

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสีย
โรงงานผลิตกระดาษกล่องชาวเคลือบมัน



นางสาวกนิษฐา วิมลรัตน์

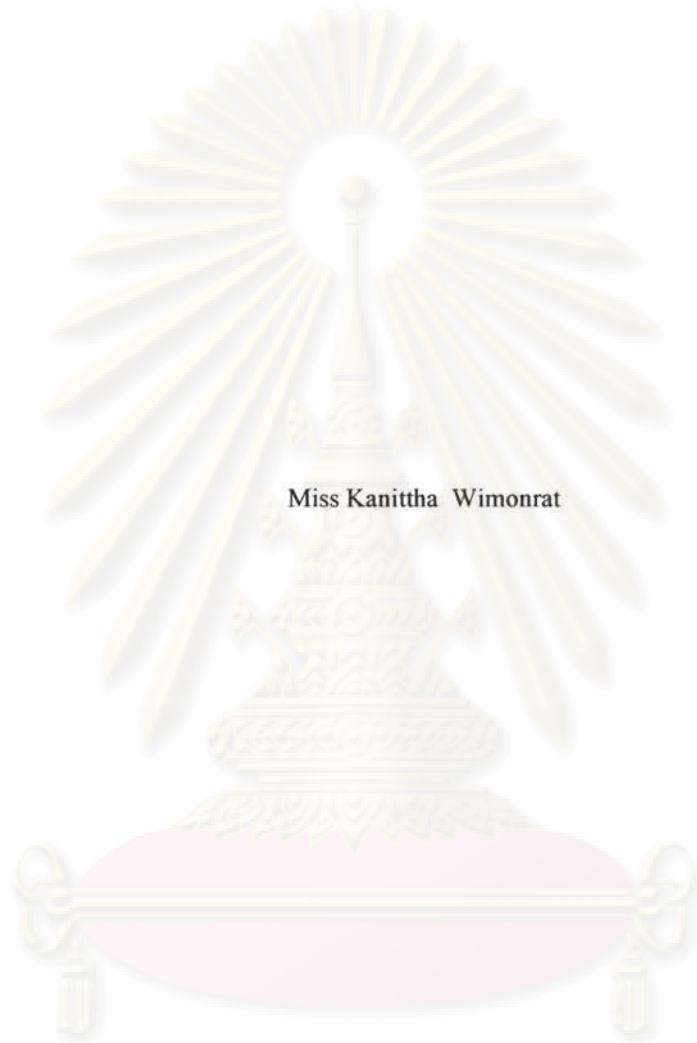
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER SLUDGE
 OF COATED DUPLEX BOARD FACTORY**



Miss Kanittha Wimonrat

**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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

521060

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิต
กระดาษกล่องขาวเคลือบมัน

โดย

นางสาวกนิษฐา วัฒนรัตน์

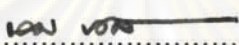
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

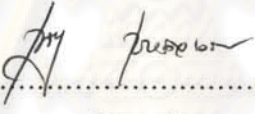
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

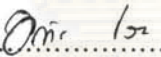
รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

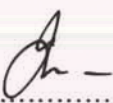
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

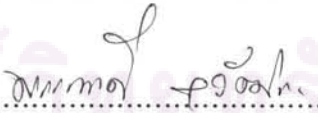

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิมง)

ศูนย์บริการสุขภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กนิษฐา วิมลรัตน์ : การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ
 ก่อ้งขาวเคลือบมัน. (BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER SLUDGE
 OF COATED DUPLEX BOARD FACTORY) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 รศ. ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, 158 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนน้ำเสีย
 โรงงานผลิตกระดาษก่อก้งขาวเคลือบมันต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยระบบ
 ถังกวนสมบูรณ์ที่เดิมหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนปริมาณร้อยละ
 40 ของปริมาตรถังหมัก ทั้งนี้กำหนดให้มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 ปรับสภาพ
 เบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 และการผสมกับขยะเศษอาหารในอัตราส่วนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่ากากตะกอน
 เชื้อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ 0.091 ลิตร/กรัมของแข็ง
 ระเหยทั้งหมด และเมื่อนำกากตะกอนเชื้อกระดาษมาปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนที่
 อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 ความเข้มข้นร้อยละ 2 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง และทั้งปรับด้วยการให้ความร้อนและแช่ใน
 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพด้วยความร้อนและ
 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 77.87 คิดเป็น
 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.181 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด แต่พบว่า
 ก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเพียงร้อยละ 39.37 การทดลองแปรผันอัตราส่วน
 กากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหารตั้งแต่ 1:1 ถึง 1:4 พบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1
 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 0.121 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ซึ่งมี
 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนมากขึ้นเท่ากับร้อยละ 69.99 นอกจากนี้การใช้กากตะกอน
 เชื้อกระดาษที่ปรับสภาพด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พร้อมผสมกับขยะ
 เศษอาหาร ในอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหารเท่ากับ 1:1 พบว่าสามารถ
 ผลิตก๊าซชีวภาพสะสมมากขึ้น 0.186 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ซึ่งมีองค์ประกอบของ
 ก๊าซมีเทนมากที่สุด ร้อยละ 63.33

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....กนิษฐา วิมลรัตน์.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....Oris 1๖๖.....
 ปีการศึกษา.....2552.....

5170204721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : COATED DUPLEX BOARD PLANT / BIOGAS / PULP SLUDGE /
THERMAL PRE – TREATMENT / CHEMICAL PRE – TREATMENT

KANITTHA WIMONRAT : BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER
SLUDGE OF COATED DUPLEX BOARD FACTORY. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 158 pp.

This research aimed to the study efficiency of biogas generation from Wastewater Sludge of Coated Duplex Board Factory which was mixed in batch reactor-Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). The chosen ratio of seed from anaerobic wastewater treatment was 40% by volume of reactor. Then final concentration of total solid of mixture which was pretreated with heat was adjusted to 4%. To achieve this study, the investigation was planned into 4 experiments. Experiment 1, studied efficiency of biogas generation from only Wastewater Sludge. The results showed that the maximum biogas production was 0.091 L/gTVS. Experiment 2, studied fining state at the beginning Wastewater Sludge by heating at 125°C (30 minutes) and fined the state at the beginning with NaOH 2% of concentration (48 hours) before experience. The results of Wastewater Sludge that change fining state with NaOH and heat showed that high biogas production of 0.181 L/gTVS. However, Wastewater Sludge that changed fining state with NaOH increased methane to 45.23%. Experiment 3, ratio of mixture between wastewater sludge and food of Wastewater Sludge were varied from 1:1 to 1:4 (by weight). The results showed that the optimum ratio of wastewater sludge : food waste was 1:1 and produced high biogas, the value was 0.121 L/gTVS and increased methane to 69.99%. Last experiment, compared with condition which was appropriate in biogas generation from Wastewater Sludge by changing fining state with heat and NaOH and mixed food waste at 1:1. The results showed that the maximum biogas production was achieved at 0.186 L/gTVS and increased methane to 63.33%.

Department : Environmental Engineering..... Student's Signature Kanittha Wimonrat
Field of Study : Environmental Engineering.. Advisor's Signature Orathai Chavalparit
Academic Year :.....2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฑฒิกะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมาจนประสบความสำเร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ท
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 พลังงานทดแทน.....	4
2.1.1 ก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.3 ลักษณะสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.4 ซีวมวลสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ.....	6
2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ.....	7
2.1.6 การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนที่เหลือจากการหมักก๊าซชีวภาพ.....	8
2.2 อุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	9
2.2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	9
2.2.2 การผลิตของอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	10
2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	17
2.2.4 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	19
2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจน.....	20
2.3.1 กระบวนการทางจุลชีววิทยาของการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	20
2.3.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	23
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	26

2.3.4 รูปแบบของระบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับของแข็ง.....	34
2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	36
2.4 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นของชีวมวล.....	37
2.4.1 การใช้ความร้อน.....	37
2.4.2 การใช้วิธีทางกายภาพ.....	37
2.4.3 การใช้วิธีทางเคมี.....	37
2.4.4 การใช้สูตร้าชาวด์.....	38
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
2.5.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.....	38
2.5.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอุตสาหกรรม.....	39
2.5.3 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหาร.....	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
3.1 แผนการวิจัย.....	45
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.3 ระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน.....	45
3.3.1 ถังหมักแบบกวนสมบูรณ์.....	45
3.3.2 ระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	47
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง.....	48
3.4.1 การเตรียมกากตะกอนเชื้อกระดาศและขยะเศษอาหาร.....	48
3.4.2 การดำเนินการทดลอง.....	48
3.5 การทดลอง.....	49
3.5.1 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาศ.....	49
3.5.2 ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาศด้วยการให้ ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการ การทดลอง.....	50
3.5.3 ศึกษาการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาศต่อขยะเศษอาหาร...	52
3.5.4 เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก กากตะกอนเชื้อกระดาศ.....	54
3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	56
3.6.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดค่าให้คงที่ในการวิจัย.....	56

3.6.2 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรต้นในการวิจัย.....	56
3.6.3 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์.....	56
3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล.....	57
3.7.1 การเก็บตัวอย่าง.....	57
3.7.2 การวิเคราะห์ผล.....	57
3.8 การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	58
3.8.1 การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมัก.....	58
3.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	58
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	59
4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเชื้อกระดาศ.....	59
4.2 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางเคมีจากชุดการทดลอง.....	64
4.3 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาศ.....	65
4.4 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาศด้วยการให้ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง.....	68
4.4.1 กากตะกอนเชื้อกระดาศที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน.....	68
4.4.2 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาศด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	72
4.4.3 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาศด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	75
4.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาศด้วยการให้ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง.....	78
4.5 การแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาศต่อขยะเศษอาหาร.....	80
4.5.1 อัตราส่วน 1:1.....	81
4.5.2 อัตราส่วน 1:2.....	84
4.5.3 อัตราส่วน 1:3.....	87
4.5.4 อัตราส่วน 1:4.....	90
4.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดการทดลองการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาศต่อขยะเศษอาหาร.....	93

4.6 เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน เชื้อกระดาษ.....	95
4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลอง.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักรากตะกอนเชื้อกระดาษที่ใช้ใน การทดลอง.....	111
ภาคผนวก ข ผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ..	113
ภาคผนวก ค ผลการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนิน การทดลอง.....	117
ภาคผนวก ง ผลการทดลองศึกษาการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อ ขยะเศษอาหาร.....	124
ภาคผนวก จ ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก กากตะกอนเชื้อกระดาษ.....	135
ภาคผนวก ฉ ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอน เชื้อกระดาษ.....	138
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด.....	143
ภาคผนวก ซ ตัวอย่างการคำนวณและผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทน.....	146
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	158

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซชีวภาพ.....	5
2.2	ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ.....	19
2.3	สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้.....	25
2.4	ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็น.....	30
2.5	ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งของอออนประจุบวกโลหะเบา.....	31
2.6	อออนประจุบวกโลหะเบาเพิ่มความเป็นพิษและอออนประจุบวกโลหะบาลด ความเป็นพิษ.....	31
2.7	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เป็นพิษต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	32
3.1	วิธีวิเคราะห์และความถี่ของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	57
4.1	ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	60
4.2	ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ก่อนดำเนินการทดลอง.....	61
4.3	ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ อัตราส่วนต่างๆ.....	62
4.4	ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม.....	63
4.5	น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง.....	68
4.6	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพ เบื้องต้น.....	79
4.7	น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง.....	80
4.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดการทดลองการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อ กระดาษต่อขยะเศษอาหาร.....	94
4.9	น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง.....	96
4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลอง.....	99
4.11	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ.....	101
๗-1	พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	114
๗-2	ปริมาณซีโอไซด์ของกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	115
๗-3	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	115

ตารางที่	หน้า
ข-4	ปริมาณกรดระเหยง่ายของกากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 116
ข-5	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของกากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 116
ค-1	พีเอชของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 118
ค-2	อุณหภูมิของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 118
ค-3	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 119
ค-4	ปริมาณซีโอดีของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 120
ค-5	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 121
ค-6	ปริมาณกรดระเหยง่ายของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 122
ค-7	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 123
ง-1	พีเอชของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 125
ง-2	อุณหภูมิของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 125
ง-3	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 126
ง-4	ปริมาณซีโอดีของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 127
ง-5	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 129
ง-6	ปริมาณกรดระเหยง่ายของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 131
ง-7	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร..... 133

ตารางที่	หน้า
จ-1	พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 136
จ-2	ปริมาณซีโอไซด์ของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน เชื้อกระดาษ..... 136
จ-3	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก กากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 137
จ-4	ปริมาณกรดระเหยง่ายของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก กากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 137
จ-5	ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก กากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 137
ช-1	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนจากทุกชุดการทดลอง..... 148



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ภาพรวมอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	9
2.2	ลักษณะของเชื้อใยยาวและเชื้อใยสั้น.....	10
2.3	ลักษณะของกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้ว.....	11
2.4	ลักษณะของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว.....	11
2.5	ลักษณะของเศษกระดาษหลายชนิดปะปนกัน.....	12
2.6	กระบวนการผลิตเชื้อกระดาษ.....	12
2.7	วัฏจักรทางเคมีของกระบวนการผลิตเชื้อกระดาษ.....	16
2.8	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	18
2.9	ลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ.....	19
2.10	กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	22
2.11	การกระจายตัวของโรงงานที่ใช้ระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของ ทั่วโลก.....	35
3.1	ถังหมักแบบกวนสมบูรณ์.....	46
3.2	ระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	47
3.3	ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ.....	49
3.4	ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพ เบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	51
3.5	ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษและขยะ เศษอาหารที่ผสมกันด้วยอัตราส่วนต่างๆ.....	53
3.6	ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษและขยะ เศษอาหารที่สภาวะที่เหมาะสม.....	55
4.1	กากตะกอนเชื้อก่อนและหลังกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน.....	59
4.2	กากตะกอนเชื้อที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนดำเนินการทดลอง ด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	61
4.3	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางเคมีของชุดการทดลอง.....	64
4.4	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกากตะกอนเชื้อกระดาษ.....	66

ภาพที่		หน้า
4.5	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน.....	70
4.6	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	73
4.7	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	76
4.8	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้น.....	80
4.9	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:1).....	82
4.10	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:2).....	85
4.11	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:3).....	88
4.12	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:4).....	91
4.13	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร.....	95
4.14	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ.....	97
4.15	เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซมีเทนของชุดการทดลอง..	100
ฉ-1	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น.....	139
ฉ-2	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน.....	140
ฉ-3	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	141
ฉ-4	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	142

ภาพที่	หน้า
ซ-1	ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด..... 144
ซ-1	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 149
ซ-2	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่าน การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนก่อนดำเนินการทดลอง..... 150
ซ-3	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่าน การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการ การทดลอง..... 151
ซ-4	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่าน การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง..... 152
ซ-5	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอน เชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1..... 153
ซ-6	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอน เชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2..... 154
ซ-7	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอน เชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3..... 155
ซ-8	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอน เชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4..... 156
ซ-9	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่าน การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองผสมขยะเศษอาหาร 1:1..... 157

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี 2551 พบว่าอัตราการใช้พลังงานของประเทศไทยเพิ่มขึ้นจากปี 2550 ร้อยละ 2.2 โดยใช้พลังงานเชิงพาณิชย์อันประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 และใช้พลังงานหมุนเวียนอันประกอบด้วยพิน ถ่าน แกลบ และกากอ้อย เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 ทั้งนี้เป็นการผลิตพลังงานจากแหล่งภายในประเทศรวมทั้งสิ้น 61,930 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ร้อยละ 6.3 และมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศรวมทั้งสิ้น 59,386 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ร้อยละ 0.8 คิดเป็นมูลค่านำเข้ารวมทั้งสิ้น 1,178,000 ล้านบาท (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552) ดังนั้นเพื่อลดมูลค่าการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศดังกล่าว จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานอื่นมารองรับหรือทดแทนพลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเชื้อกระดาษจัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากปัจจุบันอัตราการเจริญเติบโตของการผลิตเชื้อกระดาษมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี ดังจะเห็นได้จากปี 2551 การผลิตเชื้อกระดาษมีปริมาณ 1,030.17 พันล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ประมาณ 102.38 พันล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 9.93 (กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2552) ซึ่งของเสียจากกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นกากตะกอนเชื้อกระดาษซึ่งกำจัดโดยวิธีการเผาในหม้อต้มเชื้อ (Boiler) เพื่อผลิตความร้อนไปใช้สำหรับต้มเชื้อกระดาษ สารเคมีจากกระบวนการผลิต ได้แก่ โซดาไฟ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในขั้นตอนต้มเชื้อกระดาษ ซึ่งบางส่วนจะนำกลับเข้ากระบวนการผลิตน้ำยาเคมีกลับคืน (Chemical Recovery) เพื่อนำโซดาไฟ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) กลับมาใช้ในขั้นตอนต้มเชื้อกระดาษใหม่ และบางส่วนจะถูกนำส่งบริษัทรับกำจัดสารเคมี และความร้อนที่อยู่ในรูปของไอน้ำซึ่งจะกำจัดโดยการปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังมีของเสียจากการอุปโภคบริโภคจากโรงงานเชื้อกระดาษ เช่น ขยะเศษอาหารที่สามารถนำมาผสมกับของเสียอื่นๆ เพื่อนำมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้อีกด้วย

กากตะกอนเชื้อกระดาษพบว่ามีองค์ประกอบของเศษเชื้อกระดาษที่เหลือจากกระบวนการผลิตปริมาณมาก โดยกำลังการผลิตเชื้อกระดาษ 240,000 ตัน จะมีกากตะกอนที่รีดน้ำออกแล้ว 46,150 ตัน โดยกากตะกอนเชื้อกระดาษส่วนใหญ่จะนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดินหรือผลิตแ่งเพาะชำสำหรับปลูกต้นไม้ประมาณ 9,230 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของปริมาณ

กากตะกอนเยื่อกระดาษ ใช้เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 8,300 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 18 ของปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษ ใช้ถลุงที่ประมาณ 3,700 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 8 ของปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษ มีผู้ซื้อนำไปใช้ประโยชน์ประมาณ 2,770 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษ และนำไปฝังกลบประมาณ 22,160 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 48 ของปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษ (กระทรวงอุตสาหกรรม, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2548) ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นพบว่าปริมาณการนำไปทิ้งของกากตะกอนเยื่อกระดาษยังมีปริมาณสูงมาก ดังนั้นถ้านำกากตะกอนเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงานทดแทน เช่น การหมักแบบไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยนำกากตะกอนเยื่อกระดาษมาบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือนำมาผสมรวมกับขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วนที่เหมาะสมก็น่าจะทำให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น และเป็นการนำของเสียมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน โดยวิธีการทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมันด้วยระบบหมัก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมันด้วยการให้ความร้อนและการปรับสภาพด้วยค่าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมของกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมันและขยะเศษอาหารที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ระบบหมักแบบแบตช์ (Batch) เป็นถึงปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ระดับห้องปฏิบัติการ

1.3.2 ใช้ตัวอย่างกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมันที่มีการนำเยื่อกระดาษเก่ามาใช้ในกระบวนการผลิต

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษเปรียบเทียบกับกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส และกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2

1.3.4 ศึกษาผลของการหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผสมกับขยะเศษอาหารที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร (เมื่อผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสม) คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณแอมโมเนีย ค่าซีโอดี (COD) และค่าความขุ่น คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ปริมาณกรดระเหยง่าย (VFA) ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) ค่าซีโอดี (COD) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน และก๊าซอื่นๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษของระบบบำบัดน้ำเสีย

1.4.2 เป็นแนวทางหนึ่งในการนำกากตะกอนเยื่อกระดาษกลับมาใช้ผลิตพลังงานทดแทน

1.4.3 เป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานทดแทน

2.1.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในสภาวะไร้อากาศ เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ อุจจาระคน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม ฯลฯ โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลาย ซึ่งก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้อาจจะมีก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่เล็กน้อย แต่ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของการหมัก (สกานต์ ศิริมะณีวัฒนา และวรรณะ ชมสร, 2548) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1984)

2.1.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (อวัตดา ฉลาณวัฒน์, 2545)

โดยทั่วไปองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

ก๊าซมีเทน	ร้อยละ 55–65
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ร้อยละ 35–45
ก๊าซไนโตรเจน	ร้อยละ 0–5
ก๊าซออกซิเจน	ร้อยละ 0–1
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ร้อยละ 0–1

2.1.3 ลักษณะสมบัติของก๊าซชีวภาพ (อวัตดา ฉลาณวัฒน์, 2545)

ลักษณะสมบัติของก๊าซชีวภาพ (ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ)

ปริมาณมีเทน	ร้อยละ 65–70
ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์	ร้อยละ 30–35
ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์	1,000 ส่วนในล้านส่วน
ค่าความร้อนทางต่ำ	24.48 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร
ความเร็วเปลวไฟ	25 เซนติเมตร/วินาที
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 องศาเซลเซียส
ค่าความจุความร้อน (C_p)	1.6 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร-องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น (ρ)	1.15 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทน

ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.50 กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67 ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60 ลิตร
น้ำมันเตา	0.55 ลิตร
ถ่านไม้	2.50 กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซชีวภาพ

ลักษณะสมบัติ	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
สถานะ	ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ และ ของเหลว ภายใต้ความร้อน
สี	ไม่มีสี	ไม่มีสี	ไม่มีสี
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น	ไม่มีกลิ่น	ก๊าซไข่เน่า
น้ำหนักโมเลกุล	16.04	44.01	34.04
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	-161.5	-79	-60.2
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (องศาเซลเซียส)	-182	-70	-85.7
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	0.466	1.101	1.45
ความดันไอ (มม.ปรอท)	1.342 ที่ 0 °ซ	569 ที่ -82 °ซ	-
ความหนาแน่นไอ	-	1.5	1.21
ความสามารถในการละลาย น้ำ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	-	ได้	ได้
ค่าพีเอช	-	-	4.5 ที่ 20 °ซ
ข้อมูลทางกายภาพและเคมี อื่นๆ	สารนี้สามารถละลายได้ ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์	ละลายได้ไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายอินทรีย์	สารนี้ไวต่อความชื้น

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2552.

