรือล้มเหลวของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากการใช้อัตราภาระสารอินทรีย์สูงเกิดไป (overloading) จนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนใช้กรดไขมันระเหยที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) ไม่ทัน นอกจากนี้การสะสมของกรดไขมันระเหยยังมีส่วนในการเพิ่มความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) ภายในระบบไร้อากาศ เป็นผลให้เกิดกรดไขมันระเหยที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนสูง (มากกว่า 2 อะตอม) เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งเป็นกรดไขมันระเหยที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดไม่ถูกใช้จะทำให้ความเป็นกรด-ด่างภายในระบบลดลงจนไม่เหมาะสมสำหรับการดำรงอยู่ของจุลชีพในระบบไร้อากาศ จะเกิดการสะสมของไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด (Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo, 2008)

ดังนั้นการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบควรเพิ่มทีละน้อย และการเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์แต่ละครั้งควรรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state) ก่อนแล้วจึงเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อจนได้ตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ต้องการ

2.7.6 สารพิษ

การมีไอออนบวก (cations) เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ หรือโลหะหนักบางชนิดเช่น สังกะสี ทองแดง นิกเกิล อยู่ภายในระบบไร้อากาศในปริมาณน้อยจะมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต และกระตุ้นการทำงานของจุลชีพในระบบไร้อากาศ แต่ถ้ามีไอออนพวกโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง และ/หรือสารพิษชนิดอื่นภายในระบบไร้อากาศมีความเข้มข้นมากจะเป็นพิษต่อจุลชีพภายในระบบ และมีผลยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มต่างๆ ภายในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

สารอินทรีย์	ความเข้มข้นที่เกิดการยับยั้งร้อยละ50 (มก./ล.)
Acetaldehyde	440
Acrolein	10
Bacitracin	20
Bromoethanesulfonate	20
Chloroform	15
Creolin (mixture of creosole, phenols และ resins)	1
Dinitrophenol	40
Dettol (ρ -chlorometaxylenol, terinol และ isopropanol)	10
Ethylbenzene	340
Fluorinated hydrocarbons (CCl3F, CCl2F2)	1
Formaldehyde	70
Long-chain fatty acids	500
Monensin	2
Nitrobenzene	10
Tannins	700
Virginiamycin	10

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

ไอออน	ความเข้มข้น (มก./ล.)	
	พิษปานกลาง	พิษฉับพลัน
Na^{+}	3,500 – 5,500	8,000
K^{+}	2,500 – 4,500	12,000
Ca^{2+}	2,500 – 4,500	8,000
Mg^{2+}	1,000 – 1,500	3,000
NH_4^{+}	1,500 – 3,000	3,000
S^{2-}	200	200
Cu^{2+}		0.5
Cr^{6+}		3.0
Cr^{3+}		-
Ni^{2+}		2.0
Zn^{2+}		1.0

2.7.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อกระบวนย่อยสลายแบบไร้อากาศทั้ง ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา เสถียรภาพ ปริมาณก๊าซชีวภาพ และความต้องการพลังงานทั้งหมดของระบบ ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการย่อยสลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิภายในระบบสูงเกินไปจะทำให้จุลชีพในระบบไร้อากาศตาย และถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในภูมิอากาศเขตร้อนแบบประเทศไทยคืออุณหภูมิช่วง 25 – 35 องศาเซลเซียส (mesophilic temperature)

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wilkins และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำตาลที่เกิดจากการย่อยสลายเปลือกของผลไม้จำพวกส้มด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) และเพกทิเนส (pectinase) โดยสัดส่วนของเอนไซม์ต่อน้ำหนักแห้งของเปลือกผลไม้ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0 1 2 5 และ 10 มิลลิกรัม ของเอนไซม์ ต่อ 1 กรัมของน้ำหนักแห้งของเปลือกผลไม้จำพวกส้ม ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 3.8 4.3 4.8 5.3 และ 5.8 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสตั้งแต่ 2 มิลลิกรัม เซลลูเลส ต่อ 1 กรัมของน้ำหนักแห้งของเปลือกผลไม้จำพวกส้ม และเอนไซม์เพกทิเนสตั้งแต่ 5 มิลลิกรัม เพกทิเนส ต่อ 1 กรัมของน้ำหนักแห้งของเปลือกผลไม้จำพวกส้ม ขึ้นไป ทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซีสของเปลือกส้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการทดลองคือ 4.8 นอกจากนี้การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ/หรืออีดีทีเอ (EDTA) จะทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซีสของเปลือกส้มเพิ่มขึ้น จากการงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าในเปลือกของผลไม้จำพวกส้มมีน้ำตาลในปริมาณสูงแต่อยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน ซึ่งสามารถถูกไฮโดรไลซ์ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้โดยเอนไซม์เซลลูเลส และเพกทิเนสได้

Wyman และคณะ (2005) ได้ทำการรวมรวบข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการกำจัดลิกโนเซลลูโลสในชีวมวลด้วยวิธีต่างๆ เช่น การบำบัดด้วยกรดเจือจางที่อุณหภูมิสูง การบำบัดด้วยด่าง การบำบัดด้วยไอน้ำที่ผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ วิธีการบำบัดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion) และการบำบัดด้วยปูนขาว โดยในรายงานวิจัยฉบับนี้จะประกอบด้วยกลไกการทำงาน และข้อดีข้อเสียของการบำบัดเบื้องต้นวิธีต่างๆ

Hartmann และคณะ (1999) พบว่าหลังจากทำการบำบัดชีวมวลด้วยเครื่องลดขนาดที่มีลักษณะเป็นใบมีดที่หมุนได้ (macerator) ก่อนนำไปย่อยสลายด้วยกระบวนการไร้อากาศ พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และเมื่อพิจารณาในแง่การกระจายขนาดของอนุภาคพบว่าศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพไม่มีความสัมพันธ์กับเส้นใยที่มีขนาดเล็ก ทำให้สรุปได้ว่าการที่ก๊าซชีวภาพเกิดมากขึ้นหลังจากบำบัดด้วยการลดขนาดชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Angelidaki และ Ahring ในปี 1999 ว่าก๊าซชีวภาพเกิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เมื่อทำการลดขนาดชีวมวลจนถึง 0.35 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องลดขนาดที่มีใบมีดที่หมุนได้ (macerator) นอกจากนี้การบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ/หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) จะทำให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของชีวมวลที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ/หรือ

แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้กระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ และเคมีร่วมกันจะไม่ทำให้การเกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ถ้าหากอนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 มิลลิเมตร ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Delgenes และคณะ (1999) ได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบประเภทต่างๆ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 และ ณ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้น้ำตาลในชีวมวลประเภทต่างๆ นั้นละลายออกมาเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 70 แต่อย่างไรก็ตามในชีวมวลก็ยังคงมีองค์ประกอบที่ไม่สามารถถูกละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คงค้างอยู่

Kim และ Holtzapple (2005) ได้ศึกษาการบำบัดใบ และซังข้าวโพดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในสัดส่วน 0.5 กรัม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อซังข้าวโพด 1 กรัม โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีจุดประสงค์ที่จะหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัดใบ และซังข้าวโพดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือทำการบำบัดที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ หลังจากการบำบัดแล้วจะได้กลูแคน และไซแลนสูงถึงร้อยละ 91.3 และร้อยละ 51.8 ตามลำดับ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสและไซโลสตามลำดับ และเมื่อทำการบำบัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) และเบต้าไกลโคซิเดส (β-glycosidase) แล้วจึงทำการบำบัดต่อด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยเอนไซม์แล้วจึงทำการบำบัดต่อด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะช่วยลดปริมาณการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลือเพียง 0.073 กรัม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อซังข้าวโพด 1 กรัม และสามารถกำจัดลิกนินได้ถึงร้อยละ 87.5

Grohmann Cameron และ Buslig (1995) ได้ศึกษาการทำลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน ในเปลือกส้ม ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.06 ถึงร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าสามารถทำการสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน ในเปลือกส้มให้กลายเป็นสารละลายของน้ำตาลได้โดยวิธีการบำบัดด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังพบว่ากรดกาแลกยูโรนิกซึ่งเป็นองค์ประกอบในเซลลูโลส และเพกทินนั้นถูกย่อยสลายได้ยากด้วยสารละลายกรด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการบำบัดกรดซัลฟิวริกเจือจางที่อุณหภูมิสูง สามารถปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบได้

Alvarez และ Llabes (2000) ได้ทำการรวบรวมรายละเอียดในหัวข้อการประชุมที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่ใช้ในการประชุม The second international symposium on anaerobic digestion of solid wastes ที่จัดขึ้น ณ กรุงบาเซโลน่า ประเทศสเปน ในปี 1999 ซึ่งมีหัวข้อดังนี้ ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา แบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (two–phases anaerobic digestion) เทคโนโลยีการย่อยสลายร่วม (co – digestion) การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลาย การนำเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และข้อดีของการใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่บรรยากาศ

RISE-AT (1998) ศูนย์บริการข้อมูลเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้จัดทำรายงานสรุปเกี่ยวกับสถานการณ์ของเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศสำหรับการบำบัดขยะชุมชน (municipal solid waste) โดยรายงานฉบับนี้ได้รวบรวมข้อมูล รายละเอียด และข้อมูลการเดินระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศของบริษัทชั้นนำของโลก เช่น บริษัท OWS-Dranco ของประเทศเบลเยี่ยม Ecotec ของประเทศฟินแลนด์ BTA และ TBW ของประเทศเยอรมัน นอกจากนี้รายงานฉบับนี้ยังมีกรณีศึกษาของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศทั้งในระดับอุตสาหกรรม และระดับชุมชน

Muller (2007) ได้จัดทำรายงานสรุปเกี่ยวกับสถานการณ์ของเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศสำหรับการบำบัดขยะชุมชน (municipal solid waste) ของประเทศกำลังพัฒนา เช่น ไทย เนปาล โคลัมเบีย อินเดีย และจีน เป็นต้น โดยรายงานฉบับนี้ได้รวบรวมข้อมูลรายละเอียด และข้อมูลการเดินระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เดินระบบอยู่ในประเทศกำลังพัฒนา และจากรายงานสรุปฉบับนี้พบว่าประเทศอินเดีย และจีนกำลังพัฒนาเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศอย่างต่อเนื่อง และมีความพยายามที่จะนำเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศไปใช้ในระดับครัวเรือน และระดับชุมชน นอกจากนี้ยังพบว่าสาเหตุการล้มเหลวของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศส่วนใหญ่ในประเทศกำลังพัฒนาไม่ได้มาจากความขาดแคลนเครื่องมือ และ/หรือความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ แต่เกิดจากผู้เดินระบบขาดซึ่งความรู้ความเข้าใจ และการจัดการระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ

Bouallagui และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายของขยะจำพวกผัก และผลไม้ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ โดยสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองคือขยะจำพวกผัก และผลไม้ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 8 ถึง 18 โดยปริมาตร จากการ

ทดลองพบว่าถังหมักไร้อากาศสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นมีเทนได้ถึงร้อยละ 70 ถึง 95 เมื่อใช้อัตราภาระสารอินทรีย์ 1 ถึง 6.8 กรัม ของแข็งระเหย ต่อลิตร ต่อวัน (1-6.8 g VS/L*day) และพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศติดขัดคือการลดลงอย่างรวดเร็วของความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักไร้อากาศ เนื่องมาจากการเกิดกรดไขมันระเหยปริมาณมากจากขั้นตอนการสร้างกรดจากขยะจำพวกผัก และผลไม้ ดังนั้น Bouallagui และคณะจึงทำการย่อยสลายขยะจำพวกผัก และผลไม้ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (two-phases anaerobic digester) พบว่าสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นมีเทนได้ถึงร้อยละ 95 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5.65 กรัม ของแข็งระเหย ต่อลิตร ต่อวัน (5.65 g VS/L*day) และมีค่าเฉลี่ยของผลผลิตมีเทนเท่ากับ 420 ลิตร มีเทน ต่อ 1 กิโลกรัม ของแข็งระเหย (420 L CH_4/kg added VS)

กฤชพล ใจจงรักษ์ (2546) ได้ทำการศึกษาแนวทางในการหมุนเวียนน้ำชะขยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายขยะอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่าถังหมักไร้อากาศที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะมีประสิทธิภาพดีกว่าถังหมักไร้อากาศที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ ทั้งการกำจัดซีโอดีในน้ำชะขยะ ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ถังหมักไร้อากาศที่มีวิธีการหมุนเวียนน้ำชะขยะตามมวลซีโอดี และปริมาณมีเทน ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าถังหมักไร้อากาศที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะที่กำหนดปริมาณน้ำชะขยะที่ใช้หมุนเวียนแบบตายตัว

Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาการหมักของสารอินทรีย์โดยจุลชีพในระบบไร้อากาศ พบว่าการเกิดไฮโดรเจนในกระบวนการหมักมีสาเหตุมาจากการยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน อันเป็นผลให้เกิดการสะสมของไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งในกระบวนการหมัก นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนมีดังนี้ สภาวะที่เป็นกรดภายในถังปฏิกิริยา อัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีค่าสูง ระยะเวลากักเก็บต่ำ ความร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียส และสารพิษ

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ มุ่งเน้นศึกษาการกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง ศึกษาผลของการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และศึกษาการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ โดยศึกษาการกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง เพื่อเปรียบเทียบการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ การเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบจะพิจารณาจากค่าซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ นอกจากนี้การทดลองนี้ยังเป็นขั้นเตรียมถังปฏิกิริยาให้พร้อมสำหรับการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองในส่วนการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี โดยศึกษาการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นของเสียที่พบได้ง่ายจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ โดยสนใจถึงประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในกากส้ม และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำย่อยจากกากส้ม หลังทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นต่างๆ และเลือกความเข้มข้นของสารเคมีที่ให้น้ำย่อยจากกากส้มที่มีสภาพเหมาะสมกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศมากที่สุดเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ในถังปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 1 ซึ่งมีกากส้มเป็นตัวกลางในสภาพไร้อากาศ การทดลองนี้สนใจถึงการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้ม ปริมาณก๊าซชีวภาพ และความเหมาะสมในการย่อยสลายแบบ

ไร้อากาศของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงาน และแหล่งคาร์บอนของจุลชีพในถังหมักไร้อากาศ

3.2 กากส้มที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

กากส้มที่นำมาใช้ในการทำการทดลองเป็นกากส้มเขียวหวานที่ผ่านการหั่นแบบหยาบ ซึ่งเก็บรวบรวมกากส้มมาจากร้านขายน้ำส้มคั้นในตลาดสดสามย่าน โดยทำการเก็บตัวอย่างแล้วนำมาแช่ไว้ในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการทดลอง และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของกากส้ม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของกากส้มที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความชื้น	Standard Method#2540 (Dried 103-105^{o}C)
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540 (Dried 103-105^{o}C)
ของแข็งระเหย	Standard Method#2540 (Dried 500-600^{o}C)
ธาตุคาร์บอน	CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)
ธาตุไฮโดรเจน	CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)
ธาตุไนโตรเจน	CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)

3.3 หัวเชื้อจุลชีพ

หัวเชื้อจุลชีพ (seed) ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง และที่ใช้ในการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบระหว่างดำเนินการทดลอง เป็นหัวเชื้อจุลชีพจากถังหมักไร้อากาศของบริษัท แซน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรด-ด่าง	Electronic pH meter with glass electrode method
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter
ซีโอดี	Standard method #5220 (Close reflux)
สภาพด่าง	Standard method#2320 (Titration method)
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540 (Dried 103-105^{o}C)
ของแข็งระเหย	Standard Method#2540 (Dried 500-600^{o}C)

3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

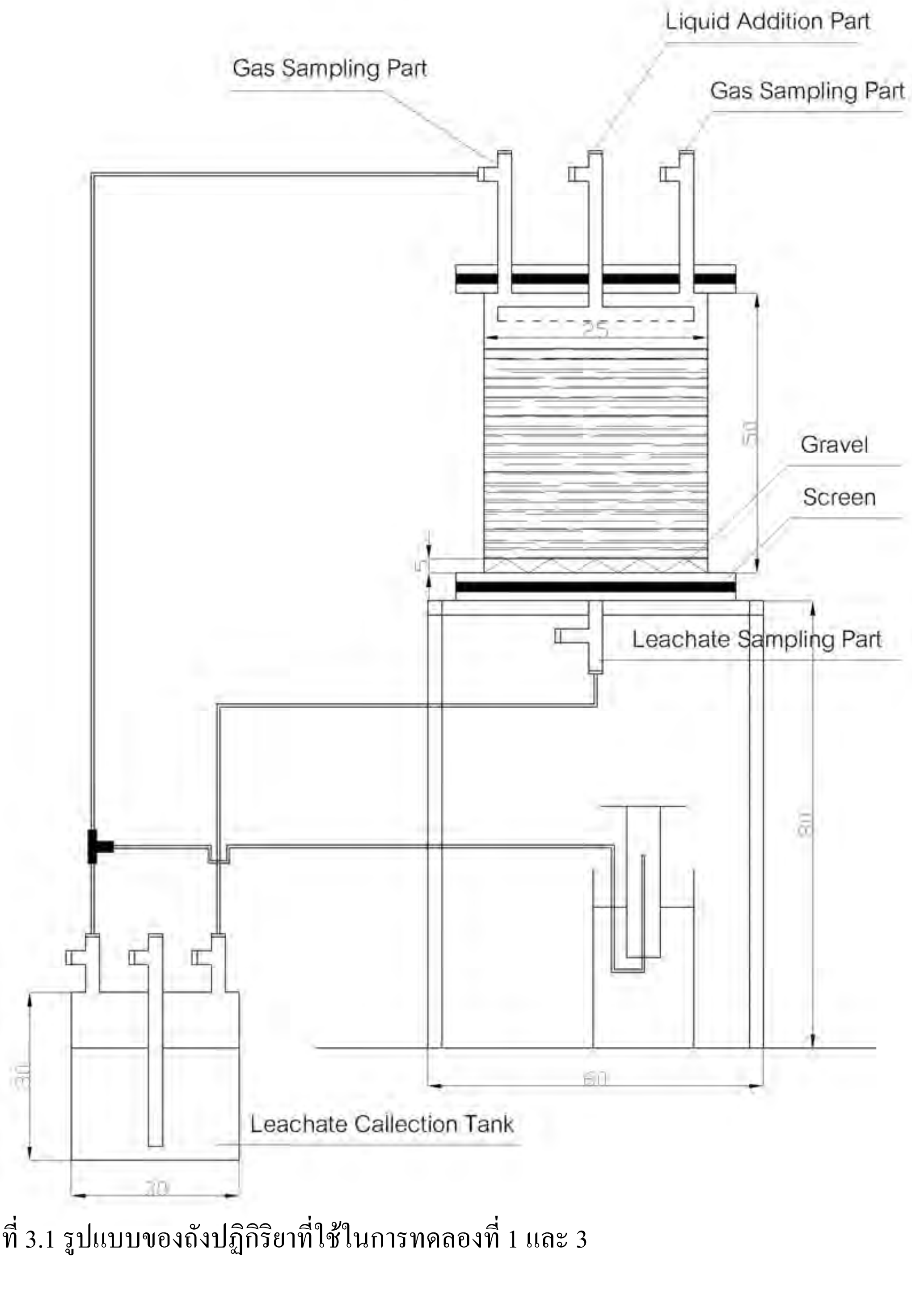
3.4.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1.1 รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3 ใช้ถังปฏิกิริยาจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ (labortory scale reactor) ปริมาตรประสิทธิผล (effective volume) 17 ลิตร จำนวน 3 ถัง โดยถังปฏิกิริยาแต่ละถังทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร โดยเป็นชั้นสำหรับกระจายน้ำ 10 เซนติเมตร และชั้นกรวด 5 เซนติเมตร ตัวถังปฏิกิริยาจะประกอบกับหน้าแปนพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร เพื่อเป็นฝาปิดถังปฏิกิริยา ซึ่งบนฝาปิดถังปฏิกิริยานี้ติดตั้งเกลียวในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จำนวน 3 จุด เพื่อติดตั้งวาล์วสำหรับระบายก๊าซ และเติมน้ำชะขยะจำนวน 1 จุด ณ จุดศูนย์กลางของฝาปิดถังปฏิกิริยา และอีก 2 จุด ตามแนวรัศมีใช้สำหรับติดตั้งข้อต่อซิลิโคนซึ่งต่อกับระบบเก็บก๊าซ ส่วนชั้นกระจายน้ำชะขยะรูปกากบาทถูกเชื่อมต่อกับฝาปิดถังปฏิกิริยา ก้นถังปฏิกิริยาจะติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ในการระบายและเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ นอกจากนี้ก้นถังปฏิกิริยาจะถูกปูด้วยตะแกรงเหล็ก และหิน เพื่อป้องกันการอุดตันของชั้นระบายน้ำก้นถังปฏิกิริยา

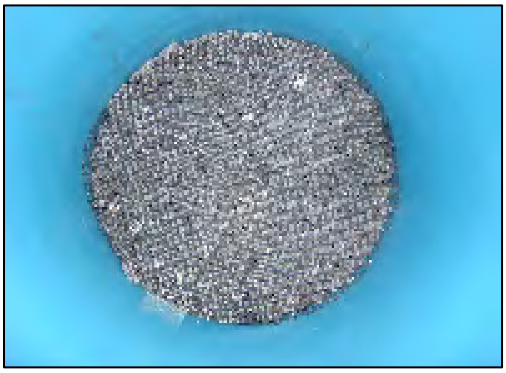
ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาจะถูกรวบรวม และวัดปริมาตรโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่เกิดขึ้น กระบอกเก็บก๊าซจะประกอบด้วยกระบอกแก้วขนาด

500 มิลลิลิตร ประกอบกับด้านกับกระบอกแก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร ทำการปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้ต่ำกว่า 3 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3

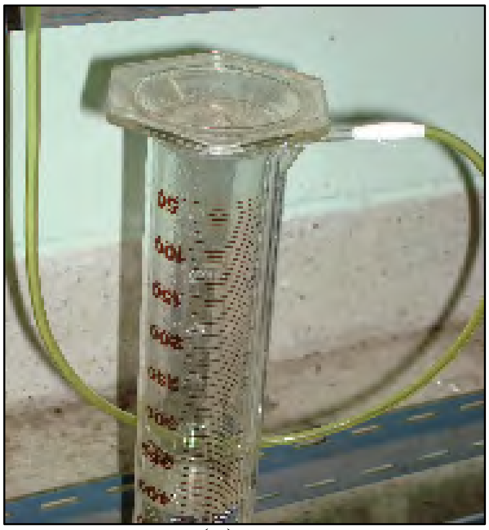
(ก)


(ข)

(ค)

(ง)

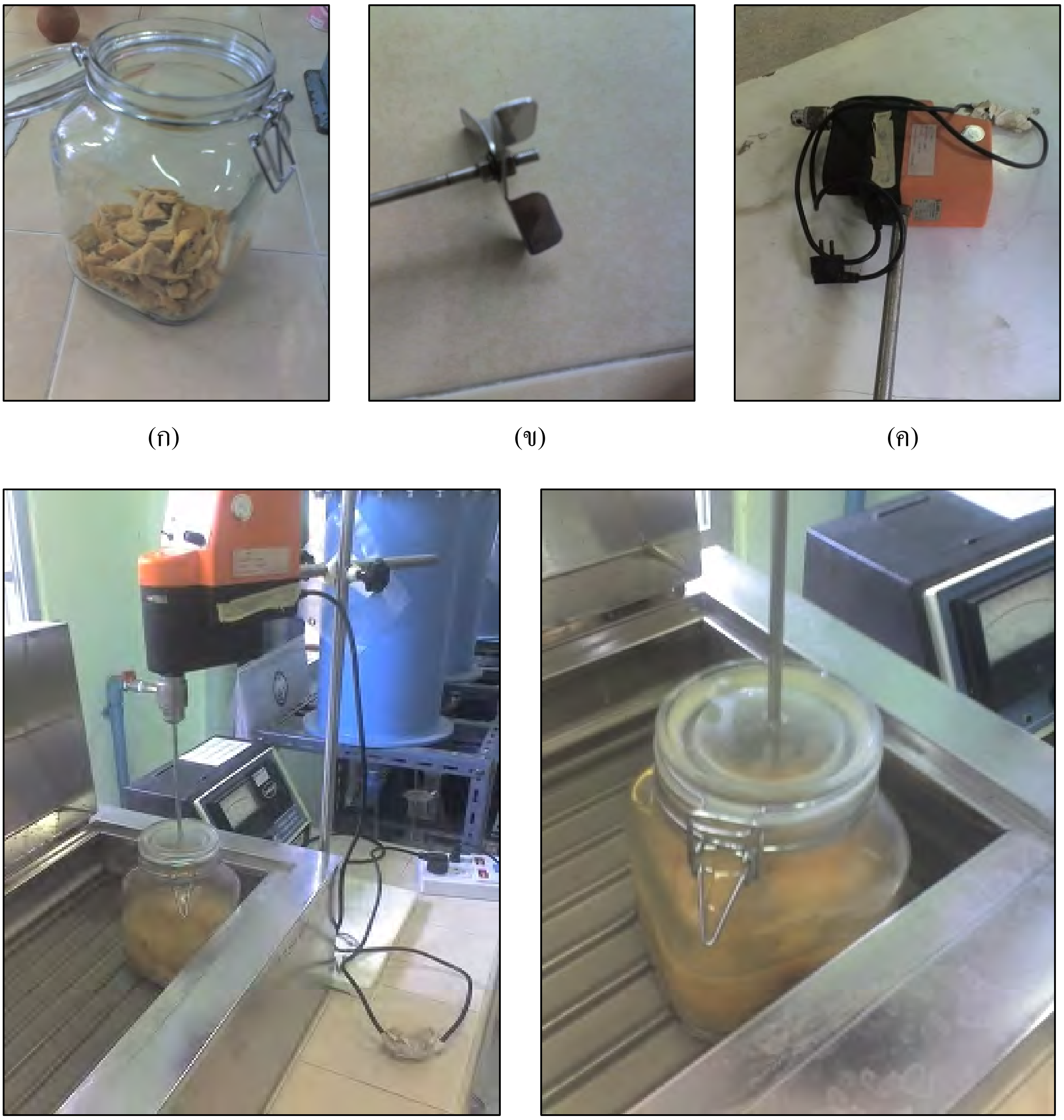
(จ)


(ฉ)

รูปที่ 3.2 รูปถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3 (ก) ชั้นกระจายน้ำ (ข) ชั้นกรวดและตะแกรงก้นถัง (ค) และ (ง) วาล์วและจุดเติมน้ำชะขยะบนฝาถังปฏิกิริยา (จ) จุดเก็บตัวอย่างและระบายน้ำชะขยะก้นถัง (ฉ) กระบอกเก็บก๊าซ

3.4.1.2 รูปแบบของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ทำจากแก้ว มีปริมาตรประสิทธิผล 2 ลิตร บริเวณจุดศูนย์กลางของฝาปิดถังปฏิกิริยาจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับใส่ใบพายที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ)

รูปที่ 3.3 รูปถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 2 (ก) ถังปฏิกิริยาที่ทำจากแก้ว (ข) ใบพายเหล็กกล้าไร้สนิม (ค) มอเตอร์ (ง) ชุดการทดลองที่ 2 . เครื่องอังไอน้ำ เทอร์โมมิเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ (จ) กากส้มขณะทำการบำบัดทางเคมี

3.4.1.3 อุปกรณ์อื่นๆ

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ

2. ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส

3. เตาเผา ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550$\pm$50 องศาเซลเซียส

4. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

5. เครื่องอังไอน้ำ เทอร์โมมิเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ

6. ฮีทติ้งเพลท

7. เครื่องกรองบุคเนอร์

8. ชุดกลั่น ประกอบด้วยขวดเจลดาห์ล (Kjeldahl flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร ต่อกับเครื่องควบแน่น

9. เครื่องย่อยสลายที่มีที่ให้ความร้อน และที่ดูดควันออก

3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย 0.1 นอร์มัล

4. สารละลายกรดซัลฟุริก (ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต)

5. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์

6. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 นอร์มัล

7. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์

8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล

9. กรดบอริก

10. สารละลายอินดิเคเตอร์บอริกแอซิค

11. กรดซัลฟุริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4)

12. กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3)

13. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

3.5 การจัดการ และการควบคุมน้ำภายในระบบ

ปริมาณน้ำภายในระบบเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพราะปฏิกิริยาทางเคมี และทางชีวภาพส่วนใหญ่เกิดในของเหลว ดังนั้นการจัดการ และควบคุมน้ำภายในระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยปริมาณน้ำภายในถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิจัยนี้คำนวณมาจากปริมาณความชื้นของกากส้ม และปริมาณน้ำจากการเติมหัวเชื้อจุลชีพ ซึ่งจากการคำนวณปริมาณน้ำภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.2±0.4 ลิตร โดยไม่คิดการสูญเสียน้ำจากการระเหยเพราะการทดลองนี้ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง และเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะไปวิเคราะห์จะทำการเติมน้ำกลั่นในปริมาณที่เท่ากับนำไปวิเคราะห์เพื่อควบคุมความชื้นภายในถังปฏิกิริยา

ในการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นการศึกษาการย่อยสลายของกากส้ม น้ำกากส้ม และน้ำย่อยจากกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศ ถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง ที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 3 จะถูกทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะทุกวันซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลชีพได้รับอาหารมากขึ้นเป็นผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กากส้มภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งการหมุนเวียนน้ำชะขยะนั้นสามารถทำได้โดยระบายออกทางวาล์วที่ติดตั้งอยู่ก้นถังปฏิกิริยา แล้วนำน้ำชะขยะที่ระบายออกมาเติมลงในจุดเติมน้ำชะขยะซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา โดยอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง จะแปรผันตามซีโอดีละลายและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถัง เพื่อให้สภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถังเหมาะสมกับการทำงานของจุลชีพในแต่ละถังมากที่สุด

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นระบบที่ซับซ้อน และประกอบด้วยจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนอาศัยอยู่ร่วมกัน การที่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะทำงานได้ดีเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยทางสภาพแวดล้อม และสาเหตุที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสูญเสียเสถียรภาพคือ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบไม่เหมาะสม จึงทำให้จุลชีพไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นในการวิจัยนี้จะทำการปรับความเป็นกรดเป็นกรด-ด่างของน้ำชะขยะให้มีค่าประมาณ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเม็ด โดยจะทำการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเม็ดในน้ำชะขยะก่อนจะเติมกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยา

ในการทดลองที่ 3 จะมีการเติมน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดทางเคมีลงในถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง ซึ่งจะใช้ถังปฏิกิริยาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วในการทดลองที่ 1 และเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัด

เบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ดังนั้นต้องทำการระบายน้ำชะขยะจากการทดลองที่ 1 ออกก่อนเริ่มทำการทดลองที่ 3 โดยการระบายน้ำชะขยะออกจากถังปฏิกิริยานั้นจะระบายน้ำชะขยะจนถึงขีดความสามารถในการอุ้มน้ำ (field capacity) ของกากส้มภายในถังปฏิกิริยาเท่านั้น

3.6 การเติมหัวเชื้อจุลชีพ

ในการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นการทดลองทางชีวภาพได้มีการเติมหัวเชื้อจุลชีพระหว่างดำเนินการทดลองให้แก่ระบบเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้ระบบไร้อากาศติดขัด และเพื่อตรวจสอบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงแล้วหรือไม่ ส่วนวิธีการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบทำได้ด้วยการผสมหัวเชื้อจุลชีพกับน้ำชะขยะที่จะทำการหมุนเวียนในแต่ละวัน ครั้งละ 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 วัน และทุกครั้งที่เติมหัวเชื้อจุลชีพจะทำการทิ้งน้ำชะขยะในปริมาณที่เท่ากับปริมาณหัวเชื้อจุลชีพที่จะทำการเติมให้แก่ระบบโดยการเติมหัวเชื้อจุลระหว่างดำเนินการทดลองที่ 1 ทางผู้ดำเนินการวิจัยได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง ปริมาตรหัวเชื้อจุลชีพรวม 1 ลิตรต่อถัง ในวันที่ 85 ถึง 90 ของการเดินระบบการทดลองที่ 1 และทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 ปริมาตรหัวเชื้อจุลชีพรวม 1 ลิตรต่อถัง ในวันที่ 57 และ 59 ของการเดินระบบการทดลองที่ 3

3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.7.1 การทดลองที่ 1 การกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดของแข็งในกากส้ม ซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง เพื่อเปรียบเทียบการลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ นอกจากนี้การทดลองที่ 1 ยังเป็นการเตรียมถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง ให้พร้อมสำหรับใช้ในการทดลองที่ 3

การศึกษาการย่อยสลายของกากส้ม และน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง มีแผนขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำกากส้มเขียวหวานสดมาหั่นแบบหยาบ และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของกากส้มตามตารางที่ 3.1

2. นำหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพตามตารางที่ 3.2

3. นำกากส้มเขียวหวานสดหั่นหยาบปริมาณ 10 กิโลกรัม/ถัง ผสมคลุกเคล้ากับหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศปริมาตร 5 ลิตร/ถัง (มีน้ำหนักแห้งประมาณ 0.107 กิโลกรัม) และสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพ แล้วบรรจุลงในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง และปิดถังปฏิกิริยาให้สนิทเพื่อให้ปฏิกิริยาภายในถังทั้ง 3 ถัง เป็นปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ

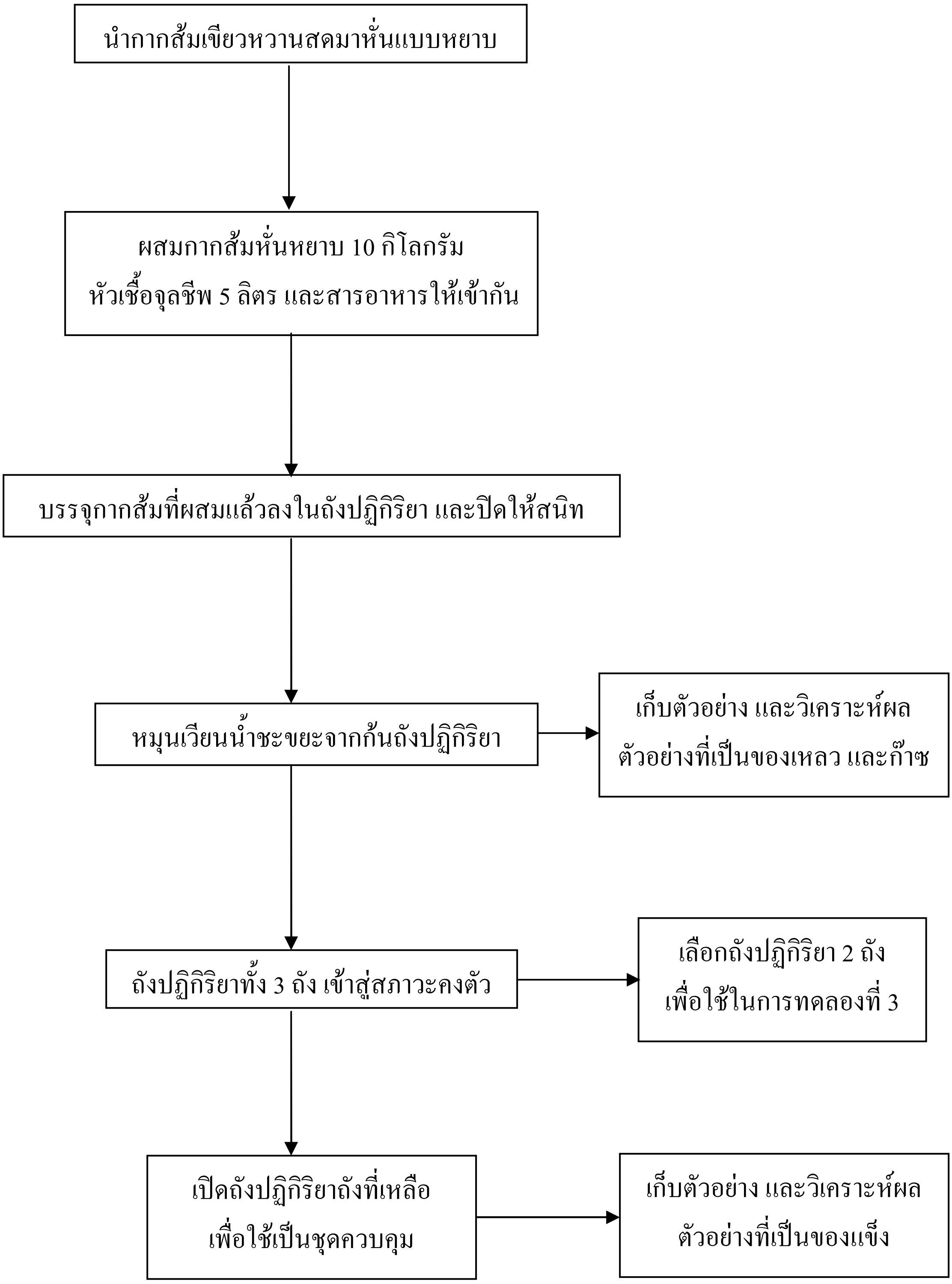
4. ทำการระบายน้ำชะขยะออกจากก้นถังปฏิกิริยาทั้ง 3 แล้วเติมกลับลงในจุดเติมน้ำชะขยะซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้จะทำจนกระทั่งปริมาณน้ำชะขยะที่เติมกลับลงไปในแต่ละวันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณของเหลวที่ระบายออกมาได้ในวันถัดไป ซึ่งแสดงว่าปริมาณน้ำชะขยะที่ระบายออกมานั้นเกินขีดความสามารถรับน้ำของกากส้มในถังปฏิกิริยาใบนั้นแล้ว จึงเริ่มนับเป็นวันที่ 0 ของการเดินระบบ

5. เริ่มเดินระบบถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถัง โดยมีกากส้มเขียวหวานหั่นหยาบเป็นสารอินทรีย์ และทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะในแต่ละถังปฏิกิริยา

6. เก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ ปริมาณและความเข้มข้นของก๊าซมีเทน จากปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง และทำการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.4

7. ทำการเลือกถังปฏิกิริยาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวจำนวน 2 ถัง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 3 โดยเกณฑ์การเลือกถังปฏิกิริยาไปใช้ในการทดลองที่ 3 และการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบจะพิจารณาจากค่าซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นหลัก

8. ทำการเปิดถังปฏิกิริยาที่เหลือ และเก็บตัวอย่างกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.4 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการลดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีในการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 1

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองที่ 1

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของกากส้ม	กากส้มเขียวหวาน หั่นหยาบ
2. ปริมาณของกากส้ม	10 กิโลกรัม ต่อ 1 ถังปฏิกิริยา
3. ปริมาณหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศ	5 ลิตร ต่อ 1 ถังปฏิกิริยา
4. อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
5. ปริมาณน้ำในระบบ	ควบคุมปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยาทั้ง 3
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ข้อกำหนดในการทดลอง
1. ศึกษาการย่อยสลายของกากส้ม และน้ำกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง	จนกว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งในกากส้ม	ของแข็งระเหย
2. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลาย	ซีโอดีละลาย
3. ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	ปริมาณก๊าซชีวภาพ
	ความเข้มข้นก๊าซมีเทน

หมายเหตุ

เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นผลให้ถังปฏิกิริยาแต่ละถังมีสารอินทรีย์คาร์บอนเริ่มต้นที่จุลชีพสามารถนำมาใช้ได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างแต่ละถังปฏิกิริยาได้ แต่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละถังปฏิกิริยาได้โดยการวิเคราะห์ผลในรูปของร้อยละการเพิ่ม และร้อยละการกำจัด

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาว่าถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงในงานวิจัยนี้เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state) แล้วหรือไม่ จะพิจารณาจากภาพรวมของพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มข้นของซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละถังปฏิกิริยามีค่าค่อนข้างคงที่ จึงถือว่าถังปฏิกิริยานั้นเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3.4 จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองที่ 1 และ 3

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
น้ำชะขยะ		
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	จันทร์ พุธ และศุกร์
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	จันทร์ พุธ และศุกร์
ซีโอดีละลาย (soluble COD)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	จันทร์ พุธ และศุกร์
กรดไขมันระเหย (VFA)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	จันทร์ พุธ และศุกร์
สภาพด่าง (alkalinity)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	จันทร์ พุธ และศุกร์
แอมโมเนียไนโตรเจน (ammonia Nitrogen)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	ทุกเดือน
ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา	ทุกเดือน
ก๊าซชีวภาพ		
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (gas production)	กระบอกเก็บก๊าซ	ทุกวัน
ความเข้มข้นก๊าซมีเทน (percent methane)	จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ	ทุกเดือน
ของแข็ง		
ความชื้น (moisture content)	ภายในถังปฏิกิริยา	สิ้นสุดการทดลองที่ 1
ของแข็งทั้งหมด (total solids)	ภายในถังปฏิกิริยา	สิ้นสุดการทดลองที่ 1
ของแข็งระเหย (volatile solids)	ภายในถังปฏิกิริยา	สิ้นสุดการทดลองที่ 1

3.7.2 การทดลองที่ 2 การลดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เหมาะสมในการกำจัดของแข็งในกากส้ม และเลือกความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิดละ 1 ความเข้มข้น ที่ให้น้ำย่อยจากกากส้มที่เหมาะสมกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศมากที่สุดเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3

การทดลองในส่วนการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ดังรายละเอียดรูปที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำกากส้มเขียวหวานสดมาหั่นแบบหยาบ และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของกากส้มตามตารางที่ 3.6 บันทึกค่าเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดของแข็งในกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นต่างๆ

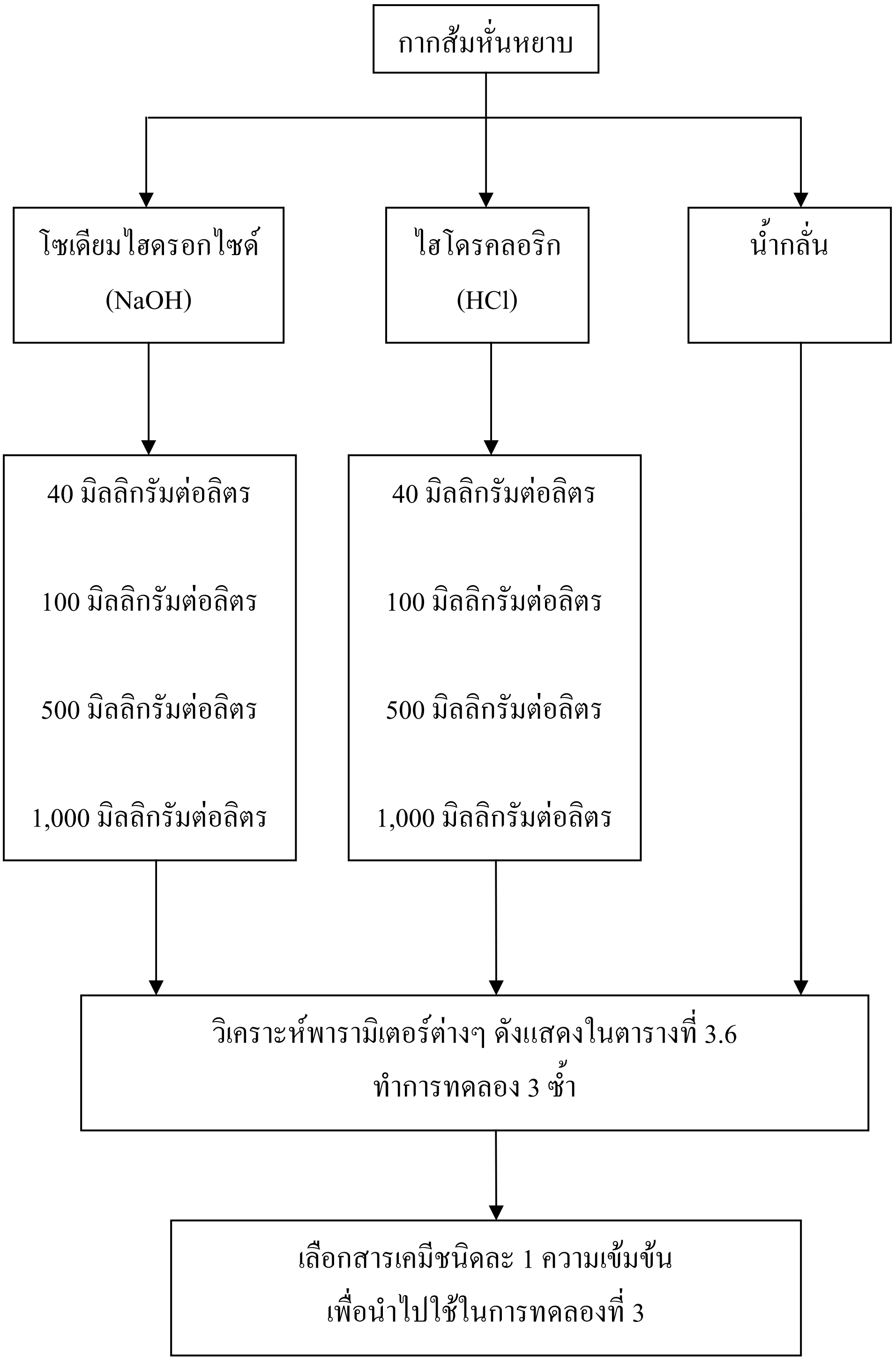
2. การทดลองชุดที่ 1 ทำการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 4 ค่าคือ 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนสารเคมีกับกากส้มให้เข้ากันดีด้วยชุดกวนผสมดังแสดงในหัวข้อ 3.4.1.2 ที่รอบการกวน 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6

3. การทดลองชุดที่ 2 ทำการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี โดยใช้ไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้น 4 ค่าคือ 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนสารเคมีกับกากส้มให้เข้ากันดีด้วยชุดกวนผสมดังแสดงในหัวข้อ 3.4.1.2 ที่รอบการกวน 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6

4. การทดลองชุดที่ 3 โดยกวนน้ำกลั่นกับกากส้มให้เข้ากันดีด้วยชุดกวนผสมดังแสดงในหัวข้อ 3.4.1.2 ที่รอบการกวน 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6

5. เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของกากส้มก่อน และหลังทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นต่างๆ

6. เลือกความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิดละ 1 ความเข้มข้น เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 3 โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในกากส้ม และความเหมาะสมในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นหลัก



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองที่ 2

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของกากส้ม	กากส้มเขียวหวาน หั่นหยาบ
2. ปริมาณของกากส้ม	200 กรัม ต่อ 1 ชุดการทดลอง
3. ปริมาณของสารละลาย	5 มิลลิลิตร ต่อ กากส้ม 1 กรัม
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30 นาที ต่อ 1 ชุดการทดลอง
5. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	90±5 องศาเซลเซียส
6. ความดันที่ใช้ในการทดลอง	1 ความดันบรรยากาศ
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของไฮโดรคลอริก (HCl)	40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในกากส้ม	ของแข็งระเหย
2. ความเหมาะสมของน้ำย่อยจากกากส้ม เมื่อนำไปย่อยสลายในถังหมักไร้อากาศ	ความเป็นกรด-ด่าง
	ซีโอดีละลาย

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ต้องทำการวิเคราะห์ในการทดลองที่ 2

พารามิเตอร์	ช่วงทำการวิเคราะห์	หมายเหตุ
ของแข็ง		
ความชื้น (Moisture content)	ก่อนทำการทดลอง	100 กรัม ต่อ 1 ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total solids)	ก่อน และหลังทำการทดลอง	100 กรัม ต่อ 1 ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์
ของแข็งระเหย (Volatile solids)	ก่อน และหลังทำการทดลอง	100 กรัม ต่อ 1 ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์
ของเหลว		
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ก่อน และหลังทำการทดลอง	ทิ้งไว้จนถึงอุณหภูมิห้องก่อนทำการวิเคราะห์
ซีโอดีละลาย (Soluble COD)	ก่อน และหลังทำการทดลอง	ทิ้งไว้จนถึงอุณหภูมิห้องก่อนทำการวิเคราะห์

3.7.3 การทดลองที่ 3 การกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้ม ปริมาณก๊าซชีวภาพ และความเหมาะสมในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการบัดเบื้องต้นทางเคมีในการทดลองที่ 2 ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง ซึ่งจะใช้ถังปฏิกิริยาจำนวน 2 ถัง จากการทดลองที่ 1

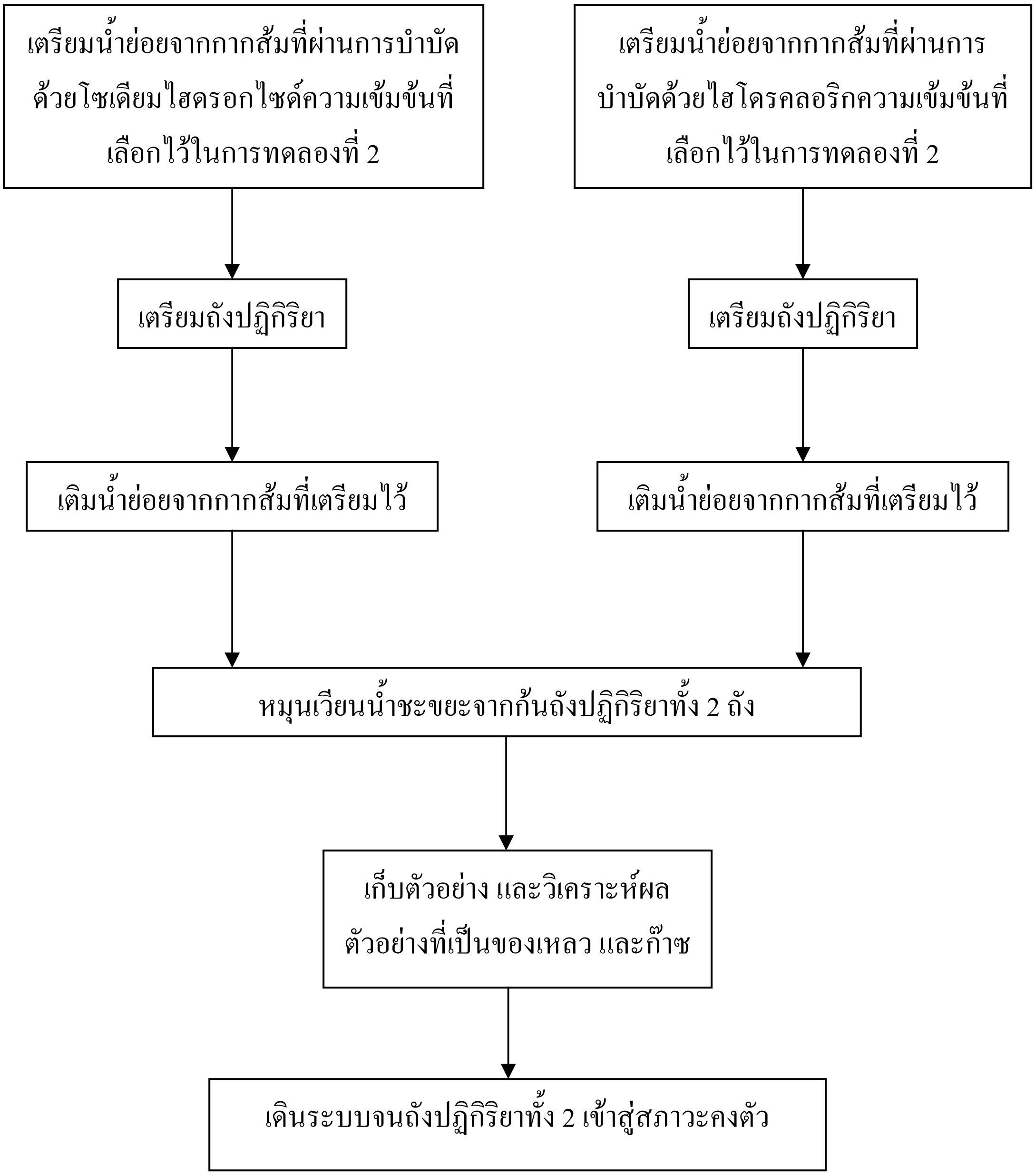
การศึกษาการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง มีแผนขั้นตอนดังรูปที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.7 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำถังปฏิกิริยา 2 ถัง ที่เลือกไว้ในการทดลองที่ 1 มาเตรียมพร้อมสำหรับเริ่มทำการทดลองที่ 3 ตามรายละเอียดที่แสดงในหัวข้อที่ 3.5

2. เติมน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ตามความเข้มข้นที่เลือกไว้ในการทดลองที่ 2 โดยปริมาณน้ำย่อยจากกากส้มที่เติมลงไปในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง จะมีปริมาณเท่ากับน้ำชะขยะที่ระบายออกมาจนถึงขีดความสามารถในการอุ้มน้ำ (field capacity) ในถังปฏิกิริยาแต่ละถัง

3. เริ่มเดินระบบถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง โดยมีน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นสารอินทรีย์ และทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะในแต่ละถังปฏิกิริยา

4. เก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ ปริมาณและความเข้มข้นของก๊าซมีเทน จากปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง และทำการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของกากส้ม	กากส้มที่ย่อยสลายใน ถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1
2. ปริมาณของกากส้ม	ในถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1
3. ปริมาณหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศ	ในถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1
4. อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
5. ปริมาณน้ำในระบบ	ควบคุมปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยาทั้ง 3
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
1. ศึกษาการความเหมาะสมของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศ	1. น้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่เลือกไว้ในการทดลองที่ 2
	2. น้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้นที่เลือกไว้ในการทดลองที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลาย	ซีโอดีละลาย
2. ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	ปริมาณก๊าซชีวภาพ
	ความเข้มข้นก๊าซมีเทน

3.8 แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ตลอดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 แสดงวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง
ความชื้น (moisture content)	Standard method#2540 (Dried 103 – 105°C)	-
ของแข็งทั้งหมด (total solids)	Standard method#2540 (Dried 103 – 105°C)	-
ของแข็งระเหย (volatile solids)	Standard method#2540 (Dried 500 – 600°C)	-
ซีโอดีละลาย (soluble COD)	Standard method #5220 (Close reflux)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Electronic pH meter with glass electrode method	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	ORP meter	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
สภาพด่าง (alkalinity)	Standard method#2320 (Titration method)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
กรดไขมันระเหย (VFA)	Standard method#5560	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
แอมโมเนียไนโตรเจน (ammonia Nitrogen)	Standard method#4500-NH_3	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate)	Standard method#4500-P (Vanadomolybopheric Acid Method)	จุดเก็บน้ำชะขยะก้นถังปฏิกรณ์
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (gas production)	Inverted glass cylinder method	กระบอกเก็บก๊าซ
ความเข้มข้นก๊าซมีเทน (percent methane)	Gas Chromatography	กระบอกเก็บก๊าซ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากส้ม

ขยะที่ใช้ในการวิจัยนี้คือกากส้มเขียวหวานที่เก็บรวบรวมจากร้านขายน้ำส้มคั้นในตลาดสดสามย่าน ซึ่งจะนำมาหั่นแบบหยาบ และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.1 เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้หลังจากวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ภายหลังผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และ การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII) โดยส่งตัวอย่างกากส้มไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากส้มที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	80.92	0.654
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	19.07	0.654
ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	97.07	0.129
ธาตุคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	37.12	0.148
ธาตุไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	5.611	0.059
ธาตุไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	0.14	0.085

4.2 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพ

ในการวิจัยนี้มีการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ และระหว่างดำเนินการทดลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศด้วยการเติมหัวเชื้อจุลชีพเพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายของกากส้ม หัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นหัวเชื้อจุลชีพจากถังหมักไร้อากาศของ

บริษัท แซน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด โดยมีการวัดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ในวันที่เริ่มต้นเดินระบบถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง จะถูกบรรจุด้วยหัวเชื้อจุลชีพปริมาตร 5 ลิตร ที่ผสมกับกากส้มปริมาตร 10 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ และระหว่างวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
ความเป็นกรด-ด่าง	7.28
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-316.90
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	22,969
สภาพด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	10,784
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	21,524
ของแข็งระเหยได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	13,182

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ระหว่างวันที่ 57 และ 59 ของการทดลองที่ 3

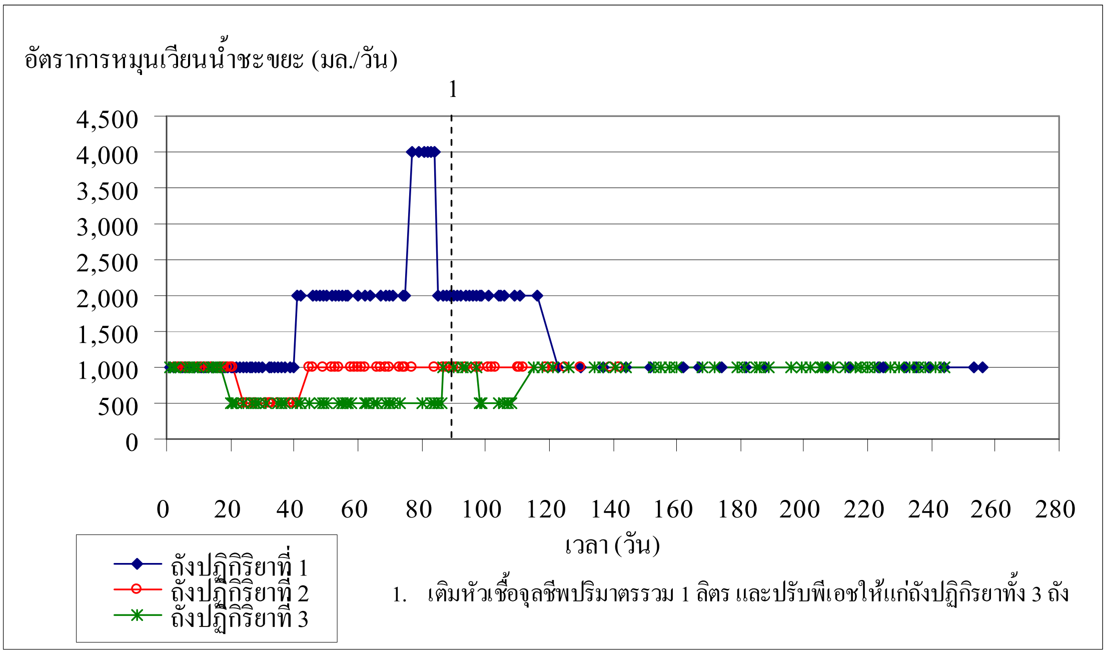
พารามิเตอร์	ค่า
ความเป็นกรด-ด่าง	7.14
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-260.90
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	25,480
สภาพด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	9,384
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	26,824
ของแข็งระเหยได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	14,050

4.3 ผลการทดลองที่ 1 การกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง

การทดลองนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งในกากส้ม และซีโอดีละลายของน้ำกากส้มที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกิริยาจำนวน 3 ถัง แต่ละถังถูกบรรจุด้วยกากส้มหั่นหยาบปริมาณ 10 กิโลกรัม ผสมกับหัวเชื้อจุลชีพปริมาตร 5 ลิตร และมีการหมุนเวียนน้ำชะขยะจากก้นถังเพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง จะแปรผันตามซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถัง และเมื่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง เข้าสู่สภาวะคงตัว ถังปฏิกิริยาใบที่ 1 และ 2 ซึ่งใช้เวลาในการเดินระบบในการทดลองที่ 1 เท่ากับ 256 และ 142 วัน ตามลำดับ จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาการกำจัดน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีในการทดลองที่ 3 ส่วนถังปฏิกิริยาใบที่ 3 จะถูกใช้เป็นชุดควบคุม โดยทำการเดินระบบเป็นเวลา 244 วัน

4.3.1 ผลของการหมุนเวียนน้ำชะขยะต่อถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 1

การหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลชีพได้รับอาหารมากขึ้นเป็นผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กากส้มภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง แสดงดังรูปที่ 4.1

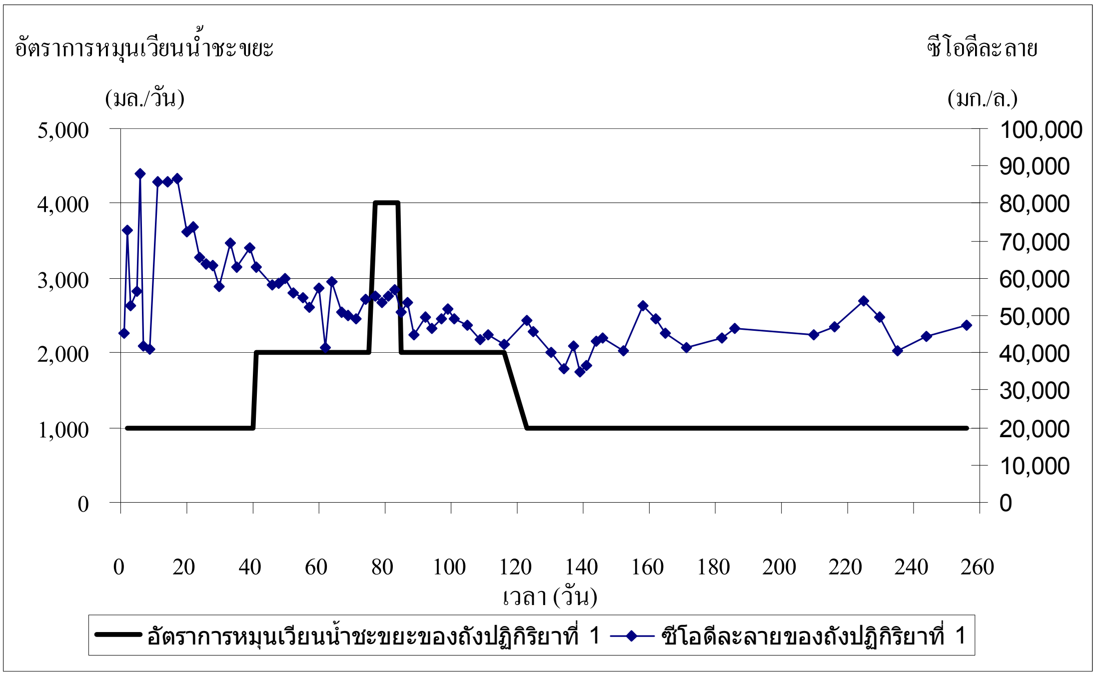


รูปที่ 4.1 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 แสดงในตารางที่ 4.4 โดยในช่วง 40 วันแรกของการเดินระบบ อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 41 และวันที่ 77 ของการเดินระบบ ได้เพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 เป็น 2,000 และ 4,000 มิลลิลิตรต่อวัน เพื่อตรวจสอบว่าถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วหรือไม่ ซึ่งการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็น 2,000 และ 4,000 มิลลิลิตรต่อวัน ส่งผลต่อค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีแนวโน้มสูงขึ้นในวันที่ 64 และวันที่ 83 ของการเดินระบบ ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะทำให้การไหลตามแนวดิ่ง (vertical flow) ของน้ำชะขยะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการชะละลาย (leach) ส่วนที่ยังสามารถย่อยสลายได้ออกมากับน้ำชะขยะในช่วงนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และในวันที่ 85 และวันที่ 123 ของการเดินระบบได้ทำการลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเหลือ 2,000 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะ และหมุนเวียนน้ำชะขยะด้วยอัตรา 1,000 มิลลิลิตรต่อวันจนสิ้นสุดการเดินระบบของถังปฏิกิริยาที่ 1 ในการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.4 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะขาเข้า (มิลลิลิตร/วัน)	ค่าพิสัยของซีโอดีละลายก้นถังปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้า (กรัม/วัน)
1-40	40	1,000	40,972 – 87,946	68.05±14.43
41-76	36	2,000	41,303 – 62,856	109.22±11.11
77-84	8	4,000	53,248 – 56,906	220.55±5.99
85-122	38	2,000	42,325 – 53,312	97.06±7.35
123-256	134	1,000	39,936 – 53,961	44.85±4.48

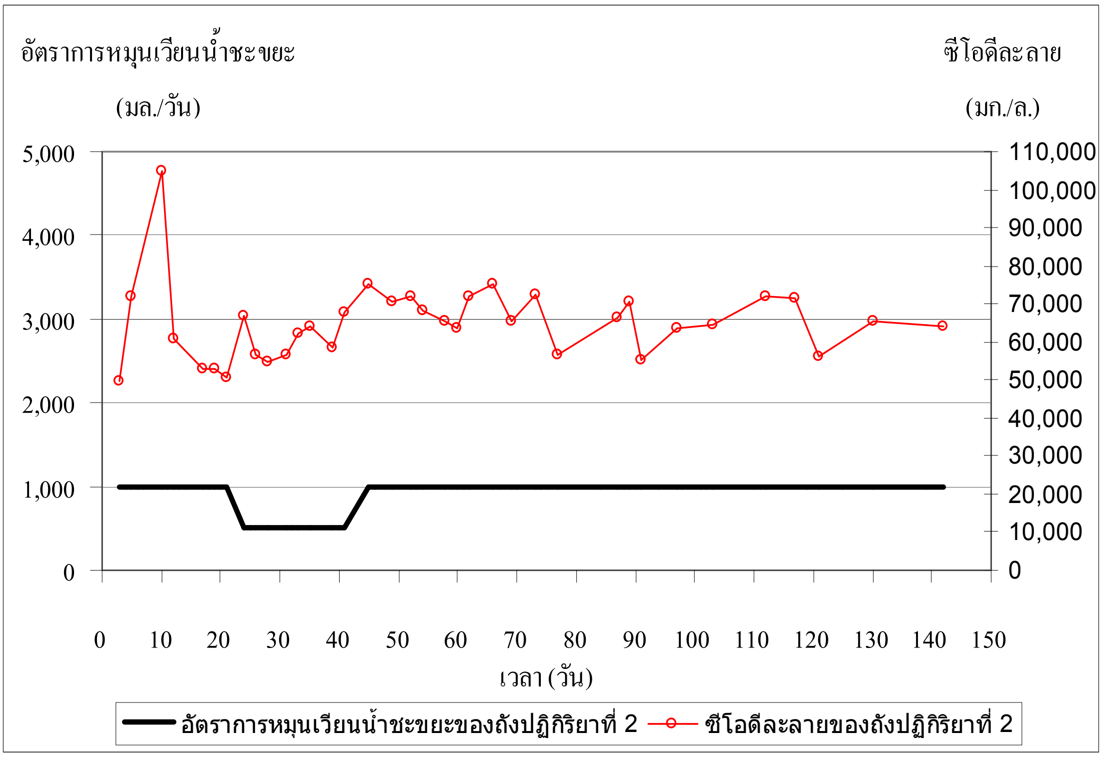


รูปที่ 4.2 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 แสดงในตารางที่ 4.5 โดยในช่วง 21 วันแรกของการเดินระบบ อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 24 ถึงวันที่ 41 ของการเดินระบบ อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเหลือ 500 มิลลิลิตรต่อวัน เนื่องจากเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ และเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็น 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 45 ของการเดินระบบ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในวันที่ 45 ของการเดินระบบ เป็นผลให้เกิดการแพร่ (diffusion) และการไหลในแนวดิ่ง (vertical flow) ของน้ำชะขยะเข้าไปในกากส้มส่วนที่ย่อยสลายได้น้อย และชะละลายส่วนที่ยังสามารถย่อยสลายได้ออกมากับน้ำชะขยะตามลำดับ ทำให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะในวันที่ 24 ถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบ และในวันที่ 62 ถึงวันที่ 73 ของการเดินระบบ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะขาเข้า (มิลลิลิตร/วัน)	ค่าพิสัยของซีโอดีละลายก้นถังปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้า (กรัม/วัน)
1-23	23	1,000	49,713 – 105,120	63.44±19.96
24-44	21	500	54,569 – 67,689	60.93±5.04
45-142	98	1,000	55,289 – 75,274	66.73±5.95

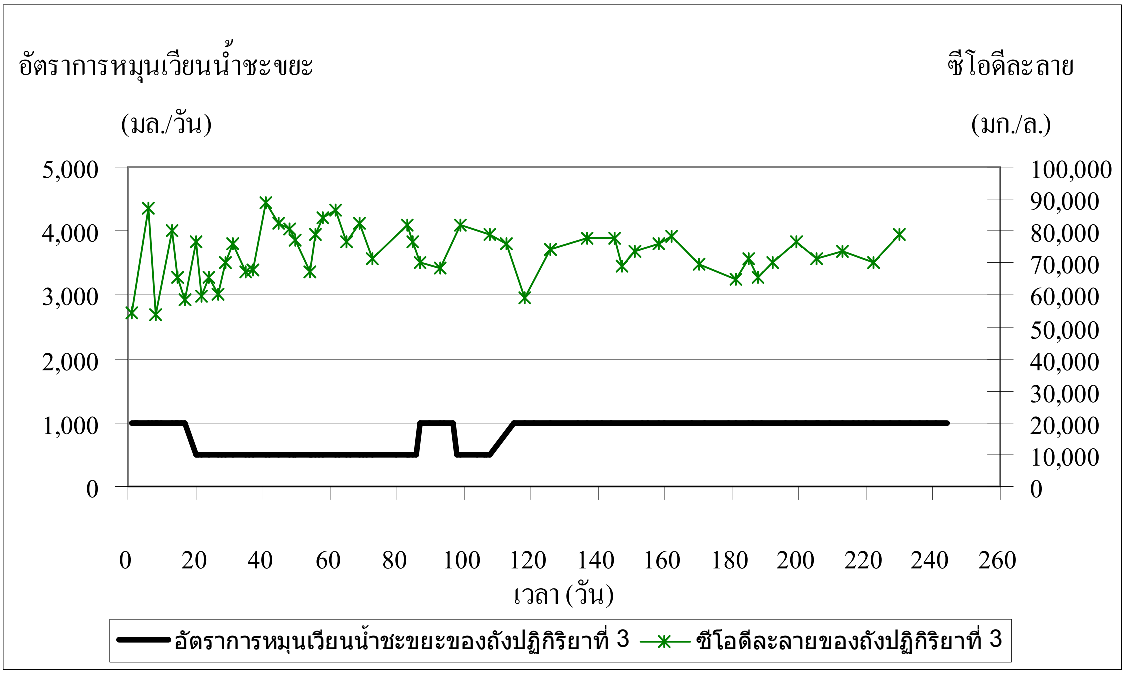


รูปที่ 4.3 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 แสดงในตารางที่ 4.6 โดยในช่วง 19 วันแรกของการเดินระบบ ทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะด้วยอัตรา 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 20 ถึงวันที่ 86 ของการเดินระบบ ลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเหลือ 500 มิลลิลิตรต่อวัน เนื่องจากค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีค่าสูงมาก และเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ จากการลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็นผลให้เกิดการแพร่ (diffusion) ของน้ำชะขยะเข้าไปชะละลายกากส้มส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ออกมากับน้ำชะขยะ ทำให้ซีโอดีละลายของน้ำชะขยะในช่วงนี้มีค่าเพิ่มขึ้น ในวันที่ 87 90 93 94 และ 97 ของการเดินระบบ ได้มีการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบ และเพื่อให้หัวเชื้อจุลชีพที่เติมลงไปนั้นกระจายทั่วทั้งถังปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็น 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน และในวันที่ 115 ของการเดินระบบ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในช่วงนี้มีค่าเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งเกิดจากการถูกชะละลายของกากส้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะขาเข้า (มิลลิลิตร/วัน)	ค่าพิสัยของซีโอดีละลายก้นถังปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้า (กรัม/วัน)
1-19	19	1,000	53,939 – 87,387	66.59±14.06
20-86	67	500	59,520 – 89,098	37.56±4.17
87-97	11	1,000	68,340 – 69,904	69.12±1.11
98-114	17	500	79,190 – 81,616	40.20±0.86
115-244	130	1,000	59,148 – 78,792	72.28±5.88