2.1.4 องค์ประกอบชีวมวลที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ (กระทรวงพลังงาน, สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

- ฟางข้าว

ลักษณะทั่วไป ขนาดเล็กยาวแตกลง ได้มาหลังการเกี่ยวข้าว

การนำไปใช้งาน ฟางข้าวมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นอาหารสัตว์ คลุมดิน เพาะเห็ดฟาง ทำโครงพวงหรีดดอกไม้ และใช้ในอุตสาหกรรมทำกระดาษ เป็นต้น แต่ยังมีฟางข้าวอีกมากที่ไม่ได้นำไปใช้ คาดว่าประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนที่เหลือถูกเผาทิ้ง

จุดเด่น ยังมีฟางข้าวอีกมากที่ไม่ได้นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์

จุดด้อย รวบรวมได้ยากถ้าใช้แรงคน เพราะอยู่กระจัดกระจาย ต้องใช้เครื่องทุ่นแรง (Straw Baler) มาช่วยในการรวบรวม

- กากอ้อย

ลักษณะทั่วไป มีลักษณะเป็นขุย ได้จากการผลิตน้ำตาลดิบ โดยนำอ้อยมาคั้นน้ำออก ส่วนที่เป็นน้ำนำไปผลิตเป็นน้ำตาลดิบ ส่วนที่เหลือคือกากอ้อย

การนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตน้ำตาลดิบประมาณร้อยละ 80 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 20 นำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษ

จุดเด่น ยังมีกากอ้อยเหลืออีกส่วนหนึ่งที่ยังไม่ได้นำไปใช้งาน

จุดด้อย น้ำหนักเบาและความชื้นสูง

- ใบอ้อยและยอดอ้อย

ลักษณะทั่วไป มีลักษณะเรียวยาว จะถูกตัดออกจากลำต้นอ้อยก่อนส่งไปโรงงาน ช่วงเดือนธันวาคมถึงเมษายน ดังนั้นใบอ้อยและยอดอ้อยจะกระจายไปทั่วไร่อ้อย แต่บางครั้งชาวไร่อ้อยจะใช้วิธีการเผาแทนการตัด ซึ่งจะทำให้ไม่มีใบอ้อยและยอดอ้อยหลงเหลืออยู่

การนำไปใช้งาน ยอดอ้อยสามารถนำมาเป็นอาหารสัตว์

จุดเด่น ใบอ้อยและยอดอ้อยส่วนใหญ่จะถูกเผาทิ้งในไร่ ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์

จุดด้อย มีเฉพาะเดือนธันวาคมถึงเมษายนของทุกปี และการรวบรวมเก็บค่อนข้างใช้แรงงานมาก จำเป็นต้องหาเครื่องทุ่นแรงมาช่วย

- เปลือกและกากมันสำปะหลัง

ลักษณะทั่วไป เปลือกมีลักษณะเป็นขุย สีน้ำตาล ความชื้นร้อยละ 50 กากมันมีลักษณะละเอียด สีขาว ความชื้นสูงประมาณร้อยละ 80

การนำไปใช้งาน กากมันนำไปใช้ผสมอาหารสัตว์ในมันเส้น เปลือกมันทำปุ๋ย

จุดเด่น เนื่องจากเปลือกมันยังมีส่วนหนึ่งที่ขายไม่ได้ ทางโรงงานต้องนำไปฝังกลบ เพราะยังไม่ได้ศึกษานำไปใช้ให้เป็นประโยชน์อย่างอื่น

จุดด้อย เปลือกมันมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ

- **กากปาล์ม**

ลักษณะทั่วไป กากปาล์มเป็นเศษเหลือจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะเลาะปาล์มสด มี 3 แบบ คือ ไฟเบอร์มีลักษณะเป็นขุย กะลามีลักษณะคล้ายกะลามะพร้าว แต่มีขนาดเล็กกว่ามาก โดประมาณ 1–2 เซนติเมตร และทะเลาะปาล์มเปล่า

การนำไปใช้งาน ไฟเบอร์นำมาเป็นเชื้อเพลิงในขบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ จึงมีเหลือไม่มาก ส่วนทะเลาะเปล่านำไปเพาะเห็ด

จุดเด่น กะลาปาล์มมีค่าความร้อนสูงสุด เหมาะนำมาเป็นเชื้อเพลิง แต่ต้องระวังเศษน้ำมันที่ตกค้างอยู่ ส่วนทะเลาะเปล่ามีเหลืออีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ และถ้านำมาเผาจะได้ขี้เถ้าที่มีแร่ธาตุโปตัสเซียมสูงมาก

จุดด้อย การที่จะนำทะเลาะเปล่ามาเป็นเชื้อเพลิง ต้องนำมาผ่านขบวนการย่อยหรือตัดก่อน เพราะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอัลคาไลน์สูง จะทำให้ท่อน้ำในหม้อน้ำมียางเหนียวเกาะติดได้ง่าย

- **ใบปาล์มและต้นปาล์ม**

ลักษณะทั่วไป ใบปาล์มหรือทางปาล์มจะถูกตัดออกเพื่อนำทะเลาะปาล์มสดลงจากลำต้น มีขนาดยาวประมาณ 2–3 เมตร ส่วนลำต้นจะถูกโค่นเมื่อมีอายุ 20–25 ปี หรือเมื่อไม่สามารถให้ผลผลิตได้ดี

การนำไปใช้งาน ทางปาล์มใช้คลุมดิน ส่วนลำต้นเริ่มทยอยตัดในพื้นที่บางแห่ง

จุดเด่น ยังไม่มีการศึกษานำไปใช้ประโยชน์เป็นอย่างอื่น

จุดด้อย ทางปาล์มมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80 และขนาดใหญ่

2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (อวิศดา ฉลาณุวัฒน์, 2545)

1) ด้านพลังงาน

เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐกิจแล้ว การลงทุนผลิตก๊าซชีวภาพจะลงทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่น เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถนำไปใช้ได้ดังนี้

1.1) ให้ค่าความร้อน 3,000–5,000 กิโลแคลอรี ความร้อนนี้จะทำให้น้ำ 130 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเดือด

1.2) ใช้กับตะเกียงก๊าซขนาด 60–100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5–6 ชั่วโมง

1.3) ผลิตกระแสไฟฟ้า 1.25 กิโลวัตต์

- 1.4) ใช้กับเครื่องยนต์ 2 แรงม้า นาน 1 ชั่วโมง
- 1.5) ใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ

2) ด้านการเกษตร

2.1) ทำปุ๋ย กากที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สดๆ และปุ๋ยคอก เนื่องจากขณะหมักจะมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในมูลสัตว์ ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

2.2) ทำอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมักไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่มีข้อจำกัด คือ ควรใส่อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัม/ส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2.1.6 การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนที่เหลือจากการหมักก๊าซชีวภาพ

กากตะกอนที่เหลือจากการผลิตก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบสำคัญคือ ฮิวมัส (Humus) ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่คงสภาพและยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารพืช ทำให้ดินร่วนซุย ช่วยส่งเสริมการทำงานของรากพืชในการดูดซับน้ำและอาหาร อีกทั้งช่วยป้องกันการพังทลายของหน้าดิน ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์สำหรับการเพาะปลูกพืช (สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา), 2551) สารปรับสภาพดินที่ได้จากระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถใช้ร่วมกันหรือทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ตกค้างอยู่ในผลผลิตทางการเกษตรและพื้นที่เพาะปลูก ในขณะที่ก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานสะอาดสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งจะช่วยลดมลพิษทางอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลังงานโดยการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล นอกจากนี้มีเทนที่ได้กลับคืนโดยเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะช่วยลดปริมาณมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่บรรยากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับ การกำจัดขยะมูลฝอยแบบกองทิ้งกลางแจ้ง การฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล และการหมักปุ๋ยแบบใช้อากาศ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกอันเนื่องมาจากก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกซึ่งมีศักยภาพทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential : GWP) สูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

2.2 อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

2.2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551)

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษเป็นอุตสาหกรรมหนักต่อเนื่องจากภาคเกษตรกรรม ใช้วัตถุดิบหลัก เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ ปอ ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษของประเทศ และมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศอย่างมาก โดยอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของอุตสาหกรรมกระดาษต่างๆ เช่น กระดาษพิมพ์เขียว กระดาษกราฟ เป็นต้น เป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำและอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องกระดาษ ถุงกระดาษ เป็นต้น และเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำของอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์



ภาพที่ 2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551

2.2.2 การผลิตของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

1. **วัตถุดิบ** (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550)

การใช้วัตถุดิบและสารเคมีจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

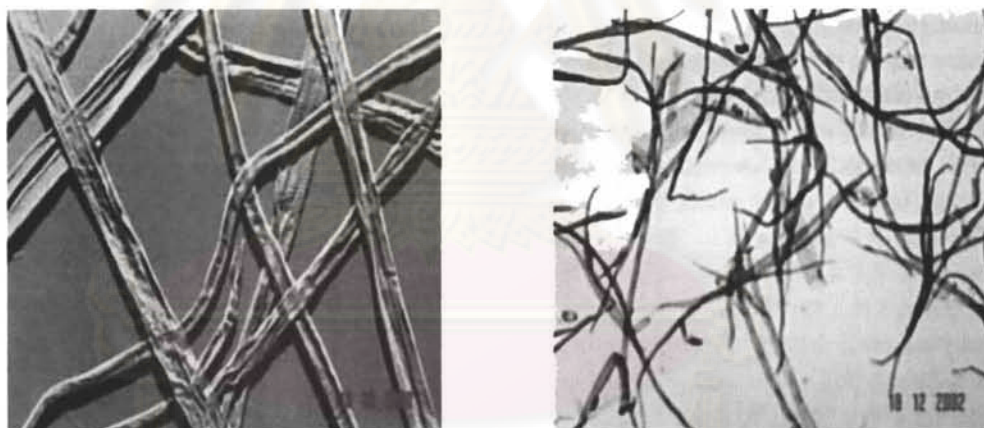
1.1) การผลิตเยื่อกระดาษ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีการใช้วัตถุดิบหลายชนิด ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลักๆ คือ

- วัตถุดิบประเภทไม้ (Wood) ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถิน
- วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-Wood) เช่น ชานอ้อย ปอแก้ว ฟางข้าว ไม้ไผ่

เป็นต้น

นอกจากวัตถุดิบหลักที่กล่าวมาแล้ว ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษยังต้องใช้น้ำ พลังงาน และสารเคมีบางอย่างอีกด้วย ซึ่งเยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศส่วนใหญ่จะเป็นเยื่อใยสั้นถึงเยื่อใยปานกลาง ยกเว้นเยื่อกระดาษที่ผลิตจากต้นปอสาเท่านั้นที่จัดเป็นเยื่อใยยาว



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

● กระดาษเก่าที่นำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการนำกระดาษเก่ามาผ่านกระบวนการตีเยื่อใหม่ คุณภาพเยื่อจะดีกว่าเยื่อกระดาษบริสุทธิ์ ทั้งในด้านความแข็งแรงและความสะอาด เช่น

- ก่อกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้ว
- กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว
- เศษกระดาษหลายชนิดปะปนกัน



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของก่อก่อกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้ว

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550

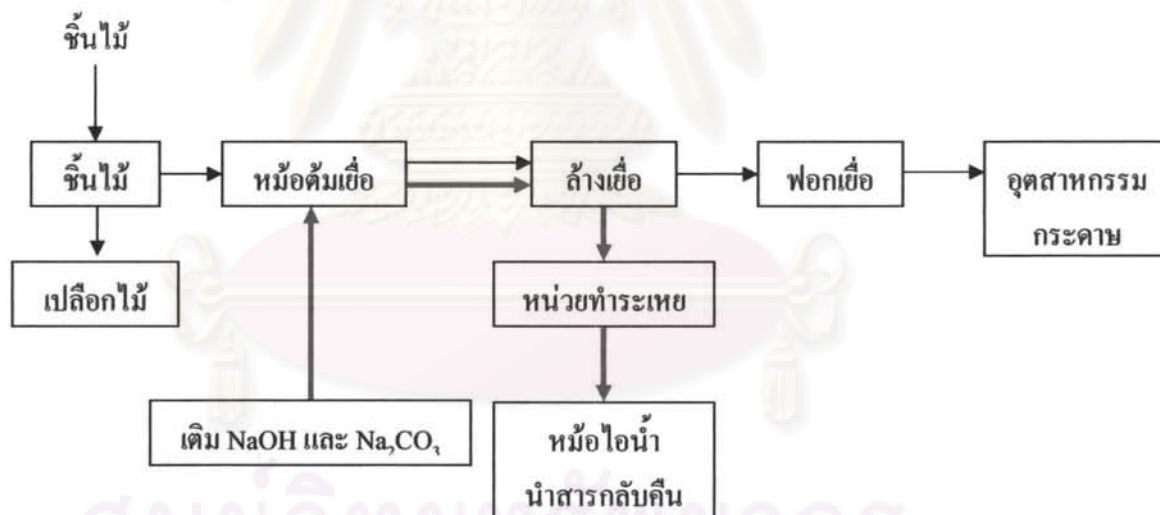


ภาพที่ 2.5 ลักษณะของเศษกระดาษหลายชนิดปะปนกัน

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550

2. กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีหน่วยการผลิตที่สำคัญตามภาพที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดดังนี้



หมายเหตุ: → หมายถึง เยื่อกระดาษ

→ หมายถึง สารเคมี

ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550

2.1) การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551)

- การปอกเปลือก (Debarking) เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเปลือกไม้เป็นส่วนที่ไม่มีประโยชน์ต่อการผลิตเยื่อกระดาษ และยังมีผลเสียอีกด้วย เนื่องจากเปลือกไม้เป็นส่วนที่มีเส้นใยน้อยและมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนมาก หากเข้าสู่กระบวนการผลิตอื่นๆ เช่น การต้มเยื่อ จึงเป็นการเปลืองสารเคมีและไอน้ำมาก ขณะที่ได้ผลตอบแทนไม่คุ้มค่า รวมทั้งเยื่อกระดาษที่ได้ยังมีคุณภาพต่ำอีกด้วย

โรงงานในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้เครื่องปอกเปลือกแบบ Debarking Drum ซึ่งจะอาศัยหลักการหมุน เปลือกไม้จะหลุดออกเนื่องจากแรงเสียดทานและการกระแทกกันของไม้ ไม้จะถูกลำเลียงทางสายพานเข้าไปสู่ Debarking Drum เมื่อ Debarking Drum หมุน เปลือกไม้จะถูกแยกออกมาจากช่องซึ่งอยู่ด้านข้างของ Debarking Drum และจะถูกลำเลียงไปยังเครื่องตีเปลือก แล้วส่งไปยังที่เก็บเปลือก ปริมาณเปลือกไม้ที่เกิดขึ้นภายในโรงงานจะมีปริมาณร้อยละ 10-12 ของวัตถุดิบ ซึ่งส่วนใหญ่โรงงานจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อน้ำ (Boiler) ส่วนไม้ท่อนที่ปอกเปลือกแล้วจะล้างด้วยน้ำก่อนเข้าเครื่องสับ

- การสับชิ้นไม้ (Chipping) หลังจากปอกเปลือก ไม้ท่อนจะถูกสับให้มีขนาดเล็กลง เพื่อความเหมาะสมในการต้มเยื่อ การสับไม้จะใช้เครื่องสับไม้ ไม้ท่อนเมื่อผ่านเครื่องสับไม้แล้วจะได้เป็นชิ้นไม้สับ (Chip) ขนาดชิ้นไม้สับที่ได้จะมีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อ ขนาดควรจะมี ความสม่ำเสมอ ความยาว และความหนาสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความกว้าง โดยควรมี ความยาวและความกว้างประมาณ 20-30 มิลลิเมตร หนาประมาณ 6-10 มิลลิเมตร ชิ้นไม้สับจะถูกส่งโดยสายพานยาวลำเลียงจากเครื่องสับไม้มากองไว้บนลานกลางแจ้ง

- การคัดขนาด (Screening) ชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกแยกออกจากพวกเสี้ยนไม้ (Fines) และไม้ชิ้นที่มีขนาดใหญ่ (Oversize) ด้วยเครื่องคัดขนาด ชิ้นไม้สับที่มีขนาดใหญ่จะถูกทำให้มีขนาดเล็กลง ส่วนเสี้ยนไม้และฝุ่นจะถูกรวมกับเปลือก เพื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) สำหรับชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกส่งไปยังหม้อต้มเยื่อต่อไป

2.2) การต้มเยื่อ (Cooking)

ชิ้นไม้สับจะถูกส่งเข้าสู่หม้อต้มเยื่อ (Digester) โดยสายพาน พร้อมกับเติมสารเคมีที่เรียกว่าน้ำขาว (White Liquor) ซึ่งประกอบด้วยโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) การต้มเยื่อจะกระทำภายใต้อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสและความดัน 7 บาร์ น้ำต้มเยื่อจะซึมซาบเข้าสู่ชิ้นไม้และทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้ลิกนินในชิ้นไม้สับละลายออกมาอยู่ในน้ำยาต้มเยื่อ การต้มเยื่อใช้เวลาประมาณ 60-70 นาที จะได้เยื่อซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายที่เรียกว่าน้ำดำ (Black Liquor) ในน้ำดำจึงประกอบด้วยสารเคมีและลิกนินละลายอยู่ น้ำดำจากขั้นตอนนี้

นำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำยาเคมีกลับคืน (Chemical Recovery) ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้ากระบวนการต่อไป (ฉวีวิทย์ โศภิตา, 2548) การต้มเยื่อที่ใช้กันทั่วไปมี 2 แบบ คือ

- การต้มเยื่อแบบเดี่ยว (Batch Cooking) ใช้หม้อต้มเยื่อแบบที่ทำงานเป็นครั้งๆ (Batch Digester) เริ่มจากการเติมน้ำดิบ เติมน้ำยาต้มเยื่อ ปิคเฝ้า เติมน้ำ คัมจนกระทั่งได้คุณภาพตามค่าควบคุมตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ ระบายเยื่อออกจนหมดแล้วเริ่มต้มหม้อต่อไป

- การต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Cooking) ใช้หม้อต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง คือ ซึ้นไม้สับจะถูกเติมเข้าทางด้านบนอย่างต่อเนื่อง และเยื่อก็จะไหลออกทางด้านล่างอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกัน โดยหม้อต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง 1 ใบจะมีกำลังการผลิตเท่ากับหม้อต้มเยื่อแบบเดี่ยวหลายใบ หม้อต้มเยื่อทั้ง 2 แบบมีข้อดีแตกต่างกัน แต่โรงงานที่ตั้งใหม่นิยมใช้หม้อต้มเยื่อแบบต่อเนื่องมากกว่า (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2550)

2.3) การบดเยื่อ (Refiner) และแยกเยื่อ (Screening) (ฉวีวิทย์ โศภิตา, 2548)

เยื่อที่ได้จากการต้มเยื่อจะถูกส่งเข้าเครื่องบดเยื่อ (Refiner) เพื่อให้เยื่อแตกตัวจากซึ้นไม้มากยิ่งขึ้น และเพิ่มความแข็งแรงให้กับเยื่อ จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการต่อไป ส่วนเยื่อที่ยังติดกับซึ้นไม้จะถูกส่งไปยัง Reject Refiner เพื่อบดเยื่อใหม่ แล้วจึงส่งกลับมาเพื่อแยกเยื่ออีกครั้ง

2.4) การล้างเยื่อ (Washing) ประกอบด้วย

- การล้างเยื่อ (Washing) มีวัตถุประสงค์เพื่อล้างของเหลวดำ (Black Liquor) ออกจากเยื่ออย่างมีประสิทธิภาพที่สุดและใช้น้ำน้อยที่สุด โดยประสิทธิภาพของการล้างหมายถึงเส้นใยต้องสะอาดที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะช่วยให้สูญเสียสารเคมีน้อยที่สุด เกิดฟองน้อยที่สุด รวมถึงการทิ้งของเสียออกจากกระบวนการน้อยที่สุดด้วย ในขณะที่เดียวกันการสิ้นเปลืองสารเคมีฟอกเยื่อต้องน้อยที่สุด รวมถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย ไม่ว่าจะเป็นเยื่อหรือกระดาษต้องมีคุณภาพดีที่สุดด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2550) โดยเยื่อที่ได้จากการแยกเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องล้างเยื่อ (Washer) เพื่อล้างสารเคมีที่ติดมากับเยื่อออก แล้วจึงส่งเยื่อไปล้างอีกครั้ง น้ำล้างเยื่อครั้งที่สองนี้จะส่งกลับไปใช้ในการต้มเยื่อ ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้าไปรีดเอาน้ำออกจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ก่อนส่งไปยังโรงงานผลิตกระดาษต่อไป (ฉวีวิทย์ โศภิตา, 2548)

- การร่อนเยื่อ (Screening) เป็นขั้นตอนที่สำคัญตอนหนึ่ง เนื่องจากการต้มเยื่อแม้ว่าจะมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ อย่างดี แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าซึ้นไม้สับทุกซึ้นจะสุกอย่างสม่ำเสมอหรือเส้นใยทุกเส้นจะแยกเป็นเส้นใยอิสระ ดังนั้นเยื่อหลังจากการล้างมักจะมีสิ่งเจือปนอยู่เสมอ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านั้นแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 2 กลุ่ม คือ

- **สิ่งเจือปนที่เกิดจากเนื้อไม้** ได้แก่

- สิ่งเจือปนขนาดใหญ่ เช่น ชันไม้สับที่ดัมสุกที่ค้างบนตะแกรงร้อนที่มีขนาดรู 9 มิลลิเมตร

- สิ่งเจือปนจำพวกเส้นใยที่ยังไม่แยกเป็นเส้นใยอิสระ มีขนาดยาวประมาณ 1–3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 0.1–0.5 มิลลิเมตร และมีความแข็งกระด้างสูงกว่าเส้นใย เราสามารถแยกสิ่งเจือปนเหล่านี้ออกจากเยื่อโดยใช้ตะแกรงร้อนเยื่อ

- **สิ่งเจือปนที่ไม่ได้เกิดจากเนื้อไม้** เช่น เศษกรวดทราย เปลือกไม้ ฝัสนิมเหล็ก ฯลฯ สิ่งเจือปนเหล่านี้มีขนาดเล็ก สามารถแยกออกได้โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องทำความสะอาดที่ใช้แรงหนีศูนย์กลาง

สำหรับเยื่อที่ไม่ต้องการความขาวสว่าง เมื่อผ่านกระบวนการล้างเยื่อแล้วก็จะถูกส่งเข้าเครื่องผลิตกระดาษ (Paper Machine) ต่อไป แต่ถ้าเป็นเยื่อที่ต้องการให้มีความขาวสว่างก็จะต้องถูกส่งไปยังกระบวนการฟอกเยื่อก่อน แล้วจึงส่งต่อไปยังกระบวนการผลิตกระดาษ (ฉวีวิทย์ โดทีนา, 2548)

2.5) การฟอกเยื่อ (Bleaching)

การผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulp) ที่นำไปผลิตกระดาษพิมพ์เขียนจำเป็นอย่างยิ่งที่เยื่อที่ได้ต้องมีความขาวสว่างสูง การฟอกเยื่อเป็นวิธีการที่จะได้มาซึ่งเยื่อที่มีความขาวสว่างสูง การฟอกเยื่อมีมาตั้งแต่ปี 2463 โดยเริ่มจากการฟอกแบบเดี่ยว (Batch) ด้วยสารไฮโปคลอไรด์เพียงขั้นตอนเดียว วิธีนี้ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลงและเยื่อที่ได้ก็มีความขาวสว่างต่ำ ในปัจจุบันยังไม่มีสารเคมีหรือวิธีการใดที่สามารถฟอกเยื่อให้ขาวได้ภายในขั้นตอนเดียว จำเป็นต้องใช้สารเคมีหลายตัวและฟอกหลายขั้นตอน ซึ่งอาจมีมากถึง 5–6 ขั้นตอน สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เช่น

C : คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2)

H : ไฮโปคลอไรด์ (NaOCl , $\text{Ca}(\text{OCl})_2$)

E : การสกัดโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Extraction)

P : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

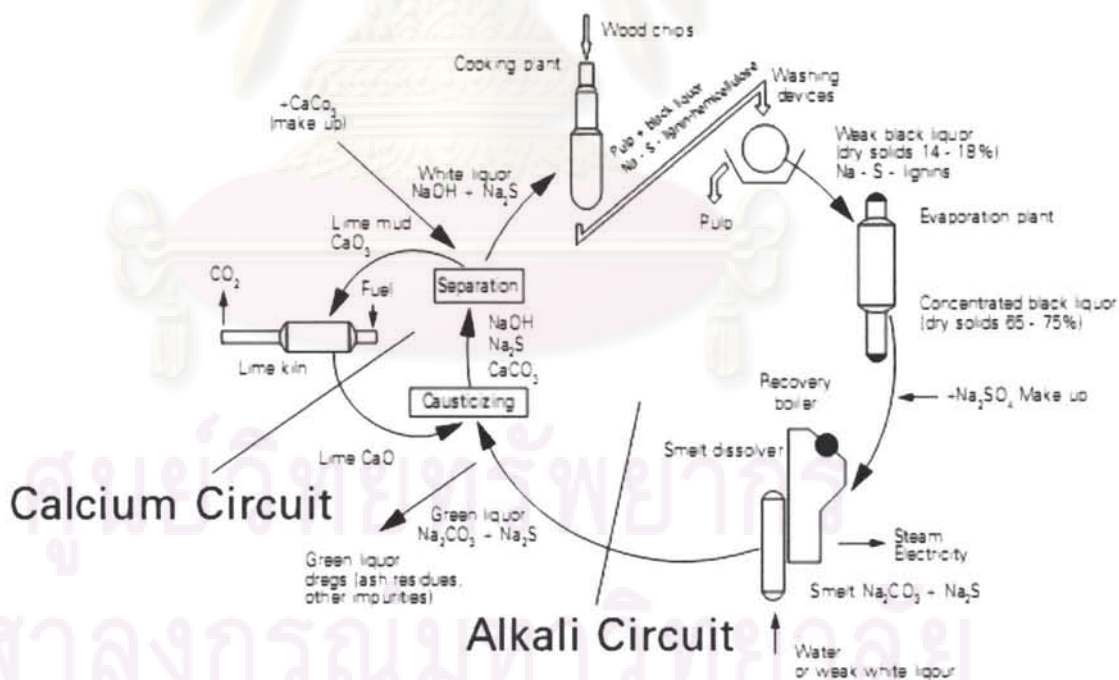
O : ออกซิเจน (O_2)

หลังจากผ่านกระบวนการฟอกเยื่อแล้ว เยื่อที่มีความขาวสว่างจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องผลิตกระดาษ (Paper Machine) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษ โรงงาน, 2550)

3. กระบวนการผลิตน้ำยาเคมีกลับคืน (Chemical Recovery Cycle)

สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ (Digestion) จะถูกนำกลับใช้ใหม่อีก โดยมีลำดับขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2.7

เมื่อใช้ White Stage ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ต้มเยื่อแล้วจะมีลิกนินปนออกมาด้วยเป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำยาต้มเยื่อเปลี่ยนสีเป็นสีดำ เรียกว่าน้ำดำ (Black Liquor) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยทำระเหย (Evaporator) เพื่อระเหยน้ำออกจากน้ำดำ ทำให้มีความเข้มข้นสูงมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นร้อยละ 70 ก่อนจะถูกส่งไปเผาเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery Boiler) ซึ่งจะทำหน้าที่เผาไหม้สารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในน้ำดำ โดยขั้นตอนนี้จะได้พลังงานจากการเผาไหม้ สามารถเอามาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ และจากการเผาน้ำดำจะได้เถ้าที่เหลือจากการเผา (Smelt) ซึ่งประกอบด้วยโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เมื่อนำเถ้าที่เหลือจากการเผาไปละลายน้ำจะได้น้ำยาสีเขียว (Green Liquor) ในถังตกตะกอน (Green Liquor Tank) ส่วนใสจะเติมปูนขาว (Lime) เรียกว่าน้ำอ่อน (Weak Wash) แล้วนำกลับไปใช้ในกระบวนการต้มเยื่อ และตะกอนที่ได้คือ กากปูน (Lime Mud) ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ส่วนตะกอนของถังตกตะกอนน้ำยาสีเขียวจะได้คาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่วนประกอบของเหล็ก และชิ้นส่วนของสารที่ใช้ในการทำผนังเตาเผา (ฉัฐวิทย์ โดทินา, 2548)



ภาพที่ 2.7 วัฏจักรทางเคมีของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ที่มา : ฉัฐวิทย์ โดทินา, 2548

2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ (ฉวีวิทย์ โดทิยา, 2548)

1) การบำบัดขั้นต้นทางกายภาพ (Physical Treatment)

น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตก่อนไหลเข้าสู่บ่อพักจะผ่านตะแกรงหยาบ (Bar Screen) เพื่อแยกกรวดเศษสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ออกก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ทำความเสียหายแก่เครื่องจักร จากนั้นจึงส่งไปยังบ่อดกตะกอนขั้นต้น (Pre-sedimentation Tank) เพื่อตกตะกอนแยกเอาความสกปรกซึ่งอยู่ในรูปสารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เศษเยื่อ ตะกอนสารแขวนลอย ออกจากน้ำทิ้ง ขั้นตอนนี้สามารถลดหรือจำกัดความสกปรกได้ประมาณร้อยละ 30

2) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

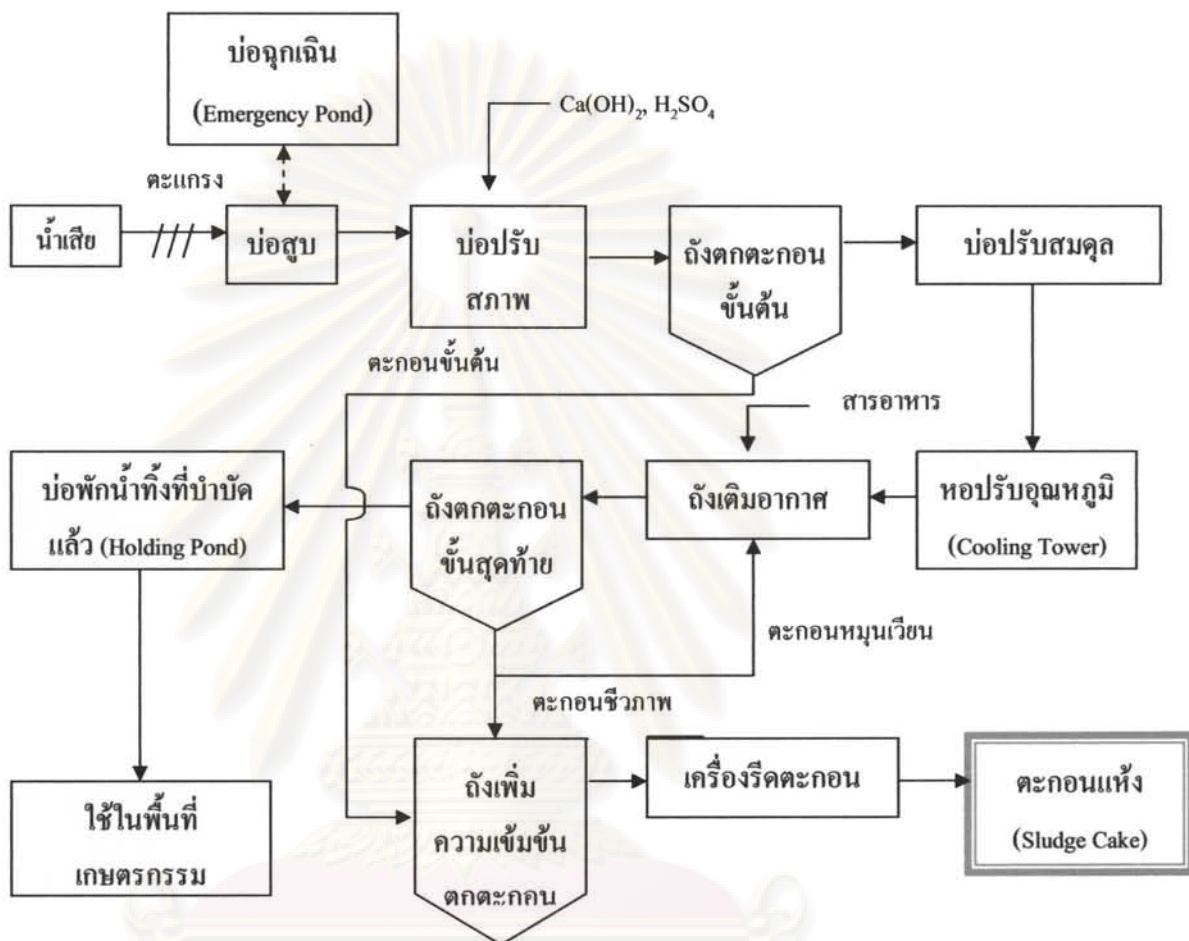
ความสกปรกที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ จะนำมาบำบัดโดยทางชีวภาพด้วยระบบตะกอนเร่ง 2 ขั้นตอน (Activated Sludge 2 Stage) โดยจะปรับสภาวะแวดล้อมต่างๆ ให้แก่จุลินทรีย์ ตั้งแต่ำนน้ำทิ้งไปปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำทิ้งให้อยู่ระหว่าง 6-8 เติมสารอาหารพวกธาตุไนโตรเจน (N) ในรูปของปุ๋ยยูเรีย และเติมธาตุฟอสฟอรัส (P) ในรูปของปุ๋ยฟอสเฟต (P_2O_5) ซึ่งเป็นธาตุจำเป็นสำหรับจุลินทรีย์

เมื่อมีการปรับสภาพที่เหมาะสมแล้ว น้ำทิ้งจะถูกส่งมายังบ่อเลี้ยงจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ (Aeration Tank) โดยปกติจะควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำทิ้งประมาณ 1-2 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากที่จุลินทรีย์ได้รับออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (High Speed Surface Aerator) ก็จะเริ่มกินย่อยสลายความสกปรกในน้ำทิ้งอย่างต่อเนื่อง จนความสกปรกในน้ำทิ้งหมดไป จากนั้นก็จะเป็นขั้นตอนแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำ โดยส่งไปยังถังตกตะกอน (Intermediate Tank) จุลินทรีย์จะค่อยๆ จมตัวลงสู่ก้นบ่อ ทำให้ได้น้ำใสสะอาดออกมา ขั้นตอนนี้สามารถลดความสกปรกได้มากกว่าร้อยละ 95 จุลินทรีย์ที่แยกออกมาแล้วจะถูกส่งกลับไปถังเติมอากาศ (Return Sludge) วนเช่นนี้ไปตลอด และจะแยกจุลินทรีย์ส่วนเกินออกจากระบบ (Excess Sludge) ผ่านไปยังถังเพิ่มความเข้มข้น (Thicker Tank) เพื่อส่งต่อไปยังระบบกำจัดตะกอนต่อไป

3) การกำจัดตะกอน

ตะกอนที่ได้จากบ่อดกตะกอนขั้นต้น (Primary Sludge) จะถูกส่งไปผสมกับตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินในถังเพิ่มความเข้มข้น (Secondary Sludge or Bio-sludge) แล้วส่งต่อไปยังเครื่องบีบตะกอน โดยมีการผสมน้ำตะกอน (Sludge) กับ Cationic Polymer แบบ In-line Mixing เพื่อให้ตะกอนจับตัวเป็นก้อน (Flocculation) ซึ่งจะช่วยต่อการรีดน้ำออก น้ำที่ถูกรีดออกจากเนื้อตะกอน (Sludge Cake) จะถูกส่งกลับไปบำบัดต่อที่บ่อดกตะกอนขั้นต้น ส่วนตะกอนที่ได้จะนำไปฝังกลบและจำหน่ายให้กับเกษตรกรเพื่อใช้ทำปุ๋ย

ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีคุณภาพน้ำที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด สามารถนำไปใช้ในการเกษตร ใช้ล้างพื้นอาคารโรงงาน รดน้ำต้นไม้ ในบริเวณโรงงาน หรือปล่อยลงไปยังแม่น้ำต่อไป



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551

หมายเหตุ:



(ตะกอนแห้ง) คือ ส่วนที่นำมาใช้ในการวิจัยของวิทยานิพนธ์

2.2.4 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551)

จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษได้ก่อกมลพิษทางน้ำปริมาณมาก ซึ่งสามารถสรุปปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นตามกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

จุดที่เกิด	ปริมาณ (ลบ.ม./วัน)	อัตราการเกิด/ตัน เยื่อกระดาษ (ลบ.ม.)	ลักษณะ
การต้มเยื่อ	8,920	6.86	- พีเอชประมาณ 5-6
การฟอกเยื่อ	1,800	1.38	- บีโอดีประมาณ 400-500 มก./ล.
หน่วยทำระเหย	56	0.04	- ซีโอดีประมาณ 1,200-2,000 มก./ล.
หม้อน้ำสารเคมี กลับคืน	300	0.23	- ของแข็งแขวนลอยประมาณ 300-500 มก./ล.
หน่วยทำค่าง	700	0.54	- ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดประมาณ 2400-2800 มก./ล.

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551



ภาพที่ 2.9 ลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551

2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Process)

กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ใช้แบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนหลายกลุ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และสลับซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน คือ ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Anaerobic Environment) จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Microorganism) จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนมีกระบวนการที่สลับซับซ้อนมาก โดยมีปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นนับร้อยกระบวนการ ซึ่งจะต้องอาศัยเอนไซม์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเข้าทำปฏิกิริยาด้วย แม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนจะมีการศึกษากันมาอย่างยาวนาน แต่ในปัจจุบันการศึกษาทางด้านนี้ก็ยังไม่หยุดนิ่ง ยังคงมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทราบถึงกลไกและลักษณะการทำงานของแบคทีเรีย เพื่อจะได้ออกแบบและควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.3.1 กระบวนการทางจุลชีววิทยาของการผลิตก๊าซชีวภาพ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

กระบวนการทางจุลชีววิทยาของการผลิตก๊าซชีวภาพมีความสลับซับซ้อนและเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิด ซึ่งสามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้กลายเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยว เช่น การย่อยสลายแป้งให้อยู่ในรูปของน้ำตาล การย่อยสลายไขมันให้อยู่ในรูปของกรดไขมัน และการย่อยสลายโปรตีนให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน เป็นต้น ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายนดังกล่าว

2) การสร้างกรดไขมัน (Acidogenesis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริก กรดโพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย กระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรทและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เช่น กรดไขมันชนิดยาว

ถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ความดันของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านวิธี Embden–Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูงผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

3) การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

การเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นกรดอะซิติกหรือเกลืออะซิเตทซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตมีเทน แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารตั้งต้นเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรตในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิก ตามลำดับ



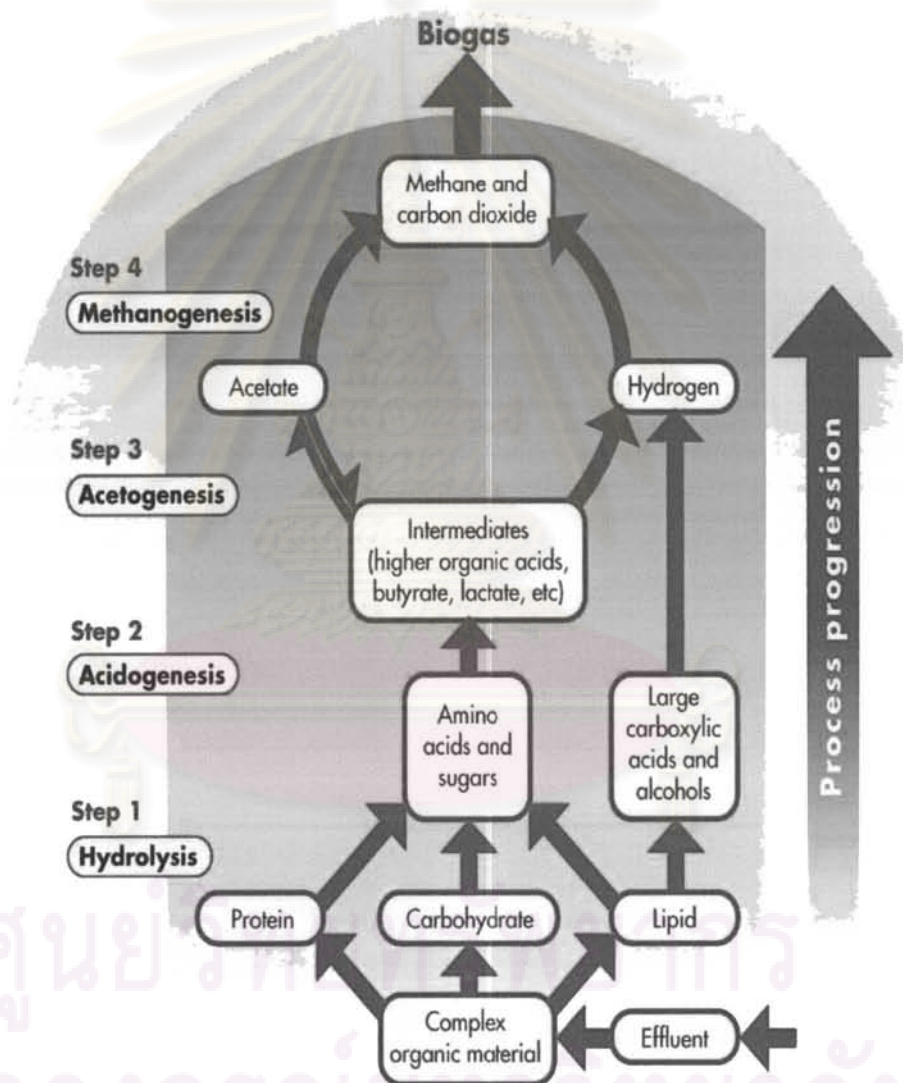
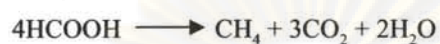
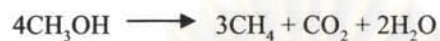
ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูง

4) การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน



กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะเซติกหรือไฮโดรเจนก่อน จึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะเซติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก (HCOOH)



ภาพที่ 2.10 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546

2.3.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (กระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถจำแนกได้
ดังนี้

1) แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไร้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้น
โดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเค็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่าชนิดแบคทีเรียกึ่งใช้ออกซิเจน
ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเค็ดขาดมีจำนวนมากกว่า แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเค็ดขาดที่มี
บทบาทสร้างกรดไขมันระเหยคือกลุ่มคลอสตริเดียม ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้
สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวไทริก
กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น
นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่มโพรไพโอนิก (Propionic Bacterium) ที่ผลิตกรดโพรไพโอนิก
(Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

2) แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็น
เป็นสารโมเลกุลที่เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงมีการเปลี่ยน
สารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เพื่อให้สามารถดูดซึม
เข้าไปใช้ได้ ในเซลล์ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก
ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.1) แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเดียว (Homoacetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับ
อิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ผ่านวิถีชีวเคมีที่
เรียกว่า Acetyl-CoA แบคทีเรียชนิดนี้ได้แก่ *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium aceticum*
สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโทโทรฟิก (Autotrophic) คือ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น
สารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยน
คาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก



อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบเฮเทอโทรโทรฟิกก็ได้ โดยการหมักน้ำตาลดังสมการ



แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัสคลอสทริเดียมพบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

2.2) แบคทีเรียที่สร้างอะซิเตทที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H_2 -Producing Acetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร และสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทในตรงนี้ เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้

การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

3) แบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเค็ซซาด ไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเค โมเสทเธอโรโทรพ ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณ 10 ชนิดเท่านั้น ดังตารางที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้

สับสเตรตประเภทคาร์บอนไดออกไซด์	
คาร์บอนไดออกไซด์	
$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$; $\Delta G^{0'} = -131 \text{ kJ/reaction}$
ฟอร์มेट (HCOO^-)	
$4 \text{HCOO}^- + 4 \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $\Delta G^{0'} = -145 \text{ kJ/reaction}$
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	
$4 \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$; $\Delta G^{0'} = -210 \text{ kJ/reaction}$
สับสเตรตประเภทเมทิล	
Methanol (CH_3OH)	
$4 \text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $\Delta G^{0'} = -319 \text{ kJ/reaction}$
Methylamine (CH_3NH_2)	
$4\text{CH}_3\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_3$; $\Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
Dimethylamine ($(\text{CH}_3)_2\text{NH}$)	
$(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_3$; $\Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
Trimethylamine ($(\text{CH}_3)_3\text{N}$)	
$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4 \text{NH}_3$; $\Delta G^{0'} = -666 \text{ kJ/reaction}$
อะซิเตท	
Acetate (CH_3COO^-)	
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$; $\Delta G^{0'} = -31 \text{ kJ/reaction}$

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่น บิวทิริก หรือ โพรไพรอนิก ซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้

แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดของสารอาหารที่ใช้ได้แก่

3.1) เมทานोजินที่บริโภคนเฉพาะอะซิเตท (Obligate Acetoclastic Methanogen) เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการดังนี้



3.2) เมทานोजินที่บริโภคนเฉพาะไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic Methanogen หรือ Hydrogen Utilizer) เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ตามสมการดังนี้



นอกจากก๊าซไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นแหล่งอาหารเพียงอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้

3.3) เมทานोजินที่บริโภคนได้ทั้งไฮโดรเจนและอะซิเตท (Hydrogenotrophic /Acetoclastic Methanogen) เป็นแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน แต่ใช้ไฮโดรเจนได้ดีกว่า

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ แบคทีเรียไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี การควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้แบคทีเรียอยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านการทำงาน (อาริยา วิรัชวรกุล, 2546)

1) ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factor)

1.1) อุณหภูมิ (Temperature)

ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50–65 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่าเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria)

- ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่ามีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria)

- ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5–15 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่าไซโครฟิลิกแบคทีเรีย (Psychrophilic Bacteria)

สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในช่วงเทอร์โมฟิลิก แบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าในช่วงมีโซฟิลิก โดยสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิกประมาณร้อยละ 20–50 ดังนั้นสำหรับในต่างประเทศที่อยู่ในเขตกึ่งร้อนจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำทิ้ง แต่สำหรับประเทศไทยนั้นระบบบำบัดจะทำงานอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกได้เองโดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย แม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วงมีโซฟิลิกจะดียกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่ายพบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

นอกจากนี้แบคทีเรียยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในการออกแบบระบบจึงควรมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของระบบมีการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2–3 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนอย่างมาก การรักษาอุณหภูมิของระบบให้มีความสม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าการควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิอยู่ในจุดที่ให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

1.2) พีเอช (pH)

แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมากที่สุด โดยขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดขึ้นที่พีเอช 6.8–7.2 และพีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acidogens) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพที่พีเอชระหว่าง

5-8 นอกจากนี้ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยจะส่งผลต่อความเข้มข้นหรืออิออนของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) แอมโมเนีย (NH_3) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนบางครั้งได้แยกขั้นตอนของการสร้างกรดและการสร้างมีเทนออกจากกัน (Two Stage Anaerobic Reactor) เพื่อให้สามารถย่อยสลายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสหรือส่วนที่มีองค์ประกอบเป็นไฟเบอร์บางส่วนก่อน เช่น การหมักขยะอินทรีย์เป็นดิน (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.6-7.8 โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบคทีเรียผลิตมีเทนจะอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546) บางตำราให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Tchobanoglous และคณะ, 1993) ในกรณีที่ปริมาณสารอินทรีย์ป้อนเข้าสู่ระบบมากเกินไปจะทำให้เกิดการสะสมของกรดระเหยง่าย ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ลดลงได้ โดยหากค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทน และหากค่าพีเอชต่ำกว่า 5.5 จะถือว่าถังปฏิกรณ์นั้นล้มเหลว (สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา), 2551)

1.3) ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการต่างๆ พบว่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความชื้นของมูลฝอยในระบบหมัก ผลจากการเพิ่มสัดส่วนความชื้นที่สำคัญ คือ ป้องกันการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศ ช่วยแลกเปลี่ยนสารอินทรีย์ สารอาหารที่จำเป็น บัฟเฟอร์เจือจางสารพิษ และช่วยแพร่กระจายเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (ปิยชน สังข์กลิ่นหอม, 2545) โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60-80 ของน้ำหนักเปียก (สแกนต์ สิริเมธีวัฒนา และวรรณะ ชมสร, 2548)

1.4) กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid : VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ซึ่งจะถูแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อค่าพีเอชของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น พีเอชจะต่ำลง ระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มิลลิกรัม/ลิตร หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ อัตราของการเปลี่ยนกรดโพรไพโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมดุลของระบบ ถ้ามีกรดโพรไพโอนิกเหลืออยู่ถึงเป็นปริมาณมาก อัตราการเกิดก๊าซจะลดลง ทำให้ระบบล้มเหลวได้

1.5) ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ความเป็นด่างนี้จะเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้เป็นสาเหตุทำให้พีเอชลดลง (อารียา วัชรกุล, 2546)

1.6) อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน (C/N Ratio)

เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการใช้ทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ต่างๆ โดยอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียผลิตมีเทนจะอยู่ในช่วง 20:30-1 อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้แล้วแต่กรณี (สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา), 2551)

1.7) ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคมูลฝอยมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย ซึ่งถ้าลดขนาดของอนุภาคลงจาก 25 เซนติเมตร เหลือ 2.5 เซนติเมตร จะทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 4.4 เท่า (ขานู สุริยวิจิตรเสรณี, วรวรรณ วิโรจน์ชัยยันต์ และวิเศษพล ทรัพย์มณี, 2549)

1.8) สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก (Macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (Micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) และนิกเกิล (Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 150 : 1.1 : 0.2 โดยใช้คาร์บอนสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนสังเคราะห์โปรตีน และฟอสฟอรัสสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมจึงต้องใส่สารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป (อวิศา ฉลานูวัฒน์, 2545)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็น

สารอาหาร	ความเข้มข้น (g/l)	ผล
Fe ²⁺	0.2	ต่อโครงสร้างฟิล์มชีวะ (Biofilm) การตกตะกอนของซัลไฟด์
Ni ²⁺	0.01	สร้าง F ₄₂₀ โคแฟกเตอร์ในเมทาโนเจน
	0.006	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
SO ²⁻	0.02	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
CO ₄ ²⁺	0.03	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์

ที่มา : สุรพล สายพานิช, 2530

1.9) สารพิษ (Toxic Substance)

สารบางอย่างถ้ามีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ สารพิษได้แก่

1.9.1) อีออนประจุบวกของโลหะเบา (Light Metal Cation)

อีออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม (Na⁺) โพแทสเซียม (K⁺) แคลเซียม (Ca²⁺) และแมกนีเซียม (Mg²⁺) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชในระบบ จะมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษจะเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของอีออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด (อาริยา วิรัชวรกุล, 2546)

ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดจะรุนแรงไม่เท่ากัน อีออนประจุบวกของโลหะเบาว่าเลนซีเท่ากับ 1 จะมีพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่าอีออนประจุบวกของโลหะเบาว่าเลนซีเท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca⁺⁺ และ Mg⁺⁺ จะมากกว่าพิษของ Na⁺⁺ และ K⁺⁺ ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อว่าเลนซีสูงขึ้น

ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาสามารถลดลงได้ กล่าวคือเมื่อมีอีออนประจุบวกของโลหะเบาซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศอยู่ชนิดหนึ่ง ถ้ามีอีออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วยจะทำให้ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลงได้ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า Antagonism แต่ในทางตรงกันข้ามอีออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของอีกชนิดหนึ่งเมื่ออยู่ร่วมกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า Synergism (อวิศดา ฉลานูวัฒน์, 2545)

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกโลหะเบา

ไอออนประจุบวก โลหะเบา	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
Na ⁺	100–200	3,500–5,500	8,000
K ⁺	200–400	2,500–4,500	12,000
Ca ²⁺	100–200	1,500–4,500	8,000
Mg ²⁺	75–150	1,000–1,500	3,000

ที่มา : วัตสดา ฉลาอนุวัฒน์, 2545

ตารางที่ 2.6 ไอออนประจุบวกโลหะเบาเพิ่มความเป็นพิษ (Synergism) และไอออนประจุบวกโลหะเบาลดความเป็นพิษ (Antagonism)

ไอออนประจุบวกโลหะเบา	เพิ่มความเป็นพิษ (Synergism)	ลดความเป็นพิษ (Antagonism)
แอมโมเนีย (N)	Ca, Mg, K	Na
Ca	แอมโมเนีย (N), Mg	K, Na
Mg	แอมโมเนีย (N), Mg	K, Na
K	-	K, Na
Na	แอมโมเนีย (N), Ca, Mg	K

ที่มา : United State Environmental Protection Agency (EPA), 1979

1.9.2) โลหะหนัก (Heavy Metal)

โลหะหนัก (Heavy Metal) ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักนั้นจะละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ และตกตะกอน ถ้าน้ำเสียนั้นมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งต้องเติมเกลือ

ซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกือบทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้ (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เป็นพิษต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	ยับยั้งการทำงาน	เป็นพิษ	หยุดการทำงาน
Cr ³⁺	130	260	<200
Cr ⁶⁺	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	>30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1,700

ที่มา : อวตศา ฉลาณุวัฒน์, 2545

1.9.3) ก๊าซบางชนิด

- แอมโมเนีย (Ammonia) เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เช่น โปรตีนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 จะมีแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) มากกว่า แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 จะมีก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่าแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000–9,000 มิลลิกรัม/ลิตร