รูปที่ 4.4 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1

4.3.2 ผลการวิเคราะห์น้ำชะขยะในการทดลองที่ 1

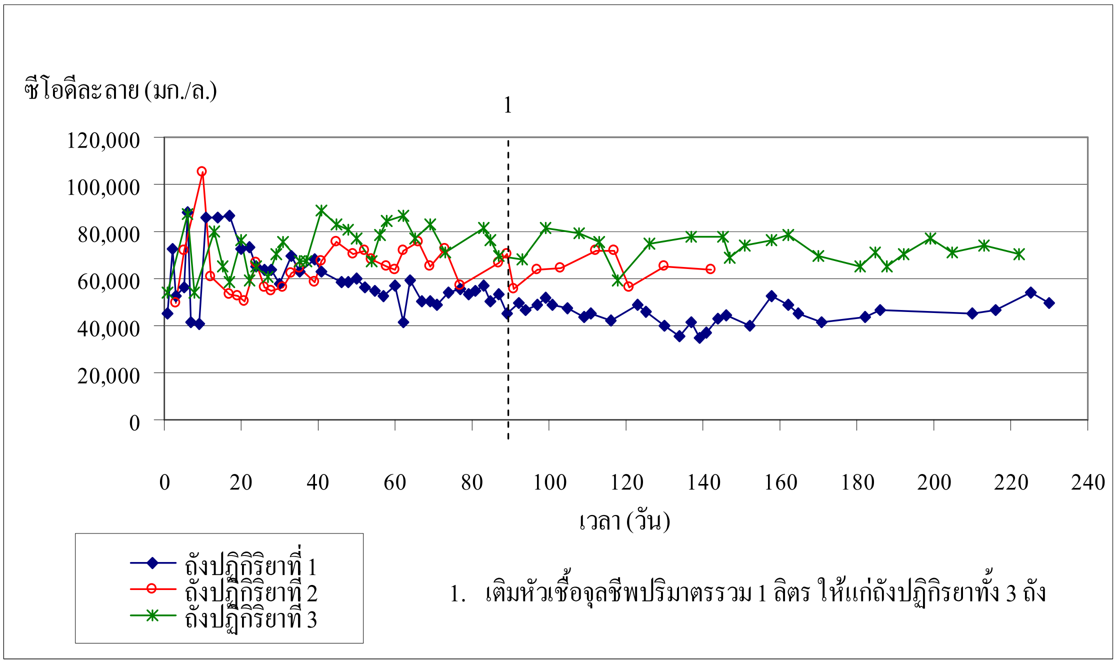
ได้มีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำชะขยะเพื่อตรวจสอบว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ และที่สำคัญค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ยังสามารถบ่งบอกถึงระดับการย่อยสลาย และเฟสต่างๆ ของขยะที่ถูกทำให้เสถียรภายในถังปฏิกิริยาได้อีกด้วย

4.3.2.1 ซีโอดีละลาย และประสิทธิภาพการบำบัด

ค่าซีโอดีละลายสามารถบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง และประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะเป็นค่าที่แสดงความสามารถ หรือประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูง ซึ่งถังหมักไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพสูงทำงานได้ดีจะมีประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะสูงตามไปด้วย ผลการวิเคราะห์ซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถัง แสดงดังรูปที่ 4.5 และข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 45,202 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 87,946 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 6 ของการเดินระบบ ในช่วง 9 วันแรกของการเดินระบบมีความแปรปรวนของค่าซีโอดีละลายมาก

เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มภายในถังปฏิกิริยา มีการชะละลายของน้ำตาลที่ละลายน้ำในกากส้ม และการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) และ/หรือปฏิกิริยาแบบกึ่งไร้อากาศ (facultative reaction) ของสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพบางส่วนภายในถังปฏิกิริยา ในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1 โดยมีค่าพิสัยประมาณ 4,0972-87,946 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีละลายค่อนข้างคงที่ในวันที่ 11 ถึง 17 ของการเดินระบบซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85,980±660 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนที่ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 จะลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53,095±4,198 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 24 ถึงวันที่ 69 ของการเดินระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในช่วงนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 38.25 และในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตรให้แก่ระบบ เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะในถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 มีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงวันที่ 144 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในวันที่ 144 ของการเดินระบบจนสิ้นสุดการเดินระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45,878±4,003 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร้อยละการลดของซีโอดีละลายเท่ากับ 13.59 เมื่อเทียบกับค่าซีโอดีละลายเฉลี่ยของน้ำชะขยะก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53,095±4,198 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบ



รูปที่ 4.5 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 49,713 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 105,120 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 10 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ลดลงอย่างชัดเจนในช่วงวันที่ 12 ถึงวันที่ 21 ของการเดินระบบ โดยความแปรปรวนของข้อมูลซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 อาจเกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มภายในถังปฏิกิริยา มีการชะละลายของน้ำตาลที่ละลายน้ำในกากส้ม และการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) และ/หรือปฏิกิริยาแบบกึ่งไร้อากาศ (facultative reaction) ของส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพบางส่วนภายในถังปฏิกิริยา ในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1 ในวันที่ 24 ถึงวันที่ 45 ของการเดินระบบพบว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่ในวันที่ 73 ของการเดินระบบ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69,278$\pm$4,241 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในช่วง 73 วันแรกของการเดินระบบมีค่าเท่ากับร้อยละ 34.09 และในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตรให้แก่ระบบ เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะในถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเล็กน้อย วันที่ 97 ของการเดินระบบจนสิ้นสุดการเดินระบบของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66,858$\pm$3,771 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร้อยละการลดของซีโอดีละลายเท่ากับ 3.49 เมื่อเทียบกับค่าซีโอดีละลายเฉลี่ยของน้ำชะขยะก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบ

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 54,387 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจากการทดลองในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบ พบว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีความแปรปรวนมาก ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มภายในถังปฏิกิริยา มีการชะละลายของน้ำตาลที่ละลายน้ำในกากส้ม และการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) และ/หรือปฏิกิริยาแบบกึ่งไร้อากาศ (facultative reaction) ของส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพบางส่วนภายในถังปฏิกิริยา ในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1 โดยมีค่าพิสัยประมาณ 53,939-87,387 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีละลายค่อนข้างคงที่ในวันที่ 22 ถึง 27 ของการเดินระบบซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61,830$\pm$3,199 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงวันที่ 29 ถึงวันที่ 87 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าค่าสูงสุดเท่ากับ 89,098 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 41 ของการเดินระบบ โดยค่าซีโอดีละลายในช่วงนี้มีค่าพิสัยมีค่าประมาณ 67,190-89,098 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 79,047$\pm$5,718 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพการกำจัด

ซีโอดีของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในช่วงวันที่ 45 ถึงวันที่ 83 ของการเดินระบบ มีค่าเพียงร้อยละ 11.28 ซึ่งการที่ถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายต่ำ อาจเกิดจากความไม่สมดุลของอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยโดยจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และการใช้กรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน เป็นผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ทำให้ภายในถังปฏิกิริยามีสภาวะเป็นกรด ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานและ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน และเมื่อจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนภายในถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 เริ่มตาย จะเกิดการสะสมของผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) ได้แก่ กรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อภายในระบบมีไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) สูงขึ้นตาม เป็นผลให้กรดไขมันระเหยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรดจะเป็นชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ซึ่งเป็นสับเสตรท (substrate) ที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ (Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo, 2008) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าต่ำ และในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตรให้แก่ระบบ เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะลดลงเล็กน้อย และตั้งแต่วันที่ 147 จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71,620±4,076 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร้อยละการลดของซีโอดีละลายเท่ากับ 19.62 เมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ ซึ่งการที่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในช่วงนี้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสภาพภายในถังปฏิกิริยาไม่เหมาะสมกับการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ที่มีค่าสูง ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีความแปรปรวนมาก และแม้ว่าในการทดลองนี้จะใช้กากส้มชนิดเดียวกัน จากแหล่งเดียวกัน และปริมาณเท่ากันทั้ง 3 ถัง แต่ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มซึ่งเป็นของแข็ง ซึ่งการหมุนเวียนน้ำชะขยะให้แก่ถังปฏิกิริยาจะช่วยให้กากส้มภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของแต่ละถังปฏิกิริยาต้องทำการวิเคราะห์ผลในรูปของร้อยละการกำจัดของแต่ละถังปฏิกิริยา

ในช่วงแรก (ประมาณ 20 วันแรกของการเดินระบบ) ของการบำบัดกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถัง ปฏิกิริยาภายในถังเป็นแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) และ/หรือกึ่งใช้อากาศ (facultative reaction) เนื่องจากอากาศที่ค้างอยู่ภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง ในขั้นตอนการเริ่มต้นเดินระบบ ส่งผลให้สารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพบางส่วนภายในถังปฏิกิริยา เช่น น้ำส้ม และน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ภายในกากส้ม ถูกย่อย

สลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีปริมาณมากซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3.3 ส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายไปในช่วง 30 ถึง 40 วันแรกของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (ก่อนวันที่ 85 ของการเดินระบบ) มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในช่วงหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายต่ำ ดังสรุปในตารางที่ 4.7 อาจมีสาเหตุมาจาก

1. กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศติดขัดเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยาไม่เหมาะสมต่อการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้หัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ระบบในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบ (ซึ่งเป็นการเติมจุลชีพทั้งกลุ่มสร้างกรด และกลุ่มสร้างมีเทนให้แก่ระบบ) ทำงานได้ไม่ดี และ/หรือไม่สามารถทำงานได้ เป็นผลให้กรดไขมันระเหยคงค้างอยู่ภายในระบบ (ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3.2.2) ไม่เปลี่ยนเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงส่งผลให้ไม่เกิดการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ

2. สารอาหารหลัก (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอสำหรับการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพไร้อากาศกลุ่มต่างๆ เนื่องจากใช้กากส้มเพียงอย่างเดียวเป็นสับเสตรท (substrate) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3.2.5

3. สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง ส่วนใหญ่เป็นส่วนที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ

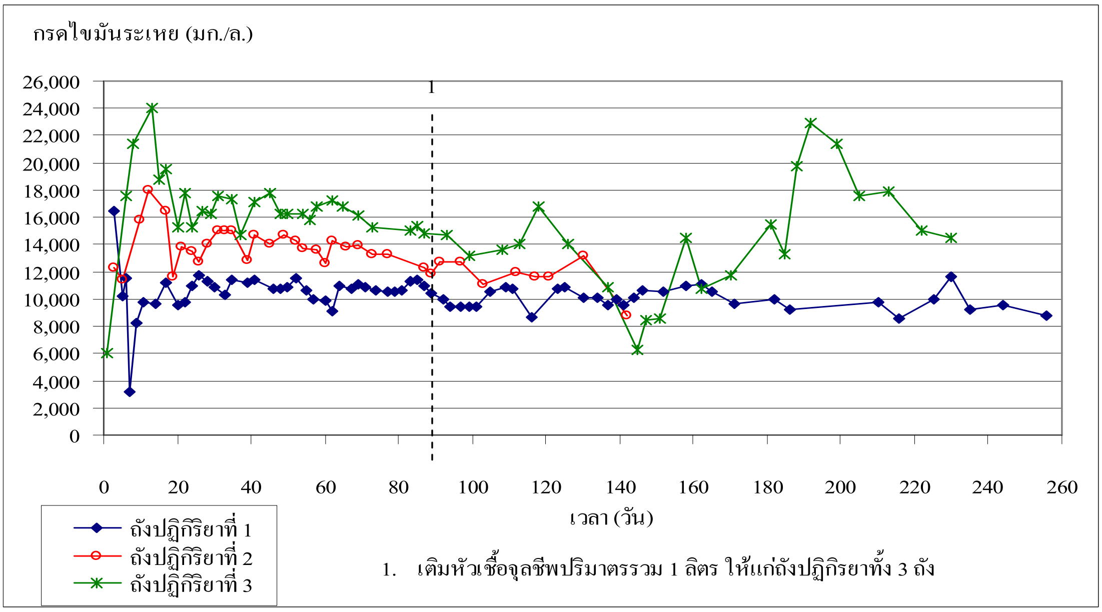
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศแต่ละถังในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยา	ประสิทธิภาพของระบบก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (ร้อยละการกำจัด)	ประสิทธิภาพของระบบหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพ (ร้อยละการกำจัด)	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (ร้อยละการกำจัด)
ถังปฏิกิริยาที่ 1	38.25	13.59	46.64
ถังปฏิกิริยาที่ 2	34.09	3.49	36.40
ถังปฏิกิริยาที่ 3	11.28	9.39	19.62

หมายเหตุ การคำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นอาหารของจุลชีพในการทดลองที่ 1 นี้ ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากรูปแบบที่ใช้ในการทดลองที่ 1 นี้ ไม่ใช่การทดลองแบบทีละเท (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continue) อย่างแท้จริง จึงทำให้อัตราการไหลไม่คงที่ อีกทั้งไม่สามารถแยกข้อมูลช่วงที่ปฏิกิริยาเป็นแบบไร้อากาศออกจากปฏิกิริยาแบบใช้อากาศและกึ่งไร้อากาศที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 1 ได้ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณสมดุลมวลได้

4.3.2.2 กรดไขมันระเหย

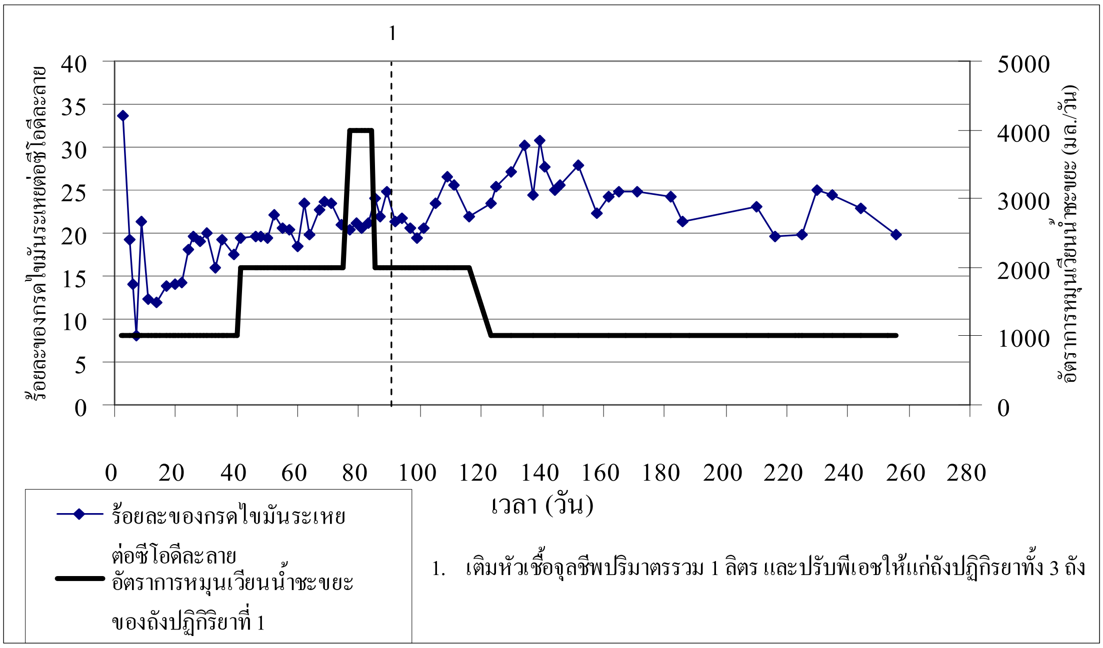
ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ กรดไขมันระเหยเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเดินระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นอย่างมาก โดยกรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมัก เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และกรดไขมันระเหยที่สำคัญที่สุดคือ กรดอะซิติก (acetic acid) เพราะในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนจะเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดอะซิติก (Acetoclastic) เป็นปฏิกิริยาหลัก ในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศที่ทำงานได้ดีอัตราการผลิต และอัตราการใช้กรดไขมันระเหยต้องสมดุลกัน มิฉะนั้นจะเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพจนทำให้ระบบล้มเหลวได้ ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศแบบชองแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถัง แสดงดังรูปที่ 4.6 และข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 4.6 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในช่วง 22 วันแรกของการเดินระบบ มีความแปรปรวนมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในวันที่ 24 ของการเดินระบบ จากนั้นค่ากรดไขมันระเหยจึงเริ่มมีแนวโน้มที่จะคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยเท่ากับ 10,831$\pm$578 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 จะพบว่าค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17.98 เป็นร้อยละ 24.07 ในช่วงวันที่ 24 ถึงวันที่ 85 ของการเดินระบบ ซึ่งตรงกับช่วงที่มีการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ แสดงว่าการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำ

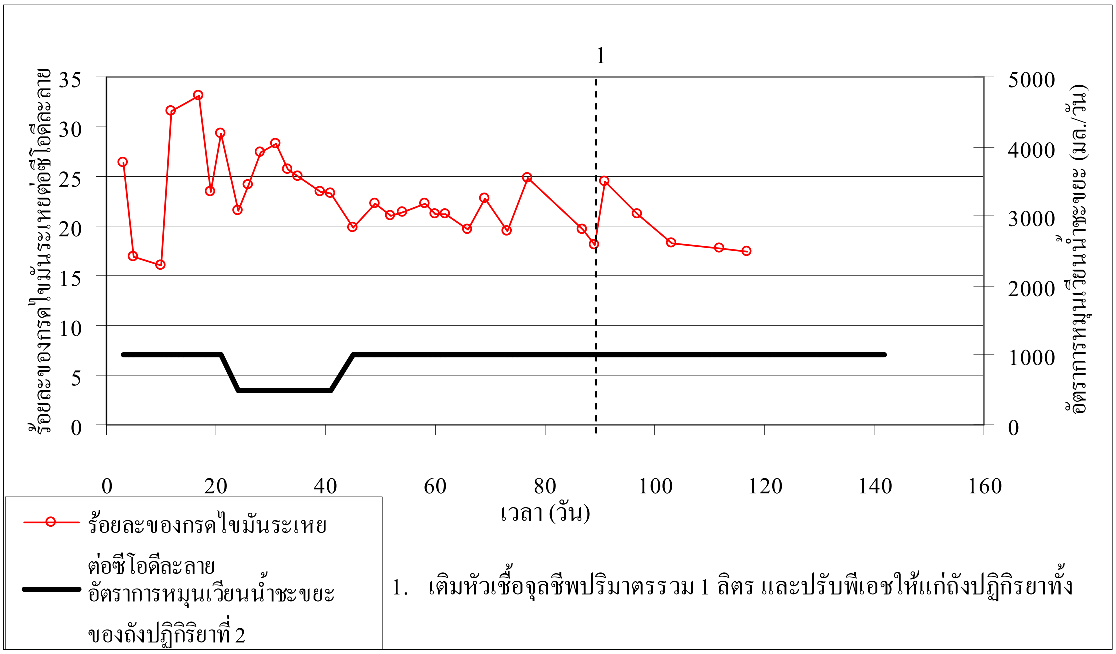
ชะขยะนอกจากจะเกิดการชะละลายส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ออกมากับน้ำชะขยะ แล้วยังมีส่วนช่วยให้กระบวนการหมัก (fermentation) เกิดได้มากขึ้นอีกด้วย และค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงวันที่ 109 ถึงวันที่ 152 ของการเดินระบบ เนื่องจากหัวเชื้อจุลชีพที่เติมลงไปในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 สามารถกระจายทั่วทั้งถังปฏิกิริยาแล้ว แสดงว่าภายในถังปฏิกิริยายังคงมีสารอินทรีย์ส่วนที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยอยู่ และเมื่อเติมหัวเชื้อจุลชีพซึ่งเป็นการเติมทั้งจุลชีพกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน สารอินทรีย์ที่มีศักยภาพจึงถูกจุลชีพกลุ่มสร้างกรดเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยเป็นผลให้ค่าร้อยละกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตั้งแต่วันที่ 171 ของการเดินระบบ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ ค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยเท่ากับ 9,642±849 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1

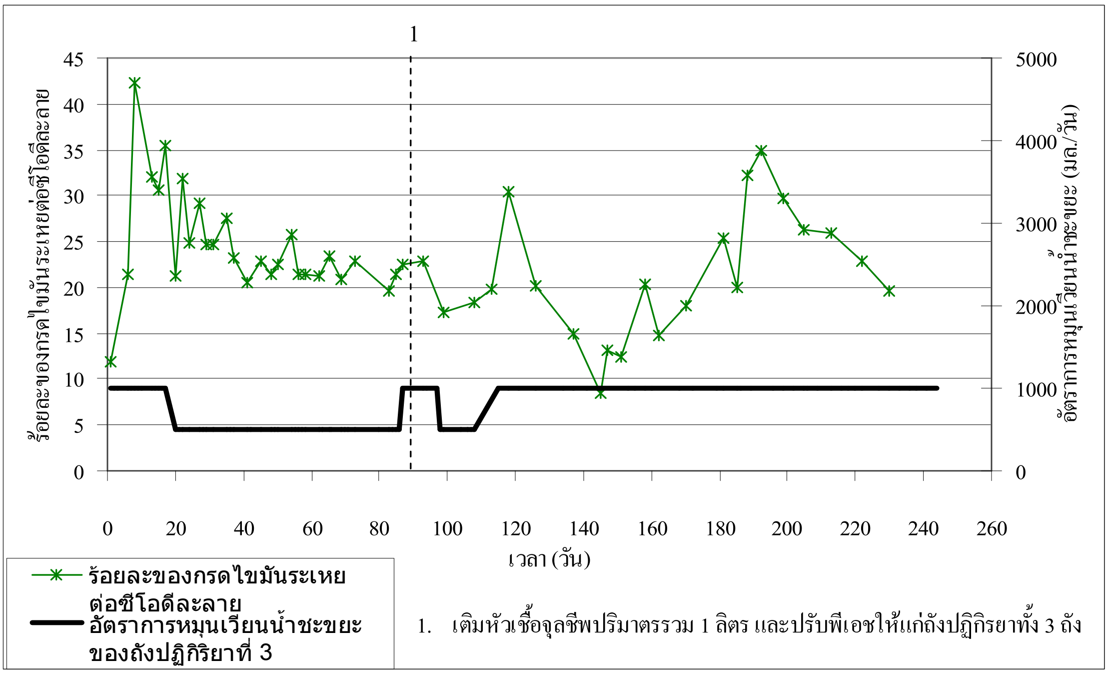
ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในช่วง 17 วันแรกของการเดินระบบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยสูงถึง 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในช่วงวันที่ 24 ถึงวันที่ 41 ของการเดินระบบ เพื่อป้องกันการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ จากการลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็นผลให้ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13,996±770 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงวันที่ 24 ถึง 69 ของการเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งความเข้มข้นของ

กรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 อาจก่อให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน อันเป็นผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนได้ ภายหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในวันที่ 90 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่าภายในถังปฏิกิริยายังคงมีสารอินทรีย์ส่วนที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยอยู่ และในช่วงท้ายของการเดินระบบค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,976±553 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.8 ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1

ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในช่วง 17 วันแรกของการเดินระบบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยสูงถึง 24,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงต้องลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในช่วงวันที่ 20 ถึงวันที่ 86 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ค่ากรดไขมันระเหยมีค่าพิสัยประมาณ 14,750-17,750 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16,310±940 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในช่วงที่ลดอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเหลือ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าพิสัยประมาณร้อยละ 19.60-25.77 ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1

ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง อาจเป็นสาเหตุการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน อันเป็นผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนได้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด ซึ่งสอดคล้องกับถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายต่ำ ในช่วงวันที่ 137 ถึงวันที่ 151 ของการเดินระบบ ค่ากรดไขมันระเหยมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบในวันที่ 85 ถึง 90 ของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 และในวันที่ 158 ของการเดินระบบ ค่ากรดไขมันระเหย และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแล้วจึงเริ่มลดลงในวันที่ 205 ของการเดินระบบ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ ซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหยในช่วงวันที่ 158 ถึงวันที่ 205 ของการเดินระบบ เป็นผลมาจากการใช้กรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนต่ำกว่าการผลิตกรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างกรด ซึ่งทราบได้จากร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีค่าสูงขึ้น และค่าสภาพด่างที่ลดลงในช่วงเวลาดังกล่าว

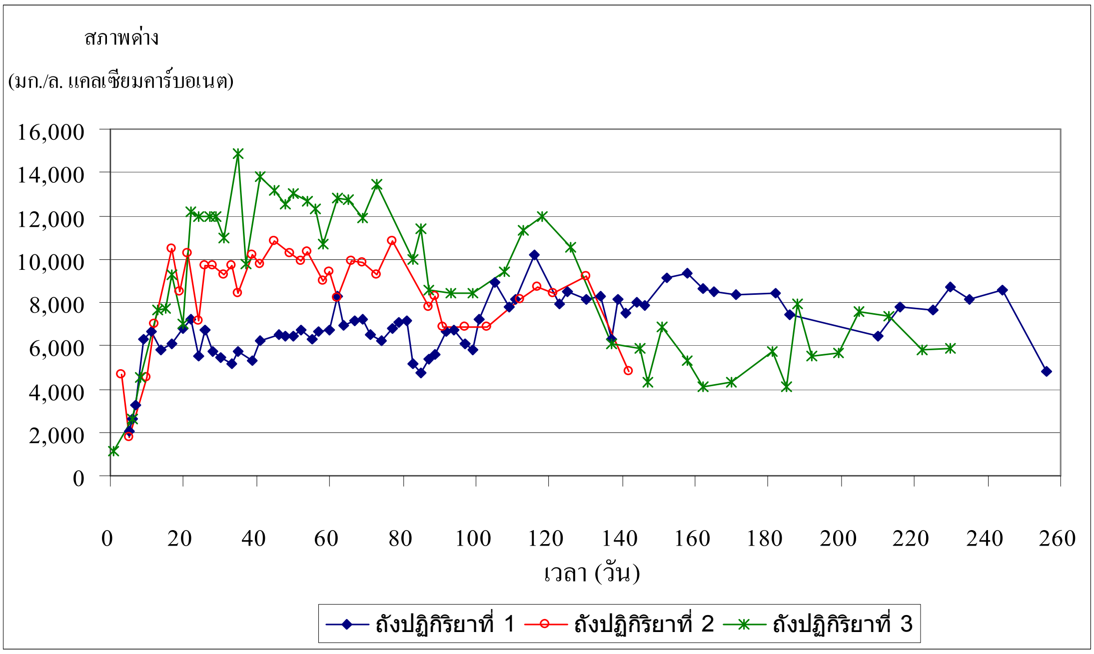
จากผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 พบว่าในช่วงแรก (ประมาณ 20 วันแรกของการเดินระบบ) สารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพในกากส้มถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยที่มีความเข้มข้นสูง เป็นผล

ให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง โดยเฉพาะถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยมากที่สุด (24,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้สภาพแวดล้อมภายในถังหมักไร้อากาศไม่เหมาะสมต่อการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำ

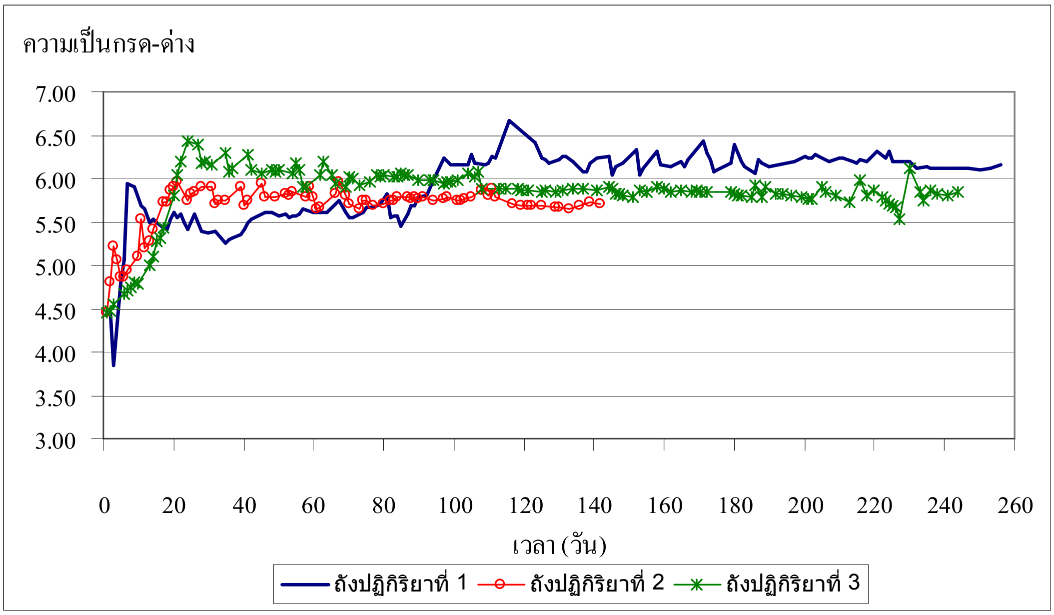
4.3.2.3 สภาพด่าง และความเป็นกรด-ด่าง

สภาพด่างคือความสามารถในการสะเทินกรด ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อใช้ในการควบคุมความเป็นกรด-ด่างของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันไม่ให้ความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (pH drop) ผลการวิเคราะห์สภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถัง แสดงดังรูปที่ 4.10 และข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก

ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบมีค่าต่ำ เนื่องจากกรดไขมันระเหยที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายเกิดขึ้นมากในช่วงนี้ ทำให้สภาพด่างถูกใช้เป็นบัฟเฟอร์มากตามไปด้วย ส่งผลให้สภาพด่างในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าต่ำ โดยค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2,040-6,800 1,800-10,500 และ 1,140-9,250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เรียงตามถังปฏิกิริยา และจะเพิ่มขึ้นตามกรดไขมันระเหยที่ถูกใช้ไป โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขั้นตอนการย่อยสลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

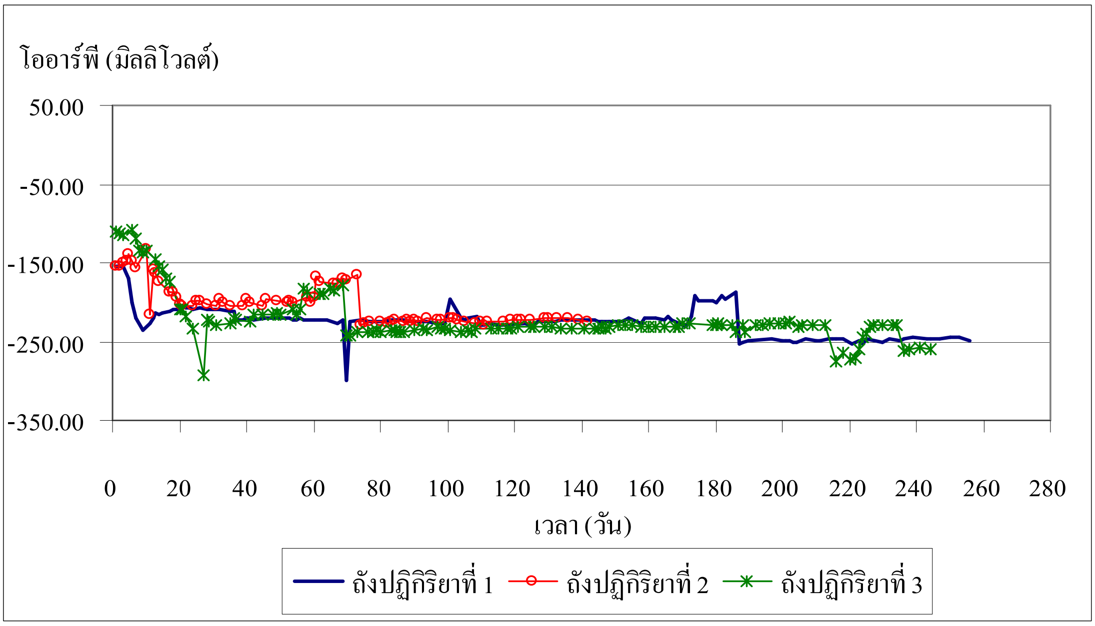


รูปที่ 4.11 ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ค่าความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขึ้นอยู่กับกรดไขมันระเหยง่าย สภาพด่าง และความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในระบบ โดยในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบ ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าต่ำ เนื่องจากกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นมาก จึงส่งผลให้สภาพด่างในน้ำชะขยะมีค่าน้อย ซึ่งสภาพด่างเป็นตัวควบคุมความเป็นกรด-ด่างของระบบ และความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะจะเพิ่มขึ้นเมื่อกรดไขมันระเหยลดลง โดยความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในช่วงท้ายของการเดินระบบ มีค่าพิสัยประมาณ 5.65-6.4 ดังแสดงในรูปที่ 4.11

4.3.2.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบมีค่าติดลบน้อย เนื่องจากภายในถังปฏิกิริยายังมีอากาศอยู่บ้าง ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าการลดลงของค่าซีโอดีละลายในช่วงแรกของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง อาจเกิดจากปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) และ/หรือปฏิกิริยาแบบกึ่งไร้อากาศ (facultative reaction) ของส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพบางส่วนภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง และตั้งแต่วันที่ 20 ของการเดินระบบ ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง เริ่มมีค่าเป็นลบมากจนมีค่าประมาณ -220 ถึง -270 มิลลิโวลต์ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ ซึ่งแสดงว่าภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง อยู่ในสภาพไร้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



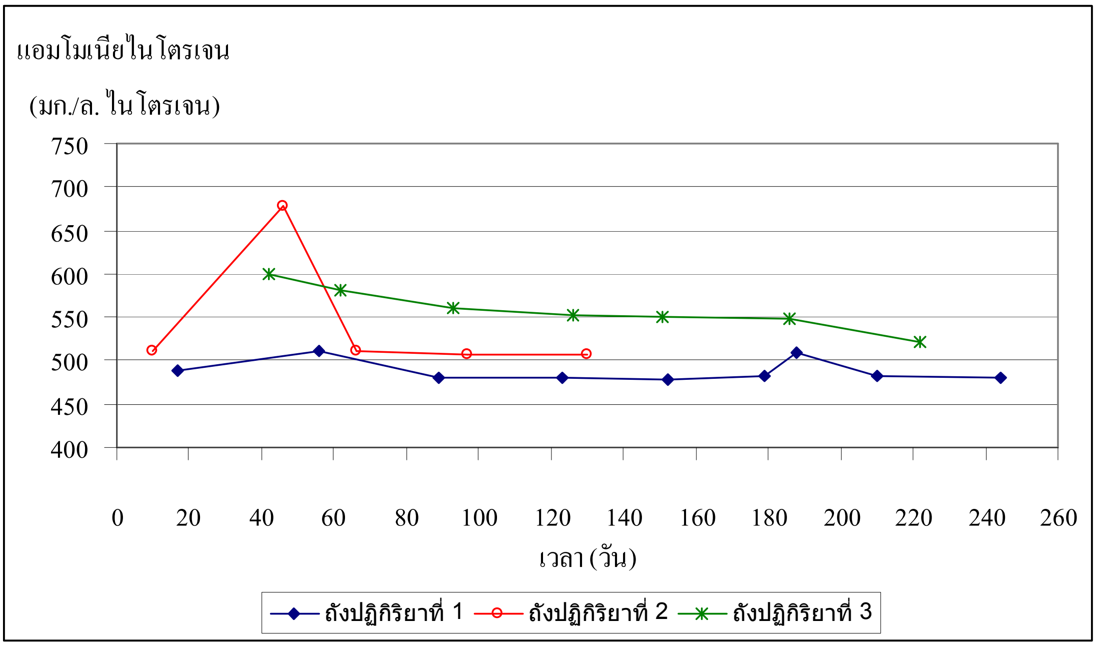
รูปที่ 4.12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

4.3.2.5 สารอาหาร

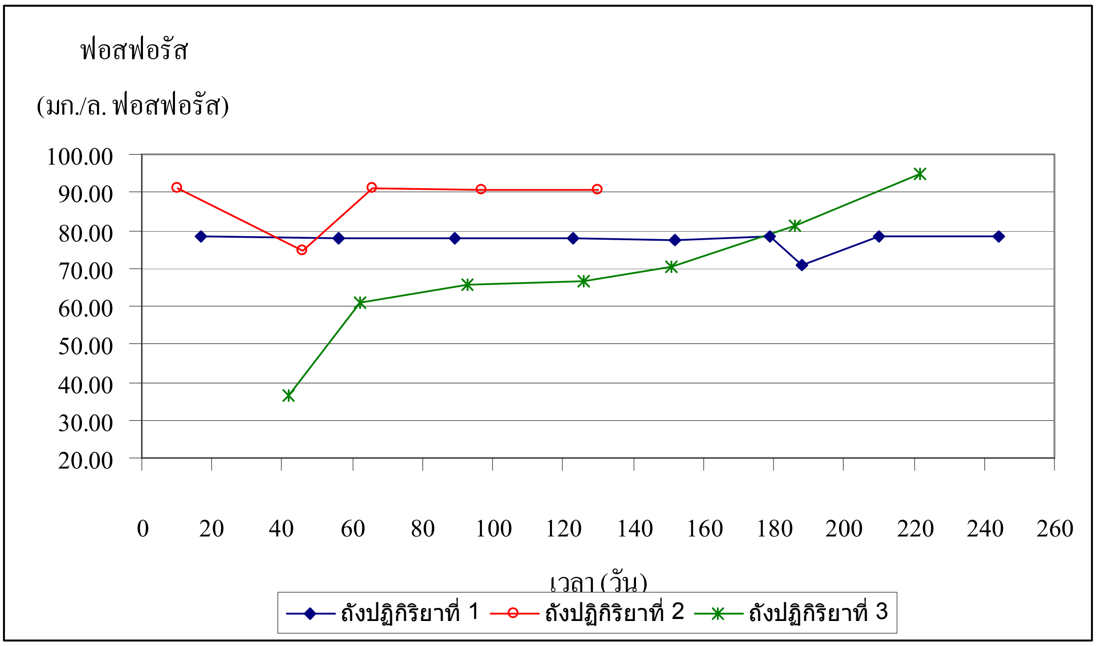
สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศคือไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งรูปแบบของไนโตรเจนที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้ง่ายที่สุดคือแอมโมเนียไนโตรเจน ผลการวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง พบว่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์โดยจุลชีพกลุ่มต่างๆ ในช่วงแรกของการเดินระบบ และช่วงท้ายของการเดินระบบตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ออร์โธฟอสเฟตถูกใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณฟอสฟอรัสที่จุลชีพในระบบไร้อากาศสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ โดยออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากจุลชีพในระบบไร้อากาศจะใช้ฟอสฟอรัสเพียงเล็กน้อยในการสร้างเซลล์ ผลการวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง แสดงในรูปที่ 4.14

จากการวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง พบว่าภายในถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ที่ใช้กากส้มเป็นสับเสตรทเพียงอย่างเดียวมีสารอาหารไม่เพียงพอสำหรับใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศตาม



รูปที่ 4.13 ค่าแอมโมเนียในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.14 ค่าออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

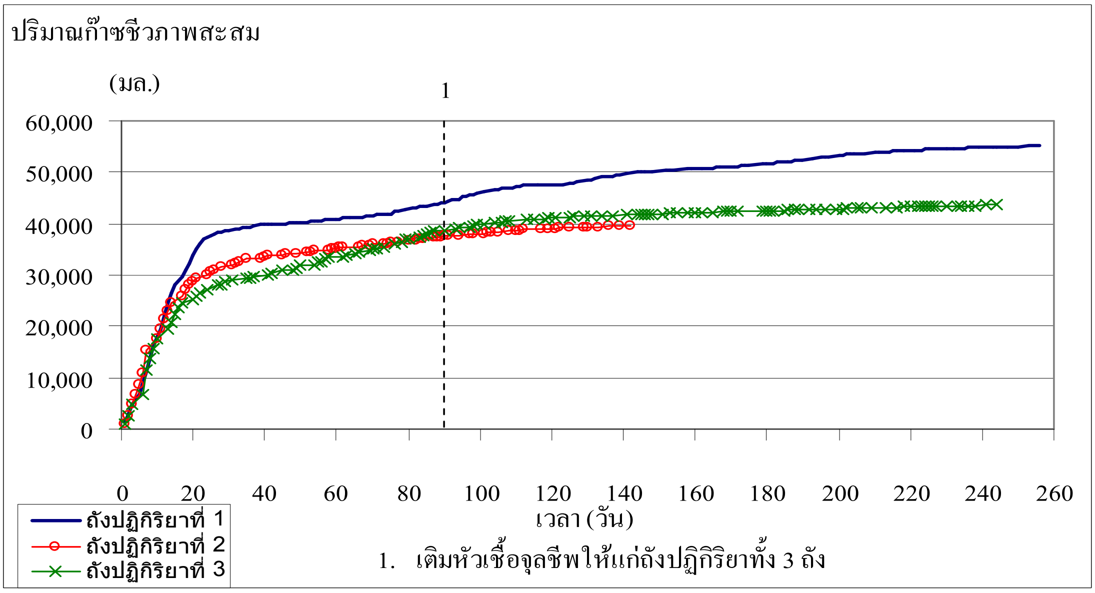
อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 : 2 : 0.4 (Speece, 1996) ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

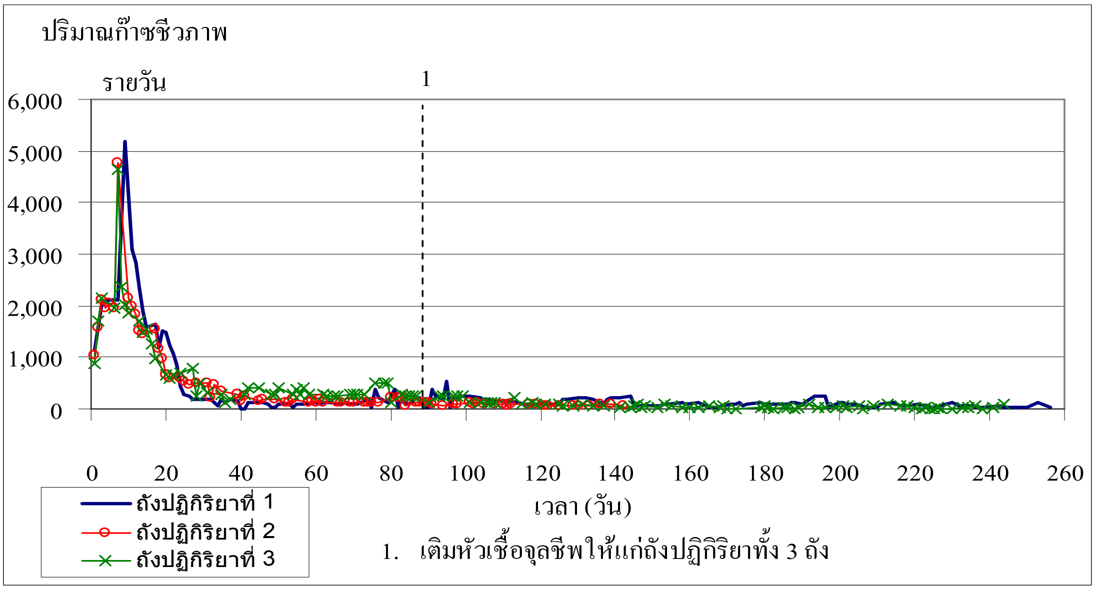
วันที่ทำการวิเคราะห์	อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส
ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่ 17 ของการเดินระบบ	100 : 0.56 :0.09
วันที่ 56 ของการเดินระบบ	100 : 0.98 : 0.15
วันที่ 89 ของการเดินระบบ	100 : 1.07 : 0.17
วันที่ 123 ของการเดินระบบ	100 : 0.99 : 0.16
วันที่ 152 ของการเดินระบบ	100 : 1.19 : 0.19
วันที่ 179 ของการเดินระบบ	100 : 1.17 : 0.19
วันที่ 188 ของการเดินระบบ	100 : 1.10 : 0.15
วันที่ 210 ของการเดินระบบ	100 : 1.07 : 0.17
วันที่ 244 ของการเดินระบบ	100 : 1.08 : 0.18
ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่ 10 ของการเดินระบบ	100 : 0.49 : 0.09
วันที่ 46 ของการเดินระบบ	100 : 0.90 : 0.10
วันที่ 66 ของการเดินระบบ	100 : 0.68 : 0.12
วันที่ 97 ของการเดินระบบ	100 : 0.80 : 0.14
วันที่ 130 ของการเดินระบบ	100 : 0.77 : 0.14
ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่ 42 ของการเดินระบบ	100 : 0.67 : 0.04
วันที่ 62 ของการเดินระบบ	100 : 0.67 : 0.07
วันที่ 93 ของการเดินระบบ	100 : 0.82 : 0.10
วันที่ 126 ของการเดินระบบ	100 : 0.74 : 0.09
วันที่ 151 ของการเดินระบบ	100 : 0.74 : 0.10
วันที่ 186 ของการเดินระบบ	100 : 0.77 : 0.11
วันที่ 222 ของการเดินระบบ	100 : 0.74 : 0.13

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลองที่ 1

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันจากการย่อยสลายของกากส้มภายในถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ เมื่อถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง เข้าสู่สภาวะคงตัวปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายของกากส้มภายในสภาวะไร้อากาศเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีคือ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีในแต่ละถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยา	ก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (วันที่ 1 ถึงวันที่ 85 ของการเดินระบบ)				หลังเติมหัวเชื้อจุลชีพ (วันที่ 85 ของการเดินระบบจนสิ้นสุดการเดินระบบ)				รวม (วันที่ 1 ของการเดินระบบจนสิ้นสุดการเดินระบบ)			
	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี
1	231.35	179.74	43.44	24.17	71.86	55.83	11.68	20.92	303.21	235.57	55.12	23.35
2	111.00	86.24	37.12	43.04	32.32	25.11	2.47	9.84	143.32	111.35	39.59	35.55
3	97.55	75.79	37.96	50.09	34.38	26.71	5.72	21.42	131.93	102.50	43.68	42.61

จากตาราง 4.9 จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าต่ำกว่าปริมาณก๊าซทางทฤษฎีมาก อาจมีสาเหตุมาจาก

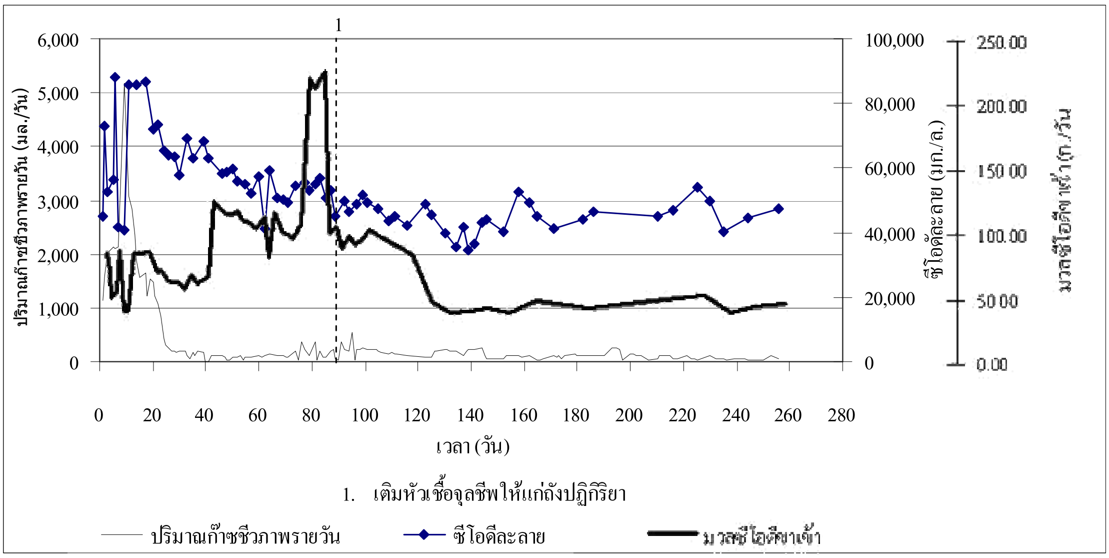
1. เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ภายในระบบ เนื่องจากเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังปฏิกิริยาทำให้ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรดซึ่งได้แก่ กรดไขมันระเหย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นมีเทน และสะสมอยู่ภายในระบบ (Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo, 2008)

2. เกิดจากถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองอาจปิดไม่สนิท และ/หรือมีรอยรั่วตามข้อต่อต่างๆ ของถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการรั่วออก (leak) ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งโมเลกุลมีขนาดเล็กสามารถรั่วออกได้ง่าย

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันจากการย่อยสลายของกากส้มภายในถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง สังเกตได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบ มีก๊าซเกิดขึ้นปริมาณมาก ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าเป็นอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีค่าติดลบน้อยในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ และในวันที่ 11 จนถึงประมาณวันที่ 40 ของการเดินระบบถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีการเกิดก๊าซชีวภาพรายวันในปริมาณสูง และค่าซีโอดีละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงดังกล่าวแสดงว่าส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพถูกย่อยสลายในช่วงนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังปฏิกิริยา มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยในช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 มีค่าแปรปรวนมาก เนื่องจากในช่วงนี้น้ำชะขยะที่หมุนเวียนกลับเข้าถังหมักไร้อากาศทางด้านบนของถังปฏิกิริยาเริ่มเกิดการกระจายตัว ในขณะเดียวกันก็เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี และการถ่ายโอนมวลสารภายในถังหมักไร้อากาศ ทำให้ค่าซีโอดีละลายมีค่าแปรปรวน ในช่วงวันที่ 11 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายในช่วงนี้ ในขณะที่ค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว จึงกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ภายในถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 เริ่มเกิดการหมัก (fermentation) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เริ่มติดลบมากขึ้นในช่วงดังกล่าว ในวันที่ 77 ถึงวันที่ 84 ของการเดินระบบ ได้ทำการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะเป็น 4,000 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นผลให้มวลซีโอดีขาเข้าในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าสูงถึง 220.55$\pm$5.99 กรัมต่อวัน แต่ก็ไม่ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในวันที่ 85

ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายกากส้มในสภาวะไร้อากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.17 แต่เมื่อพิจารณามวลซีโอดีของหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ระบบมีค่าเพียง 22.97 กรัม (ค่าซีโอดีของหัวเชื้อจุลชีพคูณกับปริมาณหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ระบบ) หรือคิดเป็นร้อยละ 0.46 ของมวลซีโอดีขาเข้าสะสมทั้งหมดตลอดช่วงการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 (4,973.98 กรัม) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศจึงไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และในช่วงวันที่ 144 ของการเดินระบบจนสิ้นสุดการเดินระบบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงว่าถังปฏิกิริยาถังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว

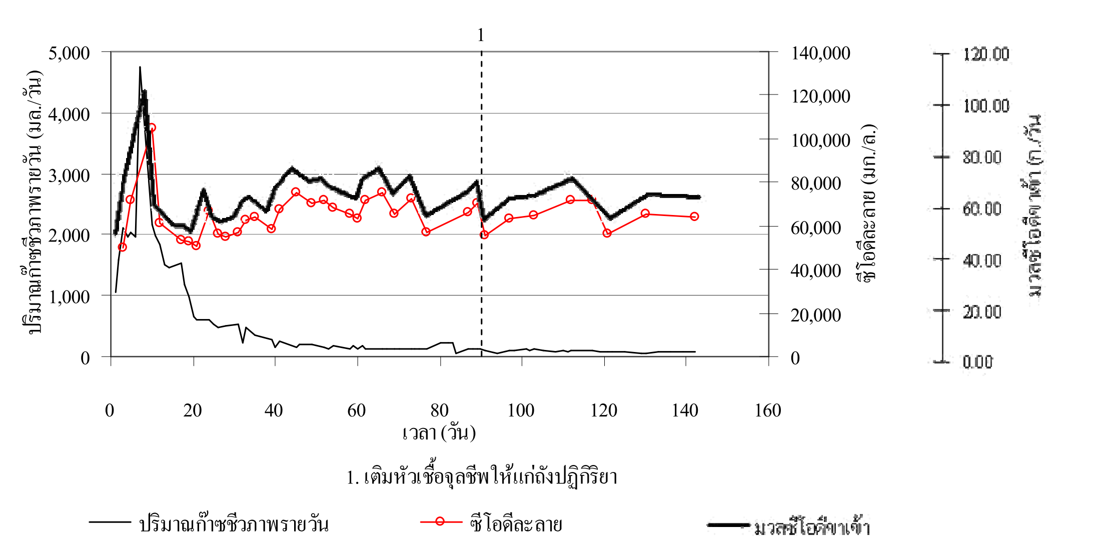


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 1

ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถทำได้ในวันที่ 123 ของการเดินระบบ เนื่องจากความไม่พร้อมของอุปกรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาที่ 1 พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทน ณ วันที่ 123 และวันที่ 250 ของการเดินระบบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.75 และร้อยละ 1.78 โดยปริมาตร ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าต่ำมากเนื่องจากกากส้มย่อยสลายในสภาพไร้อากาศได้ยาก และช่วงที่ทำการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศอยู่ในช่วงสุดท้ายแล้ว

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 เกิดในอัตราสูงในช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบ แต่ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีแนวโน้มสูงขึ้นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2.2 แสดงว่าก๊าซที่เกิดขึ้นน่าจะเป็น

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (aerobic reaction) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีค่าติดลบน้อยในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ในวันที่ 11 ถึงวันที่ 40 ของการเดินระบบ มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากแล้วจึงค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 130.63$\pm$21.20 มิลลิลิตรต่อวัน ในช่วงวันที่ 52 ถึงวันที่ 77 ของการเดินระบบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีละลาย และกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะที่ค่อยๆ ลดลงในช่วงเวลาดังกล่าว และภายหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตร ให้แก่ระบบในวันที่ 90 ของการเดินระบบ ซึ่งมวลซีโอดีของหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ระบบมีค่าเท่ากับ 22.97 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 1.03 ของมวลซีโอดีขาเข้าสะสมทั้งหมดตลอดช่วงการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 (2,236.10 กรัม) ดังนั้นการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศจึงไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ เมื่อพิจารณาค่าซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูป 4.18 แสดงว่าสารอินทรีย์ที่คงเหลืออยู่ในน้ำชะขยะเป็นส่วนที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ จึงกล่าวได้ว่าถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 เข้าสู่สภาวะคงตัว และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศพบว่าความเข้มข้นมีเทน ณ วันที่ 123 ของการเดินระบบ มีมีเทนเพียงร้อยละ 0.6 โดยปริมาตร และวันที่ 136 ของการเดินระบบไม่พบก๊าซมีเทนในก๊าซตัวอย่าง

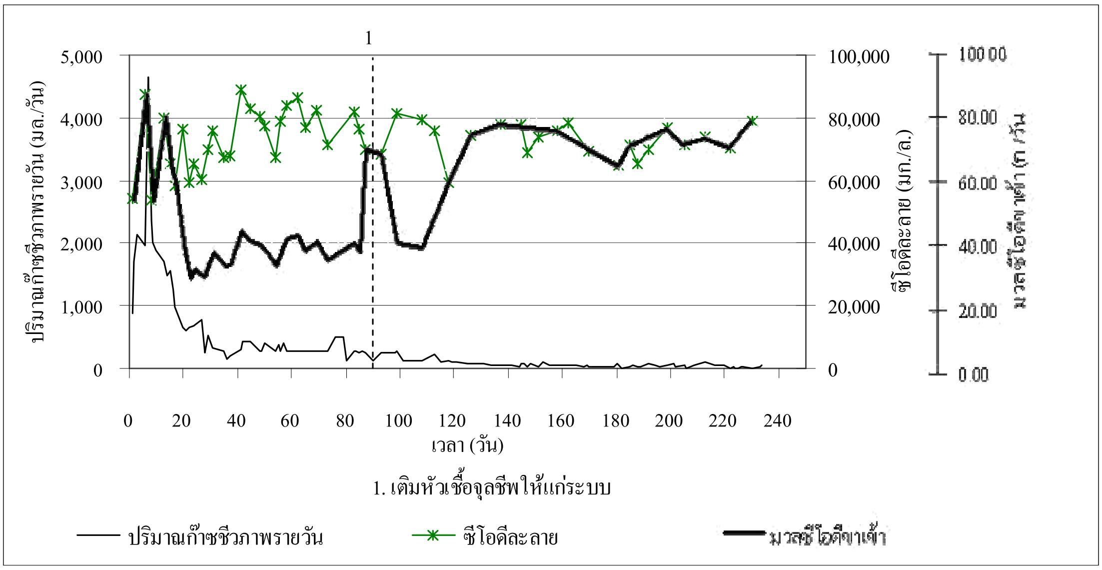


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 1

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายกากส้มของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 39.59 ลิตร แต่เมื่อพิจารณามวลซีโอดีที่ถูกกำจัดระหว่างถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 และ 3 พบว่าถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 สามารถกำจัดมวลซีโอดีได้มากกว่าถัง

หมักไร้อากาศถังที่ 3 แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าสูงกว่า แสดงว่าถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 อาจปิดไม่สนิท และ/หรือมีรอยรั่วตามข้อต่อต่างๆ ของถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการรั่วออก (leak) ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลาย มวลซีโอดีที่ถูกกำจัด และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.19 และจากหัวข้อ 4.3.2.1 จะเห็นว่าถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะต่ำ แต่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 43.68 ลิตร และความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง และนอกจากนี้ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ยังมีค่าสูงตลอดการทดลองในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบ (85 วันแรกของการเดินระบบ) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.3.2.2 ทำให้สันนิษฐานได้ว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ส่วนใหญ่น่าจะเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) และการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในถังปฏิกิริยาเป็นผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกิริยาเริ่มลดต่ำลงจนไม่เหมาะสมที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนจะทำงาน และ/หรือดำรงอยู่ และเมื่อจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนมีไม่เพียงพอต่อการใช้ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด (กรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน) ที่สะสมอยู่ภายในถังปฏิกิริยา เป็นผลให้กรดไขมันระเหยที่ถูกเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรดในสภาวะที่มีความดันพาร์ทเชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) สูงเป็นกรดไขมันระเหยชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ซึ่งกรดไขมันระเหยเหล่านี้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ จนเกิดการขาดแคลนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนภายในถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในที่สุด จึงจำเป็นต้องลดมวลซีโอดีขาเข้าเหลือ 37.56$\pm$4.17 กรัมต่อวัน ในวันที่ 20 ถึงวันที่ 86 ของการเดินระบบ เพื่อลดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ ซึ่งก็ยังไม่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตร ให้แก่ถังหมักไร้อากาศในวันที่ 85 ถึงวันที่ 90 ของการเดินระบบ ซึ่งมวลซีโอดีของหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ระบบมีค่าเท่ากับ 22.97 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 1.04 ของมวลซีโอดีขาเข้าสะสมทั้งหมดตลอดช่วงการเดินระบบถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 (2,202.06 กรัม) ดังนั้นการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศจึงไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ ตั้งแต่วันที่ 115 ของการเดินระบบ ได้ทำการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าเป็น 72.28$\pm$5.88 กรัมต่อวัน จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ ก็ไม่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ในการทดลองที่ 1

ส่วนผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นก๊าซมีเทนในช่วง 100 วันแรกของการเดินระบบ ปรากฏว่าไม่พบก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 และในวันที่ 133 ของการเดินระบบ ได้ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซและวิเคราะห์ผลอีกครั้ง พบว่ามีก๊าซมีเทนความเข้มข้นเพียงร้อยละ 0.4 โดยปริมาตร

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 3 ถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1 จะพบว่าสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำมาก (ไม่เกินร้อยละ 3 โดยปริมาตร) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการกำจัดของแข็งในกากส้มมากกว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากส้ม และเนื่องจากมีการคาดการณ์อยู่แล้วว่าจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนอาจทำงานได้ไม่เต็มที่เนื่องจากภาวะไม่เหมาะสม ดังนั้นหากต้องการเน้นประเด็นของคุณภาพ และปริมาณก๊าซชีวภาพ ควรออกแบบการทดลองให้การวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่มีความถี่สูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดความแม่นยำกว่าการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

จากผลการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลองที่ 1 ที่กล่าวไปข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าสาเหตุที่ทำให้การบำบัดกากส้มเพียงอย่างเดียว (single substrate) ด้วยถังหมักไร้อากาศมีประสิทธิภาพต่ำ (พิจารณาจากร้อยละการกำจัดซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริง) เกิดจากการขาดแคลนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน เนื่องจากสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.3.2.5 และสภาพแวดล้อมภายในถังหมักไร้อากาศมีสภาวะที่เป็น

กรดสูงจากตัวน้ำส้ม และจากการสะสมของกรดไขมันระเหย ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ของแข็งในการทดลองที่ 1

หลังจากทำการย่อยสลายกากส้มเขียวหวานปริมาณ 10 กิโลกรัม ด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงถังที่ 3 ซึ่งเป็นชุดควบคุมเพื่อใช้เปรียบเทียบการลดของแข็งในกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี โดยทำการเดินระบบในการทดลองที่ 1 เป็นเวลา 244 วัน จึงทำการเปิดถัง และระบายน้ำชะขยะออกทั้งหมด เพื่อเก็บตัวอย่างกากส้มเขียวหวานที่ย่อยสลายภายในถังหมักไร้อากาศโดยถือว่าเชื้อจุลชีพที่ติดมากับกากส้มมีน้ำหนักน้อยมากไปวิเคราะห์ของแข็งดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างกากส้มเขียวหวานจากถังปฏิกิริยาเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของถังปฏิกิริยา ในแต่ละส่วนจะเก็บตัวอย่างแบบสุ่มจำนวน 3 ตัวอย่าง

เมื่อเปิดถังปฏิกิริยาถังที่ 3 พบว่ากากส้มภายในถังปฏิกิริยามีการทรุดตัวลงมาจากระดับตอนเริ่มต้นเดินระบบเป็นระยะ 7 เซนติเมตร และกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศมีลักษณะคล้ายคลึงกับกากส้มสดแต่เนื้อส้มที่ติดมากับเปลือกจะลดลง และแห้งกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ส่วนผลการวิเคราะห์ของแข็งในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศในส่วนต่างๆ ของถังปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.10

(ก)

(ข)

รูปที่ 4.20 กากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศในถังปฏิกิริยาถังที่ 3 (ก) แสดงการทรุดของกากส้มในถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 (ข) แสดงลักษณะของกากส้มหลังผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ของแข็งในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ส่วนบนของถังปฏิกิริยาที่ 3		
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	87.03	0.01
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	12.97	0.01
ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	75.80	0.11
ส่วนกลางของถังปฏิกิริยาที่ 3		
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	88.96	0.07
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	11.04	0.07
ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	76.78	1.91
ส่วนล่างของถังปฏิกิริยาที่ 3		
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	89.17	0.23
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	10.83	0.23
ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	76.96	0.31

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศในส่วนต่างๆ ของถังปฏิกิริยาถังที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการหมุนเวียนน้ำชะขยะมีส่วนช่วยให้กากส้มภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงร้อยละ 75.80-76.96 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 76.51 ± 0.63 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับร้อยละ 21.18 เมื่อเปรียบเทียบกับของแข็งระเหยในกากส้มสด

4.4 ผลการทดลองที่ 2 การลดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

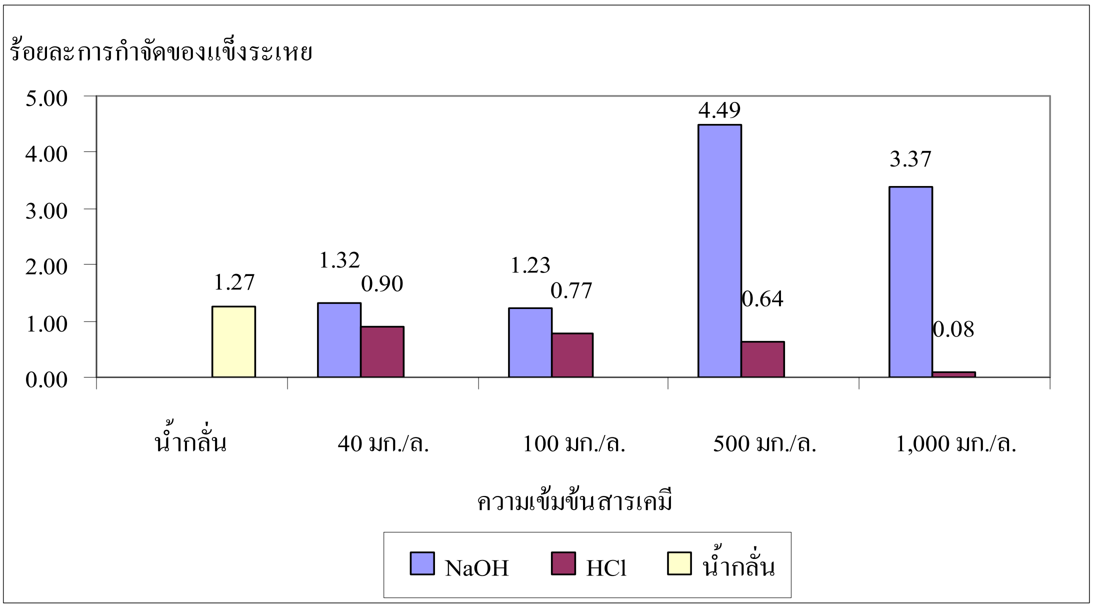
การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองในส่วนการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ในกากส้มให้เป็นสับเสตรท (substrate) ที่จุลชีพแบบไร้อากาศสามารถนำไปใช้ได้ โดยการทดลองนี้จะหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เหมาะสมในการกำจัดของแข็งในกากส้ม และเลือกความเข้มข้นของสารเคมีชนิดละ 1 ความเข้มข้น ที่ให้น้ำย่อยจากกากส้มที่เหมาะสมกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศมากที่สุดเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3 โดยการทดลองที่ 2 นี้เป็นการทดลองแบบทีละเท (batch) ในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองสามซ้ำ แล้วนำกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และน้ำย่อยกากส้มมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ โดยผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์การบำบัดกากส้มทางเคมี

ชุดการทดลอง	กากส้ม		น้ำย่อยกากส้ม	
	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	พีเอช
กากส้มสด	19.07±0.65	97.07±0.13	13,115+102	4.53±0.02
กากส้มสด + น้ำกลั่น	11.36±0.07	95.84±0.10	16,893±120	4.88±0.01
กากส้มสด + NaOH 40 มก./ล.	10.76±0.03	95.79±0.02	19,068±250	5.54±0.03
กากส้มสด + NaOH 100 มก./ล.	11.20±0.02	95.87±0.07	19,379±686	5.67±0.01
กากส้มสด + NaOH 500 มก./ล.	10.96±0.53	92.72±1.96	19,181±1,340	8.51±0.01
กากส้มสด + NaOH 1,000 มก./ล.	10.63±0.25	93.90±0.13	19,000±163	9.88±0.06
กากส้มสด + HCl 40 มก./ล.	11.48±0.16	96.19±0.09	20,499±653	4.70±0.02
กากส้มสด + HCl 100 มก./ล.	11.61±0.36	96.32±0.08	22,951±150	4.66±0.01
กากส้มสด + HCl 500 มก./ล.	11.22±0.56	96.45±0.27	15,528±589	3.08±0.03
กากส้มสด + HCl 1,000 มก./ล.	8.79±0.04	96.99±0.07	15,115±689	2.40±0.00

4.4.1 ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

ค่าของแข็งระเหย (volatile solids) คือของแข็งที่ระเหยไปเมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 550±50 องศาเซลเซียส ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้สารอินทรีย์ที่ถูกเผาจะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ของแข็งระเหยในกากส้มสดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 97.07±0.13 โดยน้ำหนัก และกากส้มที่บำบัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.84±0.10 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 1.27 ในส่วนผลการวิเคราะห์ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.79±0.02 95.87±0.07 92.72±1.96 และ 93.90±0.13 โดยน้ำหนัก หรือร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 1.32 1.23 4.49 และ 3.37 เรียงลำดับตามชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.21 และของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าใกล้เคียงกันทุกชุดการทดลองโดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงร้อยละ 96.16-96.99 โดยน้ำหนัก และจากรูปที่ 4.21 พบว่าร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มโดยใช้ไฮโดรคลอริกในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยร้อยละในการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มเท่ากับ 0.60



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งระเหยในกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

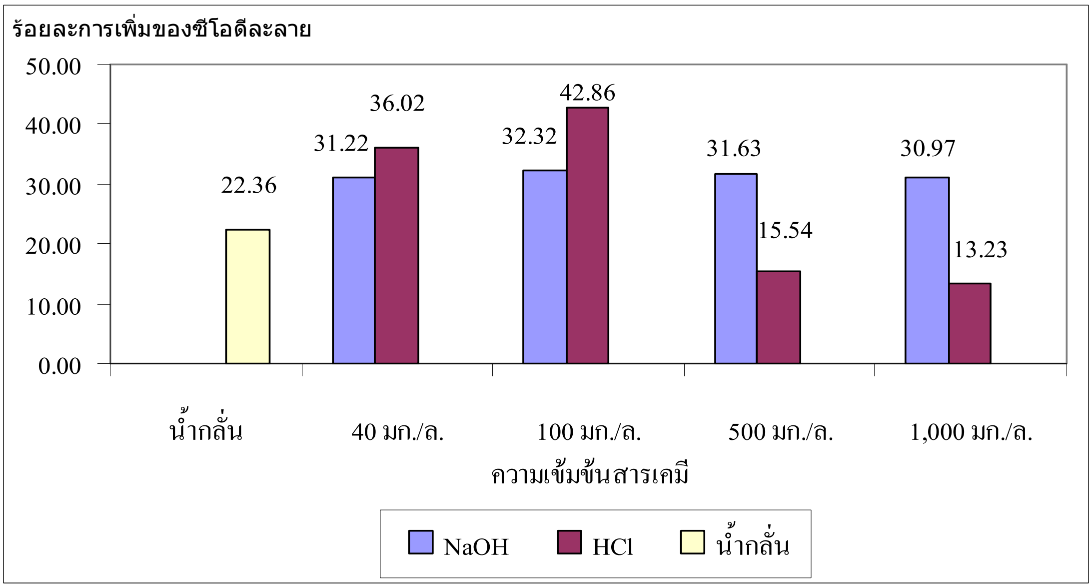
จากผลการวิเคราะห์ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยสูงกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริกทุกชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยสูงที่สุดซึ่งเท่ากับร้อยละ 4.49 ในขณะที่การ

บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกไม่สามารถกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูป 4.21

เมื่อเปรียบเทียบค่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดกากส้มด้วยสารเคมี โดยสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดกากส้มเป็นสารเคมีคุณภาพระดับอุตสาหกรรม พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เสียค่าสารเคมี 0.14 บาทต่อ 1 ชุดการทดลอง หรือคิดเป็น 0.7 บาทต่อกากส้ม 1 กิโลกรัม ส่วนการใช้ไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เสียค่าสารเคมี 0.162 บาทต่อ 1 ชุดการทดลอง หรือ 0.81 บาทต่อการกากส้ม 1 กิโลกรัม ซึ่งจะเห็นว่าการบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นดีกว่าการบำบัดกากส้มด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มได้สูงกว่า และเสียค่าสารเคมีต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อต้องบำบัดกากส้มในปริมาณมาก การบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มเพียงร้อยละ 4.49 จึงไม่เกิดความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

4.4.2 ซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

ค่าซีโอดีละลาย (sCOD) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสกปรกหรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำที่ผ่านการกรอง จากตารางที่ 4.11 พบว่าน้ำกากส้ม (ของเหลวที่ออกมาจากกากส้มสดหั่นหยาบที่ตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน) มีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายเท่ากับ 13,115+102 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าเท่ากับ 16,893±120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มเท่ากับ 22.36 แสดงว่าน้ำกลั่นได้ชะละลายน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำในกากส้มได้บางส่วนเป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนชุดการทดลองการบำบัดกากส้มทางเคมีมีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 40 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเท่ากับ 19,068±250 19,379±686 19,181±1,340 และ 19,000±163 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร้อยละการเพิ่มเท่ากับ 31.22 32.32 31.63 และ 30.97 เรียงตามชุดการทดลอง ส่วนการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มใกล้เคียงกัน คือ 20,499±653 และ 22,951±150 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มเท่ากับ 36.02 และ 42.86 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้ไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 15.54 และ 13.23 ตามลำดับ ดังแสงในรูปที่ 4.22



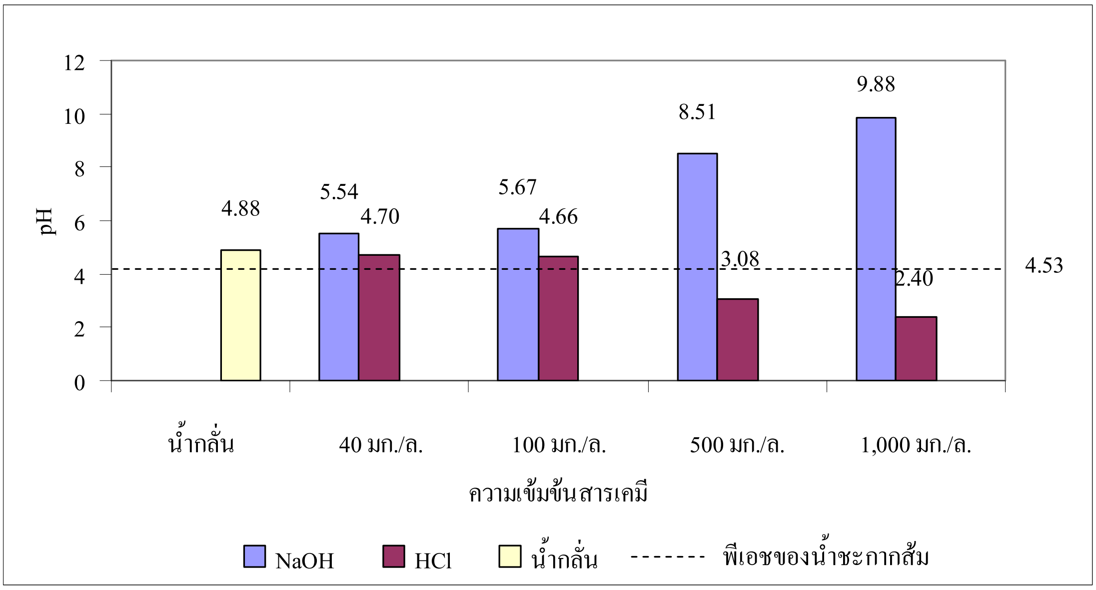
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริก ในขณะที่การบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถลดของแข็งระเหยในกากส้มได้มากกว่าการบำบัดกากส้มด้วยไฮโดรคลอริกทุกความเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีการสูญเสียคาร์บอนในน้ำย่อยกากส้มระหว่างทำการบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากการปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; -OH) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับกลุ่มของโพลิแซ็กคาร์ไรด์บนสายกิ่งของเฮมิเซลลูโลส ให้กลายเป็นสารละลายน้ำตาลที่มีโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งง่ายต่อการสลายตัว (Hendriks และ Zeeman, 2008) และการสลายตัวของสารละลายน้ำตาลดังกล่าวอาจเกิดขึ้นระหว่างทำการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.22 พบว่าในส่วนของค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าต่ำกว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าใกล้เคียงกันทุกชุดการทดลอง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากเกิดการตกตะกอน หรือสร้างผลึกใหม่ของน้ำตาลบางส่วนในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้นสูง โดยการบำบัดด้วยสารละลายกรดเข้มข้นจะมีโอกาสทำให้เกิดการตกตะกอน หรือสร้างผลึกใหม่ของน้ำตาลสูงกว่าการบำบัดด้วยสารละลายกรดเจือจาง (Hendriks และ Zeeman, 2008)

4.4.3 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.11 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำกากส้มที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และบำบัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าเท่ากับ 4.53 และ 4.88 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.54 5.67 8.51 และ 9.88 เรียงตามลำดับชุดการทดลอง และน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.70 4.66 3.08 และ 2.40 เรียงตามลำดับชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชในน้ำย่อยกากส้มกับการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำกากส้มที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี และน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในช่วงกรด เนื่องจากน้ำส้มมีสภาพเป็นกรดโดยธรรมชาติ ส่วนความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป โดยชุดการทดลองที่บำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใกล้เคียงกัน แต่ชุดการทดลองที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกทุกชุดการทดลองไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากถ้าความเป็นกรด-ด่างต่ำมากเกินไป ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และขั้นตอนการสร้างมีเทนจะถูกยับยั้ง

4.4.4 การเลือกความเข้มข้นของสารเคมีเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 2 การกำจัดของแข็งในกากส้มด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ซึ่งเป็นการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริก โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในกากส้มเป็นหลัก เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการลดของแข็งในกากส้ม และนอกจากนี้ยังพิจารณาถึงความเหมาะสมในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำย่อยจากกากส้มซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี

เมื่อพิจารณาผลการทดลองของชุดการบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มสูงที่สุดในชุดการบำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 4.49) และให้น้ำย่อยกากส้มที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมากที่สุด (ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.51) ดังนั้นจึงเลือกโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนสารเคมีสภาพด่างเพื่อใช้ในการบำบัดกากส้มเพื่อนำน้ำย่อยกากส้มซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีไปใช้ต่อในการทดลองที่ 3

ส่วนชุดการบำบัดกากส้มด้วยไฮโดรคลอริกไม่พบว่ามีความเข้มข้นใดที่ให้สภาพของน้ำย่อยกากส้มเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าต่ำในทุกชุดการทดลอง (มีค่าพิสัยเท่ากับ 2.40-4.70) และของแข็งระเหยในกากส้มหลังผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าไม่แตกต่างกับของแข็งระเหยในกากส้มก่อนการบำบัดเบื้องต้นอย่างมีนัยสำคัญ (ร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าพิสัยเท่ากับ 0.08-0.9) ถึงแม้ค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าสูงสุด (ร้อยละการเพิ่มของซีโอดีละลายเท่ากับ 42.86) แต่ไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มได้ดีที่สุด เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มซึ่งเป็นของแข็ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลอง และอาจเกิดการตกตะกอน หรือเกิดการสร้างผลึกใหม่ของน้ำตาลบางส่วนในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้นสูง และเมื่อพิจารณาความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.70 ± 0.02 และ 4.66 ± 0.01 ตามลำดับ จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับความเป็นกรด-ด่างของน้ำกากส้ม และชุดการทดลองบำบัดกากส้มด้วยน้ำกลั่นที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.53 ± 0.02 และ 4.88 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองบำบัดกากส้มด้วยน้ำกลั่นมีสภาพใกล้เคียงกับความเป็นกรด-ด่างของน้ำชะขยะจากการหมัก

กากส้มในการทดลองที่ 1 ดังนั้นจึงเลือกใช้ไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนสารเคมีสภาพกรด ซึ่งให้น้ำย่อยกากส้มที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.08$\pm$0.03) เป็นตัวแทนสารเคมีสภาพกรดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางเมื่อต้องทำการบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นกรด-ด่างต่ำ

4.5 ผลการทดลองที่ 3 การกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยจากกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี ด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง

การทดลองที่ 3 มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่เป็นผลพลอยได้จากการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีในการทดลองที่ 2 ให้เป็นก๊าซชีวภาพด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง ซึ่งถังหมักไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองที่ 3 จะเตรียมจากถังปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 1 จำนวน 2 ถัง โดยวิธีการเตรียมถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3 กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5 สำหรับการทดลองที่ 3 นี้ได้เลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามข้อมูลที่กล่าวไปแล้วในผลการทดลองที่ 2

น้ำย่อยกากส้มที่ได้จากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกเติมลงในถังปฏิกิริยาถังที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในช่วงแรกของการทดลองใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 40 วัน ในวันที่ 47 ของการเดินระบบ ได้ทำการเติมสารยูเรีย ($CO(NH_2)_2$) และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric equation) เพื่อตรวจสอบว่าสาเหตุที่ถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง มีร้อยละการกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำเกิดจากสารอาหารไม่เพียงพอหรือไม่ และได้เติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 59 ของการเดินระบบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำย่อยกากส้ม

4.5.1 ปริมาณน้ำย่อยกากส้มที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3

ในขั้นตอนการเตรียมถังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 ให้พร้อมสำหรับเริ่มการทดลองที่ 3 ได้ทำการระบายน้ำชะขยะออกจากถังปฏิกิริยาจนถึงขีดความสามารถในการอุ้มน้ำ (field capacity) ของกากส้มภายในถังปฏิกิริยา นอกจากนี้ปริมาตรน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีที่จะเติมให้แก่ถังปฏิกิริยาแต่ละใบจะเท่ากับปริมาตรน้ำชะขยะที่สามารถระบายออกมาจนถึงขีดความสามารถในการอุ้มน้ำของถังปฏิกิริยานั้นเพื่อรักษาสมดุลของปริมาณน้ำภายในระบบ โดยจะไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มก่อนเติมให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง

สำหรับถังปฏิกิริยาที่ 1 สามารถระบายน้ำชะขยะออกมาได้ปริมาตร 7 ลิตร ซึ่งจะใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และถังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกในภายหลัง โดยถังปฏิกิริยาที่ 2 สามารถระบายน้ำชะขยะออกจากถังปฏิกิริยาได้ 6 ลิตร โดยการเติมน้ำย่อยกากส้มจะค่อยๆเติมลงในถังปฏิกิริยาครั้งละไม่เกิน 2 ลิตร

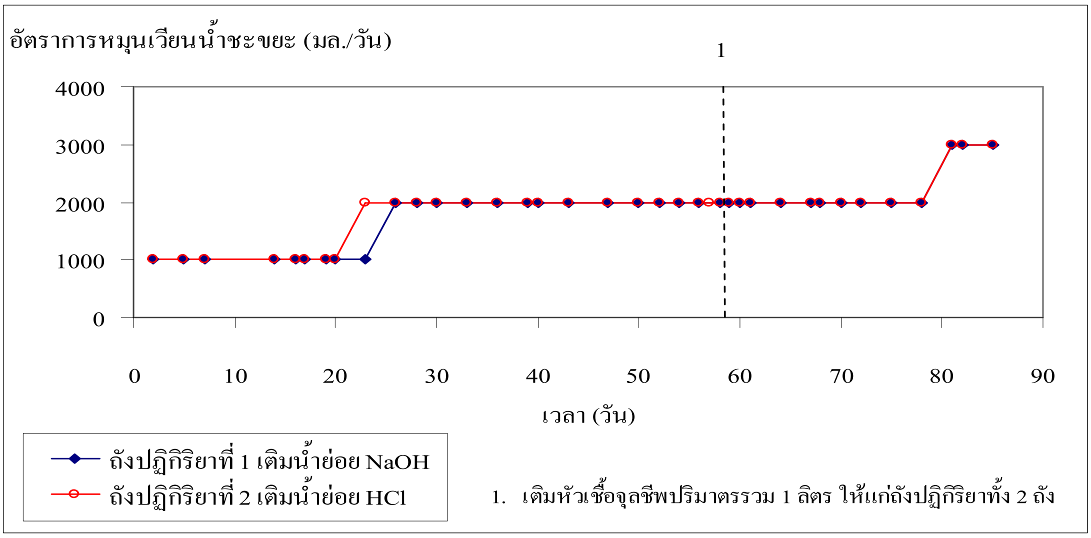
เพื่อให้น้ำย่อยที่เติมเข้าไปนั้นเต็มขีดความสามารถในการอุ้มน้ำของกากส้มภายในถังปฏิกิริยา แล้วจึงหมุนเวียนน้ำชะขยะด้วยอัตราต่ำ เพื่อป้องกันชั้นกากส้มซึ่งเป็นตัวกลางภายในถังปฏิกิริยาแห้ง และป้องกันการล้มเหลวของถังหมักไร้อากาศ เนื่องจากน้ำย่อยกากส้มที่เติมลงไปนั้นมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงที่อาจทำให้ระบบไร้อากาศมีปัญหาได้ หากระบบไม่มีปัญหาจึงเริ่มเติมน้ำย่อยกากส้มจนมีปริมาตรเท่าน้ำชะขยะที่ระบายออกมา และรายละเอียดในการเติมน้ำย่อยกากส้มให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดน้ำย่อยกากส้มที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ชุดน้ำย่อยกากส้ม	ถังปฏิกิริยา	ปริมาตรทั้งหมดที่เติม (ลิตร)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
น้ำย่อยจาก NaOH	1	7	5.74±0.53	14,566±1,862
น้ำย่อยจาก HCl	2	6	2.69±0.18	15,313±1,365

4.5.2 ผลของการหมุนเวียนน้ำชะขยะต่อถังหมักไร้อากาศในการทดลองที่ 3

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มในการทดลองที่ 3 มีคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เนื่องจากไม่เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย และค่าความเป็นกรด-ด่างของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง มีค่าไม่ต่ำมากเนื่องจากภายในถังปฏิกิริยายังคงมีสภาพด่างเหลือเพียงพอสำหรับป้องกันความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (pH drop) ของน้ำชะขยะภายในถังปฏิกิริยา

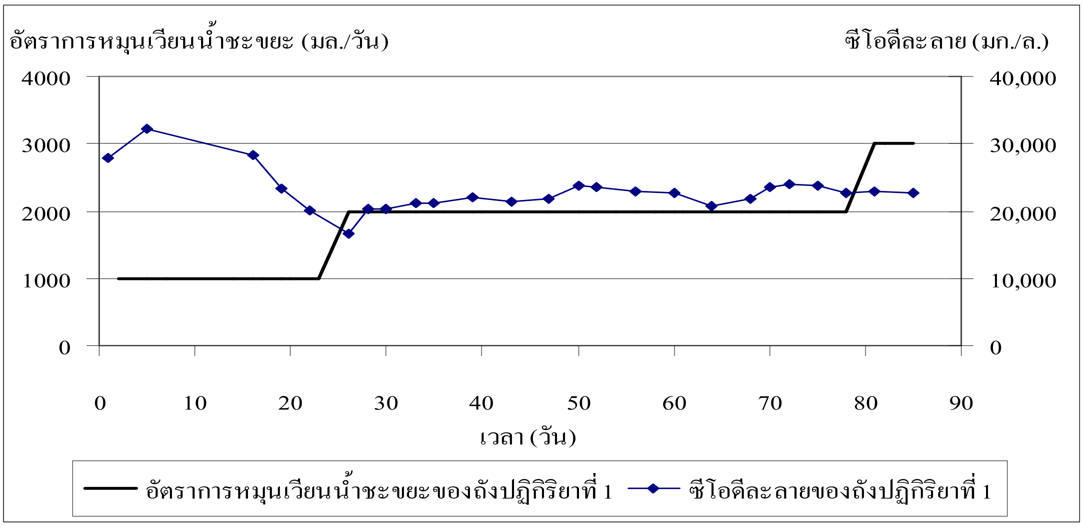


รูปที่ 4.24 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางถังที่ 1 แสดงในตารางที่ 4.13 โดยในช่วง 23 วันแรกของการเดินระบบ อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ในวันที่ 26 ถึงวันที่ 78 ของการเดินระบบ ได้เพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 เป็น 2,000 มิลลิลิตรต่อวัน โดยในช่วงนี้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องเกิดการชะละลาย (leach) จากน้ำย่อยกากส้มที่มีฤทธิ์เป็นด่างชะเอาส่วนที่ยังสามารถย่อยสลายได้ของกากส้ม (สารอินทรีย์) ที่ใช้เป็นตัวกลางออกมากับน้ำชะขยะในช่วงนี้ (Hendriks และ Zeeman, 2008) แต่ค่าซีโอดีละลายที่เพิ่มขึ้นนั้นจะไม่มากเท่าที่เกิดการชะละลายออกมาในการทดลองที่ 1 เพราะกากส้มที่เป็นตัวกลางในถังปฏิกิริยามีสภาพค่อนข้างเสถียรเนื่องจากผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และในวันที่ 81 และวันที่ 85 ของการเดินระบบ ได้ทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะด้วยอัตรา 3,000 มิลลิลิตรต่อวันจนสิ้นสุดการเดินระบบ ซึ่งการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในช่วงท้ายของการเดินระบบไม่ส่งผลกระทบต่อค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.13 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3

วันที่	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะขาเข้า (มิลลิลิตร/วัน)	ค่าพิสัยของซีโอดีละลายก้นถังปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้า (กรัม/วัน)
1-26	26	1,000	20,118 – 32,268	27.97±4.48
27-80	54	2,000	16,606 – 23,989	43.95±3.70
81-85	5	3,000	22,667 – 23,006	68.51±0.72

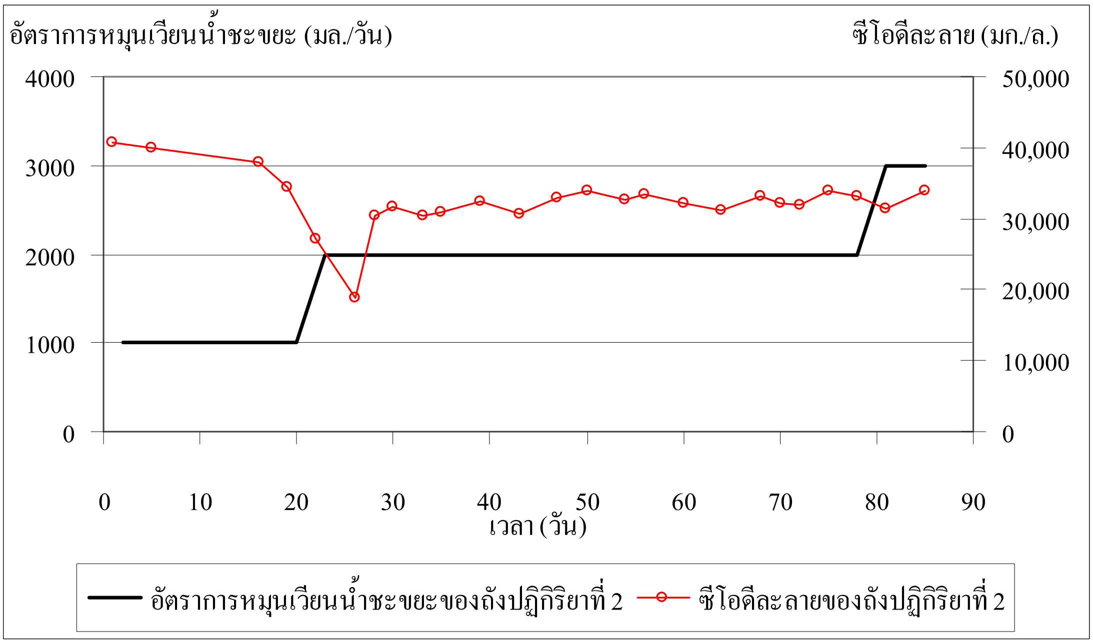


รูปที่ 4.25 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3

อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางถังที่ 2 แสดงในตารางที่ 4.14 โดยในช่วงที่เพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 จาก 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน เป็น 2,000 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายของน้ำชะขยะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องเกิดการชะละลาย (leach) จากน้ำย่อยกากส้มที่มีฤทธิ์เป็นกรดชะเอาส่วนที่ยังสามารถย่อยสลายได้ของกากส้ม (สารอินทรีย์) ที่ใช้เป็นตัวกลางออกมากับน้ำชะขยะในช่วงนี้ (Hendriks และ Zeeman, 2008) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และในช่วงท้ายของการเดินระบบได้ทำการหมุนเวียนน้ำชะขยะด้วยอัตรา 3,000 มิลลิลิตรต่อวันจนสิ้นสุดการเดินระบบ ซึ่งค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะในช่วงวันที่ 81 ถึง 85 ของการเดินระบบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (มีค่าพิสัยเท่ากับ 31,329 – 33,878 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.14 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3

วันที่	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะขาเข้า (มิลลิลิตร/วัน)	ค่าพิสัยของซีโอดีละลายก้นถังปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้า (กรัม/วัน)
1-23	23	1,000	34,334 – 40,759	37.43±2.84
23-78	53	2,000	18,941 – 34,025	62.96±6.84
81-85	5	3,000	31,329 – 33,878	97.81±5.41



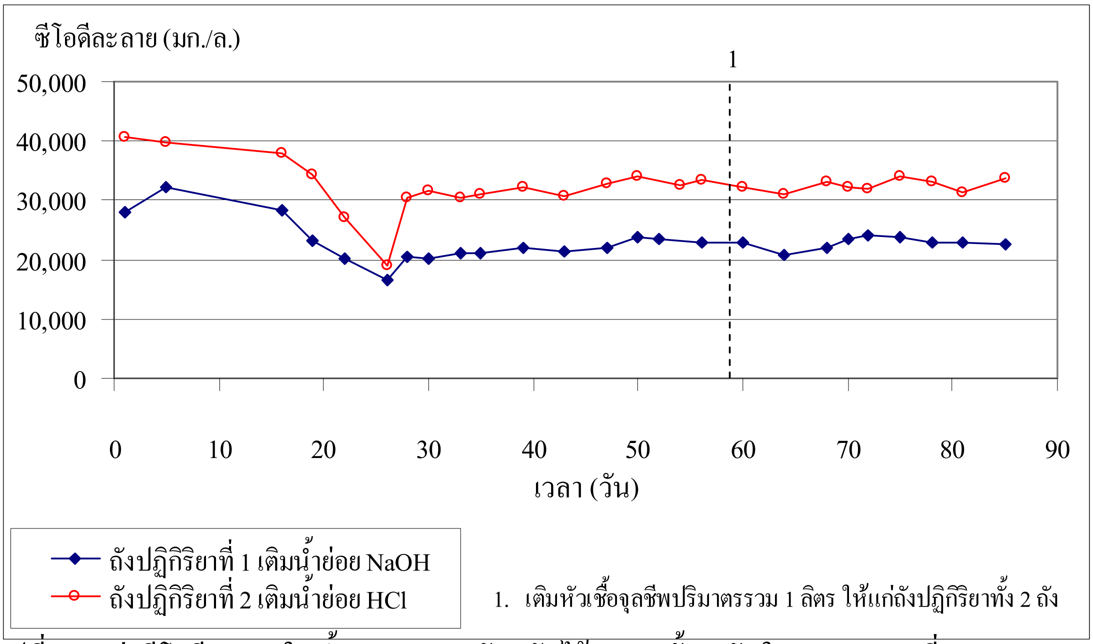
รูปที่ 4.26 อัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ และค่าซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3

4.5.3 ผลการวิเคราะห์น้ำชะขยะในการทดลองที่ 3

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในน้ำชะขยะในการทดลองที่ 3 จะบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง เมื่อทำการบำบัดน้ำย่อยกากส้มที่มีความลักษณะไม่เหมาะที่จะทำการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ

4.5.3.1 ซีโอดีละลาย และประสิทธิภาพการบำบัด

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง มีค่าสูงกว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาตอนเริ่มการทดลองที่ 3 เนื่องจากน้ำย่อยกากส้มมีฤทธิ์เป็นด่าง และกรด ซึ่งอาจก่อให้เกิดการชะละลายของสารอินทรีย์ในกากส้มซึ่งเป็นตัวกลาง (Hendriks และ Zeeman, 2008) และอาจจะเกิดการตกค้างของน้ำชะขยะที่ไม่สามารถระบายออกมาได้หมดในขั้นตอนเตรียมถังปฏิกิริยา เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีค่าสูงกว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้ม นอกจากนี้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะในการทดลองที่ 3 มีความแปรปรวนของข้อมูลต่ำเพราะการหมุนเวียนน้ำชะขยะในการทดลองที่ 1 ช่วยให้ภายในถังปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และเนื่องจากถังปฏิกิริยาแต่ละถังมีสารอินทรีย์คาร์บอนเริ่มต้นไม่เท่ากัน ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพของระบบต้องทำการวิเคราะห์ผลในรูปของร้อยละการกำจัดในถังปฏิกิริยานั้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง แสดงดังในตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.27 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ในช่วง 16 วันแรกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29,493±2,411 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 16,606 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 26 ของการเดินระบบ ซึ่งสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพในน้ำย่อยกากส้มถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไร้อากาศในช่วง 26 วันแรกของการเดินระบบ (สอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่พบมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 6.89 โดยปริมาตร ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.5.4) และผลจากการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในวันที่ 27 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะในวันที่ 28 ของการเดินระบบ เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนมีค่าค่อนข้างคงที่เท่ากับ 21,857±1,224 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายคิดเป็นร้อยละ 25.89 ในวันที่ 57 และ 59 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตร ให้แก่ระบบ เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองโดยมีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายเท่ากับ 23,306±573 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็นร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายเท่ากับร้อยละ 20.98 เมื่อเทียบกับค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ตอนเริ่มต้นเดินระบบ

ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 39,571±1,386 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 16 วันแรก

ของการเดินระบบ แล้วจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงวันที่ 19 ถึงวันที่ 26 ของการเดินระบบ อันเกิดจากส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพถูกจุลชีพในระบบไร้อากาศใช้ไปในช่วงนี้ โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 18,941 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31,936+1,278 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงวันที่ 28 ถึงวันที่ 56 ของการเดินระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ ซึ่งคิดเป็นร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายเท่ากับ 19.29 ในวันที่ 57 และ 59 ของการเดินระบบได้ทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพปริมาตรรวม 1 ลิตร เป็นผลให้ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองโดยมีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายเท่ากับ 32,582±1,143 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็นร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายเท่ากับร้อยละ 17.66 เมื่อเทียบกับค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ตอนเริ่มต้นเดินระบบ

หมายเหตุ การคำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นอาหารของจุลชีพในการทดลองที่ 3 นี้ ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากรูปแบบที่ใช้ในการทดลองที่ 3 นี้ ไม่ใช่การทดลองแบบทีละเท (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continue) อย่างแท้จริง จึงทำให้อัตราการไหลไม่คงที่ อีกทั้งไม่สามารถแยกข้อมูลช่วงที่ปฏิกิริยาเป็นแบบไร้อากาศออกจากปฏิกิริยาแบบใช้อากาศและกึ่งไร้อากาศที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 1 ได้ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณสมดุลมวลได้

ตารางที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

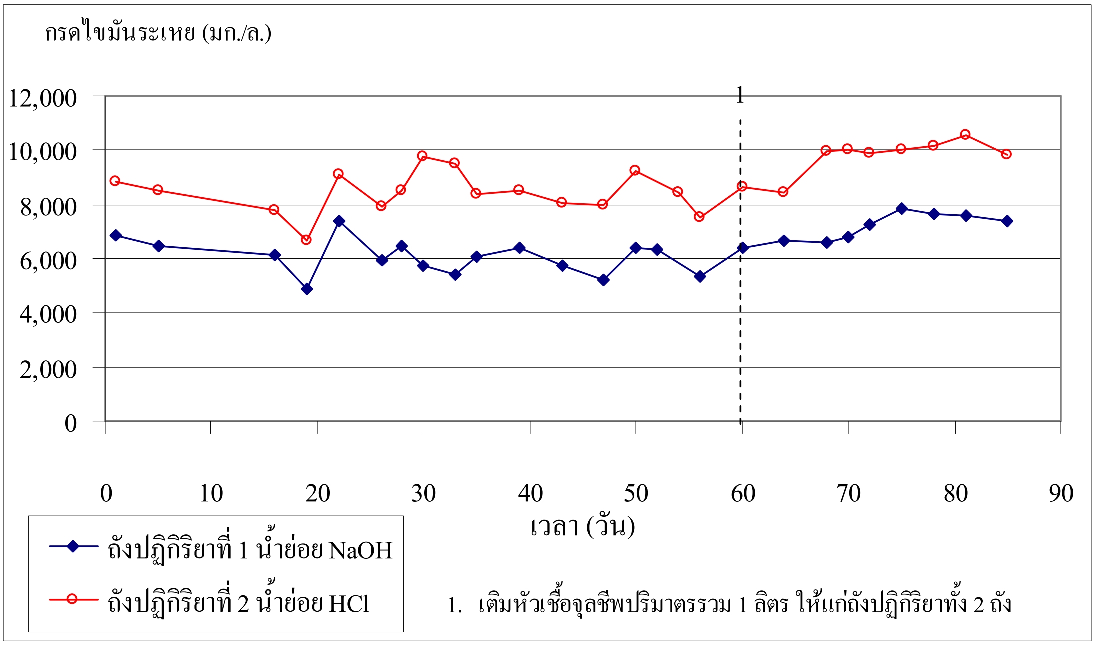
ถังปฏิกิริยา	ค่าซีโอดีละลายช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (มก./ล.)	ค่าซีโอดีละลายส่วนย่อยสลายง่าย (มก./ล.)	ค่าซีโอดีละลายช่วงสภาวะคงตัว		ร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายส่วนย่อยสลายง่าย	ร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายรวม
			ก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (มก./ล.)	หลังเติมหัวเชื้อจุลชีพ (มก./ล.)		
ถังปฏิกิริยาที่ 1 (NaOH)	29,493±2,411	16,606	21,857±1,224	23,306±573	43.70	20.98
ถังปฏิกิริยาที่ 2 (HCl)	39,571±1,386	18,941	31,936±1,278	32,582±1,143	52.13	17.66

หมายเหตุ

1. ร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายส่วนย่อยสลายง่ายคำนวณมาจากค่าซีโอดีละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 30 วันแรกของการเดินระบบ เทียบกับค่าซีโอดีละลายช่วงเริ่มต้นเดินระบบถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง
2. ร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายรวมของระบบคำนวณมาจากค่าซีโอดีละลายช่วงเริ่มต้นเดินระบบเทียบกับค่าซีโอดีละลายในช่วงหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว

4.5.3.2 กรดไขมันระเหย

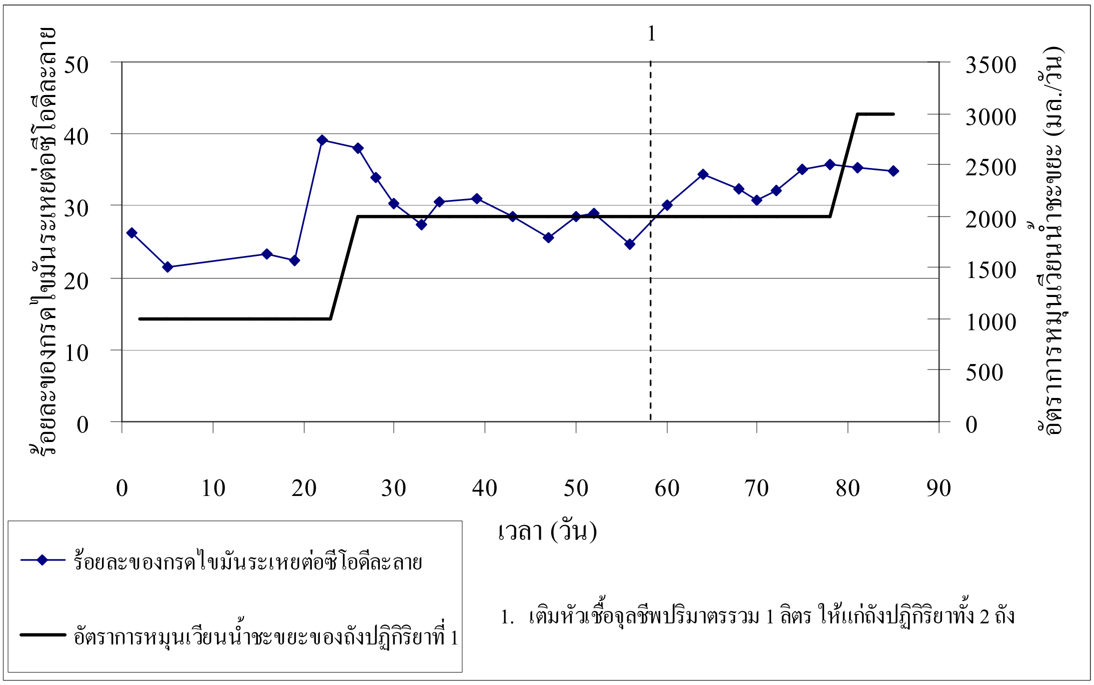
ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง แสดงดังรูปที่ 4.28 และข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยมีความแปรปรวนต่ำเนื่องจากการหมุนเวียนน้ำชะขยะในการทดลองที่ 1 ทำให้กากส้มภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากทั้งถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) และบำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบมีแนวโน้มลดลง ก่อนที่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงวันที่ 22 ถึงวันที่ 33 ของการเดินระบบ และภายหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 59 ของการเดินระบบเป็นผลให้ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.28 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากทั้งถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ในวันแรกของจากเดินระบบมีค่าเท่ากับ 6,835 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มลดลงจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4,896 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 19 ของการเดินระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ซีโอดีละลายที่มีแนวโน้มลดลง และผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่พบมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 6.89 โดยปริมาตร ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.5.4 และในวันที่ 22 ของการเดินระบบ ค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายสูงถึงร้อยละ 39.18 แล้วจึงมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 28.87±1.85 ก่อนที่จะเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำ

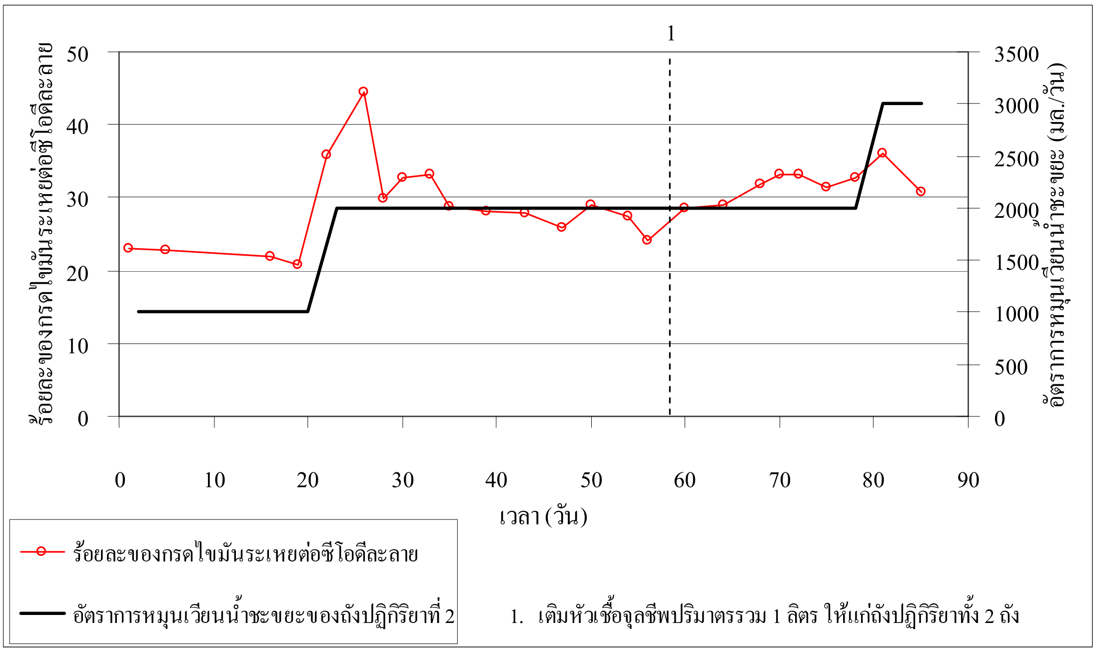
ชะขยะในวันที่ 26 แสดงว่าจุลชีพกลุ่มสร้างกรดภายในถังปฏิกิริยาที่ 1 ส่วนใหญ่ใช้เวลาในการสร้างความคุ้นเคย (acclimation) ให้สามารถใช้แหล่งคาร์บอนจากน้ำย่อยกากส้มที่ได้จากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 20 วัน และค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 35 ถึงวันที่ 39 ของการเดินระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และเมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) มีแนวโน้มลดลงเป็นช่วงๆ แสดงว่าน้ำย่อยกากส้มที่ได้จากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถถูกนำไปใช้โดยจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่พบมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์ ดังจะกล่าวในหัวข้อ 4.5.4



รูปที่ 4.29 ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าภายหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1 ในวันที่ 59 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเพราะการเติมหัวเชื้อจุลชีพซึ่งเป็นการเติมทั้งจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และกลุ่มสร้างมีเทน สารอินทรีย์ที่มีศักยภาพจึงถูกจุลชีพกลุ่มสร้างกรดเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เป็นผลให้ค่าร้อยละกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยในวันที่ 78 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง มีค่าเท่ากับ 7,532±130 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ในวันแรกของจากเดินระบบมีค่าเท่ากับ 8,820 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มลดลงจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6,660 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์น้ำชะขยะที่มีแนวโน้มลดลง และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นในปริมาณมากในช่วงดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายพบว่าเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 22 ของการเดินระบบ จนมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 44.51 ในวันที่ 26 ของการเดินระบบ และเมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพในวันที่ 28 ของการเดินระบบ ปรากฏว่าไม่พบมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) จึงมีความเป็นไปได้ที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยาไม่เหมาะสม และจากการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะในวันที่ 23 ของการเดินระบบ โดยค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหย และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบมีค่าเท่ากับ 8,422±444 มิลลิกรัมต่อลิตร และร้อยละ 27.88±1.12 ตามลำดับ หลังจากทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศวันที่ 59 ของการเดินระบบ ค่ากรดไขมันระเหย และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และในวันที่ 68 จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ กรดไขมันระเหยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10,059+249 มิลลิกรัมต่อลิตร

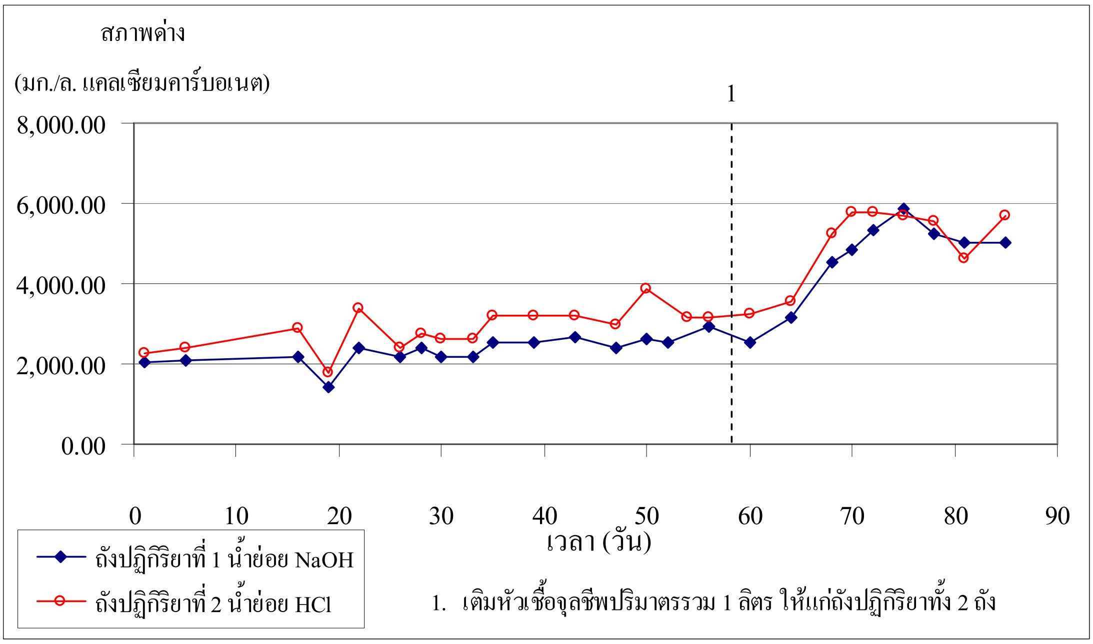


รูปที่ 4.30 ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ และอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3

4.5.3.3 สภาพด่าง และความเป็นกรด-ด่าง

ในการเริ่มการทดลองที่ 3 นี้ไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มก่อนเติมให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางเมื่อทำการย่อยสลายน้ำย่อยที่มีสภาพความเป็นกรด-ด่างสูง ดังนั้นค่าสภาพด่างที่วิเคราะห์เจอในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในช่วง 36 วันแรกของการทดลอง คือค่าสภาพด่างที่มีอยู่เดิมในถังปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 1 และเริ่มทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในวันที่ 36 ถึงวันที่ 43 ของการเดินระบบเพื่อหาสาเหตุที่ระบบติดขัด และปรับปรุงประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง

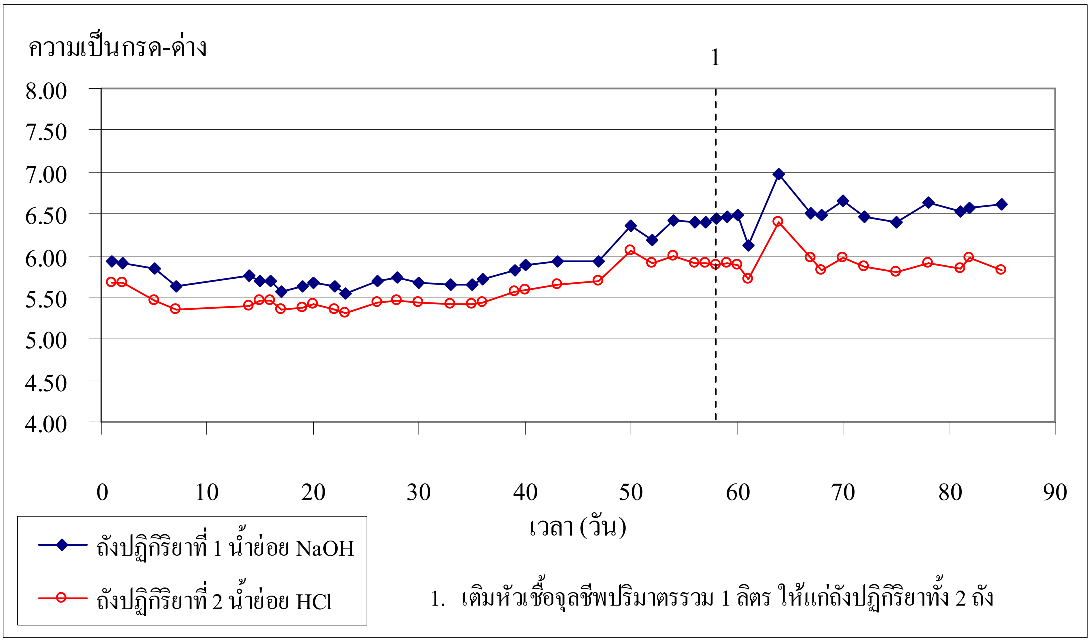
ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะจากทั้งถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพด่าง (ถังปฏิกิริยาที่ 1) และที่ใช้บำบัดน้ำกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ในช่วงก่อนทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,159±281 และ 2,637±456 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ และค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังจากเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศจนมีค่าอยู่ในช่วง 5,000-5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต มีสาเหตุมาจากหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าสภาพด่างสูงถึง 9,384 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต และผลของการปรับค่าสภาพกรด-ด่างในน้ำชะขยะ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ในขั้นตอนการเติมน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยกากส้มที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริก

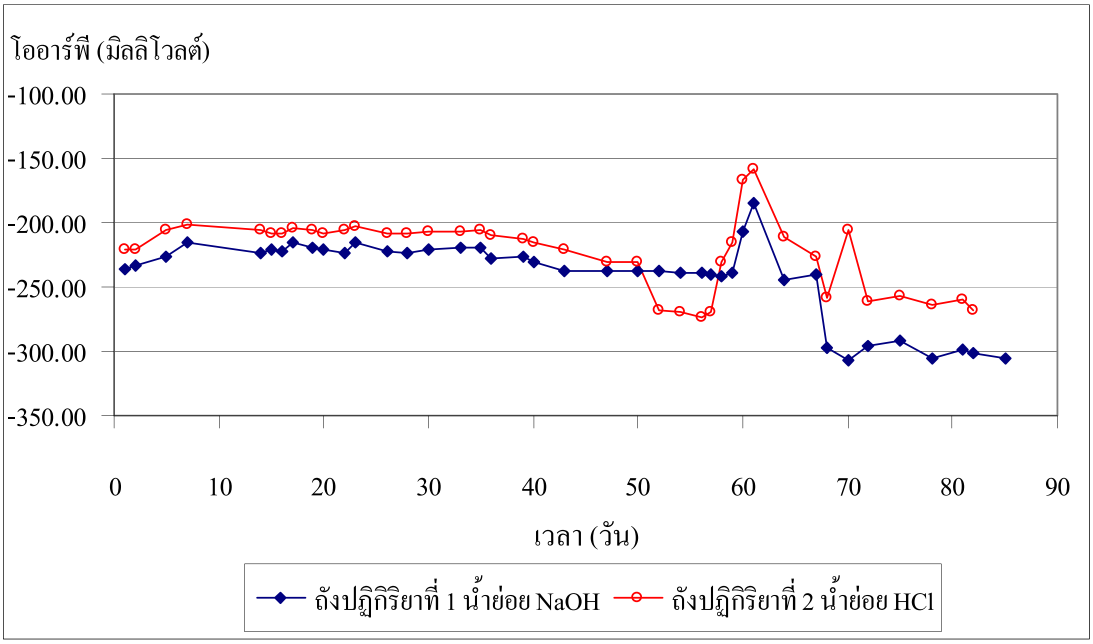
ในการบำบัดเบื้องต้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.74±0.53 และ 2.69±0.18 ตามลำดับ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะหลังจากเติมน้ำย่อยกากส้มให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 5.3-5.7 แสดงว่าค่าสภาพด่างที่มีอยู่เดิมในถังปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 1 เพียงพอสำหรับการป้องกันความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (pH drop) จากการเติมน้ำย่อยกากส้ม และหลังจากทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงจนมีค่าค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการเดินระบบโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.54+0.09 และ 5.88+0.07 ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

4.5.3.4 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง ในช่วงแรกของการเดินระบบมีค่าประมาณ -200 ถึง -250 มิลลิโวลต์ แสดงว่าภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ยังคงอยู่ในสภาพไร้อากาศตั้งแต่เริ่มการทดลองที่ 3 และเนื่องจากการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 59 ของการเดินระบบ เป็นผลให้มีค่าเป็นลบน้อยลงในช่วงนี้ แต่ภายหลังมีค่าติดลบมากขึ้นจนมีค่าพิสัย -250 ถึง -310 มิลลิโวลต์ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ ซึ่งแสดงว่าภายในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง อยู่ในสภาพไร้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

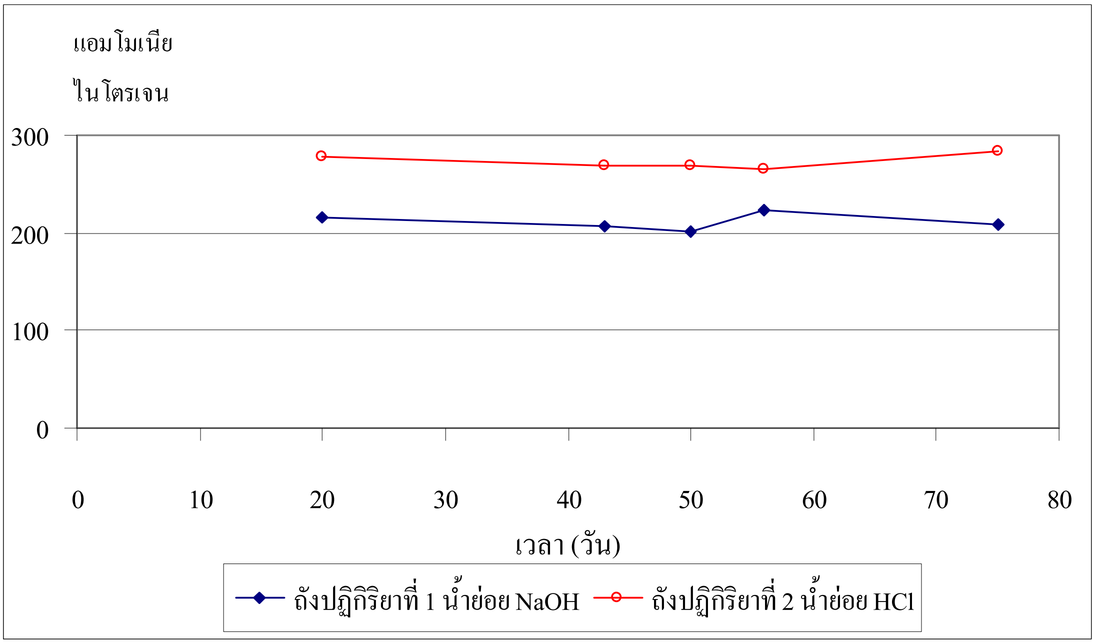
4.5.3.5 สารอาหาร

จากการวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางในการทดลองที่ 3 ทั้ง 2 ถัง เมื่อเทียบกับค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.16 จะเห็นว่าในช่วง 46 วันแรก ก่อนการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 พบว่าในน้ำชะขยะมีสารอาหารไม่เพียงพอสำหรับใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศตามอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 100 : 2 : 0.4 (Speece, 1996) ถึงแม้ข้อมูลวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟตบางช่วงมีความแปรปรวนเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันภายในถังปฏิกิริยา และในวันที่ 47 ของการเดินระบบ ได้ทำการเติมสารยูเรีย ($CO(NH_2)_2$) และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric equation) เพื่อตรวจสอบว่าสาเหตุที่ถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง มีร้อยละการกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำเกิดจากสารอาหารไม่เพียงพอหรือไม่ ดังที่ระบุไว้ในหัวข้อ 4.5 แต่เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันภายในถังปฏิกิริยาทำให้สารอาหารที่เติมลงในน้ำชะขยะในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดภายในถังปฏิกิริยา ทำให้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสหลังทำการเติมสารอาหารให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 47 ของการเดินระบบ ไม่เพียงพออัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่ต้องการ และเมื่อผลวิเคราะห์ซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพ

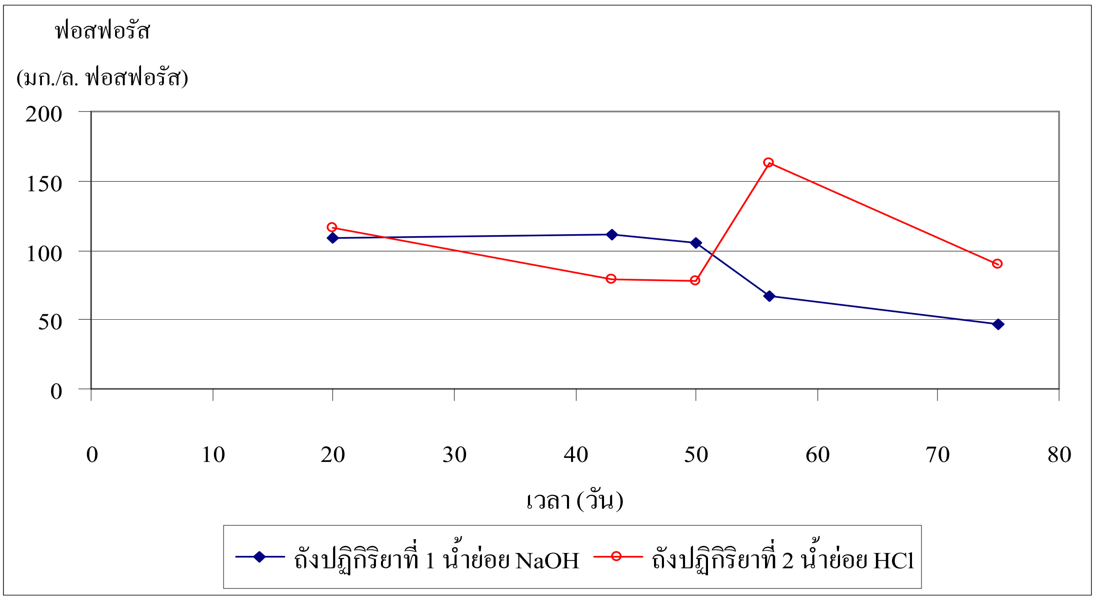
รายวันในช่วงวันที่ 47 ถึงวันที่ 57 ของการเดินระบบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 59 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน และออร์โธฟอสเฟตลดลงเล็กน้อยเนื่องจากถูกใช้โดยหัวเชื้อจุลชีพที่ถูกเติมให้แก่ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35

ตารางที่ 4.16 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในน้ำชะขยะในการทดลองที่ 3

วันที่ทำการวิเคราะห์	อัตราส่วน sCOD:N:P ของถังปฏิกิริยาที่ 1	อัตราส่วน sCOD:N:P ของถังปฏิกิริยาที่ 2
วันที่ 20 ของการเดินระบบ	100 : 0.92 : 0.47	100 : 0.81 : 0.34
วันที่ 43 ของการเดินระบบ	100 : 0.96 : 0.52	100 : 0.87 : 0.26
วันที่ 50 ของการเดินระบบ	100 : 0.85 : 0.44	100 : 0.79 : 0.23
วันที่ 56 ของการเดินระบบ	100 : 0.97 : 0.29	100 : 0.85 : 0.49
วันที่ 75 ของการเดินระบบ	100 : 0.87 : 0.19	100 : 0.82 : 0.27



รูปที่ 4.34 ค่าแอมโมเนียในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.35 ค่าออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

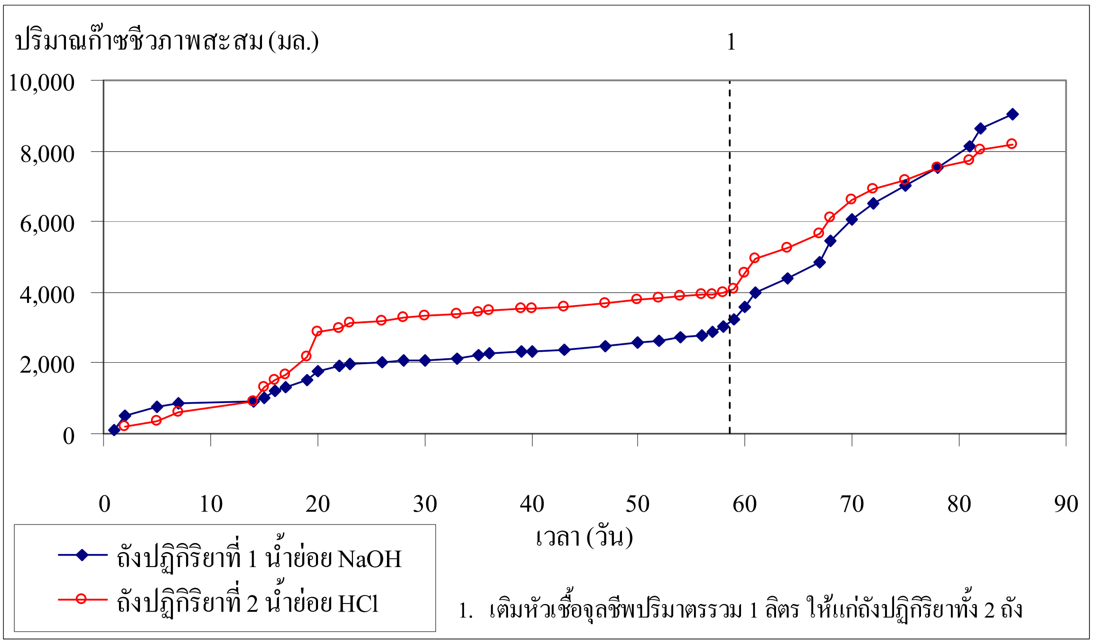
4.5.4 ผลการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลองที่ 3

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันจากการย่อยสลายของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดทางเคมีด้วยในถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง แสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ เมื่อถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง เข้าสู่สภาวะคงตัวปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายของกากส้มภายในสภาวะไร้อากาศเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีคือ 30 องศาเซลเซียส

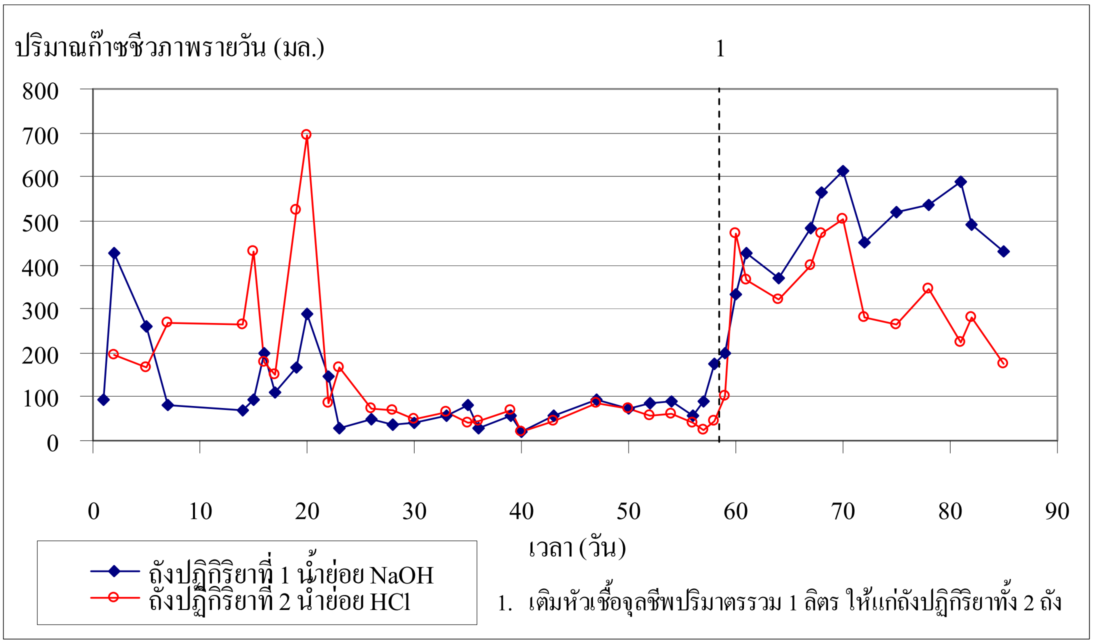
จากตาราง 4.17 จะเห็นได้ว่ามวลซีโอดีที่ถูกกำจัด และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) มีค่าเท่ากับ 26.61 กรัม และเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริง 9.06 ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 43.88 ของปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริก (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ซึ่งมวลซีโอดีถูกกำจัดสูงถึง 42.05 กรัม ซึ่งมากกว่ามวลซีโอดีถูกกำจัดด้วยถังปฏิกิริยาที่ 1 มาก แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงมีปริมาณเพียง 8.19 ลิตร หรือมีค่าเพียงร้อยละ 25.07 ของปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่านั้น อาจเป็นผลมาจากน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีผลยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายในถังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งจะกล่าวในตอนท้าย

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีในแต่ละถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยา	ก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ (วันที่ 1 ถึงวันที่ 59 ของการเดินระบบ)				หลังเติมหัวเชื้อจุลชีพ (วันที่ 60 ของการเดินระบบ จนสิ้นสุดการเดินระบบ)				รวม (วันที่ 1 ของการเดินระบบ จนสิ้นสุดการเดินระบบ)			
	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี	ซีโอดีที่ถูกกำจัด (กรัม)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ 30°ซ (ลิตร)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริง (ลิตร)	ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี
1 (NaOH)	18.98	14.75	3.25	22.03	7.62	5.92	5.81	98.14	26.61	20.67	9.06	43.83
2 (HCl)	31.45	24.44	4.09	16.73	10.60	8.24	4.10	49.76	42.05	32.67	8.19	25.07



รูปที่ 4.36 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

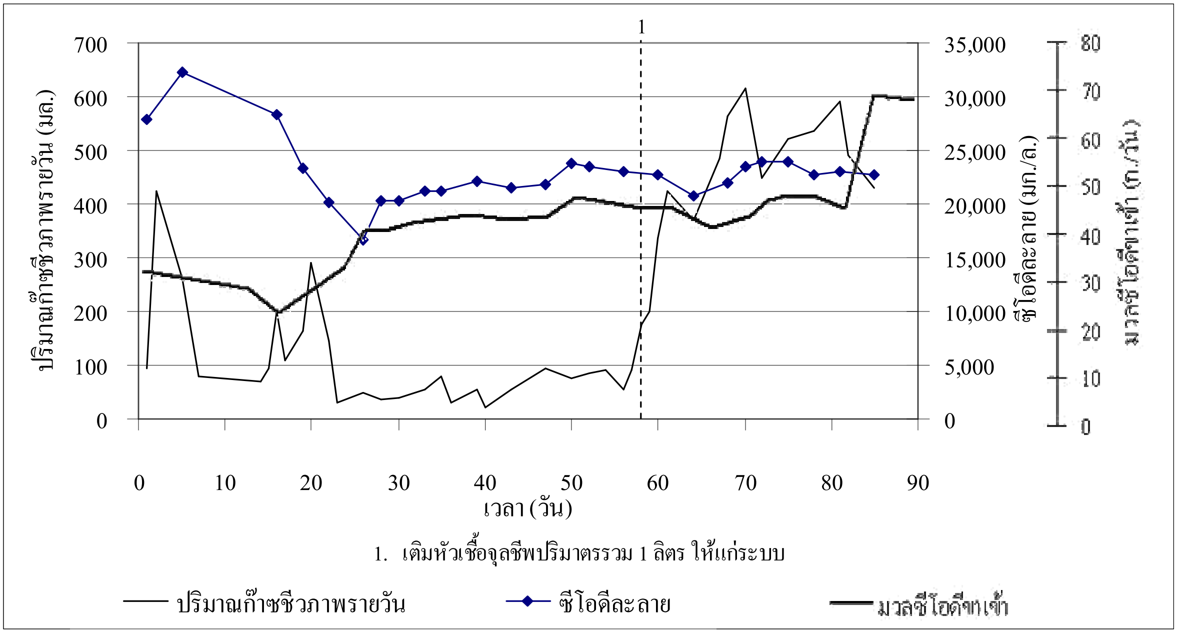


รูปที่ 4.37 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน จากการย่อยสลายของน้ำย่อยกากส้มภายในถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง สังเกตได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วง 5 วันแรกของการเดินระบบ มีก๊าซเกิดขึ้นปริมาณมาก แต่ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นปริมาณก๊าซที่วัดได้อาจจะเป็นอากาศที่เข้าไปในขั้นตอนการเติมน้ำย่อยกากส้มตอนเริ่มทำการทดลองที่ 3 ในช่วงวันที่ 16 ถึงวันที่ 26 ของการเดินระบบ พบว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง มีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงดังกล่าว แสดงว่าส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพถูกย่อยสลายในช่วงนี้ และหลังจากเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาทั้ง 2 ถัง ในวันที่ 59 ของการเดินระบบ เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันมีค่าสูงขึ้นทั้ง 2 ถังปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) แสดงดังรูปที่ 4.38 ในช่วง 19 วันแรกของการเดินระบบ มวลซีโอดีขาเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.98±4.48 กรัมต่อวัน ในช่วงวันที่ 16 ถึงวันที่ 26 ของการเดินระบบ พบว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงดังกล่าว ในช่วงวันที่ 26 ถึงวันที่ 56 ของการเดินระบบ ทำการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าเป็น 42.80±4.14 กรัมต่อวัน รวมไปถึงการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และเติมสารอาหารให้แก่จุลชีพภายในถังปฏิกิริยาที่ 1 ในวันที่ 47 ของการเดินระบบ แต่ไม่ส่งผลถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีในช่วงก่อนการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1 เท่ากับร้อยละ 22.03) จึงทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศในวันที่ 59 ของการเดินระบบ โดยหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1 นั้นคิดเป็นมวลซีโอดีขาเข้าเท่ากับ 25.48 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 2.63 ของมวลซีโอดีขาเข้าสะสมทั้งหมดตลอดช่วงการเดินระบบถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ดังนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 4.17 (ร้อยละของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎีในช่วงหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1 เท่ากับร้อยละ 98.14) ไม่ได้เกิดจากการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าเนื่องจากการเติมหัวเชื้อจุลชีพ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยมวลซีโอดีขาเข้าในช่วงวันที่ 60 ถึงวันที่ 78 ของการเดินระบบ มีค่าเท่ากับ 45.59±2.36 กรัมต่อวัน และเพื่อตรวจสอบว่าซีโอดีละลายที่ยังคงค้างอยู่ในน้ำชะขยะยังมีศักยภาพที่จะถูกจุลชีพในระบบไร้อากาศนำไปใช้ได้หรือไม่ โดยวัดจากค่าซีโอดีละลาย ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลาย และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน จึงทำการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าเป็น 68.51±0.72 กรัมต่อวัน ในวันที่ 81 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ผลปรากฏว่าค่าซีโอดีละลายในน้ำ

ชะขยะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (มีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายเท่ากับ 23,306±573 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีค่าลดลงเล็กน้อย (จากร้อยละ 35.74 ในวันที่ 78 ของการเดินระบบ เหลือร้อยละ 34.75 ในวันที่ 85 ของการเดินระบบ) ส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะช่วงท้ายของการเดินระบบเป็นส่วนที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 1 ในการทดลองที่ 3

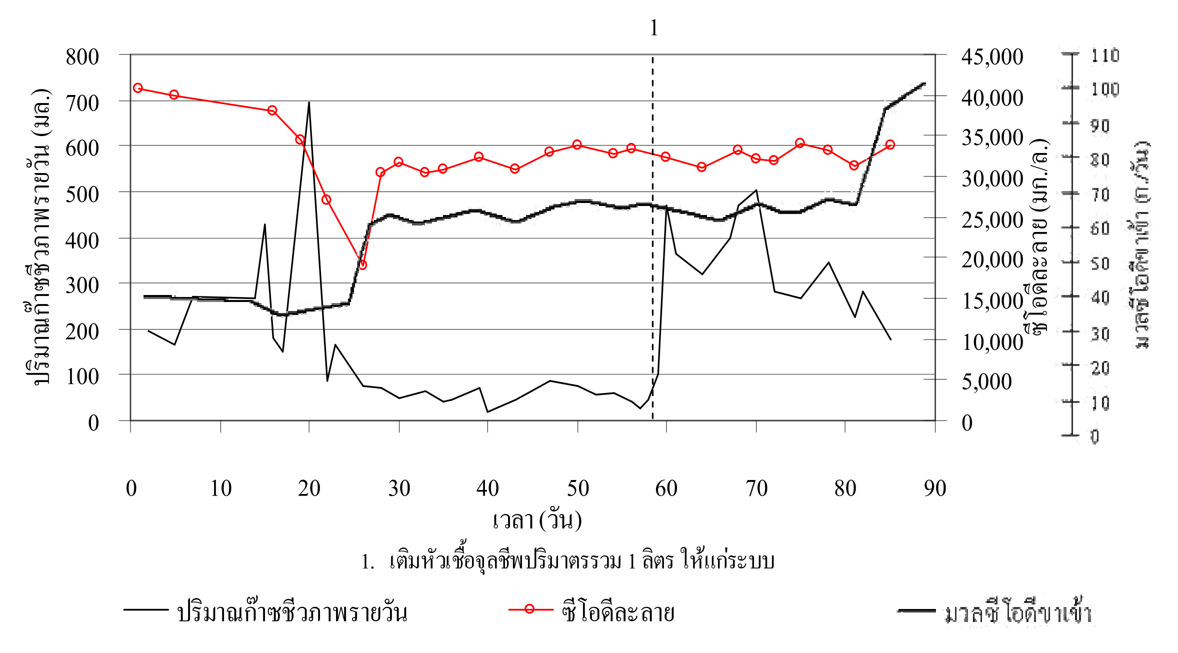
ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 28 ของการเดินระบบ พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.89 โดยปริมาตร และช่วงหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 68 และ 85 ของการเดินระบบ พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.50 และ 26.96 โดยปริมาตร ตามลำดับ จะเห็นว่าการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นผลให้ก๊าซชีวภาพดีขึ้นทั้งในเชิงปริมาณ และคุณภาพ

จากรูปที่ 4.38 จะพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันหลังทำการเติมสารอาหาร และหัวเชื้อจุลชีพ (ในวันที่ 47 และวันที่ 59 ของการเดินระบบ ตามลำดับ) มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่าการที่ถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) มีร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายต่ำ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันต่ำในช่วง