- ซัลไฟด์ (Sulfide) เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ หรือเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร จึงจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็กสามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่

ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ คังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับพีเอชของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

2) ปัจจัยทางด้านการทำงาน (Operational Factor)

2.1) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR)

อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ และเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทนต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป จะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไป เพราะสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็มประสิทธิภาพ ไม่คุ้มค่าการลงทุน และยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ผลที่อาจจะตามมาคือระบบอาจจะล้มเหลวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามค่าของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบหาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการหรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว

2.2) เวลาพักกักขังศาสตร์ (Hydraulic Retention Time : HRT)

เวลาพักกักขังศาสตร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาพักกักขังสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นจะลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกชะออกจากระบบ (Wash Out) ในอัตราที่เร็วกว่า จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ถูกชะออกจากระบบได้โดยการเพิ่มเวลาพักกักขังศาสตร์ให้นานขึ้น นอกจากนี้เวลาพักกักขังศาสตร์จะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบอีกด้วย (สุพรรณิ ชาญประเสริฐ, 2536)

2.3) การกวน (Mixing)

การกวน คือ การทำให้ของเหลวและส่วนผสมที่อยู่ในระบบมีการผสมและกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ช่วยให้ของเสียที่เข้ามาใหม่เข้าไปแทนที่ของเสียที่ถูกย่อยสลายแล้ว ทำให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การกวนยังช่วยป้องกันมิให้มีการแยกชั้นของของเสีย ซึ่งการแยกชั้นของของเสียจะสร้างปัญหาให้กับระบบ โดยตะกอนลอยด้านบนสุด (Scum) จะทำให้ประสิทธิภาพในการสร้างก๊าซมีเทนและเปลี่ยนรูป

สารอินทรีย์ในระบบลดลง ในทางปฏิบัติสามารถลดปัญหาการเกิดขึ้นตะกอนลอยได้โดยการเพิ่มการกวนให้แก่ระบบ ถ้าหากระบบมีสภาพความเข้มข้นของแข็งต่ำ (ความเข้มข้นสารแขวนลอยน้อยกว่า 500 มิลลิกรัม/ลิตร) และมีสารที่มีเส้นใยอยู่ไม่มาก สามารถใช้การหมุนเวียนของเหลวหรือก๊าซที่เกิดขึ้นในถังเพื่อกวนผสมน้ำเสียได้ แต่หากระบบมีแนวโน้มการสะสมตัวของตะกอนลอยค่อนข้างสูงหรือสารแขวนลอยในน้ำเสียนั้นมีมาก จำเป็นต้องใช้การกวนโดยใช้เครื่องมือทางกล เช่น ใบกวน เป็นต้น (อาริยา วิวัชรกุล, 2546)

2.3.4 รูปแบบของระบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับของแข็ง (สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา), 2551)

1) ระบบหมักแห้งแบบต่อเนื่อง (Dry Continuous Digestion)

ขยะอินทรีย์ซึ่งมีอัตราส่วนที่เป็นของแข็งร้อยละ 20-40 ที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะถูกป้อนเข้าระบบหมักอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีทั้งระบบที่มีการกวนผสมและระบบปลັกดโฟล สำหรับระบบปลັกดโฟลจะมีการรีไซเคิลสารบางส่วนที่ถูกย่อยสลายแล้วกลับมาผสมกับขยะอินทรีย์ที่นำเข้ามาในระบบ เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสม ทั้งระบบกวนผสมและระบบปลັกดโฟลมักจะทำในช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (50-55 องศาเซลเซียส) เพื่อเดิมน้ำผสมให้น้อยที่สุด

2) ระบบหมักแห้งแบบแบตช์ (Dry Batch Digestion)

ระบบนี้จะใช้หลักการเช่นเดียวกับการฝังกลบ แต่ใช้เวลาสั้นกว่าการฝังกลบขยะที่นำเข้ามาหมักในถังปฏิกรณ์จะถูกผสมกับสารที่ผ่านการย่อยสลายแล้วจากอีกถังหนึ่ง เพื่อปรับสภาพ หลังจากนั้นจึงปิดถังปฏิกรณ์และปล่อยให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติ ในช่วงนี้น้ำชะขยะ (Leachate) ที่เกิดขึ้นจะถูกหมุนเวียนไปรักษาระดับความชื้นและกระจายสารที่ละลายน้ำได้และแบคทีเรียย่อยมีเทน เมื่อสารถูกย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์แล้วจึงเปิดถังปฏิกรณ์เพื่อเอาสารที่เหลือจากการย่อยสลายออกแล้วเติมขยะเข้าไปใหม่ ข้อดีของระบบคือทำได้ง่าย สำหรับข้อเสียคือเป็นระบบแบตช์และจะต้องมีกระบวนการบำบัดสารผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบอีกครั้งหนึ่ง

3) กระบวนการลีช-เบด (Leach-bed Processes)

กระบวนการนี้มีหลักการคล้ายคลึงกับการหมักแห้งแบบแบตช์ แต่จะต่างกันที่ด้านล่างของถังจะมีการแลกเปลี่ยนระหว่างสารจากแบตช์เก่าและแบตช์ใหม่ เพื่อให้การเดินระบบเริ่มต้นทำได้ง่ายและระบายกรดระเหยได้ในถังหมักแบตช์เก่า หลังจากนั้นเมื่อถึงขั้นตอนการเกิดมีเทน (Methanogenesis) ถังหมักจะถูกแยกออกจากกันแล้วนำไปต่อกับถังใหม่ต่อไป หลักการนี้อาจเรียกว่า Sequential Batch Anaerobic Composting (SEBAC)

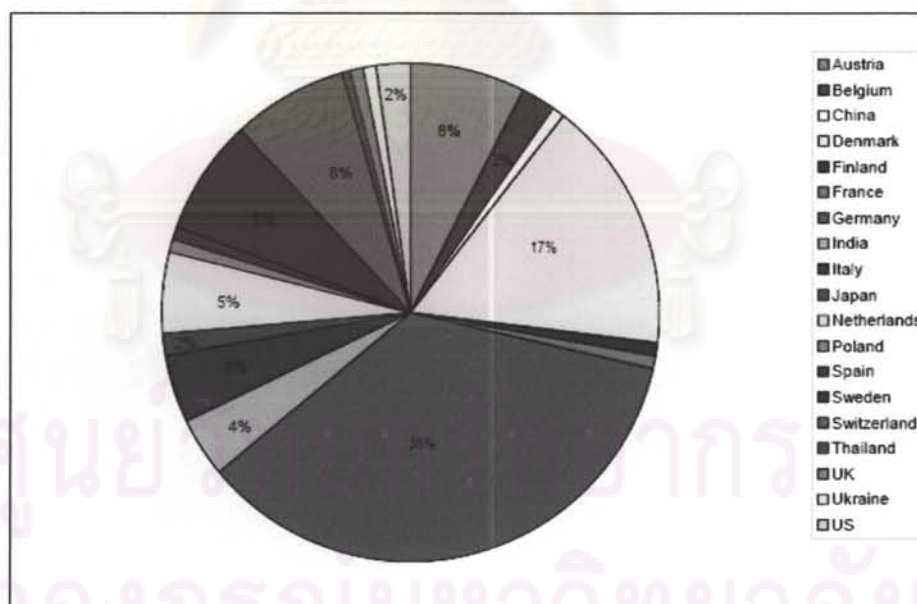
4) การหมักเปียกแบบต่อเนื่อง (Wet Continuous Digestion)

ระบบนี้ขยะจะถูกป้อนในรูปที่เป็นของเหลวข้น (Slurry) โดยมีอัตราส่วนของแข็งประมาณร้อยละ 10 ถึงปฏิกรณ์อาจมีรูปแบบเป็นถังวนคล้ายกับระบบหมักมูลสัตว์ ในขั้นตอนการเตรียมสารป้อนเข้าถัง สารที่ผ่านการย่อยสลายแล้วจะถูกกรองอัดเพื่อแยกเอาส่วนของเหลวกลับไปใช้ใหม่ ระบบนี้อาจนำไปใช้หมักขยะร่วมกับมูลสัตว์ ซึ่งนิยมทำในประเทศเคนมาร์ก

5) การหมักเปียกแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage Wet Digestion)

ระบบนี้จะแยกขั้นตอนไฮโดรไลติกและขั้นตอนการหมักกรดออกจากขั้นตอนการเกิดมีเทน ซึ่งระบบนี้มักจะใช้กับอุตสาหกรรม เช่น ระบบ Anaerobic Filter และระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

The Biogasworks (1998) อ้างถึงใน Verma (2002) แสดงให้เห็นว่ามีแหล่งที่ใช้ระบบการหมักย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน 130 แห่ง มีความสามารถในการรองรับของเสีย 500–300,000 ตัน/ปี และมีการบำบัดที่แตกต่างกันตามของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งภาพที่ 2.11 สามารถแสดงให้เห็นการนำกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพมาใช้ จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีนี้ถูกนำมาใช้มากที่สุด ในยุโรปร้อยละ 91 เอเชียร้อยละ 7 สหรัฐอเมริกามีเล็กน้อยเพียงร้อยละ 2 เยอรมันจะเป็นผู้นำในการใช้เทคโนโลยีนี้มีถึงร้อยละ 35 รองลงมาคือเคนมาร์กร้อยละ 16 สวีเดน สวิสเซอร์แลนด์ และออสเตรีย ร้อยละ 8



ภาพที่ 2.11 การกระจายตัวของโรงงานที่ใช้ระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของทั่วโลก
ที่มา: Verma, 2002

2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1) ข้อดีของเทคโนโลยีย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.)

1.1) ทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย

- เป็นเทคโนโลยีการบำบัดขยะมูลฝอยที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- สามารถแก้ปัญหากลิ่นเหม็น สัตว์พาหะนำโรคที่เกิดจากการกำจัดขยะมูลฝอยที่ไม่ถูกหลักวิชาการ
- เป็นการหมุนเวียนขยะมูลฝอยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของสารปรับสภาพดิน
- ลดการใช้พื้นที่ในการกำจัดขยะมูลฝอย เมื่อเทียบกับระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลและระบบหมักปุ๋ยแบบใช้อากาศแบบดั้งเดิม (Conventional Aerobic Composting)
- สามารถใช้บำบัดขยะมูลฝอยอินทรีย์ในที่ซึ่งการฝังกลบขยะมูลฝอยอินทรีย์ในพื้นที่ฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลไม่เป็นที่ยอมรับ
- สามารถลดปริมาณขยะมูลฝอยที่จะต้องกำจัดในขั้นตอนสุดท้าย
- สามารถหมักร่วมกับของเสียอินทรีย์ประเภทอื่น (Co-digestion) เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ต่างๆ และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.2) ทางด้านพลังงาน

- เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดขยะมูลฝอยซึ่งสามารถให้พลังงานสุทธิ (Net Energy Producer)
- มีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากขยะเปียก ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการเผาเพื่อผลิตพลังงาน มีศักยภาพที่จะได้รับผลตอบแทนทางการเงินและเศรษฐศาสตร์สูง โดยเฉพาะเมื่อพลังงานชนิดอื่นมีราคาสูง และรัฐมีมาตรการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพ

2) ข้อเสียของเทคโนโลยีย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (ชลิดา อุตะภา, 2548)

- ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบนาน เนื่องจากปฏิกิริยาการตอบสนองของจุลินทรีย์เป็นไปอย่างช้าๆ
- การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนเป็นไปได้อย่างช้า
- ต้องดูแลควบคุมระบบอย่างใกล้ชิดเป็นเวลานาน เนื่องจากความสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ไม่คงที่ มีกลิ่นเหม็นและมีสีดำเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.4 กระบวนการบำบัดเบื้องต้นของชีวมวล (Appels และคณะ, 2008)

กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกากตะกอนชีวภาพสามารถช่วยลดปริมาณของตะกอน ทำลายสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เพิ่มความเสถียรให้แก่กากตะกอน และผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพได้ แต่การประยุกต์ใช้การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาการหมัก ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20–30 วัน และประสิทธิภาพการลดลงของของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ต่ำ ประมาณร้อยละ 30–50 ดังนั้นถ้าเพิ่มขึ้นขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นของกากตะกอนก่อนเข้าสู่การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนก็จะสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นของกากตะกอน ได้แก่ การใช้ความร้อน การใช้วิธีทางกายภาพ การใช้วิธีทางเคมี และการใช้อุลตราซาวด์

2.4.1 การใช้ความร้อน

การใช้ความร้อนของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งโดยทั่วไปจะใช้ที่อุณหภูมิประมาณ 150–200 องศาเซลเซียส และมีความดันประมาณ 600–2,500 กิโลปาสกาล ซึ่งความร้อนจะทำลายพันธะเคมีของผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรน ซึ่งจะทำให้สารละลายภายในเซลล์ละลายออกมา โดยทั่วไปการบำบัดขั้นต้นด้วยอุณหภูมิช่วงมีโซฟิลิกจะสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนได้ดีกว่าใช้อุณหภูมิช่วงเทอร์โมฟิลิก

2.4.2 การใช้วิธีทางกายภาพ

การใช้วิธีทางกายภาพจะเป็นการใช้เครื่องบดทั้งแบบใช้เซรามิกและแบบใช้เม็ดแก้ว ทำลายเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยจะใช้การบดด้วยความเร็วสูง เพื่อทำลายผนังเซลล์ให้แตก ซึ่งวิธีทางกายภาพนี้จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายกากตะกอนต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

2.4.3 การใช้วิธีทางเคมี

การใช้วิธีทางเคมีเป็นการย่อยสลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของกากตะกอน ซึ่งจะเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำภายนอกเซลล์มากขึ้น โดยทั่วไปการใช้วิธีทางเคมีจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ การใช้สารกรดและสารด่าง และการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

1) การใช้สารกรดและสารด่าง

การใช้สารกรดและสารด่างจะช่วยเพิ่มการละลายของกากตะกอน โดยการเติมสารกรดและสารด่างจำเป็นจะต้องเติมที่อุณหภูมิสูง แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปานกลาง

2) การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การย่อยสลายกากตะกอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะใช้ออกซิเจนหรืออากาศที่อุณหภูมิสูง (260 องศาเซลเซียส) และความดันสูง (10 เมกะปาสกาล) ซึ่งจะทำให้สารละลาย

ส่วนใหญ่ที่อยู่ในภาคตะกอนละลายออกมา แต่การใช้ปุ๋ยกรียาออกซิเจนจะมีปัญหาเรื่องกลิ่น การกักร่อน และต้นทุนด้านพลังงานที่สูง

2.4.4 การใช้จุลินทรีย์ชีวภาพ

การใช้คลื่นเสียงในระดับพลังงานสูงจะทำลายเซลล์ของภาคตะกอนได้ร้อยละ 100 โดยหลักการบำบัดจะประกอบด้วยทำให้เซลล์เกิดโพรงอากาศ ซึ่งจะทำให้ของไหลภายในเซลล์ ขยายตัวออกจนเซลล์แตก โดยจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งระเหยง่ายได้ร้อยละ 40-50 และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 50

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล

กระทรวงพลังงาน, สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (2551) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการหมักย่อยร่วมระหว่างน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์และขยะเศษอาหาร โดยแ่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แยกน้ำค้างและหญ้าเนเปียร์ออกจากกัน โดยนำเฉพาะหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการแ่ค่างแล้วมาใช้ เพื่อตัดหรือลดทอน โครงสร้างโมเลกุลของสารที่ย่อยสลายยากพวกลิกนินให้ลดลง โดยทดลองระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าการหมักย่อยร่วมระหว่างน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 70:30 ของของแข็งระเหยง่าย และขยะเศษอาหารที่อัตราส่วนร้อยละ 40:60 ของของแข็งระเหยง่าย โดยถึง ปฏิกรณ์เอเอสบีอาร์ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน และการหมักย่อยร่วมระหว่างน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 70:30 ของของแข็งระเหยง่ายที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน และขยะเศษอาหารที่อัตราส่วนร้อยละ 40:60 ของของแข็งระเหยง่ายที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน โดยถึง ปฏิกรณ์เอเอสบีสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งระหว่างทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าของแข็งระเหยของขยะเศษอาหารมีค่าแปรปรวนตลอดระยะเวลาทำการทดลอง ส่งผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงที่กว้างมาก เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยจึงทำให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าลดลง ซึ่งไม่ได้หมายถึงว่าขยะเศษอาหารจะหมักย่อยยากกว่าหญ้า แต่อย่างไรเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีจะเห็นได้ว่าระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์จากขยะเศษอาหารได้ดีกว่าหญ้าเนเปียร์อย่างมีนัยสำคัญ และในระหว่างทำการทดลองระดับจำลอง ทางคณะผู้ดำเนินงานได้ทำการเลือกศึกษาการหมักย่อยร่วมระหว่างน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 70:30 ของของแข็งระเหยง่าย และขยะเศษอาหารที่อัตราส่วนร้อยละ 40:60 ของของแข็งระเหยง่ายที่ระยะเวลาพักเก็บที่เหมาะสม

Cai และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นของใบและช่ข้าวจ้าวโพดด้วยเกลืออนินทรีย์ ได้แก่ NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂, FeCl₂, FeCl₃, FeSO₄ และ Fe₂(SO₄)₃ เพื่อลดเคมีเซลลูโลสและเซลลูโลส พบว่าการบำบัดเบื้องต้นของใบและช่ข้าวจ้าวโพดด้วย FeCl₃ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 และ 200 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำร้อนเป็นระยะเวลา 20 นาที สามารถลดเคมีเซลลูโลสได้ประมาณร้อยละ 91 และร้อยละ 90 ตามลำดับ แต่จะลดเซลลูโลสได้เพียงร้อยละ 9 และน้อยกว่าร้อยละ 10 ตามลำดับ

Chen และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดใบและช่ข้าวจ้าวโพดด้วยวิธีทางเคมีเพื่อปรับปรุงการย่อยสลายเอนไซม์ โดยใช้กรดเจือจาง ปูนขาว แอมโมเนียละลายน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการบำบัดใบและช่ข้าวจ้าวโพดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง สามารถบำบัดเซลลูโลสได้ร้อยละ 81.2 ซึ่งจะก่อให้เกิดผลดีต่อการหมักก๊าซชีวภาพเมื่อบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่รบกวนต่อระบบการหมักจะลดน้อยลง

2.5.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอุตสาหกรรม

จิรวรรณ ชาลีวรรณ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้มับรรจุกระป๋อง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนชนิดขั้นตอนเดียว แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นถังเหล็กทรงกระบอก ปริมาตร 250 ลิตร และมีใบพัดกวนอยู่ภายในถัง วัสดุหมักที่นำมาศึกษาเป็นเศษเปลือกและแกนสับประรด โดยนำมาบดให้มีขนาด 1×1 เซนติเมตร แล้วป้อนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการเติมวันละ 1 ครั้ง อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ในช่วงเมโซฟิลิก ความดันภายในถังปฏิกรณ์ 200 มิลลิเมตรน้ำ แปรผันระยะเวลาเก็บกัก 15, 25, 40, 60 และ 90 วัน ควบคุมพีเอชไม่ให้ลดลงต่ำกว่า 7 โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ บอเนต ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะเวลาเก็บกักจะทำให้อัตราการเกิดก๊าซต่อสารอินทรีย์ที่ใช้และสัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 60 และ 90 วัน มีปริมาณจำเพาะของก๊าซที่เกิดขึ้น 0.302 และ 0.322 ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย ตามลำดับ และมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 40.24 และ 48.88 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษจากโซเดียมที่สะสมมากขึ้นทำให้เกิดสภาพที่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 15, 25 และ 40 วัน การทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน วัดค่าความเข้มข้นของโซเดียมได้มากกว่า 2,493 มก./ล. อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.157 ลบ.ม./วัน หรือ 0.682 ลบ.ม./ลบ.ม. ของถังปฏิกรณ์ ปริมาณจำเพาะของก๊าซที่เกิดขึ้น 0.302 ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย ปริมาณจำเพาะของก๊าซที่เกิดขึ้น 0.121 ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย (ก๊าซมีเทนร้อยละ 40.24) ปริมาณ

ของแข็งที่เผาไหม้ได้และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลดลงประมาณร้อยละ 85.71 และ 80.91 ตามลำดับ ตะกอนที่ออกจากระบบมีค่าอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน 12,312 มก./ล. และ 1,003 มก./ล. ตามลำดับ และอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนประมาณ 12.28 การทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 90 วัน วัดค่าความเข้มข้นของโซเดียมได้มากกว่า 1,655 มก./ล. อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.119 ลบ.ม./วัน หรือ 0.476 ลบ.ม./ลบ.ม. ของถังปฏิกรณ์ ปริมาณจำเพาะของก๊าซที่เกิดขึ้น 0.322 ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย ปริมาณจำเพาะของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น 0.157 ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย (ก๊าซมีเทน ร้อยละ 48.88) ปริมาณของแข็งที่เผาไหม้ได้และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน 10,782 มก./ล. และ 1,043 มก./ล. ตามลำดับ และอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนประมาณ 10.34

ทักษกณย์ วุฒิกุล (2549) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบวนการหมักน้ำเสียจากระบบยูเอสบีเป็นหัวเชื้อ การทดลองทำในขวดหมักขนาด 100 มิลลิลิตร และ 2 ลิตร การทดลองในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร แปรผันค่าของความเข้มข้นกากปาล์มเป็นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ค่าพีเอชที่ 5.8 และพีเอช 7.0 และอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการหมักในภาวะที่มีการเติมกากปาล์มความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พีเอช 5.8 และ 7.0 เกิดปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการทดลองกรณีอื่นๆ โดยที่พีเอช 5.8 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.46 มล./กรัม ของแข็งระเหย/วัน โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ 246.79 ± 7.27 ไมโครโมล หรือ 81.78 ± 2.41 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.32 มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 57.79 ± 4.16 ไมโครโมล หรือ 19.15 ± 1.38 มิลลิลิตร และที่พีเอช 7.0 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.60 มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซมีเทนจำนวน 320.08 ± 6.31 ไมโครโมล หรือ 106.07 ± 2.09 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.26 มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 47.35 ± 1.32 ไมโครโมล หรือ 15.69 ± 0.44 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้แปรผกผันกับปริมาณความเข้มข้นของกากปาล์มทุกภาวะของการทดลอง สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ได้เลือกใช้ภาวะที่มีการเติมกากปาล์ม พีเอชและอุณหภูมิที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด ในการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร จากการทดลองพบว่าที่พีเอช 5.8 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 8.33×10^{-4} มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซมีเทนจำนวน 3.86 ไมโครโมล หรือ 1.28 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.06 มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 255.44 ไมโครโมล หรือ 84.65 มิลลิลิตร และที่พีเอช 7.0 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ

3.15×10^{-3} มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซมีเทนจำนวน 16.30 ไมโครโมล หรือ 5.40 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.06 มล./กรัมของแข็งระเหย/วัน โดยเกิดก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 305.59 ไมโครโมล หรือ 101.26 มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร และขวดแก้วขนาด 2 ลิตร พบว่าการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพมากกว่าการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร

Chulhwan และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ผลการทดลองพบว่ากากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากากตะกอนที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งหลังจากการหมัก กากตะกอนที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีชีโอดีและปริมาณของแข็งระเหยลดลง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 85.9 และ 77.5 ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 0.52 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของแข็งระเหย หรือคิดเป็นองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับร้อยละ 79.5

Chunmin และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นกากตะกอนจากเชื้อกระดาษและกระดาษด้วยค้าง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8 กรัม/100 กรัมของแข็งของกากตะกอน ภายในถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร โครงสร้างของกากตะกอนกระดาษรวมตัวกันดีขึ้นและสามารถลดขนาดของเชื้อกระดาษให้เหลือขนาดเล็กกลงได้ หลังจากการบำบัดเบื้องต้นแล้ว ชีโอดีที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 83 และความเข้มข้นของกรดระเหยง่ายเพิ่มขึ้นเป็น 1,040 มิลลิกรัม/ลิตร รวมถึงปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.32 ลบ.ม. ของก๊าซมีเทน/กก. ของแข็งระเหยที่กำจัด ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 183.5

Emma และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษ โดยใช้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ 1) บำบัดเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยวิธีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส 2) บำบัดเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 12 และด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และ 3) บำบัดเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยคลื่นเสียงที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาษที่บำบัดด้วยอุณหภูมิที่สูงที่สุด (170 องศาเซลเซียส) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 50