ก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ เกิดมาจากการขาดแคลนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนเนื่องจากสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.5.3.5 ทำให้อัตราการใช้กรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนต่ำกว่าอัตราการสร้างกรดไขมันระเหยของจุลชีพกลุ่มสร้างกรด และเมื่อทำการเติมสารอาหาร และหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ระบบ เป็นผลให้กรดไขมันระเหยที่สะสมภายในถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ถังปฏิกิริยาที่ 1) ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.38 นอกจากนี้ยังทำให้ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพดีขึ้นด้วย (วิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 1 ช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 28 ของการเดินระบบ พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.89 โดยปริมาตรในวันที่ 68 และ 85 ของการเดินระบบ พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.50 และ 26.96 โดยปริมาตร ตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.39 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกในถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลาง (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศเกิดขึ้นในอัตราสูงในช่วงวันที่ 16 ถึงวันที่ 26 ของการเดินระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงดังกล่าว แสดงว่าส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพถูกย่อยสลายในช่วงนี้ ในวันที่ 26 ถึงวันที่ 56 ของการเดินระบบได้ทำการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61.49$\pm$8.65 กรัมต่อวัน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และเติมสารอาหารให้แก่จุลชีพภายในถังปฏิกิริยาที่ 2 (ในวันที่ 47 ของการเดินระบบ) ก็ไม่เป็นผลให้ก๊าซชีวภาพรายวันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังจากเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 2 โดยหัวเชื้อจุลชีพที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 2 คิดเป็นมวลซีโอดีขาเข้าเท่ากับ 25.48 กรัม หรือร้อยละ 1.85 ของมวลซีโอดีขาเข้าสะสมทั้งหมดตลอดช่วงการเดินระบบถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริก (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นการเติมหัวเชื้อจุลชีพให้แก่ถังหมักไร้อากาศจึงไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะ ในช่วงวันที่ 60 ถึงวันที่ 70 ของการเดินระบบ โดยในช่วงนี้มวลซีโอดีขาเข้าใกล้เคียงกับช่วงวันที่ 26 ถึงวันที่ 56 ของการเดินระบบ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 65.06$\pm$2.00 กรัมต่อวัน และในวันที่ 72 ของการเดินระบบ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของถังปฏิกิริยาที่ 2 เริ่มมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้จะทำการเพิ่มมวลซีโอดีขาเข้าซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.81$\pm$5.41 กรัมต่อวัน ให้แก่ระบบในวันที่ 81 จนสิ้นสุดการทดลอง ก็ไม่ส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ซีโอดีละลายที่มีค่าค่อนข้างคงที่ (มีค่าเฉลี่ยของซีโอดีละลายเท่ากับ 32,582$\pm$1,143 มิลลิกรัมต่อลิตร) และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายมีค่าลดลงจากร้อยละ 35.95 ในวันที่ 81 ของการเดินระบบ เหลือร้อยละ 30.86 ใน

วันที่ 85 ของการเดินระบบ จึงสามารถสรุปได้ว่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะช่วงท้ายของการเดินระบบเป็นส่วนที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีละลาย มวลซีโอดีขาเข้า และปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ของถังหมักไร้อากาศถังที่ 2 ในการทดลองที่ 3

จากตารางที่ 4.17 เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริก (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ช่วงก่อน และหลังการเติมหัวเชื้อจุลชีพมีปริมาณใกล้เคียงกัน (4.09 ลิตร และ 4.10 ลิตร ตามลำดับ) แต่มวลซีโอดีที่ถูกกำจัดแตกต่างกันมาก (31.45 กรัม และ 10.60 กรัม ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลาย กรดไขมันระเหย และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริก (ถังปฏิกิริยาที่ 2) พบว่าในช่วงวันที่ 19 ถึง 26 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลาย และกรดไขมันระเหยมีแนวโน้มลดลง แต่ในช่วงวันที่ 28 ถึง 56 ของการเดินระบบ ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังปฏิกิริยาที่ 2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายค่าสูงถึงร้อยละ 44.51 ในวันที่ 26 ของการเดินระบบ และเมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพในวันที่ 28 ของการเดินระบบ ปรากฏว่าไม่พบมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มสภาพกรด (ถังปฏิกิริยาที่ 2) จึงมีความเป็นไปได้ที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกิริยาไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด ดังนั้นการ

ที่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าต่ำกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทางทฤษฎี และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่มวลซีโอดีที่ถูกกำจัดของถังปฏิกิริยาที่ 2 สูงกว่ามวลซีโอดีที่ถูกกำจัดของถังปฏิกิริยาที่ 1 ในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 57 และวันที่ 59 ของการเดินระบบ อาจมีสาเหตุจากการรั่วออก (leak) ของไฮโดรเจน (H_2) ที่สะสมภายในระบบเนื่องจากเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน และอาจมีรอยรั่วตามข้อต่อต่างๆ ของถังปฏิกิริยาถังที่ 2 ตามที่สันนิษฐานไว้ในการทดลองที่ 1

ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริก (ถังปฏิกิริยาที่ 2) ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซช่วงก่อนเติมหัวเชื้อในวันที่ 28 ของการเดินระบบ ปรากฏว่าไม่พบก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริก และภายหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพในวันที่ 68 และ 85 ของการเดินระบบ พบว่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.72 และ 15.35 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการที่ไม่พบก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำย่อยกากส้มด้วยไฮโดรคลอริกในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพมีสาเหตุมาจากสภาพของน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกไม่เหมาะสมรวมไปถึงสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.5.3.5 เป็นผลให้เกิดการยับยั้งการทำงาน และ/หรือการตายของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน แต่ภายหลังทำการปรับสภาพของน้ำชะขยะให้เหมาะสม และเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศ จุลชีพก็สามารถใช้น้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยไฮโดรคลอริกเป็นแหล่งคาร์บอน และพลังงานในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งในเชิงปริมาณ และคุณภาพ เป็นผลให้ระบบสามารถทำงานได้ดีขึ้น

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศแบบของแข็งปริมาณสูงทั้ง 2 ถังปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3 จะพบว่าสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำมาก (ไม่เกินร้อยละ 30 โดยปริมาตร) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการกำจัดของแข็งในกากส้มมากกว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากส้ม และเนื่องจากมีการคาดการณ์อยู่แล้วว่าจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนอาจทำงานได้ไม่เต็มที่เนื่องจากภาวะไม่เหมาะสม ดังนั้นหากต้องการเน้นประเด็นของคุณภาพ และปริมาณก๊าซชีวภาพ ควรออกแบบการทดลองให้การวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่มีความถี่สูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดความแม่นยำกว่าการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. การหมุนเวียนน้ำชะขยะจากก้นถังปฏิกิริยากลับเข้าสู่ระบบนอกจากจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลชีพได้รับอาหารมากขึ้น และช่วยในการเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของกากส้มซึ่งเป็นของแข็งภายในถังปฏิกิริยาแล้ว การเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะยังมีส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการหมัก (fermentation) ของกากส้ม ซึ่งทราบได้จากร้อยละของกรดไขมันระเหยต่อซีโอดีละลายในน้ำชะขยะที่มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำชะขยะทั้งในการทดลองที่ 1 และ 3

2. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 มีร้อยละการกำจัดซีโอดีละลายเท่ากับร้อยละ 46.64 36.40 และ 19.62 เรียงตามลำดับถังปฏิกิริยา โดยสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง มีค่าต่ำ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 มีปริมาณ 55.12 39.59 และ 43.68 ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 23.35 35.55 และ 42.61 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี เรียงตามลำดับถังปฏิกิริยา ส่วนการวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายกากส้มด้วยถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง พบว่าความเข้มข้นของมีเทนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-2.75 โดยปริมาตร

3. เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 1 ได้ทำการเปิดถังหมักไร้อากาศถังที่ 3 ซึ่งเป็นชุดควบคุมเพื่อเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์การลดปริมาณของแข็งในกากส้มด้วยการย่อยสลายแบบไร้อากาศ พบว่าของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นเวลา 244 วัน มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงร้อยละ 75.80-76.96 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 76.51$\pm$0.63 ซึ่งคิดเป็นร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับร้อยละ 21.18 เมื่อเปรียบเทียบกับของแข็งระเหยในกากส้มสด

4. จากผลการทดลองที่ 1 พบว่าการบำบัดกากส้มเพียงอย่างเดียว (single substrate) ด้วยถังหมักไร้อากาศไม่เหมาะสมเนื่องจากสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ไม่เพียงพอต่อการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มต่างๆ ในระบบไร้อากาศ นอกจากนี้กากส้มยังมีสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ยากมากเกินไป ทำให้การย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดช้า และกากส้มที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศแล้วยังมีความเสถียรต่ำ (ยังสามารถย่อยสลายต่อได้อีก และใช้

เวลาในการย่อยสลายนาน) ดังนั้นกากส้มจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวกลาง (media) สำหรับถังปฏิกิริยาแบบจุลชีพเกาะติดอยู่กับตัวกลาง (attached growth reactor)

5. ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยของกากส้มสดหั่นหยาบ และชุดการทดลองที่บำบัดกากส้มด้วยน้ำกลั่นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ค่าเฉลี่ยของแข็งระเหยเท่ากับร้อยละ 97.07$\pm$0.13 และ 95.84$\pm$0.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) และความเป็นกรด-ด่างของน้ำกากส้ม (ของเหลวที่ออกมาจากกากส้มสดหั่นหยาบที่ตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน) และน้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าใกล้เคียงกัน (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.53$\pm$0.02 และ 4.88$\pm$0.01 ตามลำดับ) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงกรด เนื่องจากน้ำส้มมีสภาพเป็นกรดโดยธรรมชาติ แต่ค่าซีโอดีละลายของน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยน้ำกลั่นสูงกว่าค่าซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม โดยคิดเป็นร้อยละการเพิ่มของซีโอดีละลายเท่ากับร้อยละ 22.36 แสดงว่าน้ำกลั่นสามารถชะละลายน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำในกากส้มบางส่วนออกมาได้ ส่วนชุดการทดลองที่บำบัดกากส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มสูงกว่ากากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกทุกชุดการทดลอง โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการลดของแข็งระเหยในกากส้มสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 4.49 แต่ของแข็งระเหยในกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง (มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงร้อยละ 96.16-96.99 โดยน้ำหนัก) และมีค่าเฉลี่ยร้อยละในการกำจัดของแข็งระเหยในกากส้มเพียง 0.60

6. น้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถถูกบำบัดด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางได้ และเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 9.06 ลิตร โดยพบมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ตลอดการเดินระบบ โดยในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพพบมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 6.89 โดยปริมาตร และช่วงหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพพบมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 10.50 และ 26.96 โดยปริมาตร ส่วนน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถถูกบำบัดด้วยถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางได้ และเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 8.19 ลิตร แต่ไม่พบมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์ในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพ แต่ภายหลังเติมหัวเชื้อจุลชีพพบมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 5.72 และ 15.35 โดยปริมาตร ในตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก

7. จากการทดลองที่ 3 พบว่าจุลชีพในระบบไร้อากาศสามารถใช้น้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริกเป็นแหล่งคาร์บอน และพลังงานได้ แต่การที่ถังหมักไร้อากาศที่มีกากส้มเป็นตัวกลางทั้ง 2 ถัง มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายในน้ำชะขยะต่ำ มีปริมาณ และคุณภาพของก๊าซชีวภาพต่ำ (โดยเฉพาะถังหมักไร้อากาศที่ทำการบำบัดน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจมีสาเหตุมาจากภายในระบบขาดแคลน และ/หรือมีจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่เพียงพอ และสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ภายในระบบไม่เพียงพอต่อการทำงาน และ/หรือการเจริญเติบโตของจุลชีพไร้อากาศกลุ่มต่างๆ

8. จากการทดลองที่ 3 พบว่าน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความจำเป็นต้องปรับสภาพน้ำย่อยก่อนนำไปบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปบำบัดด้วยกระบวนการไร้อากาศมากกว่าน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีผลในการยับยั้งการทำงาน และ/หรือการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน เนื่องจากมีความเป็นกรด-ด่างต่ำเกินไป เป็นผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบ และทำให้ระบบเกิดการขาดแคลนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนในที่สุด ดังผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายน้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกในช่วงก่อนเติมหัวเชื้อจุลชีพซึ่งไม่พบมีเทนในตัวอย่างก๊าซที่ทำการวิเคราะห์ ดังนั้นหากต้องการบำบัด และ/หรือใช้น้ำย่อยกากส้มจากการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริกด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ มีความจำเป็นต้องทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพจากระบบไร้อากาศ เติมสารอาหาร (ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) และปรับความเป็นกรด-ด่างในน้ำย่อยกากส้มเสียก่อน เพื่อป้องกันการติดขัด และ/หรือล้มเหลวของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ ปริมาณและองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเนื้อกากส้มที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ หรือเอทานอล

2. ศึกษาปริมาณน้ำตาลที่ละลายและตกผลึกในน้ำย่อยกากส้มที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่างๆ

3. ศึกษาวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีเพื่อกำจัดลิกโนเซลลูโลสในของเสีย เช่น เพิ่มความเข้มข้นของสารเคมี และเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้การบำบัด การใช้ความดันสูงในการบำบัด การใช้ไอน้ำช่วยในการกำจัดลิกโนเซลลูโลสในของเสีย เป็นต้น และพัฒนาให้สามารถนำมาใช้ได้จริงในระดับโรงงานอุตสาหกรรม

4. ศึกษาวิธีบำบัดเบื้องต้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของกากส้ม หรือของเสียชนิดอื่นที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เช่น การย่อยสลายร่วม (co-digestion) การหมักแบบใช้อากาศ (aerobic composting) เป็นต้น ก่อนนำไปบำบัดต่อด้วยถังหมักไร้อากาศ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤชพล ใจจงรักษ์. 2546. แนวทางในการหมุนเวียนน้ำชะขยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายขยะอินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน). 2548. รายงานประจำปี 2548 [online]. แหล่งที่มา: http://www.malee.co.th/thai/annual2005-thai.pdf[19 มีนาคม 2550]

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่มที่ 1, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรณา ตุลยธัญ. 2549. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมส่งเสริมการเกษตรกรม. ศูนย์สารสนเทศ. 2548. สถิติผลผลิตของพืชประเภทส้มในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ถึง 2547 [online]. แหล่งที่มา: http://production.doae.go.th [19 มีนาคม 2550]

ภาษาอังกฤษ

Alvarez, J. M. and Llabes, S. M. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes: An overview of research achievements and perspectives. Bioresource technology 74: 3 – 16.

Angelidaki, I. and Ahring, B. 1999. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure: In Mata – Alvarez, J., Tilche, A., Cecchi, F. (Eds.), Proceedings of the second international symposium on anaerobic digestion of solid wastes, Barcelona 1: 375-380.

APHA (1998). American Public Health Association Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20thed. Washington, DC: APHA and American Water Works Association and Water Environment Federation.

Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R. and Hamdi, M. 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Process biochemistry 40: 989-995.

Chang, V. S., Nagwani, M., Kim, C. and Holtzapple, T. 2001. Oxidative lime pretreatment of high-lignin biomass. Bioresource technology 94: 1-28.

Chau, C. F. and Huang, Y. L. 2003. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of citrus sinensis L Cv. Liucheng. Journal of agricultural and food chemistry 51: 2615 – 2618.

Chynoweth, D. P. and Isaacson, R. 1989. Anaerobic digestion of biomass. New York: Elsevier applied science.

Converti, A., Perego, P., Borghi, M. D. and Ferraiolo, G. 1989. Pretreatment operations and alcohol fermentation of orange wastes. Journal of fermentation and bioengineering 68: 277 – 281.

Coultate, T. P. 2002. Food: The chemistry of its component. 4thed. Cambridge: The royal society of chemistry.

Delgenes, J. P., Penaud, V., Torrijos, M. and Moletta, R. 1999. Thermochemical pre – treatment of an industrial microbial biomass: Effect of sodium hydroxide addition on COD solubilization, anaerobic biodegradability and generation of soluble inhibitory compounds: In Mata – Alvarez, J., Tilche, A., Cecchi, F. (Eds.), Proceedings of the second international symposium on anaerobic digestion of solid wastes, Barcelona 1: 121 – 128.

Fenchel, T. and Finlay, B. J. 1995. Ecology and evolution in anoxic worlds. Oxford Univ. Press.

Glazer, N. A. and Nikaido H. 1995. Microbial biotechnology: Fundamental of applied microbiology. W. H. Freeman & Company.

Grohmann, K., Torget, R. and Himmel, M. 1985. Optimization of dilute acid pretreatment of biomass. Bioresource technology 15: 59-80.

Grohmann, K., Cameron, R. G. and Buslig B. S. 1995. Fractionation and pretreatment of orange peel by dilute acid hydrolysis. Bioresource technology 54: 129 – 141.

Hartmann, H., Angelidaki, I. and Ahring, B. K. 1999. Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full – scale biogas plants by mechanical maceration: In Mata – Alvarez, J., Tilche, A., Cecchi, F. (Eds.), Proceedings of the second international symposium on anaerobic digestion of solid wastes, Barcelona 1: 129 – 136.

Hendriks, A. T. W. M. and Zeeman, G. 2008. Pretreatment to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass [online]. Available from: http://www.elsevier.com/locate/biotech [2008, November 20]

Kaar, W. E. and Holtzapple, M. T. 2000. Using lime pretreatment to facilitate the enzymatic hydrolysis of corn stover. Biomass bioenergy 18: 189-199.

Kim, S. and Holtzapple, M. T. 2005. Lime pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. Bioresource technology 96: 1994 – 2006.

Martin, D. J. 2001. The site of reaction in solid-state digestion a new hypothesis. The Institution of chemical engineers. 79, part B: 29-37.

Muller, C. 2007. Overview over existing technologies and relevant case studies: Anaerobic digestion of biodegradable solid waste in low- and middle-income countries [online]. Available from: http://www.eawag.ch [2008, November 12]

Patrick, W. and Philip, O. 2002. Bioreactor landfill design and operation. Waste age: 72-76.

RISE-AT. 1998. Review of current status of anaerobic digestion technology for treatment of municipal solid waste. Regional information service center for South East Asia on appropriate technology, Institute of science and technology research and development, Chiang Mai University, Thailand.

Robyt, J. F. 1998. Essentials of carbohydrate chemistry. New York: Springer.

Sam-soon, P. A. L. N. S., Loewenthal, R. E., Wentzel, M. C. and Marais, G. V. R. 1990. Growth of biopellets on glucose in upflow anaerobic sludge bed (UASB) system. Water SA 16(13): 151-164.

Sawyer, C. N. and McCarty, P. L. 1993. Chemistry for environmental engineering. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co-Singapore.

Speece, R. E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. Nashville, Tennessee: Archae Press.

Valdez-Vazquez, I. and Poggi-Varaldo, H. M. 2008. Hydrogen production by fermentative consortia [online]. Available from: http://www.elsevier.com/locate/biotech [2008, November 20]

Wilkins, M. R., Widmer, W. W., Grohmann, K. and Cameron, R. G. 2006. Hydrolysis of grapefruit peel waste with cellulase and pectinase enzymes. Bioresource technology.

Wyman, C. E., Dale, B. E., Elander, R. T., Holtzapple, M., Ladisch, M. R. and Lee, Y. Y. 2005. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. Bioresource technology 96: 1959-1966.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองที่ 1

ตารางที่ ก-1 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	45,202	3	49,714	1	54,388
2	72,944	5	71,871	6	87,387
3	52,380	10	105,121	8	53,939
5	56,389	12	60,961	13	80,000
6	87,947	17	53,120	15	65,296
7	41,645	19	52,720	17	58,528
9	40,973	21	50,592	20	76,384
11	85,600	24	66,960	22	59,520
14	85,600	26	56,544	24	65,482
17	86,741	28	54,570	27	60,490
20	72,267	31	56,650	29	70,081
22	73,600	33	62,401	31	75,840
24	65,333	35	64,080	35	67,190
26	64,000	39	58,550	37	67,690
28	63,467	41	67,690	41	89,098
30	57,600	45	75,274	45	82,698
33	69,333	49	70,666	48	80,630
35	62,933	52	71,990	50	77,280
39	68,267	54	68,400	54	67,190
41	62,857	58	65,270	56	78,730
46	58,402	60	63,370	58	84,139
48	58,549	62	71,990	62	86,529
50	59,792	66	75,265	65	76,810
52	56,021	69	65,546	69	82,601
55	54,944	73	72,393	73	71,245
57	52,224	77	56,789	83	81,674

ตารางที่ ก-1 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
60	57,152
62	41,303
64	59,061
67	50,667
69	50,176
71	49,152
74	54,272
77	55,296
79	53,248
81	55,096
83	56,907
85	50,699
87	53,312
89	44,949
92	49,664
94	46,560
97	48,970
99	51,744
101	49,075
105	47,627
109	43,703
111	44,841
116	42,325
123	48,630
125	45,705
130	39,936

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
87	66,362
89	70,422
91	55,290
97	63,646
103	64,698
112	71,715
117	71,600
121	56,034
130	65,500
142	63,989

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
85	76,374
87	69,905
93	68,340
99	81,616
108	79,190
113	75,896
118	59,148
126	74,500
137	77,701
145	78,066
147	68,952
151	73,877
158	76,114
162	78,297
170	69,475
181	64,960
185	71,290
188	65,508
192	70,057
199	76,834
205	71,391
213	73,852
222	70,457
230	78,793

ตารางที่ ก-1 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
134	35,712
137	41,664
139	34,720
141	36,714
144	43,090
146	44,161
152	40,310
158	52,746
162	49,162
165	45,110
171	41,270
182	44,042
186	46,409
210	44,868
216	46,784
225	53,962
230	49,643
235	40,466
244	44,500
256	47,535

ตารางที่ ก-2 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)	วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)	วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
3	16,500	3	12,330	1	6,030
5	10,170	5	11,430	6	17,550
6	11,550	10	15,750	8	21,375
7	3,150	12	18,000	13	24,000
9	8,190	17	16,500	15	18,750
11	9,810	19	11,625	17	19,500
14	9,630	21	13,875	20	15,250
17	11,190	24	13,500	22	17,750
20	9,570	26	12,750	24	15,250
22	9,810	28	14,000	27	16,500
24	11,010	31	15,000	29	16,250
26	11,730	33	15,000	31	17,531
28	11,310	35	15,000	35	17,375
30	10,830	39	12,875	37	14,750
33	10,350	41	14,750	41	17,125
35	11,375	45	14,000	45	17,750
39	11,187	49	14,750	48	16,250
41	11,438	52	14,250	50	16,250
46	10,750	54	13,750	54	16,230
48	10,750	58	13,590	56	15,750
50	10,875	60	12,630	58	16,830
52	11,562	62	14,310	62	17,190
55	10,625	66	13,830	65	16,830
57	10,000	69	13,950	69	16,110

ตารางที่ ก-2 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
60	9,875
62	9,063
64	11,000
67	10,750
69	11,125
71	10,812
74	10,688
77	10,563
79	10,563
81	10,625
83	11,325
85	11,438
87	10,938
89	10,437
92	9,938
94	9,450
97	9,450
99	9,450
101	9,450
105	10,512
109	10,875
111	10,710
116	8,670
123	10,710

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
73	13,230
77	13,230
87	12,240
89	11,895
91	12,700
97	12,700
103	11,090
112	11,910
117	11,670
121	11,610
130	13,110
142	8,820

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
73	15,210
83	15,000
85	15,345
87	14,770
93	14,655
99	13,160
108	13,590
113	14,070
118	16,830
126	14,070
137	10,878
145	6,248
147	8,460
151	8,555
158	14,480
162	10,768
170	11,778
181	15,480
185	13,320
188	19,772
192	22,932
199	21,408
205	17,555
213	17,928

ตารางที่ ก-2 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
125	10,875
130	10,125
134	10,125
137	9,500
139	10,000
141	9,500
144	10,125
146	10,625
152	10,500
158	11,000
162	11,125
165	10,500
171	9,630
182	9,990
186	9,270
210	9,710
216	8,560
225	9,990
230	11,670
235	9,270
244	9,510
256	8,820

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
222	15,042
230	14,490

ตารางที่ ก-3 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)	วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)	วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
5	2,040	3	4,680	1	1,140
6	2,640	5	1,800	6	2,640
7	3,280	10	4,560	8	4,500
9	6,280	12	7,000	13	7,625
11	6,640	17	10,500	15	7,750
14	5,800	19	8,500	17	9,250
17	6,080	21	10,250	20	7,000
20	6,800	24	7,167	22	12,167
22	7,200	26	9,667	24	12,000
24	5,520	28	9,667	27	12,000
26	6,760	31	9,250	29	12,000
28	5,720	33	9,667	31	11,000
30	5,480	35	8,417	35	14,833
33	5,200	39	10,167	37	9,750
35	5,750	41	9,750	41	13,833
39	5,333	45	10,833	45	13,167
41	6,208	49	10,250	48	12,500
46	6,500	52	9,917	50	13,000
48	6,458	54	10,333	54	12,640
50	6,438	58	8,960	56	12,320
52	6,750	60	9,440	58	10,720
55	6,292	62	8,240	62	12,800
57	6,625	66	9,920	65	12,720
60	6,750	69	9,840	69	11,880
62	8,292	73	9,240	73	13,440

ตารางที่ ก-3 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
64	6,917
67	7,125
69	7,208
71	6,500
74	6,250
77	6,792
79	7,083
81	7,167
83	5,133
85	4,708
87	5,375
89	5,625
92	6,625
94	6,760
97	6,120
99	5,800
101	7,194
105	8,889
109	7,800
111	8,125
116	10,160
123	7,920
125	8,500
130	8,125

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
77	10,800
87	7,820
89	8,280
91	6,900
97	6,900
103	6,900
112	8,160
117	8,720
121	8,400
130	9,200
142	4,800

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
83	10,005
85	11,385
87	8,587
93	8,433
99	8,433
108	9,440
113	11,360
118	12,000
126	10,560
137	6,120
145	5,880
147	4,320
151	6,840
158	5,280
162	4,080
170	4,320
181	5,750
185	4,080
188	7,920
192	5,520
199	5,630
205	7,590
213	7,360
222	5,775

ตารางที่ ก-3 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)	วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
134	8,250	230	5,880
137	6,333		
139	8,167		
141	7,500		
144	8,000		
146	7,833		
152	9,167		
158	9,333		
162	8,667		
165	8,500		
171	8,320		
182	8,400		
186	7,440		
210	6,440		
216	7,820		
225	7,680		
230	8,720		
235	8,160		
244	8,560		
256	4,800		

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
1	4.46	1	4.46	1	4.45
2	4.46	2	4.80	2	4.47
3	3.85	3	5.21	3	4.54
5	4.78	4	5.05	6	4.67
6	5.06	5	4.86	7	4.70
7	5.95	6	4.86	8	4.75
9	5.90	7	4.94	9	4.81
11	5.69	10	5.09	10	4.78
12	5.65	11	5.52	13	5.00
13	5.50	12	5.19	14	5.10
14	5.52	13	5.27	15	5.27
15	5.50	14	5.41	16	5.31
17	5.44	17	5.73	17	5.44
18	5.41	18	5.73	20	5.80
19	5.52	19	5.87	21	6.04
20	5.61	20	5.91	22	6.20
21	5.54	21	5.97	24	6.43
22	5.58	24	5.74	27	6.39
23	5.50	25	5.83	28	6.17
24	5.42	26	5.85	29	6.20
26	5.59	28	5.90	31	6.16
28	5.40	31	5.90	35	6.29
30	5.37	32	5.71	36	6.08
32	5.39	33	5.75	37	6.12
35	5.26	35	5.74	41	6.28
36	5.29	39	5.91	42	6.10

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
37	5.32	40	5.68	45	6.06
39	5.36	41	5.75	48	6.09
40	5.42	45	5.94	49	6.07
41	5.49	46	5.78	50	6.10
42	5.53	49	5.78	54	6.05
46	5.61	52	5.83	55	6.18
48	5.61	53	5.80	56	6.09
50	5.57	54	5.85	57	5.90
52	5.58	58	5.79	58	5.91
53	5.55	59	5.90	62	6.03
54	5.56	60	5.78	63	6.20
55	5.56	61	5.65	65	6.04
56	5.58	62	5.67	66	5.94
57	5.64	66	5.82	69	5.90
60	5.61	67	5.96	70	6.01
62	5.61	69	5.81	71	6.00
64	5.60	70	5.71	73	5.93
67	5.75	73	5.65	76	5.97
69	5.60	74	5.75	78	6.04
70	5.55	75	5.74	79	6.01
71	5.55	77	5.69	80	6.03
74	5.61	80	5.70	83	6.01
75	5.67	82	5.74	84	6.01
77	5.67	83	5.75	85	6.05
79	5.71	84	5.78	86	6.03
81	5.83	87	5.79	87	6.03

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
82	5.55	88	5.77	90	5.99
83	5.57	89	5.79	93	5.98
84	5.56	90	5.77	94	5.99
85	5.46	91	5.79	97	5.95
87	5.58	94	5.75	98	5.96
88	5.68	97	5.77	99	5.97
89	5.69	98	5.78	101	5.98
90	5.78	101	5.75	104	6.05
92	5.81	102	5.75	106	6.01
94	5.99	103	5.76	107	6.07
97	6.24	105	5.78	108	5.89
99	6.16	108	5.86	113	5.89
101	6.16	110	5.81	115	5.88
104	6.16	111	5.89	118	5.88
105	6.28	112	5.78	119	5.87
106	6.17	117	5.71	121	5.87
109	6.15	119	5.69	125	5.85
110	6.18	121	5.68	126	5.87
111	6.26	122	5.68	129	5.84
112	6.23	125	5.68	131	5.86
116	6.67	129	5.67	134	5.89
123	6.42	130	5.67	137	5.88
125	6.23	133	5.65	141	5.86
126	6.22	136	5.69	144	5.90
127	6.18	139	5.72	145	5.88
130	6.21	142	5.70	146	5.82

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
131	6.26	147	5.83
132	6.26	148	5.81
134	6.19	151	5.79
137	6.08	153	5.86
138	6.08	155	5.85
139	6.17	158	5.91
141	6.24	160	5.88
144	6.25	162	5.84
145	6.04	165	5.86
146	6.13	168	5.85
148	6.18	169	5.87
152	6.33	170	5.85
153	6.04	172	5.84
154	6.12	179	5.85
158	6.32	180	5.83
159	6.16	181	5.81
162	6.14	182	5.81
165	6.20	185	5.79
166	6.13	186	5.93
167	6.22	188	5.78
171	6.44	189	5.91
172	6.29	192	5.83
173	6.21	194	5.83
174	6.07	196	5.81
175	6.09	199	5.78
179	6.18	201	5.77

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
180	6.40
182	6.19
183	6.14
186	6.05
187	6.22
188	6.18
190	6.14
197	6.20
200	6.25
201	6.24
202	6.24
203	6.27
204	6.25
207	6.20
210	6.23
211	6.23
214	6.19
215	6.18
216	6.21
218	6.19
221	6.31
223	6.23
224	6.32
225	6.20
230	6.19
232	6.11

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
202	5.77
205	5.90
206	5.85
209	5.80
213	5.73
216	5.99
218	5.80
220	5.87
222	5.79
223	5.75
224	5.70
225	5.68
226	5.66
227	5.53
230	6.11
233	5.84
234	5.74
236	5.87
238	5.83
241	5.80
244	5.84
202	5.77
205	5.90
206	5.85
209	5.80
213	5.73

ตารางที่ ก-4 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
235	6.14
236	6.12
239	6.11
243	6.11
244	6.12
247	6.12
250	6.09
253	6.11
256	6.15
235	6.14
236	6.12
239	6.11
243	6.11
244	6.12
247	6.12
250	6.09
253	6.11
256	6.15

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
216	5.99
218	5.80
220	5.87
222	5.79
223	5.75
224	5.70
225	5.68
226	5.66
227	5.53
230	6.11
233	5.84
234	5.74
236	5.87
238	5.83
241	5.80
244	5.84

ตารางที่ ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
1	-153.3	1	-153.3	1	-109.7
2	-153.3	2	-153.3	2	-112.6
3	-154.5	3	-150.5	3	-114.5
5	-170.0	4	-147.7	6	-107.5
6	-200.0	5	-139.6	7	-119.6
7	-220.0	6	-147.9	8	-133.9
9	-236.7	7	-156.3	9	-136.6
11	-226.0	10	-132.0	10	-135.5
12	-219.6	11	-216.3	13	-145.4
13	-214.7	12	-159.5	14	-153.6
14	-216.3	13	-163.7	15	-159.6
15	-214.8	14	-173.3	16	-169.4
17	-211.1	17	-188.1	17	-173.5
18	-209.9	18	-188.3	20	-208.7
19	-209.5	19	-194.5	21	-210.1
20	-209.9	20	-201.8	22	-219.0
21	-204.7	21	-204.3	24	-233.9
22	-206.7	24	-205.3	27	-293.6
23	-207.7	25	-198.0	28	-223.4
24	-209.5	26	-199.0	29	-224.8
26	-207.7	28	-202.6	31	-230.0
28	-209.7	31	-206.0	35	-227.0
30	-209.6	32	-196.6	36	-219.3
32	-209.6	33	-199.5	37	-221.8
35	-212.5	35	-205.1	41	-225.1
36	-212.4	39	-205.2	42	-215.8

ตารางที่ ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
37	-221.5	40	-195.4	45	-216.4
39	-221.5	41	-200.0	48	-215.5
40	-221.4	45	-205.0	49	-214.0
41	-221.0	46	-196.4	50	-215.7
42	-221.5	49	-198.8	54	-209.1
46	-221.1	52	-200.1	55	-216.1
48	-221.0	53	-198.2	56	-209.1
50	-221.3	54	-201.6	57	-182.0
52	-221.3	58	-194.5	58	-188.0
53	-221.3	59	-200.2	62	-189.0
54	-222.1	60	-193.9	63	-190.1
55	-222.1	61	-166.6	65	-182.8
56	-221.3	62	-174.2	66	-185.8
57	-223.6	66	-175.9	69	-179.3
60	-223.6	67	-176.6	70	-243.0
62	-223.6	69	-169.4	71	-243.0
64	-223.6	70	-172.3	73	-239.0
67	-226.0	73	-164.9	76	-239.0
69	-223.6	74	-229.0	78	-237.0
70	-300.0	75	-228.0	79	-236.0
71	-224.5	77	-225.0	80	-237.0
74	-223.6	80	-225.0	83	-236.0
77	-224.5	82	-226.0	84	-236.0
81	-224.5	83	-224.0	85	-238.0
83	-222.6	84	-223.0	86	-237.0
85	-222.6	87	-224.0	87	-237.0

ตารางที่ ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
87	-222.7	88	-222.0	90	-235.0
89	-224.0	89	-224.0	93	-234.0
92	-225.0	90	-222.0	94	-235.0
94	-225.4	91	-224.0	97	-232.0
97	-227.2	94	-221.0	98	-233.0
99	-226.9	97	-222.0	99	-234.0
101	-195.5	98	-223.0	101	-236.0
104	-219.9	101	-221.0	104	-239.0
105	-222.1	102	-221.0	106	-236.0
106	-219.8	103	-222.0	107	-239.0
109	-218.5	105	-224.0	108	-234.0
110	-229.5	108	-228.0	113	-234.0
111	-228.8	110	-225.0	115	-233.0
112	-228.0	111	-229.0	118	-234.0
116	-228.8	112	-224.0	119	-233.0
123	-228.0	117	-224.0	121	-232.0
125	-228.8	119	-222.0	125	-231.0
126	-228.7	121	-223.0	126	-232.0
127	-224.5	122	-223.0	129	-231.0
130	-224.5	125	-222.0	131	-231.0
131	-224.7	129	-220.0	134	-233.0
132	-224.0	130	-221.0	137	-234.0
134	-223.4	133	-220.0	141	-233.0
137	-221.8	136	-221.0	144	-234.0
138	-221.8	139	-223.0	145	-233.0
139	-222.5	142	-224.0	146	-232.0