2.5.3 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหาร

ปิยชน สังข์กลิ่นหอม (2545) ศึกษาการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารในถังปฏิกรณ์แบบท่อไหล ดังหมักมีปริมาตรใช้งาน 12 ลิตร ภายในติดตั้งแผ่นกั้น ซึ่งแบ่งถังหมักออกเป็นห้องย่อยๆ 20 ห้อง เพื่อป้องกันการไหลล้นของจรรยาในถังหมัก โดยศึกษาผลของการลดระยะเวลากำจัด (HRT) ความเข้มข้นของแข็งของขยะที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก และผลของพีเอชควบคุมที่ขาเข้าของถังหมักต่อประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์แบบท่อไหล ผลการศึกษาพบว่าผลของการลดระยะเวลากำจัด (HRT) จาก 20 วันเป็น 10 วัน และ 7 วัน โดยให้ปริมาณของแข็งในขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าถังหมักอยู่ที่ร้อยละ 1 โดยมีภาระการป้อนสารอินทรีย์ที่ 0.75, 1.50 และ 2.15 กก. ซีโอดี/ลบ.ม ตามลำดับ พบว่าที่ HRT 7-10 วัน มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดี คือมีการกำจัดซีโอดีร้อยละ 80-90 และมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน 0.11-0.14 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่กำจัด ส่วนการศึกษาเพิ่มความเข้มข้นของของแข็งของขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าถังหมักจากร้อยละ 2 เป็นร้อยละ 5 และ 10 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของแข็งที่สูงกะทันหันจากปริมาณของแข็งร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 จะมีผลทำให้ขั้นตอนการผลิตกรดและขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนภายในถังหมักไม่สมดุล โดยเกิดการผลิตกรดอินทรีย์สูงมากจนจุลินทรีย์ผลิตมีเทนไม่สามารถรับได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแข็งในขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักทีละน้อยที่ร้อยละ 2.5 และ 7.5 พบว่าที่ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 5 และ 7.5 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 75-85 และ 0.10-0.11 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่กำจัด ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นของของแข็งร้อยละ 7.5 มีอัตราการผลิตก๊าซสูงสุด ส่วนการศึกษาผลของการควบคุมค่าพีเอชที่ขาเข้าถังหมักที่ความเข้มข้นของของแข็งในขยะเศษอาหารที่ร้อยละ 7.5 และระยะเวลากำจัด (HRT) 10 วัน พบว่าเมื่อปรับพีเอชที่ขาเข้าถังหมักสูงขึ้นจากปกติที่พีเอช 4.5 เป็น 5.5 และ 6.5 ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต้นถังหมักไปเป็นกรดอินทรีย์สูงขึ้นจาก 10,000 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 22,000 และ 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้นตามไปด้วย จาก 0.11 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่กำจัด เป็น 0.15 และ 0.22 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่กำจัด ตามลำดับ แต่เมื่อปรับพีเอชที่ขาเข้าถังหมักสูงขึ้นเป็น 7.5 เกิดการผลิตกรดอินทรีย์สูงเกินกว่าที่จุลินทรีย์ในระบบสามารถรับได้ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำลง

อวัสดา ฉลานูวัฒน์ (2545) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อน อินทรีย์สารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหาร งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของ ระยะเวลาเก็บกัก อัตราการะสารอินทรีย์ ความถี่ในการเติมของเหลวต่อประสิทธิภาพการกำจัด อินทรีย์สารและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายขยะเศษอาหารด้วยระบบถังหมักไร้อากาศ โดยศึกษาการย่อยสลายของขยะเศษอาหารที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 4 ในถังหมักปริมาตร 9.63 ลิตร จำนวน 4 ถัง โดยกำหนดสภาวะต่างๆ คือ ทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 10, 15, 20 และ 25 วัน ซึ่งเทียบได้กับอัตราการะสารอินทรีย์ 14.10, 9.40, 7.05 และ 5.58 กรัมชีโอดี/ลิตร/วัน ตามลำดับ เมื่อเติมของเหลว 1 วัน/ครั้ง และอัตราการะสารอินทรีย์ 14.95, 9.97, 7.47 และ 5.92 กรัมชีโอดี/ลิตร/วัน ตามลำดับ เมื่อเติมของเหลว 3 วันต่อครั้ง ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด อินทรีย์สารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักมากขึ้น (อัตราการะสารอินทรีย์น้อยลง) และความถี่ ในการเติมของเหลวมากขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน (อัตราการะสารอินทรีย์ 7.05 กรัมชีโอดี/ลิตร/วัน) และมีความถี่ในการเติมของเหลว 1 วัน/ครั้ง มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเฉลี่ย 2.60 ลิตร/วัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 60.56 และมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ของแข็ง ทั้งหมด ของแข็งระเหยทั้งหมด และกรดระเหยง่ายเท่ากับร้อยละ 56.48, 52.39, 70.38 และ 27.03 ตามลำดับ

อาริษา วิรัชวรกุล (2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วย ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ นำขยะเศษอาหารจากโรงอาหารบดละเอียดด้วยเครื่องบดปั่นเงือกมาให้ได้ของเหลวที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 4 กำหนดค่าระยะเวลากำจัด (HRT) ของ ถังหมักก๊าซที่ 35, 30, 25 และ 20 วัน ซึ่งคิดเป็นอัตราการะสารอินทรีย์เป็น 5.77, 6.39, 8.30 และ 10.27 กรัมชีโอดี/ลิตร/วัน เมื่อวิเคราะห์สารละลายขยะเศษอาหารพบว่ามีอัตราส่วน BOD : N : P ของสารละลายขยะเศษอาหารประมาณ 100 : 4.54 : 0.71 เป็นอัตราส่วนที่สามารถบำบัดด้วย กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้โดยไม่ต้องเติมสารอาหารต่างๆ เพิ่ม เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างมีเทนต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราร้อยละ 11 และ 2 ของปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่ ตามลำดับ เมื่อคำนวณระบบพบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกัก เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยทั้งหมด และของแข็ง แขนวลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นมี แนวโน้มลดลงเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักน้ำมากขึ้น โดยระยะเวลาเก็บกักน้ำ 20 วัน มีปริมาณ ก๊าซชีวภาพทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 54.35 ลิตร/วัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 61.26

Forster-Carneiro และคณะ (2008) ศึกษาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในช่วงอุณหภูมิสูง (55 องศาเซลเซียส) ของขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชน ซึ่งแปรผันขยะที่นำมาทดลองเป็น 3 ถัง คือ ขยะเศษอาหารขนาด 2-6 มิลลิเมตร ขยะอินทรีย์จากขยะชุมชน ขนาด 30 มิลลิเมตร และขยะอินทรีย์จากขยะชุมชน ขนาด 2-6 มิลลิเมตร ทั้งหมดทดลองในสภาวะแห้ง (ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 20) ใส่หัวเชื้อในระบบร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ดำเนินการทดลองเป็นเวลา 90 วัน ในขั้นตอนเริ่มต้นระบบจะเกิดในช่วง 2-10 วัน ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (6 N NaOH) ให้พีเอชอยู่ประมาณ 8.5 หลังจากวันที่ 10 พีเอชค่อนข้างคงที่จึงไม่มีการเติมอีก ผลการศึกษาปรากฏว่าขยะเศษอาหารซึ่งมีการย่อยสลายน้อยที่สุด (การกำจัดของแข็งระเหยง่ายเป็นร้อยละ 32.4) มีการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด คิดเป็น 0.18 ลิตรมีเทน/กรัมของแข็งระเหยง่าย ในทางตรงกันข้ามเศษชิ้นส่วนของขยะชุมชนแสดงค่าการย่อยสลายมากที่สุด (การกำจัดของแข็งระเหยง่ายเป็นร้อยละ 73.7) ผลิตก๊าซมีเทนคิดเป็น 0.05 ลิตรมีเทน/กรัมของแข็งระเหยง่าย แสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนการเตรียมขยะไม่จำเป็นจะต้องย่อยขยะให้มีขนาดเล็กลง

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่มีขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตรมาใช้ในการทดลอง โดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นร้อยละ 4 และปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษก่อนดำเนินการทดลองด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยระบบหมักในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการทดลองแบบแบตช์ (Batch) ในระบบถังกวนสมบูรณ์ด้วยใบพัดตลอดเวลา เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) ปริมาตรร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ซึ่งทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยนำบักกากตะกอนเยื่อกระดาษขึ้นต้นด้วยวิธีทางฟิสิกส์และเคมี โดยเปรียบเทียบการให้ความร้อนก่อนทำการหมักที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส กับการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 รวมถึงนำกากตะกอนเยื่อกระดาษมาผสมกับขยะเศษอาหาร โดยแปรผันอัตราส่วนผสมของกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 ถังหมักแบบไร้ออกซิเจน ปริมาตรหมัก 5 ลิตร
- 3.2.2 ก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter)
- 3.2.3 หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ
- 3.2.4 เครื่องปั่นละเอียด
- 3.2.5 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
- 3.2.6 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC)

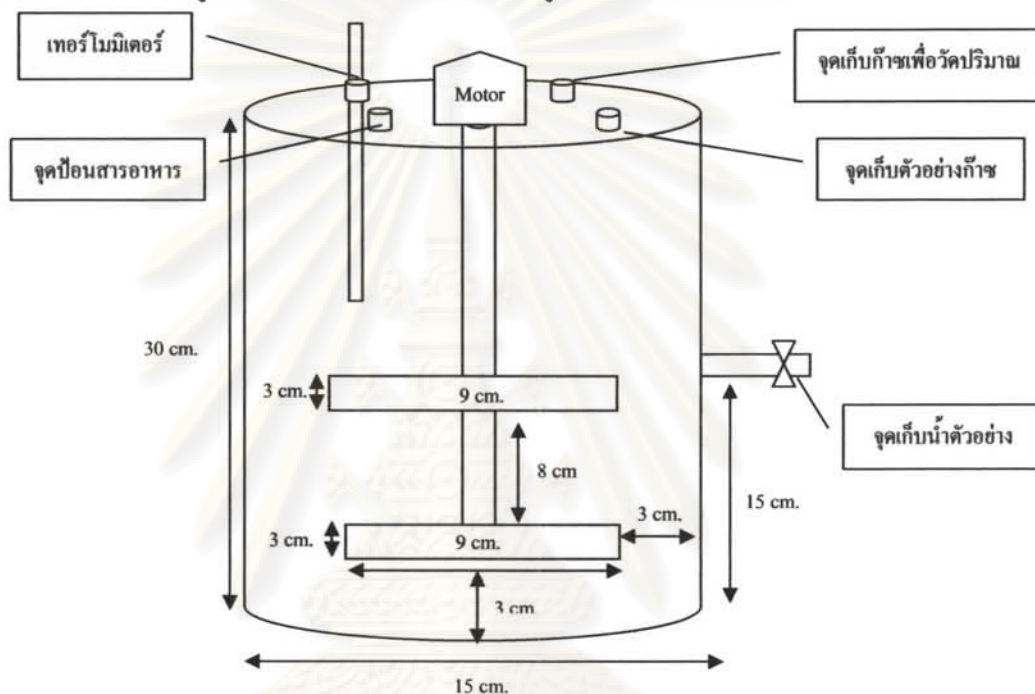
3.3 ระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน

3.3.1 ถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ (CSTR)

ตัวถังทำด้วยพลาสติกอะคริลิกใส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ฝาปิดมีประเก็นยางเพื่อป้องกันก๊าซรั่วซึมออกมา ยึดติดฝากับตัวถังด้วยน็อต ถังมีปริมาตรหมัก 5 ลิตร ภายในถังมีใบพัดกวนประกอบกันเป็นรูปกากบาท เพื่อใช้กวนขยะเศษอาหาร กากตะกอนเยื่อกระดาษ และหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) ให้ผสมกันอย่างทั่วถึง ใบพัดกวนจะถูกควบคุมการทำงานด้วยมอเตอร์ที่เปิดทำงานตลอดระยะเวลาการทดลอง ด้านบนของถังเจาะช่อง 4 ช่อง ช่องที่ 1 เสียบสายขงซิลิโคนของก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) เพื่อวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ช่องที่ 2 ต่อสายขงซิลิโคนแบบมีฝาปิด เพื่อเป็นช่องสำหรับเติมสารอาหารให้ระบบหมัก ช่องที่ 3 เสียบเทอร์โมมิเตอร์

สำหรับวัดอุณหภูมิภายในระบบ และช่องที่ 4 ช่องเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ บริเวณข้างถังหมักจะมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก่อนจะนำถังหมักไปใช้ทดลองจะต้องมีการตรวจสอบรอยรั่วบริเวณรอยต่อให้ดีก่อนเพื่อไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ระบบได้ โดยการใช้น้ำสบู่ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ จากนั้นเป่าลมเข้าสู่ถังหมัก หากมีรอยรั่วฟองสบู่จะขยายตัวขึ้น ให้อุดรอยรั่วโดยใช้กาวซิลิโคน และตรวจสอบซ้ำอีกประมาณ 2-3 ครั้ง รูปแบบของถังหมักแบบกวนสมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ถังหมักแบบกวนสมบูรณ์

ที่มา: อมรพรรณ แกมเงิน, 2551

3.3.2 ระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

ก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) เป็นเครื่องมือวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ทำจากอะครีลิกใส โดยใช้หลักการของการแทนที่น้ำ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะผ่านมาตามท่อจากวาล์วด้านบนจนถึงหมักผ่านหลอดแก้วรูปตัว U แล้วต่อกับก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) ภายในก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) จะมีกล่องอะครีลิกที่พลิกไปมาได้ เมื่อก๊าซชีวภาพบรรจุเต็มช่องว่างของกล่องอะครีลิกแล้วกล่องอะครีลิกก็จะพลิกกลับไปอีกด้านหนึ่ง จากนั้นเคาท์เตอร์จะนับจำนวนครั้งการพลิกของกล่องอะครีลิก ทำให้ทราบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ ระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร

1) นำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารบดให้มีขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร และร่อนด้วยตะแกรงร่อนดินเบอร์ 4

2) นำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผ่านการบดย่อยขนาดแล้ว มาผสมในอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร โดยแปรผันอัตราส่วน 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ซึ่งจะกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วเริ่มต้นกองที่ร้อยละ 4

3) วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผสมแล้ว ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณแอมโมเนีย (COD) และค่าความชื้น

3.4.2 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองจะแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

- 1) ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ
- 2) ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง
- 3) ศึกษาการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร
- 4) เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

3.5 การทดลอง

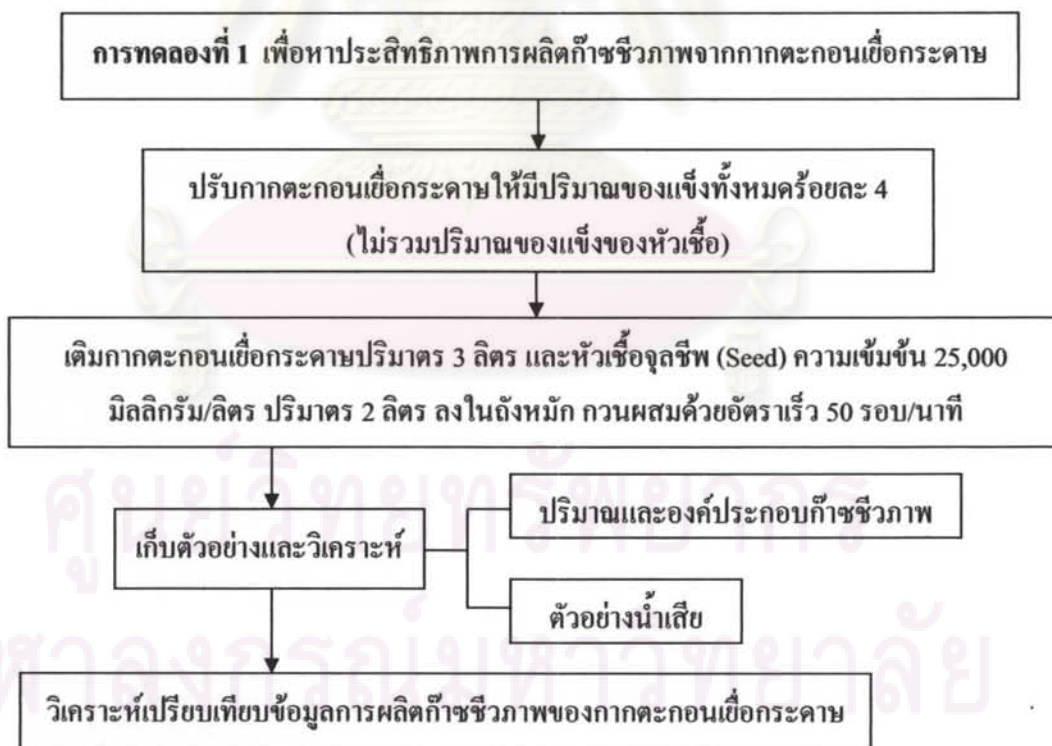
3.5.1 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

1) การเตรียมกากตะกอนเยื่อกระดาษ

เริ่มต้นโดยเติมหัวเชื้อจุลชีพ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณ ร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก จากนั้นนำกากตะกอนเยื่อกระดาษ โดยกำหนดปริมาณของแข็ง ทั้งหมดของกากตะกอนเยื่อกระดาษเริ่มต้นคงที่ร้อยละ 4 เทผสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของ ปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.3

2) ช่วงเดินระบบ

เดินระบบ โดยกวนให้ตัวอย่างกากตะกอนเยื่อกระดาษและหัวเชื้อจุลชีพผสมกัน ด้วยอัตราเร็ว 50 รอบ/นาที แล้วดำเนินการเก็บตัวอย่างจากระบบ โดยคูดของเหลวผสมปริมาณ 50 มิลลิลิตร ตัปดาห์ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ซีโอดี ปริมาณของแข็ง แขนวนลอย ปริมาณกรดระเหยง่าย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อ ความเป็นด่างทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง/ครั้ง ตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพจะเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง (ทุกๆ 10 วัน) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนและ ก๊าซอื่นๆ โดยวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 1 จำนวน/ครั้ง



ภาพที่ 3.3 ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

3.5.2 ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง

1) การเตรียมภาคตะกอนเยื่อกระดาษ

1.1) การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน

เริ่มต้นโดยนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ (Kim และคณะ, 2003) จากนั้นนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษมาทดลองต่อโดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของภาคตะกอนเยื่อกระดาษเริ่มต้นคงที่ร้อยละ 4 เทพสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก เติมหัวเชื้อจุลชีพ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.4

1.2) การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เริ่มต้นโดยนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษไปปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง (Chen และคณะ, 2009) จากนั้นนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษมาทดลองต่อโดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของภาคตะกอนเยื่อกระดาษเริ่มต้นคงที่ร้อยละ 4 เทพสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก เติมหัวเชื้อจุลชีพ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.4

1.3) การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เริ่มต้นโดยนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำภาคตะกอนเยื่อกระดาษมาทดลองต่อโดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของภาคตะกอนเยื่อกระดาษเริ่มต้นคงที่ร้อยละ 4 เทพสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก เติมหัวเชื้อจุลชีพ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.4

2) ช่วงเดินระบบ

นำกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแต่ละวิธีตามข้อ 1.1-1.3 มาทดลองต่อ ซึ่งจะมีชุดควบคุม คือ กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น เดินระบบโดยกวนให้ตัวอย่างกากตะกอนเชื้อกระดาษและหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมกันด้วยสัดส่วนเดียวกับการทดลองที่ 1 กวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบ/นาที แล้วดำเนินการเก็บตัวอย่างจากระบบ โดยดูดของเหลวผสมปริมาณ 50 มิลลิลิตร สัปดาห์ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณกรดระเหยง่าย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง/ครั้ง ตัวอย่างก๊าซชีวภาพจะเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง (ทุกๆ 10 วัน) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ โดยวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง/ครั้ง



ภาพที่ 3.4 ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.5.3 ศึกษาการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

1) การเตรียมกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร

เริ่มต้นโดยนำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารไปบดให้มีขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร (Forster-Carneiro และคณะ, 2008) ร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดขนาดของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร จากนั้นนำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารมาแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วเริ่มต้นคงที่ร้อยละ 4 เทผสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ช่วงเดินระบบ

นำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผสมตามอัตราส่วนแล้วมาทดลองต่อเดินระบบ โดยกวนให้ตัวอย่างกากตะกอนเยื่อกระดาษ ขยะเศษอาหาร และหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมกันด้วยตัวสัดส่วนเดียวกับการทดลองที่ 1 กวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบ/นาที แล้วดำเนินการเก็บตัวอย่างจากระบบ โดยคูดของเหลวผสมปริมาณ 50 มิลลิลิตร สัปดาห์ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณกรดระเหยง่าย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง/ครั้ง ตัวอย่างก๊าซชีวภาพจะเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง (ทุกๆ 10 วัน) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ โดยวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง/ครั้ง



ภาพที่ 3.5 ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร
ที่ผสมกันด้วยอัตราส่วนต่างๆ

3.5.4 เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

1) การเตรียมกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหาร

เริ่มต้นโดยนำกากตะกอนเยื่อกระดาษไปผ่านความร้อนและแห้งด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วมาผสมกับขยะเศษอาหารด้วยอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหารเท่ากับ 1:1 และมาทดลองต่อ โดยกำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วเริ่มต้นกองที่ร้อยละ 4 เทผสมในถังหมักปริมาณร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ลงถังหมักปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ปิดฝาถังหมักให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ พร้อมวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะเริ่มระบบ ดังภาพที่ 3.6



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ช่วงเดินระบบ

นำกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมกับขยะเศษอาหารตามอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 มาทดลองต่อ เดินระบบ โดยกวนให้ตัวอย่างกากตะกอนเยื่อกระดาษ ขยะเศษอาหาร และหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมกันด้วยสัดส่วนเดียวกับการทดลองที่ 1 กวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบ/นาที แล้วดำเนินการเก็บตัวอย่างจากระบบ โดยดูดของเหลวผสมปริมาณ 50 มิลลิลิตร สัปดาห์ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง/ครั้ง ตัวอย่างก๊าซชีวภาพจะเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง (ทุกๆ 10 วัน) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ โดยวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง/ครั้ง



ภาพที่ 3.6 ผังการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่สภาวะที่เหมาะสม

3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

3.6.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้คงที่ในการวิจัย ได้แก่

- หัวเชื้อจุลชีพ (Seed) จากถังย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ความเข้มข้น 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตรร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก

- ถังหมัก ปริมาตรหมัก 5 ลิตร
- อัตราการกวนของใบพัด ความเร็ว 50 รอบ/นาที
- ขนาดกากตะกอนเชื้อกระดาษและขยะเศษอาหารน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2

3.6.2 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรต้นในการวิจัย ได้แก่

- อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร โดยแปรผันอัตราส่วน 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4

- อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่กากตะกอนเชื้อกระดาษ คือ 125 องศาเซลเซียส และชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 และชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.6.3 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่

- วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเชื้อกระดาษและขยะเศษอาหาร ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน (COD) และค่าความชื้น โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง

- วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากถังหมัก ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าซีโอดี (COD) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) ปริมาณกรดระเหยง่าย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง/ครั้ง และวิเคราะห์คุณสมบัติของก๊าซ คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ โดยจะวิเคราะห์จำนวนตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง/ครั้ง

3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล

3.7.1 การเก็บตัวอย่าง

- เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังหมัก โดยใช้หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซต่อกับจุดเก็บตัวอย่างก๊าซ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC)

- เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากการหมักจากจุดเก็บตัวอย่างด้านข้างถังหมัก โดยเก็บประมาณ 50 มิลลิลิตร/การวิเคราะห์ 1 ครั้ง

3.7.2 การวิเคราะห์ผล

นำตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากการหมักมาวิเคราะห์ผล โดยใช้วิธีวิเคราะห์และความถี่ของการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์และความถี่ของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ของการวิเคราะห์
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	สัปดาห์ละ 5 วัน
ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช	สัปดาห์ละ 5 วัน
ค่าซีโอดี	วิธีฟลักซ์แบบปิด*	สัปดาห์ละ 3 วัน
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส*	สัปดาห์ละ 3 วัน
ปริมาณกรดระเหยง่าย	วิธีไทเทรต*	สัปดาห์ละ 3 วัน
ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด	วิธีไทเทรต*	สัปดาห์ละ 3 วัน
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	เครื่องก๊าซมิเตอร์	ทุกวัน
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี	3 ครั้ง

หมายเหตุ *วิธีและเทคนิควิเคราะห์จากคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (คณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2545)

3.8 การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

3.8.1 การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมัก

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะผ่านไปตามท่อจากวาล์วด้านบนถังหมัก ผ่านหลอดแก้วรูปตัว U แล้วต่อกับก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) ภายในก๊าซมิเตอร์ (Gas Meter) จะมีกล่องอะครีลิกที่พลิกไปมาได้ เมื่อก๊าซชีวภาพบรรจุเต็มช่องว่างของกล่องอะครีลิกแล้ว กล่องอะครีลิกก็จะพลิกกลับไปอีกด้านหนึ่ง จากนั้นเคาท์เตอร์จะนับจำนวนครั้งการพลิกของกล่องอะครีลิก ทำให้ทราบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้

3.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

หลังเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพใส่หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซแล้ว นำก๊าซชีวภาพไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อวิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC Model HP-5890 Series II Flame Ionization Detector (FID)

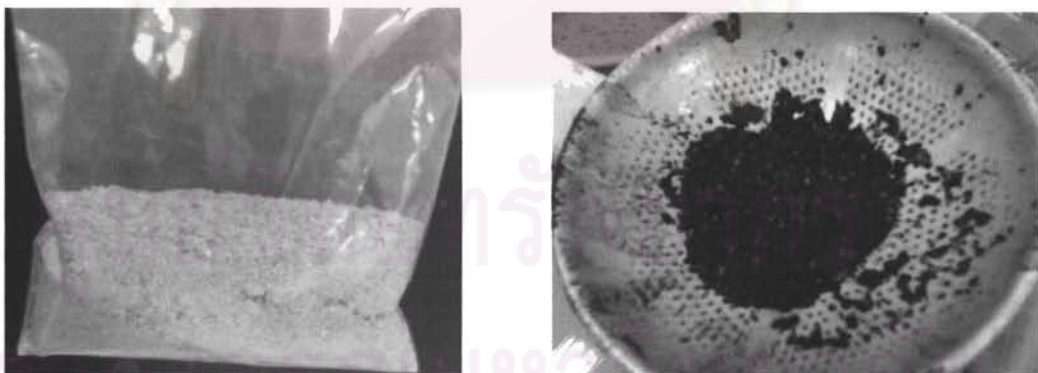
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ

กากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นกากตะกอนแห้งที่ผ่านเครื่องรีดตะกอนแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมัน ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีพบว่าปริมาณลิกนินน้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นใยของวัตถุดิบประเภทต่างๆ เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ไม้ไผ่ ยูคาลิปตัส เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปเส้นใยจากวัตถุดิบดังกล่าวจะมีปริมาณลิกนินอยู่ที่ร้อยละ 19–30 (UNEP, 1996) อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษประเภทการผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมันมีการผสมเศษกระดาษที่ใช่แล้ว จึงทำให้ปริมาณลิกนินจากเส้นใยลดลง แต่กลับพบว่าปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยจากวัตถุดิบประเภทดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ที่ร้อยละ 35–64 (UNEP, 1996) โดยปริมาณที่มากเกินไปของเซลลูโลสจะส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพลดลง เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง จึงทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ยาก (Foqelbolm, 2000) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดพบว่ามีปริมาณน้อย แสดงว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนเยื่อกระดาษที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนมีน้อย และการเกิดก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักกากตะกอนเยื่อกระดาษอาจใช้ระยะเวลาาน เนื่องจากอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนที่มากเกินไปจะส่งผลให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบช้าลง ซึ่งโดยทั่วไปอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนควรอยู่ประมาณร้อยละ 20–30:1 (สุพิศ ไกรมาก, 2546) ดังตารางที่ 4.1

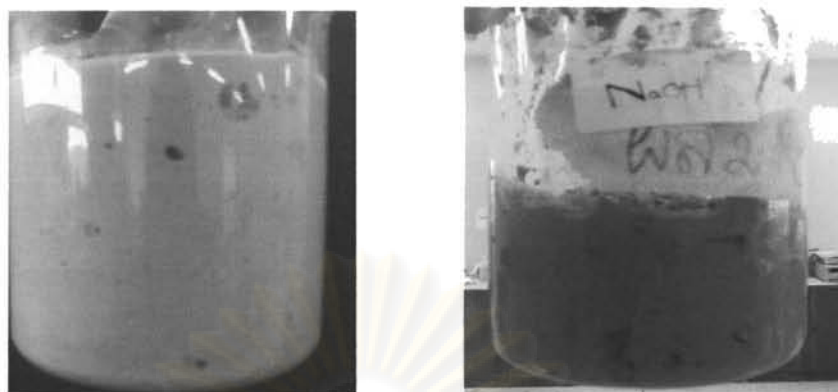


ภาพที่ 4.1 กากตะกอนเยื่อก่อนและหลังกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ลักษณะสมบัติทางเคมี	ร้อยละ
ปริมาณลิกนิน	9.1
ปริมาณเซลลูโลส	93.9
ปริมาณความชื้น	33.54
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	66.46
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	30.71
ปริมาณเถ้า	35.75
ปริมาณคาร์บอน	17.06
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.135
อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน	126.37

เมื่อนำกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2, และปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีพบว่าปริมาณลิกนินลดลงมาก ซึ่งลิกนินนั้นเป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกที่มีโครงสร้างแข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเมื่อผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วจึงพบว่าสารอินทรีย์อยู่ในรูปที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น (อิสรี รอดทัศนาศ, 2550) เช่นเดียวกับปริมาณเซลลูโลสที่เมื่อกากตะกอนเยื่อกระดาษผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วจะถูกเปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็นน้ำตาลโมลกุลเชิงเดี่ยว ทำให้จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น (ทัศนีย์ เจียรพสุอนันต์, 2545) ปริมาณความชื้นพบว่าเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษสามารถเพิ่มระดับความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนสารอินทรีย์และแพร่กระจายเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (ปิยชน สังข์กลิ่นหอม, 2545) โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60–80 (สกานต์ ศิริมะณีวัฒนา และวรรณะ ชมศร, 2548) ส่วนปริมาณคาร์บอนพบว่าลดลง แต่มีปริมาณมากเกินพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้คาร์บอนได้เพียงร้อยละ 2–5 เพื่อนำไปใช้สร้างเซลล์ (สุพิศ ไกรมาก, 2546) ดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กากตะกอนเยื่อที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนดำเนินการทดลอง ด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ก่อนดำเนินการทดลอง

ลักษณะสมบัติทางเคมี	ชุดควบคุม	ร้อยละ		
		ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อน	ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ปริมาณลิกนิน	9.1	8.9	4.9	5.1
ปริมาณเซลลูโลส	93.9	93.7	91.8	90.1
ปริมาณความชื้น	33.54	47.43	74.17	74.19
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	66.46	52.57	25.83	25.81
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	30.71	32.56	10.17	10.72
ปริมาณเถ้า	35.75	20.01	15.66	15.09
ปริมาณคาร์บอน	17.06	18.09	5.65	5.96
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.135	0.266	0.021	0.028
อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน	126.37	68.00	269	213

เมื่อนำกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่บดละเอียดแล้วมาผสมกันด้วยอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหารเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีก่อนดำเนินการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณขยะเศษอาหารจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งขยะเศษอาหารสามารถเพิ่มระดับความชื้นของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนสารอินทรีย์และแพร่กระจายเชื้อจุลินทรีย์ได้ (ปิยชน สังข์กลิ่นหอม, 2545) โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60–80 (สกานต์ ศิริระณีวัฒนา และวรรณะ ชมศร, 2548) และสามารถปรับอัตราส่วนของคาร์บอน/ไนโตรเจนให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 20:30–1 (สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา), 2551) ซึ่งอัตราส่วนของคาร์บอน/ไนโตรเจนที่เหมาะสมจะส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถดำรงชีพและเจริญเติบโตได้ดีขึ้น โดยจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ใน ไตรเจนเพื่อสร้างเซลล์ (สุพิศ ไกรมาก, 2546) แต่ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณเถ้าลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าขยะเศษอาหารมีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายง่ายเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก และส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพเกือบทั้งหมด เช่น เศษผัก ผลไม้ เศษอาหาร เป็นต้น แต่ต้องใช้ระยะเวลาานเนื่องจากมีปริมาณลิกนินและเซลลูโลสจำนวนมาก จึงส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาช้าลง โดยจะสามารถย่อยสลายได้ดีในช่วงหลังของการเกิดปฏิกิริยา (ชลิตา อุตะเกา, 2548) ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่อัตราส่วนต่างๆ

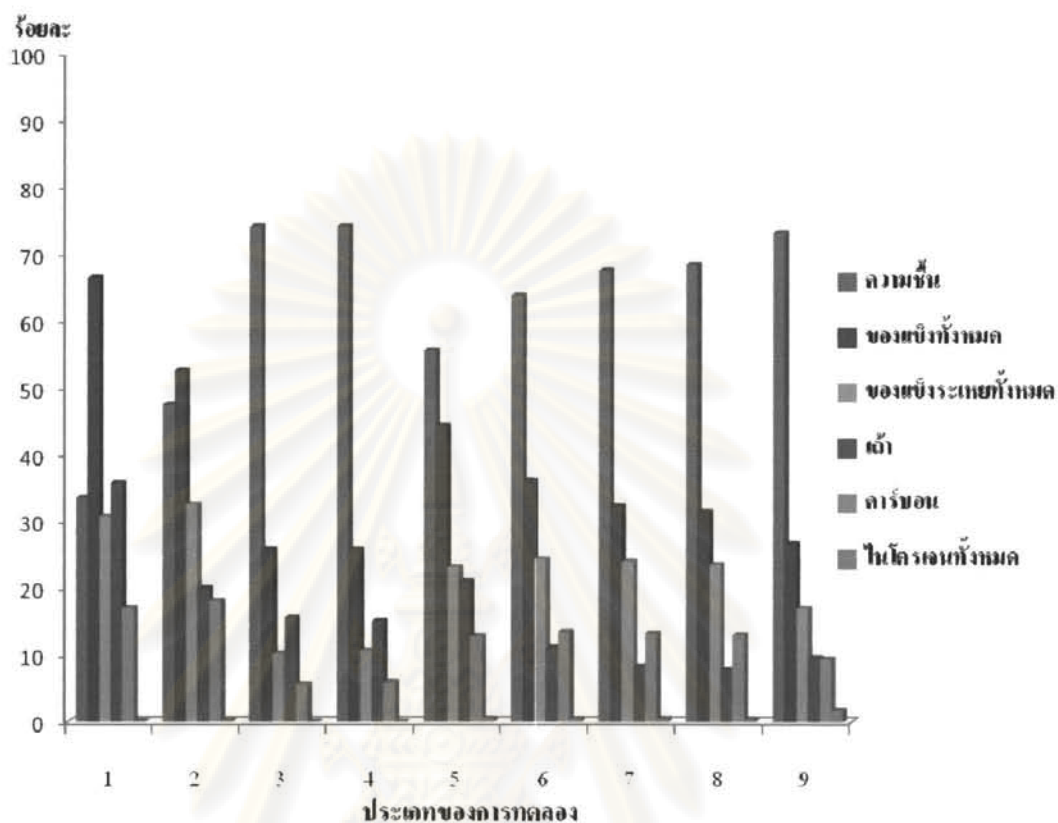
ลักษณะสมบัติทางเคมี	ร้อยละ				
	1:0	1:1	1:2	1:3	1:4
ปริมาณความชื้น	33.54	55.63	63.87	67.64	68.54
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	66.46	44.37	36.13	32.36	31.46
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	30.71	23.19	24.39	24.03	23.60
ปริมาณเถ้า	35.75	21.18	11.17	8.33	7.86
ปริมาณคาร์บอน	17.06	12.88	13.55	13.35	13.11
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.135	0.562	0.478	0.554	0.363
อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน	126.37	22.92	28.35	24.10	36.12

เมื่อนำกากตะกอนเยื่อกระดาษมาหาสภาวะที่เหมาะสม โดยนำกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองผสมกับขยะเศษอาหารที่อัตราส่วน 1:1 มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีพบว่าปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แต่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนสารอินทรีย์และแพร่กระจายเชื้อจุลินทรีย์ได้ (ปิยชน สังข์กลิ่นหอม, 2545) ซึ่งระดับความชื้นที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60–80 (สแกนต์ สิริระณีวัฒนา และวรรณะ ชมสร, 2548) แต่สภาวะดังกล่าวจะทำให้อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนลดลงมาก โดยอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนที่น้อยกว่าร้อยละ 20–30:1 จะส่งผลให้การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเกิดกลิ่นเหม็น แต่ไม่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (สุพิศ ไกรมาก, 2546) ซึ่งจากตารางที่ 4.4 จะพบว่าอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองผสมกับขยะเศษอาหารที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าประมาณร้อยละ 5 ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม

ลักษณะสมบัติทางเคมี	ร้อยละ		
	เยื่อกระดาษไม่ปรับสภาพ	เยื่อกระดาษปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	เยื่อกระดาษปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พร้อมผสมขยะเศษอาหาร
ปริมาณความชื้น	33.54	74.19	73.29
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	66.46	25.81	26.71
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	30.71	10.72	17.09
ปริมาณเถ้า	35.75	15.09	9.62
ปริมาณคาร์บอน	17.06	5.96	9.49
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.135	0.028	1.80
อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน	126.37	212.86	5.27

4.2 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางเคมีจากชุดการทดลอง



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางเคมีของชุดการทดลอง

หมายเหตุ

1 = กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ชุดควบคุม)

2 = กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อน

3 = กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4 = กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

5 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:1)

6 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:2)

7 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:3)

8 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:4)

9 = กากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมขยะเศษอาหารอัตราส่วน 1:1

4.3 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

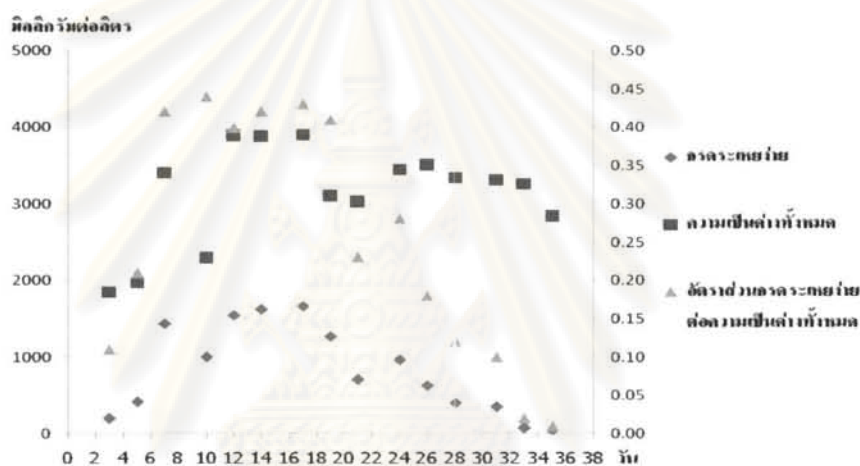
จากการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ กำหนดให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 สามารถคำนวณปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้เท่ากับ 180.56 กรัม โดยคิดจากปริมาณของแข็งทั้งหมดของกากตะกอนเยื่อกระดาษร้อยละ 66.46

เมื่อดำเนินการทดลองหลังจากใส่วัตถุดิบทุกอย่างลงในถังหมักแล้ว ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่าพีเอชของระบบมีแนวโน้มลดลงในช่วง 10 วันแรก เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดระเหยง่าย ซึ่งสอดคล้องกับกราฟของกรดระเหยง่าย โดยพบว่ากรดระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงวันที่ 17 (1,665 มิลลิกรัม/ลิตร) จากนั้นจึงเริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากกรดระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์ในถังหมักนำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นระบบจึงค่อยๆ ปรับสมดุลให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้น (6.73–7.57) และเมื่อพิจารณาซีโอดีพบว่าปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้นของการเดินระบบ เนื่องจากระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ดี จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนจากสารอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ระยะเวลาเดินระบบ 31 วัน) มีปริมาณเท่ากับ 5,060 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 91.25 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด โดยการทดลองนี้พบว่าจะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนาน เนื่องจากกากตะกอนเยื่อกระดาษมีลิกนินและเซลลูโลสปริมาณมาก ซึ่งโครงสร้างของลิกนินและเซลลูโลสมีการยึดจับตัวต่อกันด้วยพันธะที่แข็งแรงเป็น โพลีเมอร์สายยาว ดังนั้นอัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาจึงช้าลงและจะเกิดขึ้นในช่วงหลังของการทำปฏิกิริยา เพราะต้องใช้เวลาในการย่อยสลายพันธะของโซ่โพลีเมอร์ โดยจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (ชลิตา อู่ตะเภา, 2548)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ซึ่งหาองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซอื่นๆ พบว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 64.99 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 35.01 โดยองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากก๊าซชีวภาพถือว่าเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1984)



ก) พืชและอุณหภูมิ

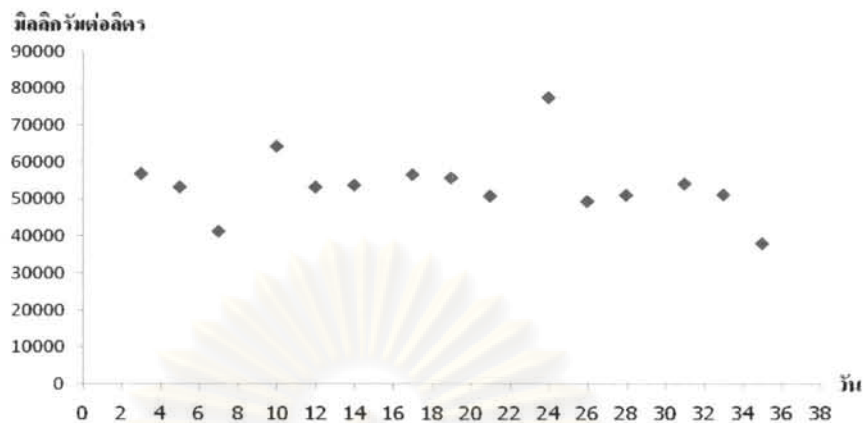


ข) กรดระเหยง่าย ความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด

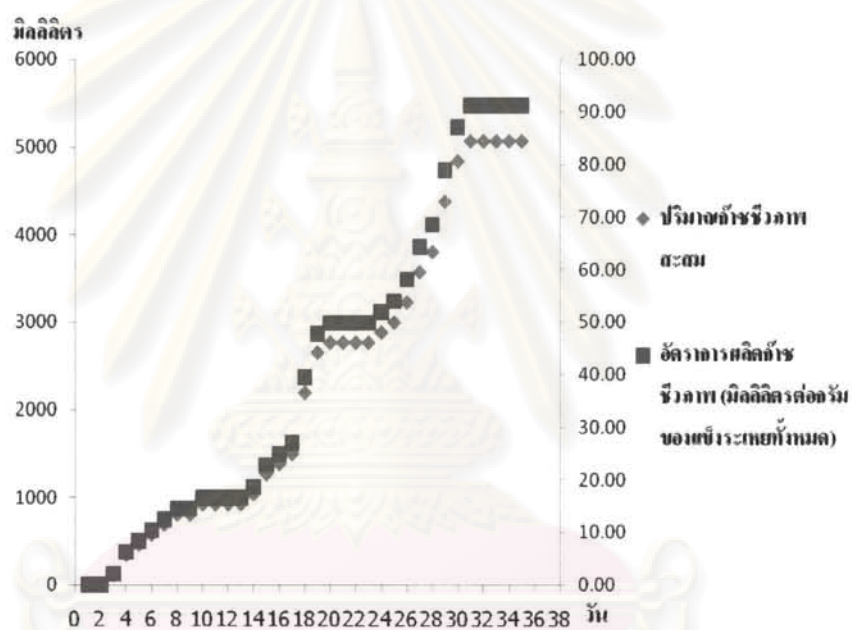


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกักตะกอนเยื่อกระดาษ



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากผลการทดลองภาคก่อนเยื่อกระดาษ (ต่อ)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน ดังนั้นจึงศึกษาทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง เพื่อลดปริมาณลิกนินและเซลลูโลสที่อยู่ในกากตะกอนเยื่อกระดาษให้อยู่ในโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยกำหนดให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษคิดเป็นน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง

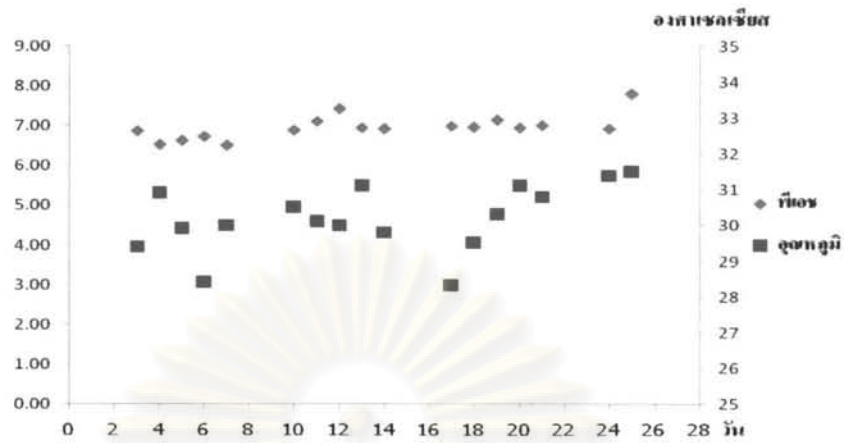
การปรับสภาพเบื้องต้น กากตะกอนเยื่อกระดาษ	ของแข็งทั้งหมดของ กากตะกอนเยื่อกระดาษ (ร้อยละ)	น้ำหนักกากตะกอน เยื่อกระดาษที่ใช้ (กรัม)
การปรับสภาพด้วยการให้ความร้อน	52.57	228.27
การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	25.83	464.58
การปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	25.81	464.94

4.4.1 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อน

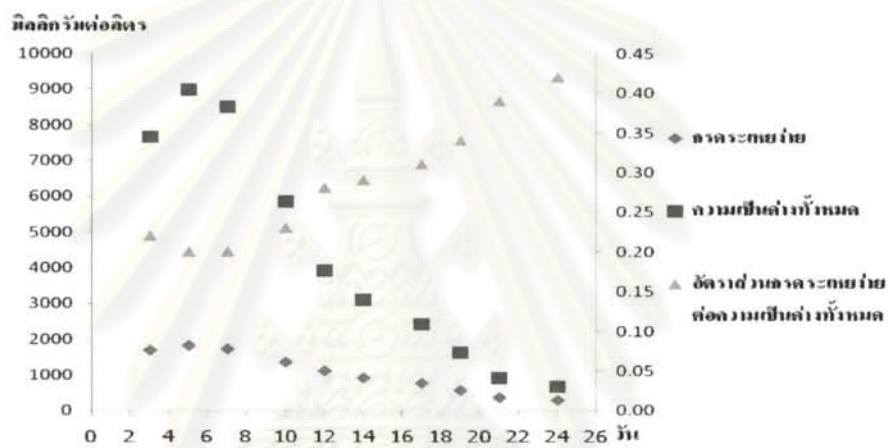
การทดลองนี้จะเป็นการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษก่อนหมักด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อดำเนินการทดลองหลังจากใส่วัตถุดิบทุกอย่างลงถังหมักแล้ว ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่าพีเอชของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนมีแนวโน้มลดลงในช่วง 10 วันแรก เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดระเหยง่าย ซึ่งสอดคล้องกับกราฟกรดระเหยง่าย โดยพบว่าปริมาณกรดระเหยง่ายจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มทดลองจนถึงวันที่ 7 (1,725 มิลลิกรัม/ลิตร) จากนั้นจึงเริ่มมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนนำกรดระเหยง่ายไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นระบบจึงปรับสมดุล ทำให้พีเอชของระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (6.90–7.81) ส่วนปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดพบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในการเตรียมสารอาหารที่ใช้ทดลอง พีเอชของระบบอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง

(6.8–7.2) จึงไม่มีการเติมค้างเข้าสู่ระบบ ซึ่งเมื่ออัตราการเกิดครกระเหยง่ายเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่าสภาพความเป็นค้างที่เกิดขึ้น จึงทำให้ระบบเสียดสมดุล และส่งผลให้อัตราส่วนครกระเหยง่ายต่อความเป็นค้างทั้งหมดมีค่ามากกว่า 0.4 ซึ่งจะทำให้ความเสถียรของระบบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำลง เมื่อพิจารณาซีโอคิพบว่าปริมาณเพิ่มสูงขึ้นใน 12 วันแรก เนื่องจากการย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นกลูโคสและครกระเหยง่าย และในการทดลองพบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาศที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 7,590 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 102.13 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ซึ่งสูงกว่ากากตะกอนเชื้อกระดาศควบคุมร้อยละ 11.92 เนื่องจากกากตะกอนเชื้อกระดาศที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนดำเนินการทดลองจะมีโครงสร้างของเส้นใยที่รวมตัวกันดีขึ้นและขนาดของเส้นใยลดลง จึงทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Chunmin และคณะ, 2009) ซึ่งใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 21 วัน โดยระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองพบว่าสั้นกว่าชุดควบคุม เนื่องจากลิกนินและเซลลูโลสที่อยู่ในกากตะกอนเชื้อกระดาศถูกเปลี่ยนจากโพลีเมอร์สายยาวที่มีพันธะแข็งแรงให้เป็นโพลีเมอร์สายสั้นประเภทน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยวที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น จึงทำให้อัตราการย่อยสลายจุลชีพในระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้นได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา

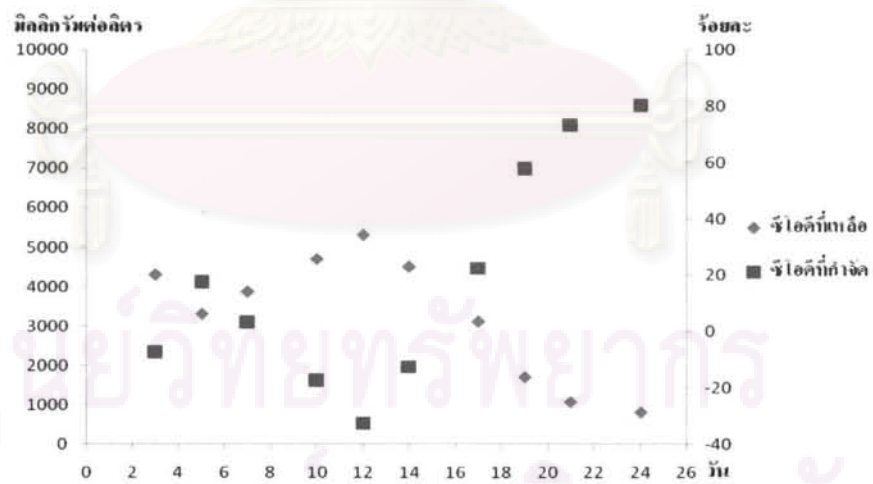
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาศที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนก่อนดำเนินการทดลองมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 42.20 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 57.80 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนต่ำกว่า อาจเนื่องจากค่าอัตราส่วนครกระเหยง่ายต่อความเป็นค้างทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้นหลังวันที่ 12 จนมีค่าสูงกว่า 0.4 ในช่วงสุดท้ายของการทดลอง ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งสภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน จึงทำให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ได้น้อยลง (Chynoweth และคณะ, 2001) ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการทดลองของ Espinosa Llorens Ma. Del และคณะ ที่ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของขยะชุมชนที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าขยะชุมชนที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด (Espinosa Llorens Ma. Del และคณะ, 2008) และการทดลองของ Chulhwan และคณะ ที่ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ด้วยวิธีทางชีวภาพและการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาศที่ไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้นจะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 0.29 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด (Chulhwan และคณะ, 2005)