ตารางที่ ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
141	-222.4
144	-222.6
145	-224.7
146	-225.8
148	-225.8
152	-225.8
153	-222.4
154	-221.1
158	-227.2
159	-220.1
162	-221.3
165	-221.7
166	-217.6
167	-222.7
171	-231.2
172	-222.6
173	-218.2
174	-191.8
175	-198.1
179	-197.9
180	-200.0
182	-192.3
183	-197.0
186	-188.2
187	-254.0
188	-252.0

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
147	-233.0
148	-232.0
151	-229.0
153	-230.0
155	-230.0
158	-231.0
160	-231.0
162	-231.0
165	-231.0
168	-232.0
169	-232.0
170	-228.0
172	-227.0
179	-230.0
180	-229.0
181	-228.0
182	-229.0
185	-230.0
186	-237.0
188	-229.0
189	-237.0
192	-230.0
194	-229.0
196	-228.0
199	-227.0
201	-226.0

ตารางที่ ก-5 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
190	-249.0
197	-247.0
200	-249.0
201	-249.0
202	-249.0
203	-251.0
204	-250.0
207	-247.0
210	-249.0
211	-248.0
214	-246.0
215	-246.0
216	-247.0
218	-247.0
221	-253.0
223	-249.0
224	-253.0
225	-246.0
230	-250.0
232	-246.0
235	-248.0
239	-245.0
243	-246.0
247	-246.0
250	-244.0
256	-249.0

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
202	-224.0
205	-232.0
206	-229.0
209	-230.0
213	-230.0
216	-274.5
218	-263.6
220	-272.3
222	-270.0
223	-260.0
224	-245.0
225	-240.0
226	-232.0
227	-230.0
230	-229.0
233	-230.0
234	-230.0
236	-261.3
238	-259.6
241	-257.3
244	-260.0

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)	วันที่	อุณหภูมิ (°C)	วันที่	อุณหภูมิ (°C)
1	28.3	1	28.4	1	28.3
2	28.0	2	28.0	2	28.5
3	28.1	3	28.4	3	28.4
5	27.8	4	27.8	6	28.4
6	28.3	5	28.3	7	28.7
7	29.6	6	28.6	8	27.8
9	29.4	7	29.4	9	28.9
11	28.8	10	28.6	10	28.3
12	28.7	11	28.7	13	28.2
13	29.9	12	27.8	14	28.2
14	28.7	13	28.8	15	28.5
15	28.8	14	28.2	16	28.3
17	30.3	17	28.2	17	28.4
18	27.5	18	28.6	20	26.5
19	27.3	19	28.5	21	27.4
20	27.1	20	28.3	22	28.0
21	27.7	21	28.3	24	28.5
22	27.8	24	26.6	27	27.7
23	27.7	25	27.4	28	28.7
24	27.5	26	28.1	29	28.1
25	28.4	28	28.5	31	26.6
26	28.7	31	27.9	35	27.9
27	28.7	32	28.6	36	27.3
28	28.2	33	28.0	37	26.4
29	27.9	35	26.8	41	28.3
30	26.7	39	27.9	42	28.4

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)	วันที่	อุณหภูมิ (°C)	วันที่	อุณหภูมิ (°C)
32	28.7	40	27.4	45	28.5
33	28.2	41	26.9	48	28.6
34	28.5	45	28.7	49	27.8
35	29.4	46	28.4	50	27.7
39	30.5	49	28.5	54	29.5
41	25.9	52	28.6	55	28.7
42	27.5	53	27.6	56	28.4
46	28.8	54	27.5	57	26.8
48	27.1	58	29.5	58	28.5
50	25.3	59	28.4	62	30.0
52	28.4	60	28.8	63	30.3
53	28.3	61	26.8	65	28.9
54	28.7	62	28.6	66	29.3
55	28.7	66	30.0	69	30.0
56	27.7	67	29.9	70	30.5
57	26.8	69	28.8	71	31.3
60	26.0	70	29.4	73	30.0
62	27.7	73	30.1	76	30.4
64	27.0	74	30.5	78	31.0
67	27.3	75	31.3	79	30.6
69	25.0	77	30.7	80	31.0
70	26.8	80	30.6	83	30.0
71	25.4	82	30.1	84	30.2
74	26.8	83	30.3	85	30.4
75	26.8	84	31.2	86	31.2
77	27.9	87	29.8	87	30.5

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	วันที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	วันที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)
79	27.1	88	30.4	90	31.3
81	28.2	89	29.8	93	31.5
83	27.1	90	31.3	94	30.7
84	28.1	91	30.7	97	31.4
85	27.9	94	31.2	98	31.6
87	28.6	97	31.6	99	30.0
88	29.7	98	30.6	101	28.4
89	30.1	101	31.4	104	28.9
90	29.7	102	31.6	106	29.0
92	29.3	103	30.0	107	29.8
94	29.8	105	28.2	108	30.2
97	28.6	108	28.9	113	30.2
99	27.5	110	29.2	115	31.3
101	26.9	111	29.9	118	28.5
104	25.7	112	29.8	119	28.8
105	24.2	117	30.4	121	29.1
106	25.8	119	31.8	125	30.2
109	27.5	121	28.5	126	29.3
110	27.6	122	28.6	129	29.4
111	28.1	125	29.3	131	30.9
112	28.2	129	30.6	134	29.6
116	28.3	130	29.3	137	29.9
123	28.8	133	29.1	141	30.6
125	27.8	136	30.8	144	29.6
126	28.9	139	29.9	145	30.1
127	28.2	142	30.3	146	30.2

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)
130	28.0
131	28.1
132	28.7
134	28.6
137	26.5
138	27.5
139	28.3
141	28.3
144	27.7
145	28.5
146	28.3
148	27.1
152	27.8
153	27.5
154	26.7
158	28.8
159	28.3
162	28.6
165	28.7
166	27.8
167	27.6
171	29.7
172	28.7
173	28.6
174	26.6
175	28.8

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)
147	29.6
148	29.5
151	30.3
153	29.0
155	28.5
158	30.1
160	30.4
162	29.9
165	31.6
168	28.8
169	29.5
170	28.6
172	28.9
179	30.8
180	30.0
181	30.4
182	29.3
185	28.8
186	28.8
188	29.3
189	29.7
192	29.1
194	29.5
196	29.5
199	29.1
201	29.3

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)
179	30.2
180	30.3
182	28.9
183	29.4
186	30.3
187	30.6
188	31.4
190	31.0
197	31.0
200	29.7
201	30.7
202	29.9
203	31.4
204	30.9
207	31.3
210	31.0
211	30.7
214	31.4
215	31.9
216	30.2
218	28.5
221	29.6
223	29.5
224	30.4
225	29.9
230	30.4

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)
202	29.0
205	29.8
206	29.5
209	29.2
213	29.8
216	30.1
218	30.6
220	30.6
222	30.0
223	30.2
224	30.4
225	29.9
226	29.9
227	30.0
230	29.4
233	30.1
234	30.5
236	28.9
238	28.7
241	29.7
244	28.8

ตารางที่ ก-6 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	อุณหภูมิ (°C)
232	30.6
235	28.7
236	28.9
239	29.2
243	31.0
244	29.7
247	30.4
250	31.1
253	30.0
256	30.6

ตารางที่ ก-7 แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	NH_3-N (มก./ล. N)
17	488.12
56	512.00
89	480.30
123	480.20
152	478.40
179	482.60
188	509.60
210	481.40
244	480.12

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	NH_3-N (มก./ล. N)
10	512.00
46	677.60
66	511.50
97	506.40
130	506.80

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	NH_3-N (มก./ล. N)
42	599.20
62	580.40
93	560.78
126	551.40
151	550.30
186	548.80
222	520.80

ตารางที่ ก-8 ออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	PO_4^{3-}-P (มก./ล. P)
17	78.40
56	78.10
89	77.84
123	77.84
152	77.60
179	78.12
188	70.72
210	78.12
244	78.12

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	PO_4^{3-}-P (มก./ล. P)
10	91.10
46	74.63
66	91.00
97	90.80
130	90.80

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	PO_4^{3-}-P (มก./ล. P)
42	36.54
62	60.80
93	65.76
126	66.80
151	70.40
186	81.40
222	94.91

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
1	1,150	1	1,045	1	890
2	1,570	2	1,580	2	1,710
3	2,010	3	2,120	3	2,140
5	2,120	4	1,950	6	1,960
6	2,110	5	2,040	7	4,645
7	2,130	6	1,960	8	2,365
9	5,170	7	4,760	9	2,015
11	3,080	10	2,160	10	1,875
12	2,830	11	1,995	13	1,720
13	2,350	12	1,825	14	1,470
14	1,890	13	1,520	15	1,550
15	1,570	14	1,460	16	1,255
17	1,650	17	1,535	17	980
18	1,210	18	1,170	20	660
19	1,530	19	970	21	610
20	1,470	20	665	22	650
21	1,220	21	610	24	690
22	1,080	24	600	27	775
23	840	25	540	28	260
24	430	26	485	29	520
25	300	28	495	31	315
26	265	31	520	35	270
27	190	32	215	36	140
28	195	33	485	37	200
29	180	35	360	41	300

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
30	185
32	185
33	125
34	65
35	180
36	120
37	195
39	170
40	0
41	0
42	115
46	125
47	95
48	30
49	30
50	95
52	80
53	100
54	40
55	85
56	80
57	95
60	125
61	85
62	115

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
39	285
40	160
41	245
45	150
46	190
49	200
52	140
53	115
54	175
58	120
59	165
60	120
61	175
62	120
66	125
67	115
69	120
70	120
73	120
74	120
75	120
77	120
80	230
82	225
83	220

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
42	420
45	425
48	275
49	280
50	405
54	280
55	380
56	270
57	400
58	270
62	270
63	265
65	265
66	265
69	275
70	270
71	270
73	275
76	515
78	500
79	495
80	130
83	270
84	265
85	260

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
64	130	84	60	86	265
67	100	87	125	87	255
68	115	88	120	90	130
69	100	89	120	93	250
70	90	90	115	94	255
71	95	91	110	97	260
74	205	94	55	98	260
75	35	97	110	99	265
76	365	98	110	101	125
77	225	101	115	104	130
79	115	102	110	106	130
81	375	103	115	107	120
82	40	105	110	108	135
83	200	108	80	113	215
84	95	110	95	115	110
85	90	111	75	118	125
87	210	112	100	119	95
88	215	117	105	121	100
89	45	119	80	125	85
90	40	121	70	126	70
91	380	122	65	129	70
92	240	125	75	131	85
94	185	129	60	134	60
95	540	130	55	137	50
96	40	133	65	141	45

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
97	235
98	230
99	245
101	240
104	235
105	185
106	175
109	155
110	165
111	130
112	145
116	105
123	90
125	95
126	205
127	195
130	215
131	215
132	210
134	205
137	110
138	205
139	235
141	215
144	250

ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
136	80
139	85
142	65
รวม	39,590

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
144	20
145	65
146	85
147	35
148	70
151	30
153	100
155	55
158	40
160	45
162	40
165	50
168	25
169	55
170	15
172	15
179	35
180	65
181	45
182	10
185	35
186	45
188	15
189	25
192	80

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
145	105	194	40
146	55	196	25
148	70	199	45
152	50	201	65
153	105	202	30
154	110	205	55
158	125	206	10
159	95	209	55
162	120	213	100
165	40	216	50
166	40	218	55
167	45	220	45
171	105	222	0
172	80	223	20
173	115	224	10
174	55	225	5
175	105	226	25
179	140	227	15
180	100	230	10
182	110	233	35
183	105	234	45
186	105	236	50
187	120	238	15
188	115	241	40
190	110	244	85

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
193	250
195	245
196	240
197	40
200	140
201	130
202	105
203	110
204	100
207	40
210	45
211	110
214	115
215	105
216	50
218	70
221	110
223	55
224	45
225	30
230	125
232	60
235	65
236	30
239	45

ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
รวม	43,680

ตารางที่ ก-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ถังปฏิกิริยาที่ 1	
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
243	55
244	25
247	30
250	35
253	120
256	45
รวม	55,115

ตารางที่ ก-10 ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 3 ถัง ในการทดลองที่ 1

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2		ถังปฏิกิริยาที่ 3	
วันที่วิเคราะห์	ร้อยละของมีเทน (โดยปริมาตร)	วันที่วิเคราะห์	ร้อยละของมีเทน (โดยปริมาตร)	วันที่วิเคราะห์	ร้อยละของมีเทน (โดยปริมาตร)
123	2.75	123	0.00	63	0.00
250	1.78	136	0.60	133	0.40

ตารางที่ ก-11 ปริมาณของแข็งในกากส้มภายในถังหมักไร้อากาศทั้งที่ 3 ในการทดลองที่ 1

ตำแหน่ง	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 °C (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 °C (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
บน	3	100.47	13.03	3.16	87.03	12.97	75.77
		100.48	13.04	3.14	87.03	12.97	75.92
		100.67	13.04	3.17	87.05	12.95	75.70
		ค่าเฉลี่ย			87.03	12.97	75.80
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.01	0.01	0.11
กลาง	3	100.31	11.00	2.32	89.03	10.97	78.93
		100.32	11.09	2.65	88.95	11.05	76.10
		100.35	11.14	2.75	88.90	11.10	75.30
		ค่าเฉลี่ย			88.96	11.04	76.78
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.07	0.07	1.91
ล่าง	3	100.50	10.98	2.50	89.08	10.92	77.26
		100.55	11.06	2.55	89.00	11.00	76.99
		100.37	10.61	2.48	89.43	10.57	76.63
		ค่าเฉลี่ย			89.17	10.83	76.96
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.23	0.23	0.31

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองที่ 2

ตารางที่ ข-1 ปริมาณของแข็งในกากส้มเขียวหวานสดหั่นหยาบ ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของน้ำกากส้ม

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 ^{o}ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 ^{o}ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.43	19.67	0.58	80.42	19.58	97.05	4.54	13,110
2		100.55	19.41	0.54	80.70	19.30	97.21	4.54	13,015
3		100.73	18.47	0.56	81.66	18.34	96.96	4.5	13,220
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					80.92±0.65	19.07±0.65	97.07±0.13	4.53±0.02	13,155±102

ตารางที่ ข-2 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยน้ำกลั่น

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 ^{o}ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 ^{o}ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.06	11.28	0.46	88.72	11.28	95.91	4.89	16,775
2		100.02	11.38	0.49	88.62	11.38	95.72	4.87	16,890
3		100.11	11.43	0.47	88.58	11.42	95.89	4.89	17,015
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					88.62±0.07	11.36±0.07	95.84±0.01	4.88±0.01	16,893±120

ตารางที่ ข-3 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 °ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 °ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	101.05	10.90	0.46	89.21	10.79	95.81	5.51	19,195
2		101.01	10.89	0.46	89.22	10.78	95.77	5.54	18,780
3		100.73	10.81	0.45	89.27	10.73	95.79	5.56	19,230
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					89.24±0.03	10.76±0.03	95.79±0.02	5.54±0.03	19,068±250

ตารางที่ ข-4 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 °ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 °ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.44	11.25	0.46	88.79	11.21	95.89	5.67	20,128
2		100.52	11.23	0.47	88.82	11.18	95.79	5.67	18,780
3		100.62	11.29	0.46	88.78	11.22	95.94	5.66	19,230
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					88.80±0.02	11.20±0.02	95.87±0.07	5.67±0.01	19,379±686

ตารางที่ ข-5 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 °ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 °ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.23	11.55	0.96	88.47	11.53	91.71	8.50	20,497
2		101.18	10.61	0.53	89.52	10.48	94.97	8.51	17,817
3		100.94	10.97	0.94	89.13	10.87	91.47	8.52	19,230
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					89.04±0.53	10.96±0.53	92.72±1.96	8.51±0.01	19,181±1,340

ตารางที่ ข-6 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 °ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 °ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.76	10.43	0.64	89.65	10.35	93.85	9.82	19,054
2		100.94	10.95	0.65	89.15	10.85	94.05	9.90	18,817
3		100.77	10.76	0.67	89.32	10.68	93.80	9.93	19,130
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					89.37±0.25	10.63±0.25	93.90±0.13	9.88±0.06	19,000±163

ตารางที่ ข-7 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 ^{o}ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 ^{o}ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.63	11.69	0.45	88.39	11.61	96.16	4.72	20,756.80
2		100.34	11.34	0.44	88.70	11.31	96.12	4.70	20,984.50
3		100.37	11.57	0.43	88.48	11.53	96.29	4.69	19,756.20
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					88.52±0.16	11.48±0.16	96.19±0.09	4.70±0.02	20,499±653

ตารางที่ ข-8 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 ^{o}ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 ^{o}ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.95	12.10	0.46	88.01	11.99	96.23	4.67	22,832.53
2		100.41	11.33	0.41	88.72	11.28	96.38	4.65	22,900.40
3		100.57	11.61	0.42	88.45	11.55	96.36	4.66	23,120.20
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					88.39±0.36	11.61±0.36	96.32±0.08	4.66±0.01	22,951±150

ตารางที่ ข-9 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 $^{\circ}$ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 $^{\circ}$ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.60	11.62	0.44	88.4509	11.5491	96.2318	3.05	15,837.87
2		100.52	10.63	0.35	89.4291	10.5709	96.7438	3.10	14,847.73
3		100.66	11.61	0.42	88.4628	11.5372	96.3635	3.10	15,898.47
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					88.78±0.56	11.22±0.56	96.45±0.27	3.08±0.03	15,528±589

ตารางที่ ข-10 ปริมาณของแข็งในกากส้ม ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายของชุดการทดลองการบำบัดด้วยไฮโดรคลอริก 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักกากส้มสด (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังอบ 105 $^{\circ}$ซ (กรัม)	น้ำหนักกากส้มหลังเผา 550 $^{\circ}$ซ (กรัม)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	3	100.39	8.88	0.27	91.16	8.84	96.91	2.40	14,600
2		100.39	8.80	0.26	91.23	8.77	97.06	2.40	14,847
3		100.39	8.81	0.26	91.23	8.77	96.99	2.40	15,898
ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					91.21±0.04	8.79±0.04	96.99±0.07	2.40±0.00	15,115±689

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ 3

ตารางที่ ค-1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีละลายในน้ำย่อยกากส้มที่ใช้เติมในการทดลองที่ 3

น้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 มก./ล.		
ครั้งที่ทำการบำบัด	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	6.57	15,667
2	6.02	16,156
3	5.78	12,561
4	5.10	13,670
5	5.24	16,996
6	6.23	12,064
7	6.14	14,848
ปริมาตรรวมที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 1		7 ลิตร

น้ำย่อยกากส้มที่บำบัดด้วย ไฮโดรคลอริก 500 มก./ล.		
ครั้งที่ทำการบำบัด	ความเป็นกรด-ด่าง	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	2.7	14,932
2	2.66	13,953
3	2.52	13,547
4	2.52	16,503
5	2.73	16,704
6	3.00	16,240
ปริมาตรรวมที่เติมให้แก่ถังปฏิกิริยาที่ 2		6 ลิตร

ตารางที่ ค-2 ค่าซีโอดีละลายในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)	วันที่	ซีโอดีละลาย (มก./ล.)
1	27,907	1	40,759
5	32,269	5	39,907
16	28,304	16	38,048
19	23,325	19	34,334
22	20,119	22	27,081
26	16,606	26	18,942
28	20,348	28	30,396
30	20,255	30	31,755
33	21,140	33	30,423
35	21,176	35	30,874
39	22,085	39	32,357
43	21,501	43	30,751
47	21,854	47	32,907
50	23,757	50	33,903
52	23,478	54	32,666
56	22,981	56	33,334
60	22,775	60	32,268
64	20,698	64	31,047
68	21,913	68	33,216
70	23,528	70	32,178
72	23,989	72	31,832
75	23,885	75	34,025
78	22,762	78	33,156
81	23,006	81	31,330
85	22,667	85	33,879

ตารางที่ ค-3 ค่ากรดไขมันระเหยในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)	วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH_3COOH)
1	6,836	1	8,820
5	6,473	5	8,520
16	6,156	16	7,776
19	4,896	19	6,660
22	7,387	22	9,114
26	5,917	26	7,901
28	6,468	28	8,489
30	5,769	30	9,776
33	5,418	33	9,468
35	6,084	35	8,352
39	6,416	39	8,531
43	5,760	43	8,028
47	5,220	47	7,992
50	6,372	50	9,216
52	6,348	54	8,418
56	5,313	56	7,521
60	6,417	60	8,625
64	6,659	64	8,418
68	6,624	68	9,936
70	6,762	70	10,040
72	7,245	72	9,902
75	7,832	75	10,005
78	7,625	78	10,178
81	7,590	81	10,557
85	7,383	85	9,798

ตารางที่ ค-4 ค่าสภาพด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)	วันที่	สภาพด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)
1	2,040	1	2,280
5	2,100	5	2,400
16	2,185	16	2,875
19	1,440	19	1,800
22	2,400	22	3,360
26	2,160	26	2,400
28	2,400	28	2,760
30	2,160	30	2,640
33	2,160	33	2,640
35	2,553	35	3,220
39	2,530	39	3,220
43	2,645	43	3,220
47	2,415	47	2,990
50	2,640	50	3,850
52	2,520	54	3,150
56	2,940	56	3,150
60	2,520	60	3,255
64	3,150	64	3,570
68	4,515	68	5,250
70	4,830	70	5,775
72	5,355	72	5,775
75	5,880	75	5,670
78	5,250	78	5,565
81	5,040	81	4,620
85	5,040	85	5,670

ตารางที่ ค-5 ความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1				ถังปฏิกิริยาที่ 2			
วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง	วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
1	5.92	57	6.40	1	5.66	57	5.90
2	5.91	58	6.44	2	5.67	58	5.89
5	5.83	59	6.46	5	5.46	59	5.90
7	5.62	60	6.48	7	5.35	60	5.89
14	5.75	61	6.12	14	5.39	61	5.72
15	5.69	64	6.97	15	5.45	64	6.39
16	5.70	67	6.50	16	5.46	67	5.97
17	5.56	68	6.48	17	5.35	68	5.82
19	5.62	70	6.66	19	5.36	70	5.96
20	5.66	72	6.47	20	5.42	72	5.87
22	5.62	75	6.39	22	5.35	75	5.80
23	5.53	78	6.63	23	5.31	78	5.90
26	5.68	81	6.52	26	5.43	81	5.83
28	5.74	82	6.56	28	5.45	82	5.97
30	5.66	85	6.62	30	5.43	85	5.82
33	5.65			33	5.41		
35	5.65			35	5.41		
36	5.72			36	5.44		
39	5.82			39	5.56		
40	5.89			40	5.59		
43	5.92			43	5.64		
47	5.93			47	5.69		
50	6.36			50	6.06		
52	6.19			52	5.90		
54	6.42			54	5.98		
56	6.39			56	5.90		

ตารางที่ ค-6 ค่าโออาร์พีในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1				ถังปฏิกิริยาที่ 2			
วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	วันที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
1	-236.0	57	-240.0	1	-221.0	57	-270.0
2	-234.0	58	-241.0	2	-221.0	58	-230.0
5	-226.0	59	-239.0	5	-206.0	59	-215.0
7	-215.0	60	-207.5	7	-201.0	60	-166.0
14	-224.0	61	-184.5	14	-205.0	61	-159.0
15	-221.0	64	-244.7	15	-208.0	64	-211.6
16	-222.0	67	-240.0	16	-209.0	67	-226.0
17	-215.0	68	-297.5	17	-204.0	68	-258.3
19	-220.0	70	-307.6	19	-205.0	70	-206.1
20	-221.0	72	-296.0	20	-209.0	72	-261.6
22	-223.0	75	-291.7	22	-205.0	75	-257.4
23	-215.0	78	-305.9	23	-203.0	78	-263.2
26	-222.0	81	-299.2	26	-208.0	81	-259.1
28	-224.0	82	-301.8	28	-209.0	82	-267.6
30	-221.0	85	-305.6	30	-207.0	85	-258.8
33	-220.0			33	-207.0		
35	-220.0			35	-206.0		
36	-228.0			36	-210.0		
39	-227.0			39	-213.0		
40	-231.0			40	-215.0		
43	-237.0			43	-221.0		
47	-237.0			47	-230.0		
50	-237.0			50	-230.0		
52	-237.0			52	-268.7		
54	-239.0			54	-269.6		
56	-239.0			56	-274.2		

ตารางที่ ค-7 อุณหภูมิในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1				ถังปฏิกิริยาที่ 2			
วันที่	อุณหภูมิ (^{o}C)	วันที่	อุณหภูมิ (^{o}C)	วันที่	อุณหภูมิ (^{o}C)	วันที่	อุณหภูมิ (^{o}C)
1	29.0	57	30.4	1	28.8	57	29.7
2	29.7	58	30.3	2	29.3	58	29.8
5	28.9	59	30.0	5	28.8	59	29.6
7	28.7	60	30.1	7	28.5	60	29.4
14	30.8	61	30.0	14	30.7	61	29.9
15	30.8	64	29.3	15	30.3	64	29.3
16	29.8	67	30.4	16	30.2	67	29.8
17	28.9	68	30.6	17	29.0	68	30.5
19	28.9	70	28.9	19	29.0	70	28.8
20	28.1	72	28.8	20	28.6	72	28.8
22	29.5	75	29.8	22	29.3	75	29.6
23	29.6	78	28.7	23	29.2	78	28.8
26	29.0	81	29.1	26	29.0	81	29.0
28	29.4	82	30.4	28	29.5	82	29.7
30	29.9	85	29.7	30	29.6	85	29.7
33	29.5			33	29.3		
35	29.4			35	29.1		
36	27.1			36	28.3		
39	30.2			39	29.8		
40	29.8			40	29.7		
43	29.4			43	29.2		
47	30.5			47	30.2		
50	30.3			50	30.2		
52	30.6			52	30.5		
54	30.5			54	30.4		
56	29.9			56	29.9		

ตารางที่ ค-8 แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	NH_3-N (มก./ล. N)	วันที่	NH_3-N (มก./ล. N)
20	215.60	20	277.20
43	207.20	43	268.80
50	201.60	50	268.80
56	224.00	56	283.60
75	208.20	75	280.40

ตารางที่ ค-9 ออร์โธฟอสเฟตในน้ำชะขยะก้นถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่	PO_4^{3-}-P (มก./ล. P)	วันที่	PO_4^{3-}-P (มก./ล. P)
20	108.55	20	115.80
43	111.25	43	78.45
50	105.50	50	78.40
56	66.71	56	163.09
75	46.12	75	90.24

ตารางที่ ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1			
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
1	95	56	165
2	425	57	90
5	260	58	175
7	80	59	200
14	70	60	300
15	95	61	170
16	200	64	90
17	110	67	275
19	165	68	435
20	290	70	615
22	145	72	450
23	30	75	500
26	50	78	535
28	35	81	590
30	40	82	490
33	55	85	430
35	80	รวม	9,060
36	30		
39	55		
40	20		
43	135		
47	250		
50	255		
52	265		
54	315		

ถังปฏิกิริยาที่ 2			
วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)	วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (มล./วัน)
2	195	57	25
5	165	58	45
7	270	59	100
14	265	60	470
15	430	61	220
16	180	64	90
17	150	67	90
19	525	68	470
20	695	70	505
22	85	72	280
23	165	75	265
26	75	78	340
28	70	81	195
30	50	82	280
33	65	85	175
35	40	รวม	8,190
36	45		
39	70		
40	20		
43	175		
47	350		
50	300		
52	95		
54	120		
56	40		

ตารางที่ ค-11 ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากถังหมักไร้อากาศทั้ง 2 ถัง ในการทดลองที่ 3

ถังปฏิกิริยาที่ 1		ถังปฏิกิริยาที่ 2	
วันที่วิเคราะห์	ร้อยละของมีเทน (โดยปริมาตร)	วันที่วิเคราะห์	ร้อยละของมีเทน (โดยปริมาตร)
28	6.89	28	0.00
68	10.50	68	5.72
85	26.96	85	15.35

ภาคผนวก ง

ปริมาณก๊าซทางทฤษฎี

ปริมาณก๊าซทางทฤษฎี

ก๊าซมีเทนทางทฤษฎีคือปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยหาได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายของก๊าซมีเทนดังสมการ

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

จากปฏิกิริยาการย่อยสลายปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้เท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยจากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นว่า 1 โมล ของก๊าซมีเทน ใช้ออกซิเจน 2 โมล ในการออกซิไดซ์

โดย O_2 1 โมล = 32 กรัม

ดังนั้น O_2 2 โมล = 32 x 2 = 64 กรัม

จากสาร 1 โมล มีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (standard temperature and pressure; STP)

ดังนั้น CH_4 1 โมล = 22.4 ลิตร ที่ STP

โดยปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายคือ ปริมาณซีโอดีที่วัดได้ เพราะจากนิยามของค่าซีโอดีหมายถึงปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในการสลายสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง แล้วจึงได้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์

ดังนั้น COD 1 กรัม = ปริมาณมีเทน / มวลโมเลกุลของออกซิเจน

= 22.4 / 64

= 0.35 ลิตร / กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ณ STP

และโดยทั่วไปสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 50 โดยปริมาตร

ดังนั้น ปริมาตรก๊าซชีวภาพ = 0.7 ลิตร / กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ณ STP

แต่ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส

ดังนั้น ปริมาตรก๊าซชีวภาพ = 0.7 x (273 + 30) / 273

= 0.78 ลิตร / กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัด ณ ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก จ
รายงานผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็งและก๊าซที่ส่งวิเคราะห์

ตารางที่ จ-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาคารสถาบัน 3 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 พญาไท กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0-2218-8101, 0-2218-8032 โทรสาร (662) 254-0211
SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY
CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD BANGKOK 10330 THAILAND TEL. 0-2218-8101, 0-2218-8032 FAX : (662) 254-0211

รายงานเลขที่ 664/2551 หน้า 1/2

<u>รายงานผลการวิเคราะห์</u>

ตัวอย่าง	ชีวมวล
ใบส่งตัวอย่าง	รหัส 512401
เจ้าของตัวอย่าง	นายวิชญ์นนท์ ธรานนท์
วัตถุประสงค์	วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์
เครื่องมือวิเคราะห์	CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)
วิธีวิเคราะห์	Gaseous products freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by frontal analysis with quantitatively detected by thermal conductivity detector.
วันที่วิเคราะห์	25 - 28 กรกฎาคม 2551

<u>ผลวิเคราะห์</u>

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง		%C	% H	%N
1	Orange Waste	(1)	37.104	5.603	0.239
		(2)	36.986	5.673	0.080
		(3)	37.281	5.556	0.106
		เฉลี่ย	**37.124**	**5.611**	**0.142**
2	pretreatment with NaOH	(1)	38.712	5.553	0.154
		(2)	39.093	5.818	0.242
		(3)	38.648	6.097	0.296
		เฉลี่ย	**38.818**	**5.823**	**0.231**

อป/สน

ตารางที่ จ-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (ต่อ)

รายงานเลขที่ 664/2551

หน้า 2/2

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง		%C	% H	%N
3	**pretreatment with HCl**	**(1)**	43.648	6.404	0.315
		(2)	43.835	6.715	0.300
		(3)	43.898	6.536	0.240
		เฉลี่ย	**43.794**	**6.552**	**0.285**

(นางสาวอัมพร อึ้งปกรณ์แก้ว)
ผู้วิเคราะห์

(นายอุทัย คิยะวิสุทธิ์ศรี)
หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์

(ผศ.ดร. สุพงศ์ นิ่มกูลรัตน์)
ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือฯ

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเท่านั้น

อป/สน

ตารางที่ จ-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (28 พฤษภาคม 2551)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Phya Thai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND
Tel: (662) 2185324, 2185328-30 Fax: (662) 2555831 E-mail: chemtech@sc.chula.ac.th

28 พฤษภาคม 2551

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ชนิดตัวอย่าง : GAS

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ส่งตัวอย่าง : นายวิชญ์นนท์ ธรานนท์

วิธีการเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ :

ทดสอบตามเครื่องมือและสภาวะดังนี้

Instrument : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ TERMO FINNIGAN

Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min

Injector Temperature : 120 °C

Column : MOLECULA SIEVE , Temperature program set at 40 °C for 10 min

Detector : TCD at 150 °C

Injection Volume : 1 ml

ผลการวิเคราะห์

ลำดับ	Sample	% Methane
1	R2	0.0
2	R3	0.4

(นางดาวใจ แก้วอัคฮาด)
ผู้วิเคราะห์

ขอรับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

(อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ Fuel Research
28 พฤษภาคม 2551

หมายเหตุ

R1 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 1

R2 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 2

R3 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 3

ตารางที่ จ-3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (31 กรกฎาคม 2551)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Phya Thai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND
Tel: (662) 2185324, 2185328-30 Fax: (662) 2555831 E-mail: chemtech@sc.chula.ac.th

31 กรกฎาคม 2551

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ชนิดตัวอย่าง : GAS
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ส่งตัวอย่าง : คุณวิชญ์นนท์ ธรานนท์
วิธีการเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ :

ทดสอบตามเครื่องมือและสภาวะดังนี้

Instrument : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNIGAN
Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min
Injector Temperature : 120 °C
Column : MOLECULA SIEVE , Temperature program set at 40 °C for 10 min
Detector : TCD at 150 °C
Injection Volume : 1 ml

ผลการวิเคราะห์

ลำดับ	Sample	% Methane
1	R1	6.89
2	R2	ไม่มี

(นางอารยา อินทร์คีรี)
ผู้วิเคราะห์

ขอรับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

(อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ Fuel Research
31 กรกฎาคม 2551

หมายเหตุ

R1 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 1

R2 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 2

R3 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 3

ตารางที่ จ-4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (8 กันยายน 2551)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Phya Thai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND
Tel: (662) 2185324, 2185328-30 Fax: (662) 2555831 E-mail: chemtech@sc.chula.ac.th

8 กันยายน 2551

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ชนิดตัวอย่าง : GAS

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ส่งตัวอย่าง : คุณวิชญ์นนท์ ธรานนท์

วิธีการเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ :

ทดสอบตามเครื่องมือและสภาวะดังนี้

Instrument : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNIGAN

Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min

Injector Temperature : 120 °C

Column : MOLECULA SIEVE , Temperature program set at 40 °C for 10 min

Detector : TCD at 150 °C

Injection Volume : 1 ml

ผลการวิเคราะห์

ลำดับ	Sample	% Methane
1	R1	10.50
2	R2	5.72

(นางอารยา อินทร์คีรี)
ผู้วิเคราะห์

ขอรับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

(อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ Fuel Research
8 กันยายน 2551

หมายเหตุ

R1 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 1

R2 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 2

R3 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 3

ตารางที่ จ-5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (7 ตุลาคม 2551)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Phya Thai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND
Tel: (662) 2185324, 2185328-30 Fax: (662) 2555831 E-mail: chemtech@sc.chula.ac.th

7 ตุลาคม 2551

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในตัวอย่าง GAS

ชนิดตัวอย่าง : GAS

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ

ผู้ส่งตัวอย่าง : คุณวิชญ์นนท์ ธรานนท์

วิธีการเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ :

ทดสอบตามเครื่องมือและสภาวะดังนี้

Instrument : GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNIGAN

Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min

Injector Temperature : 120 °C

Column : MOLECULA SIEVE , Temperature program set at 40 °C for 10 min

Detector : TCD at 150 °C

Injection Volume : 1 ml

ผลการวิเคราะห์

ลำดับ	Sample	% Methane
1	R1	26.96
2	R2	15.35

(นางอารยา อินทร์คีรี)
ผู้วิเคราะห์

ขอรับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

(อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research
7 ตุลาคม 2551

หมายเหตุ

R1 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 1

R2 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 2

R3 คือ ก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกิริยาที่ 3

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วิชญ์นนท์ ธรานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของ รองศาสตราจารย์ วิชัย ธรานนท์ กับ นางทัศนีย์ ธรานนท์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549