ก) พืชและอุณหภูมิ

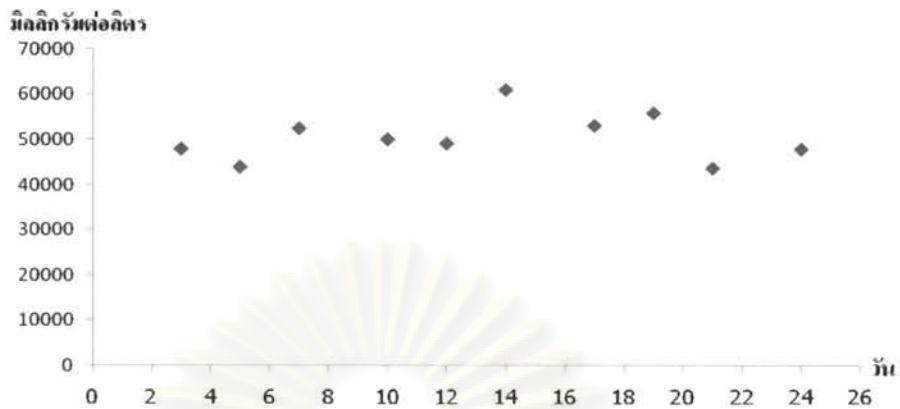


ข) การระเหยง่าย ความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนการระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด

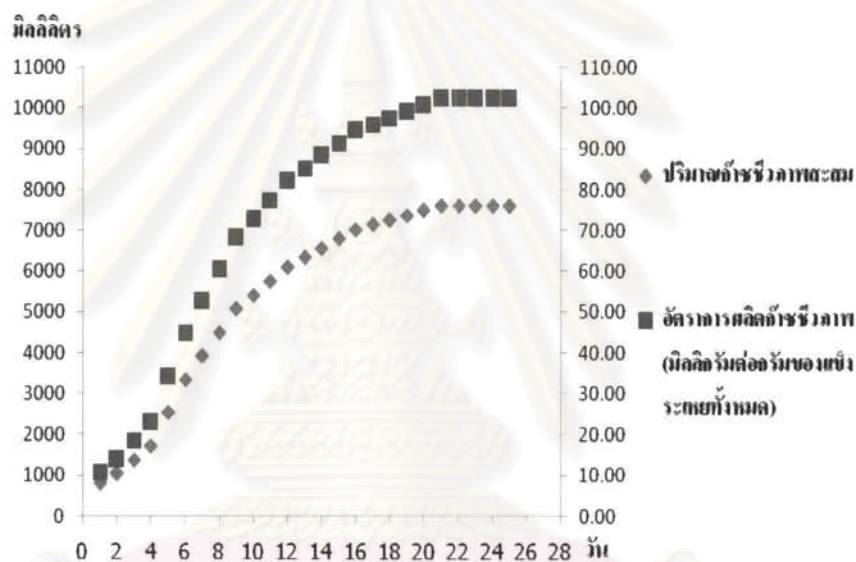


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกักตะกอนเชื้อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน



ง) ปริมาณของแก๊สแวนลอย



จ) ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ

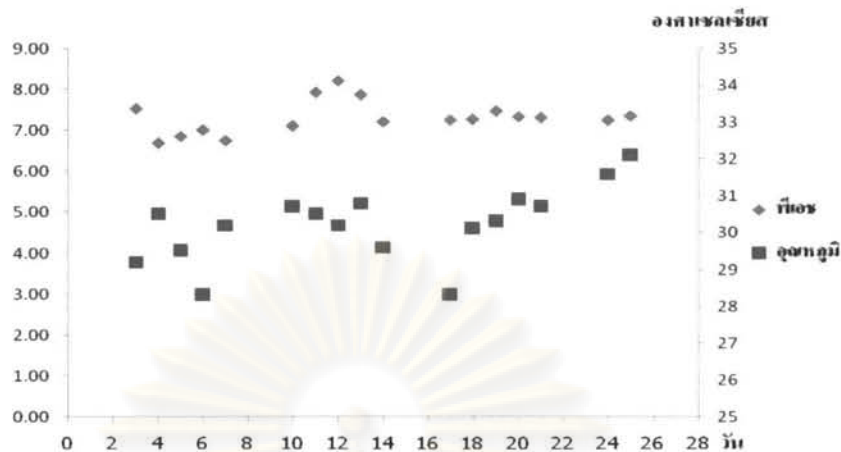
ภาพที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองภาคตะกอนเยื่อกระดาษ ที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน (ต่อ)

4.4.2 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

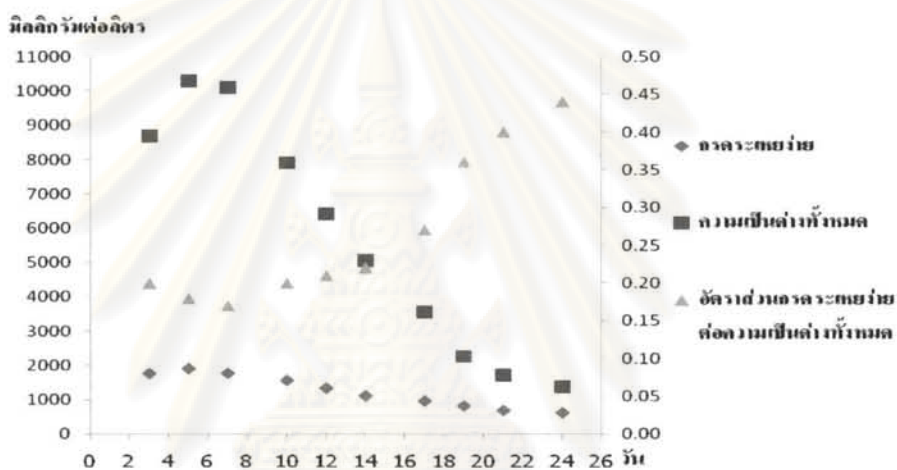
การทดลองนี้เป็นการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษก่อนดำเนินการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่ามีความไวต่อมลพิษใกล้เคียงกับชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อน ดังภาพที่ 4.6 แต่พบว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 8,280 มิลลิลิตร ซึ่งใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 22 วัน หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 175.24 มิลลิลิตร/กรัม ของแข็งระเหยทั้งหมด ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมและชุดที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร้อยละ 92.04 และ 71.59 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยปรับสมดุลลิกนินและเซลลูโลสได้มากกว่าการใช้ความร้อนในการปรับสภาพเบื้องต้น โดยเปลี่ยนลิกนินและเซลลูโลสให้เป็นโพลีเมอร์สายสั้นประเภทน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยวที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งพบว่าปริมาณลิกนินและเซลลูโลสที่มากจะลดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นปริมาณลิกนินและเซลลูโลสที่ลดลงจะส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 45.23 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 54.77 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนต่ำกว่า เนื่องจากเมื่อลิกนินและเซลลูโลสถูกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยวแล้วจะเพิ่มไฮโดรเจนให้แก่ระบบ ดังนั้นภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมากจะส่งผลให้ความดันพาร์เชียลในระบบมากกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และมากกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติกตามลำดับ ซึ่งจะทำให้การใช้กรดอะซิติกของจุลินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซมีเทนน้อยลง (อิสรี รอดทัศนาศนา, 2550)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) พืชมอร์และอุณหภูมิ

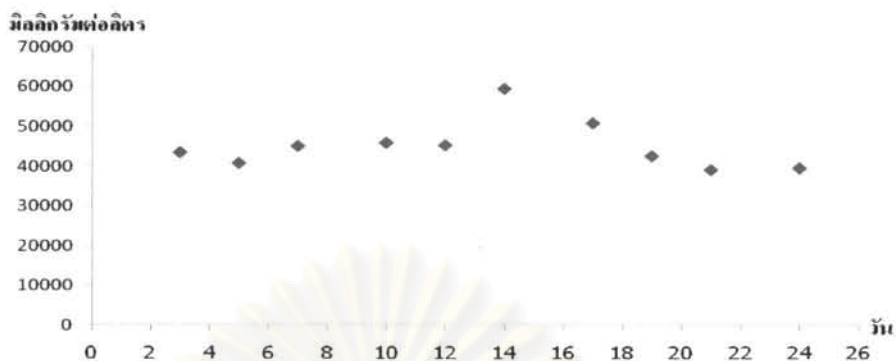


ข) กรดอะซิติก ความเข้มข้นทั้งหมด และอัตราส่วนกรดอะซิติกต่อความเข้มข้นทั้งหมด

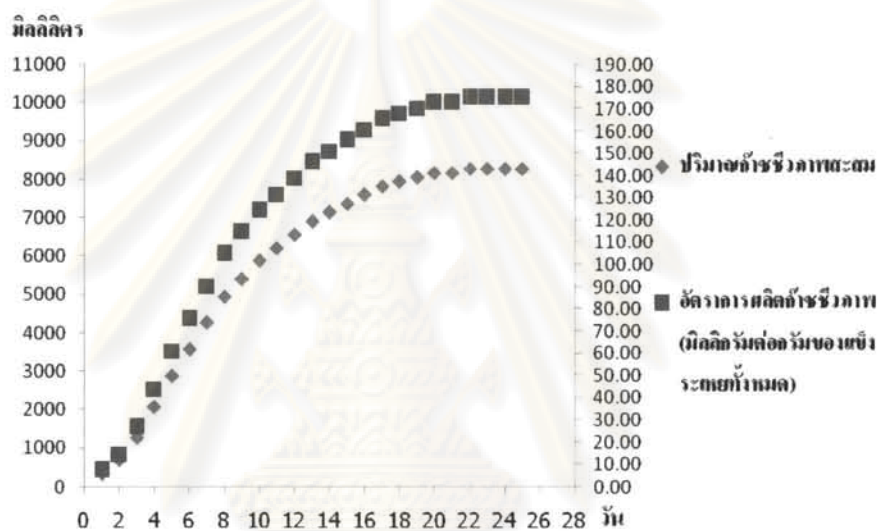


ค) ซีไอที

ภาพที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกาคตะกอนเยื่อกระดาษที่รับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

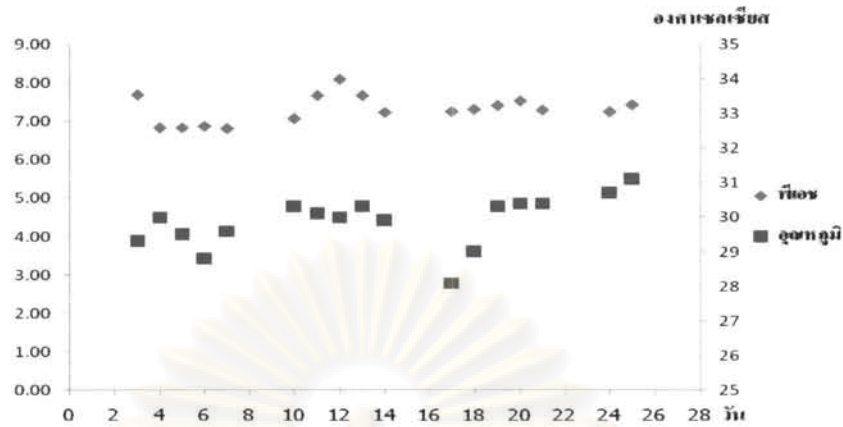
ภาพที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกักตะกอนเนื้อกระดาษ
ที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

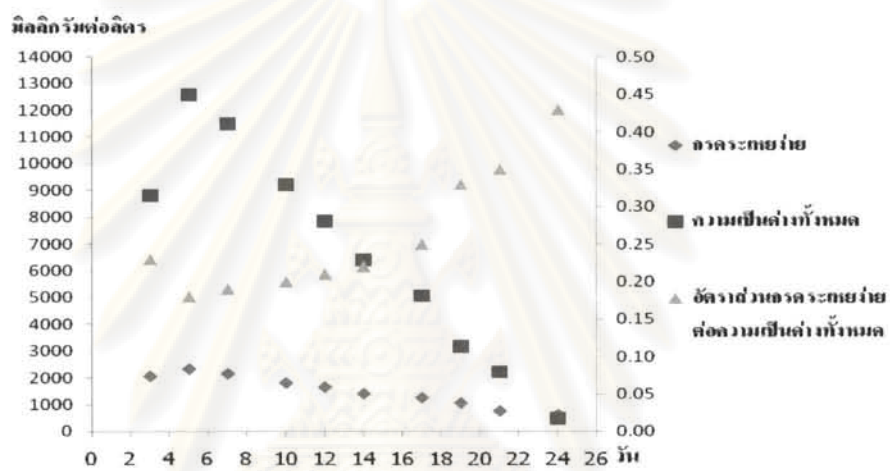
4.4.3 การปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การทดลองนี้จะเป็นการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษก่อนดำเนินการทดลองด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายมีสภาวะใกล้เคียงกับการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความร้อนที่ให้แก่ภาคตะกอนเชื้อกระดาษยังไม่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนเซลล์โลสให้เป็นกลูโคสและกรดอะมิโนง่ายเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายของการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีสภาวะที่แตกต่างจากการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างชัดเจน ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการทดลองของ Kim และคณะ ที่ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนหมัก พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงร้อยละ 30 และซีโอดีมีปริมาณลดลงร้อยละ 7 (Kim และคณะ, 2003) และการทดลองของ Carrere และคณะ ที่ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนหมัก พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงร้อยละ 59 ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงร้อยละ 30 และซีโอดีมีปริมาณลดลงร้อยละ 34 (Carrere และคณะ, 2004) เมื่อพิจารณาภาคตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 9,000 มิลลิลิตร ซึ่งใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 23 วัน หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 180.58 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ดังภาพที่ 4.7 ซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกชุดการทดลองที่ผ่านมา รวมทั้งชุดควบคุม

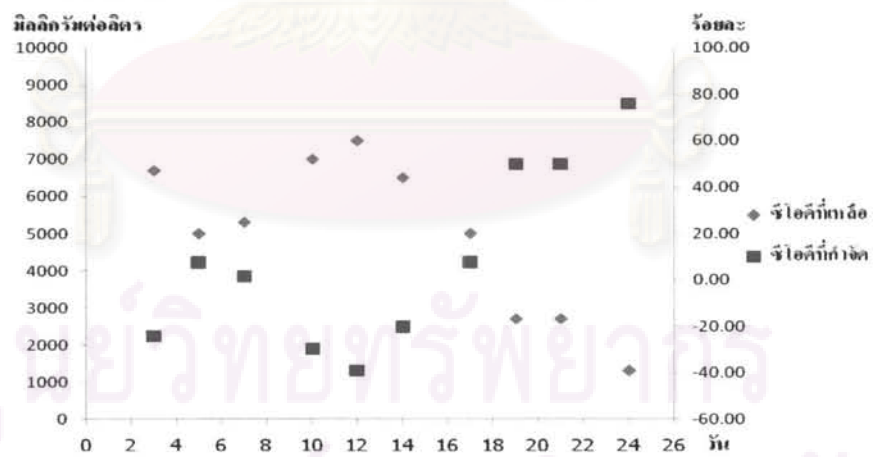
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าภาคตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 39.37 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 60.63 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่า มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนต่ำกว่ามาก และต่ำกว่าชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว



ก) พืชมอร์และอุณหภูมิ

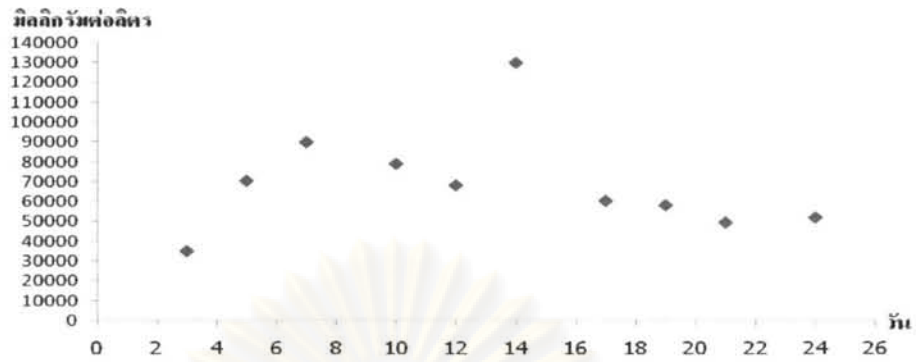


ข) การระเหยง่าย ความเข้มข้นทั้งหมด และอัตราส่วนการระเหยง่ายต่อความเข้มข้นทั้งหมด

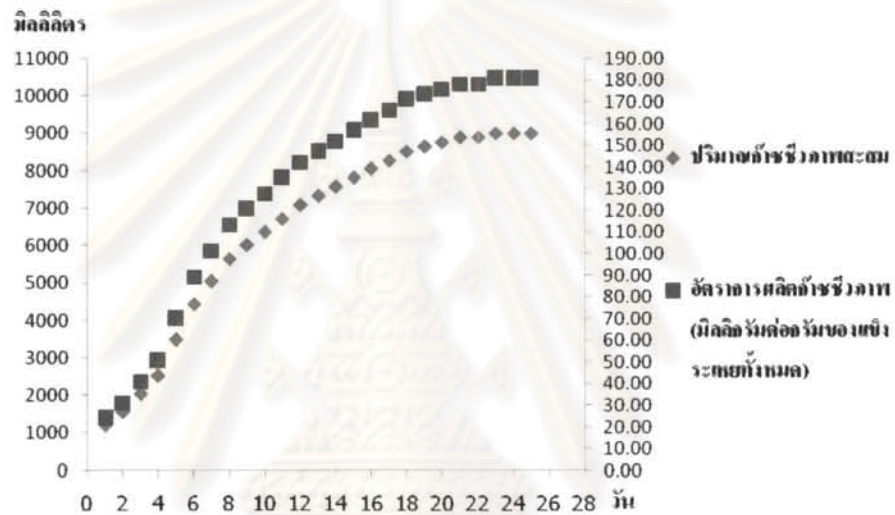


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองกาคตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง) ปริมาณของแก๊สแวนลอย



จ) ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ

ภาพที่ 4.7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองภาคตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

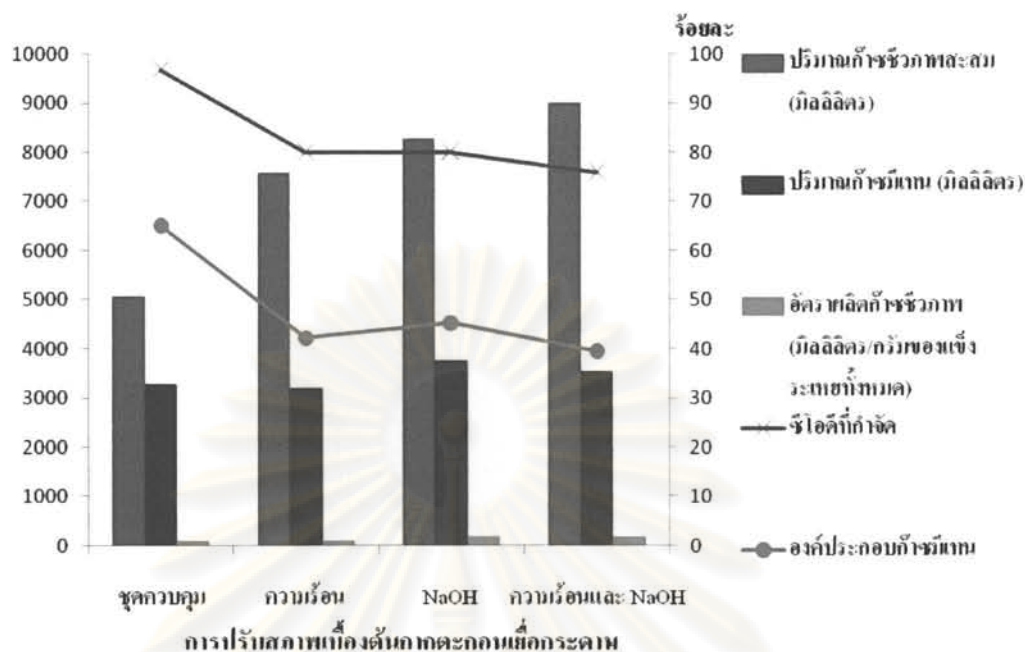
4.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นจากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนดำเนินการทดลอง

จากประสิทธิภาพข้างต้นพบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการให้ความร้อนพร้อมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 50.00, 63.64 และ 77.87 ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.92, 92.04 และ 97.90 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ สรุปได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นจากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยลดปริมาณลิกนินลง ซึ่งลิกนินเป็นสารยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน ส่วนเซลลูโลสเมื่อถูกปรับสภาพด้วยด่างจะเป็นการแตกพันธะไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจากโพลีเมอร์สายยาวที่มีพันธะที่แข็งแรงและย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ยาก ไปอยู่ในรูปน้ำตาลโมลกุลเชิงเดี่ยวที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ทำให้ระบบมีความดันพาร์เซียมากกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และมากกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติกตามลำดับ ดังนั้นแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนจึงไม่สามารถนำกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกไปใช้เพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่จะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพในระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลิกนินและเซลลูโลสถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายและนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานได้อย่างรวดเร็ว (Ahring และคณะ, 2004) ดังนั้นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นจากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด (9,000 มิลลิลิตร) และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด (180.58 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด) เนื่องจากความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้โครงสร้างของกากตะกอนเยื่อกระดาษรวมตัวกันดีขึ้นและสามารถลดขนาดของกากตะกอนเยื่อกระดาษให้เหลือขนาดเล็กลงได้ จึงง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในระบบ (Chunmin และคณะ, 2009) ซึ่งระยะเวลาที่ใช้เดินระบบจะสั้นกว่าชุดควบคุม เนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของแบคทีเรียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพสามารถทำได้ตั้งแต่เริ่มทดลอง แต่พบว่าก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบต่ำ (ร้อยละ 39.37) ดังภาพที่ 4.8 เนื่องจากกากตะกอนเยื่อกระดาษหลังจากถูกปรับสภาพเบื้องต้นแล้วจะมีอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนสูงมาก (ไนโตรเจนต่ำ) รวมทั้งอาจเนื่องมาจากลักษณะสมบัติของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้นแล้วทำให้ความเป็นด่างทั้งหมดของระบบขณะทดลองลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้

อัตราส่วนคระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมดของระบบมีค่ามากกว่า 0.4 ซึ่งระบบจะมีความเสถียรต่อการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยลง ดังนั้นในการทดลองชุดต่อไปจึงทดลองผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษผสมกับขยะเศษอาหาร เพื่อปรับอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนให้เหมาะสมต่อการทำงานของเมทาโนเจนและเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทนภายในก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ควรมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1984)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้น

พารามิเตอร์	การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษ			
	ชุดควบคุม	การปรับสภาพด้วยการให้ความร้อน	การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	การปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
พีเอช	7.57	7.81	7.36	7.43
กรคระเหยง่าย/ความเป็นด่างทั้งหมด	0.01	0.42	0.44	0.43
ซีไอดีเริ่มต้น (มิลลิลิตร/ลิตร)	4,680	4,000	5,000	5,400
ซีไอดีที่กำลังจัด (ร้อยละ)	96.79	80.00	80.00	75.93
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดเริ่มต้น (กรัม)	55.45	74.32	47.25	49.84
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)	5,060	7,590	8,280	9,000
ปริมาณก๊าซมีเทน (มิลลิลิตร)	3,288	3,203	3,745	3,543
องค์ประกอบก๊าซมีเทน (ร้อยละ)	64.99	42.20	45.23	39.37
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด)	91.25	102.13	175.24	180.58
อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด)	59.30	43.10	79.26	71.09
ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม (วัน)	31	21	22	21
ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)	9.1	8.9	4.9	5.1
ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)	93.9	93.7	91.8	90.1



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพเบื้องต้น

4.5 การแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

จากการทดลองที่ 2 พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนดำเนินการทดลองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ปริมาณมาก แต่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนน้อยจนไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงเกิดการทดลองที่ 3 คือ การศึกษาการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร กำหนดให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารคือน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองได้ดังตารางที่ 4.7

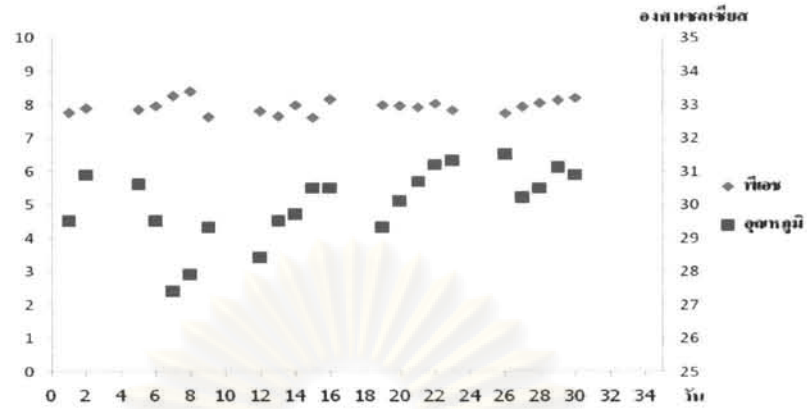
ตารางที่ 4.7 น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษ (กรัม)	ขยะเศษอาหาร (กรัม)
1:0	66.46	180.6	0
1:1	44.37	135.2	135.2
1:2	36.13	110.7	221.4
1:3	32.36	92.7	278.1
1:4	31.46	76.3	305.2

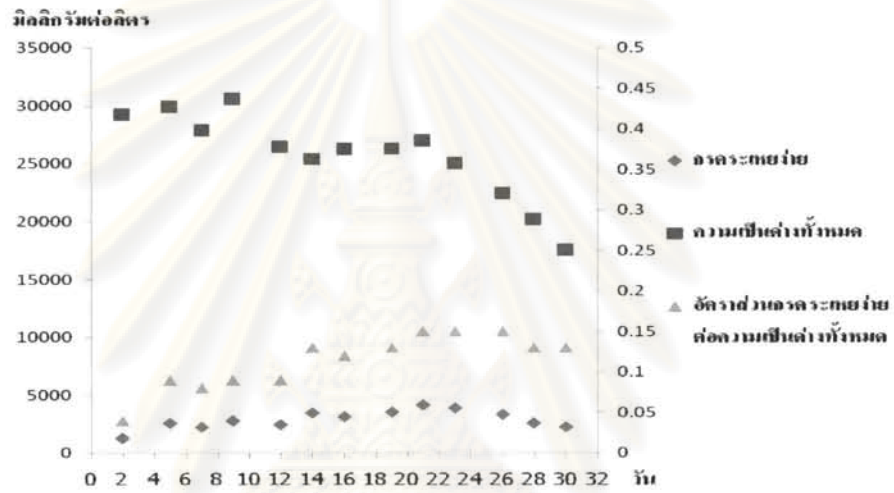
4.5.1 อัตราส่วน 1:1

การทดลองนี้เป็นการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วน 1:1 เมื่อดำเนินการทดลองหลังจากใส่วัตถุดิบทุกอย่างลงในถังหมักแล้ว ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่าพีเอชของระบบ มีแนวโน้มมากกว่า 7 ตลอดช่วงการทดลอง แสดงว่าความเป็นด่างทั้งหมดของระบบมีปริมาณมากพอที่จะรักษาสมาดุลของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุมที่พีเอชของระบบประมาณ 6.3 และจากกราฟพบว่ากรดระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบ จนถึงวันที่ 21 (4,102 มิลลิกรัม/ลิตร) เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียให้กลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดระเหยง่าย จากนั้นจึงเริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ดี จึงดึงกรดระเหยง่ายไปใช้เป็น แหล่งพลังงานภายในเซลล์ อีกทั้งความเป็นด่างทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ ชุดควบคุม ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างของอัตราส่วน 1:1 มีค่าต่ำกว่า ชุดควบคุม ซึ่งจะส่งผลให้สามารถควบคุมระบบให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี และเมื่อพิจารณาซีโอดี พบว่ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการเดินระบบ เนื่องจากระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ดี จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนจะนำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับใช้เป็นแหล่ง พลังงานเพื่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีพ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่นั้นวันแรกจนถึงสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 7,590 มิลลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ สะสมเท่ากับ 121.01 มิลลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ใช้ระยะเวลาเดินระบบประมาณ 23 วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมจะพบว่าใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า โดยชุดควบคุมจะใช้เวลาประมาณ 32 วัน ดังภาพที่ 4.9

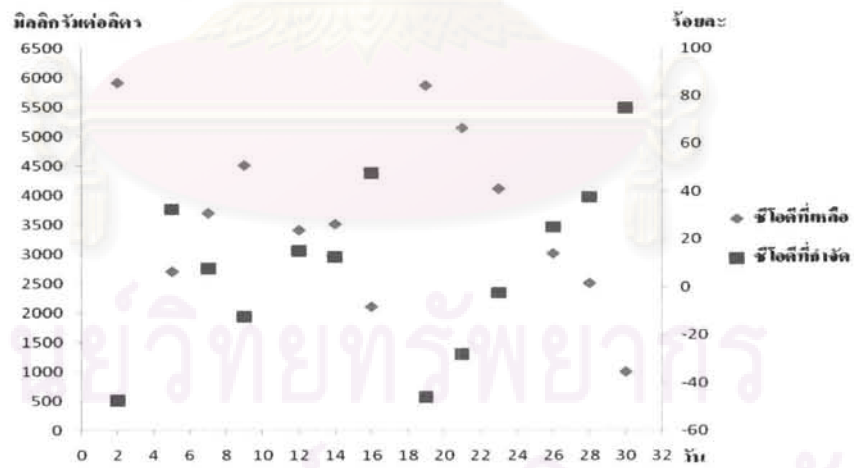
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วน 1:1 มีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทนร้อยละ 69.99 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 30.01 โดยช่วงแรกของการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า จุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตกรดระเหยง่ายจะสามารถผลิตกรดระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกมาค่อนข้างสูง เป็นผลให้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ในช่วงแรกของการย่อยสลายแบบ ไร้ออกซิเจนมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซมีเทน และเมื่อ เวลาผ่านไปนานขึ้น องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพและปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจะเพิ่ม สูงขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในจุลินทรีย์ผสมใช้กรดอะซิติกเพื่อการเจริญเติบโต และผลิตก๊าซมีเทน ทำให้จำนวนของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพ การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (วุฒิกัญท์ กุมมินทร์, 2544)



ก) ฟิโชนและจุดทศนิยม

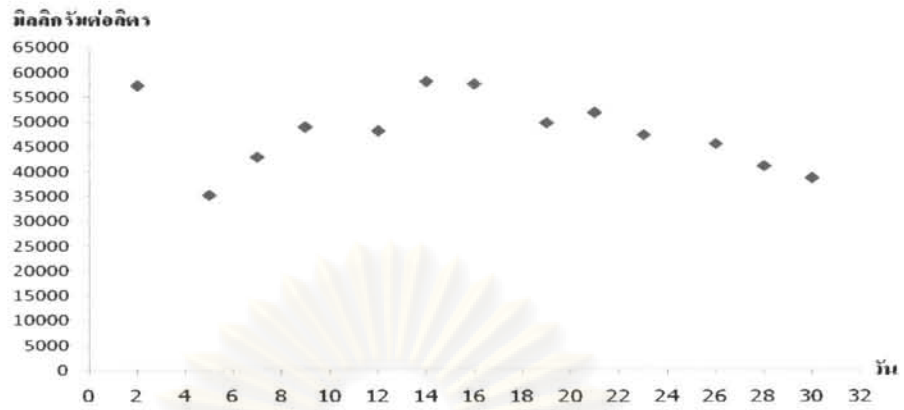


ข) กรดระเหยง่าย ความชื้นแห้งทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความชื้นแห้งทั้งหมด

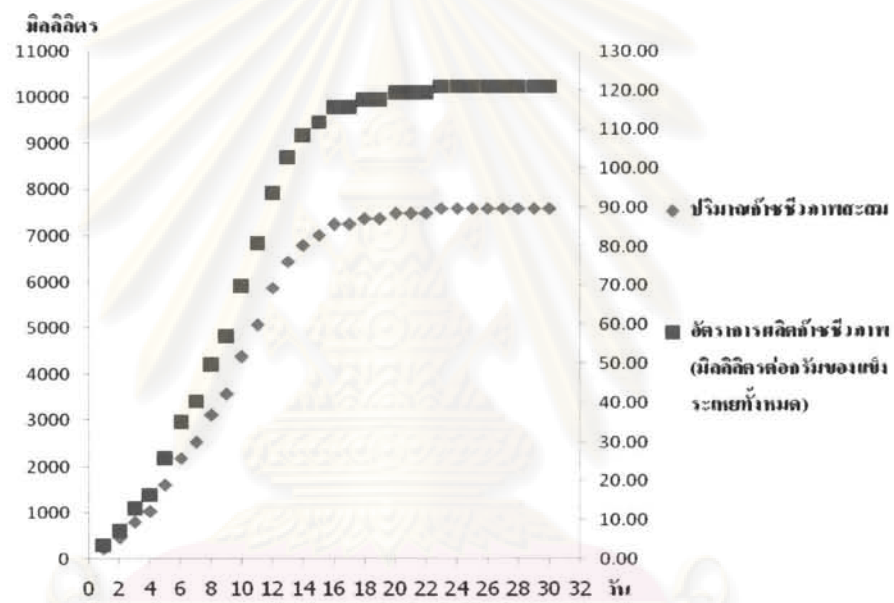


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:1)



ง) ปริมาณของแก๊สเขวนลอย



จ) ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ

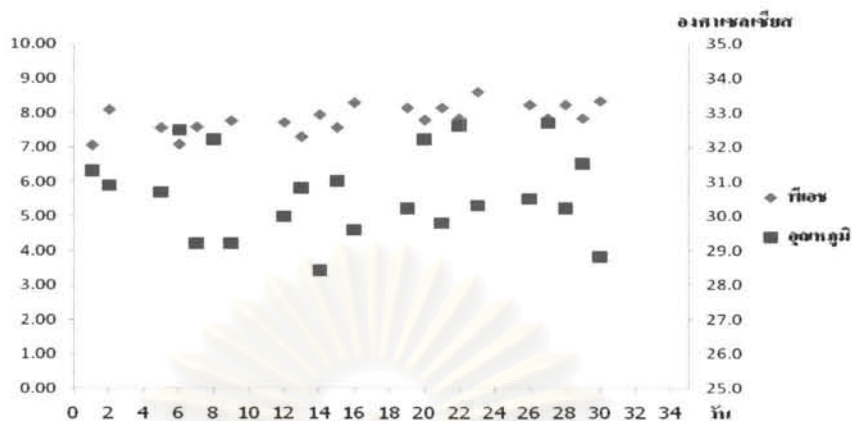
ภาพที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเชื้อกระดาษ

ต่อขยะเศษอาหาร (1:1) (ต่อ)

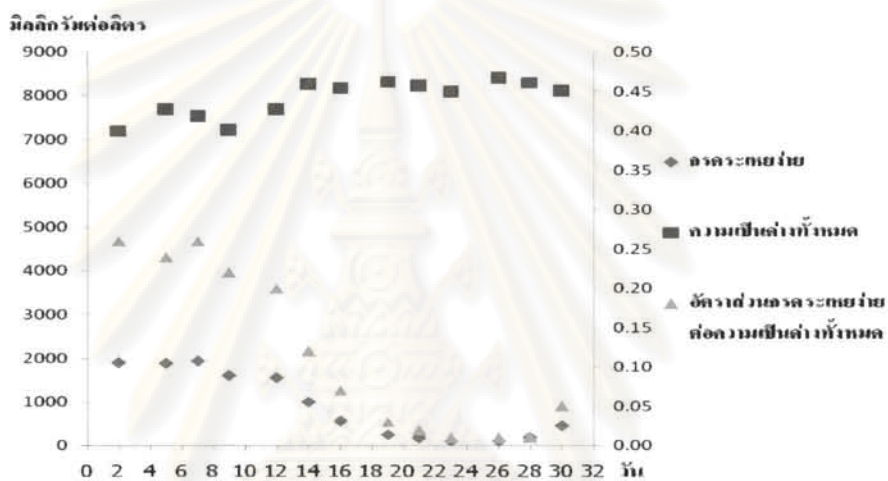
4.5.2 อัตราส่วน 1:2

การทดลองนี้เป็นการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วน 1:2 เมื่อดำเนินการทดลองหลังจากใส่วัตถุดิบทุกอย่างลงในถังหมักแล้ว ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่าพีเอชของระบบ มีแนวโน้มมากกว่า 7 ตลอดช่วงการทดลอง ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของแบคทีเรียผลิต ก๊าซมีเทนได้ง่ายขึ้น ซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุมที่พีเอชของระบบประมาณ 6.3 และจากกราฟพบว่า กรดระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงวันที่ 12 (1,550 มิลลิกรัม/ลิตร) เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรด ระเหยง่าย จากนั้นจึงเริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากจุลินทรีย์นำกรดระเหยง่าย ไปใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเหมือนกับการทดลองของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอน เชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเป็นด่างทั้งหมดมี ปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม เนื่องจากในระบบเกิดการย่อยสลายได้ กรดระเหยง่ายและแอมโมเนีย จากนั้นกรดระเหยง่ายจะถูกใช้เป็นสารอาหารของแบคทีเรียประเภท สร้างก๊าซชีวภาพ ทำให้แอมโมเนียเหลือมากขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก็จะกลายเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ดังนั้นปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้น (Raynal และคณะ, 1998 อ้างถึงใน อาริยา วิรัชวรกุล, 2546) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อ ความเป็นด่างทั้งหมดของอัตราส่วน 1:2 มีค่าต่ำ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพดี และเมื่อพิจารณาซีโอดี พบว่ามีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลอง แสดงว่าระบบมีการย่อยสลาย สารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์จนเหลือสารอินทรีย์ในระบบน้อย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็ง แฉวนลอยในน้ำ สอดคล้องกับกราฟของแข็งของแฉวนลอยที่พบว่ามีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อย ตลอดระยะเวลาเดินระบบ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนสิ้นสุด การทดลองมีปริมาณเท่ากับ 6,440 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 79.51 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ใช้ระยะเวลาเดินระบบประมาณ 23 วัน ซึ่งเมื่อ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมจะพบว่าใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า โดยชุดควบคุมจะใช้เวลาประมาณ 32 วัน

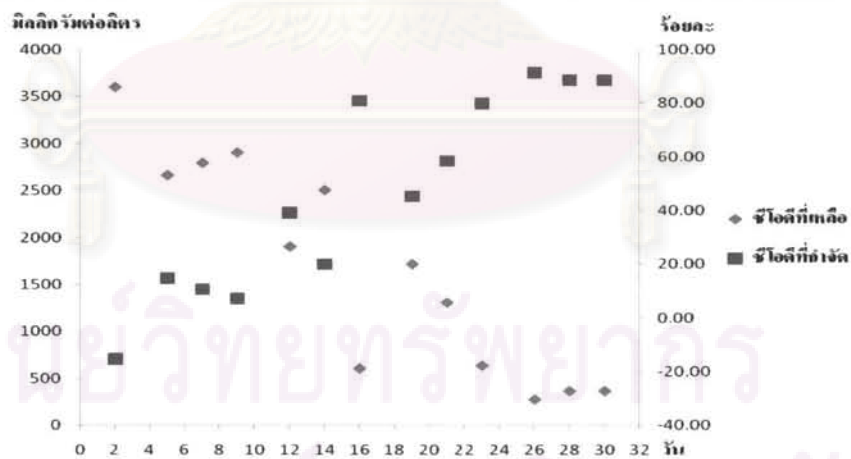
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วน 1:2 มีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทนร้อยละ 84.00 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 16.00 ซึ่งเมื่อเทียบกับชุดการทดลองปรับสภาพ เบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าสามารถ เพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทนขึ้นร้อยละ 103.20 แสดงว่าขยะเศษอาหารสามารถควบคุมความดัน พาร์เซียลของระบบให้เหมาะสมต่อการย่อยสลายกรดกรดคิวิไตรกและกรดโพโรไพโอนิกให้ กลายเป็นกรดอะซิติกได้ดี ซึ่งแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนจะสามารถนำเฉพาะกรดอะซิติกไปใช้ผลิต เป็นก๊าซมีเทนได้เพียงอย่างเดียว (Converti และคณะ, 1999)



ก) ฟิโอสและอุณหภูมิจึง

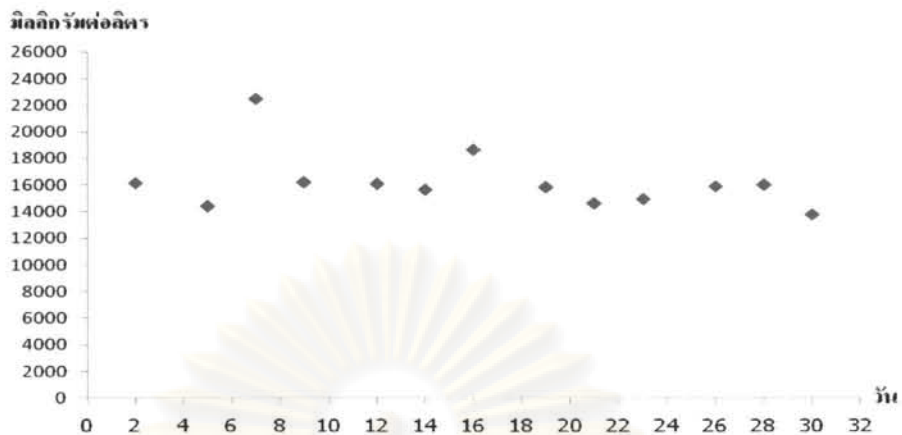


ข) กรดระเหยง่าย ความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด

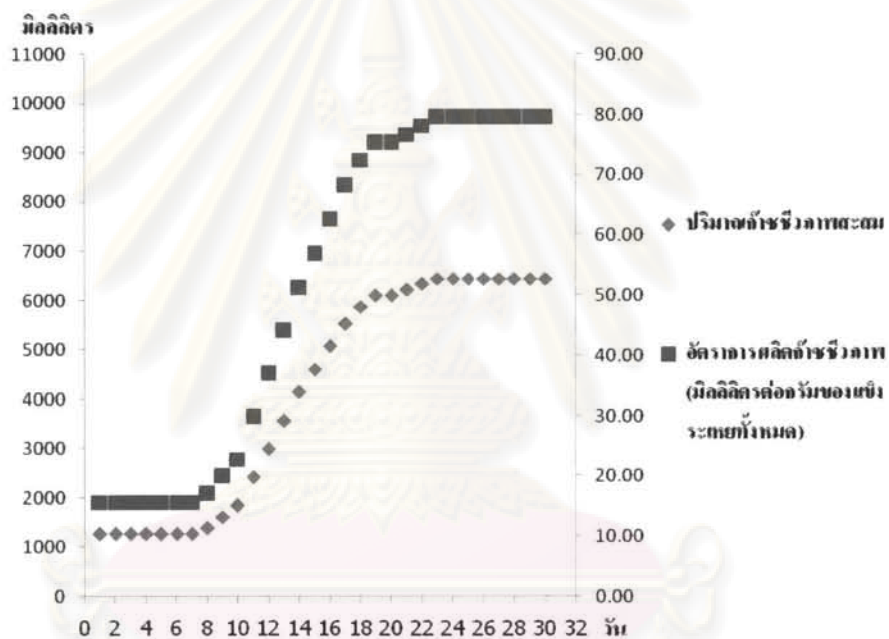


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.10 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:2)



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 4.10 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:2) (ต่อ)

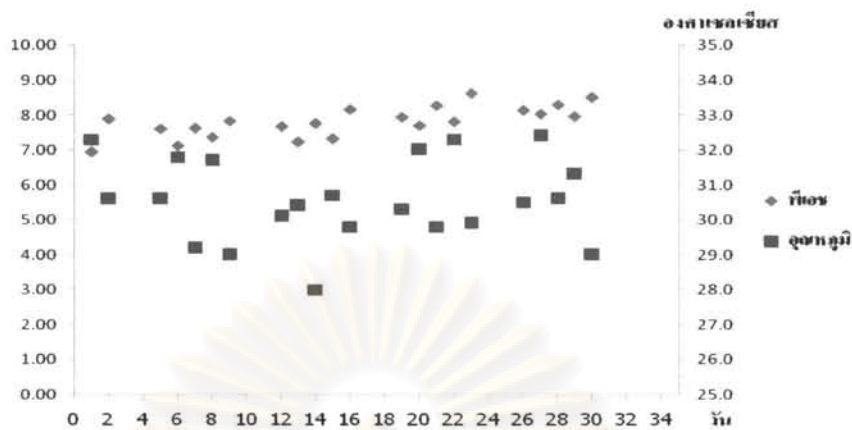
ศูนย์วิจัยพืชไร่นานาชาติ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.3 อัตราส่วน 1:3

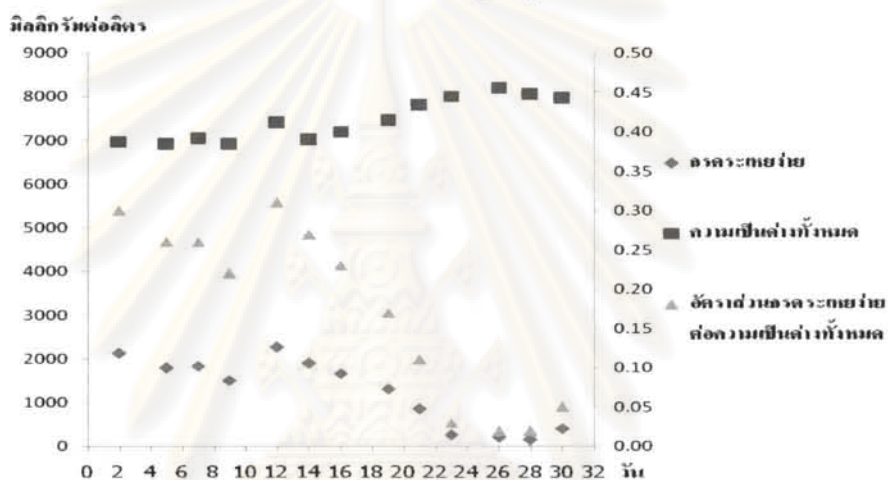
การทดลองนี้เป็นการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วน 1:3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกับชุดการทดลองแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2 ดังภาพที่ 4.11 แต่แตกต่างจากอัตราส่วน 1:1 ซึ่งอัตราส่วน 1:3 จะมีชีโอดีต่ำกว่าอัตราส่วน 1:1 โดยชีโอดีจะบ่งบอกถึงสารอินทรีย์ภายในระบบที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ ดังนั้นถ้ามี ปริมาณชีโอดีสูงก็จะสามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณมาก และอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณ กรดระเหยง่ายเพิ่มสูงขึ้นภายใน 12 วันแรกเท่านั้น แต่อัตราส่วน 1:1 สามารถเกิดกรดระเหยง่าย ได้ยาวนานจนถึงวันที่ 21 ของการเดินระบบ ซึ่งกรดระเหยง่ายจะแสดงถึงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของ การทดลอง เนื่องจากก๊าซชีวภาพจะเกิดจากแบคทีเรียนำกรดระเหยง่ายไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นอัตราส่วน 1:1 จึงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาณก๊าซชีวภาพ ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนถึงสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 5,635 มิลลิลิตร หรือคิด เป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 63.24 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ซึ่งลดลง จากชุดการทดลองแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1 และ 1:2 ร้อยละ 25.76 และ 12.50 ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาเดินระบบประมาณ 26 วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ ชุดควบคุมจะพบว่าใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า โดยชุดควบคุมจะใช้เวลาประมาณ 32 วัน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วน 1:3 มีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทนร้อยละ 64.28 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 35.72 ซึ่งเมื่อเทียบกับชุดควบคุมพบว่ามีองค์ประกอบ ของก๊าซมีเทนลดลงเพียงเล็กน้อย แต่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองปรับสภาพ กากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงว่าขยะเศษอาหาร สามารถช่วยเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอน เชื้อกระดาษ โดยจะทำให้แบคทีเรียสามารถเปลี่ยนกรดระเหยง่ายอื่นๆ มาเป็นกรดอะซิติก เพื่อนำไปผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนได้ดีขึ้น (Converti และคณะ, 1999)

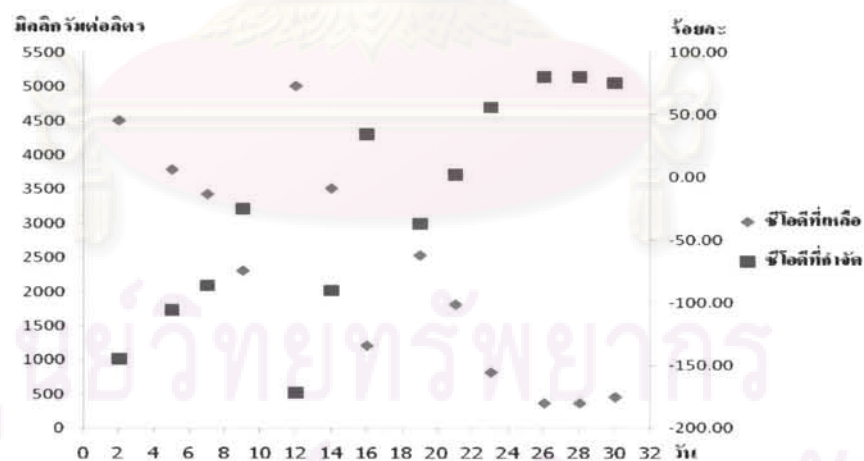
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ฟีโชนและอุณหภูมิตัว

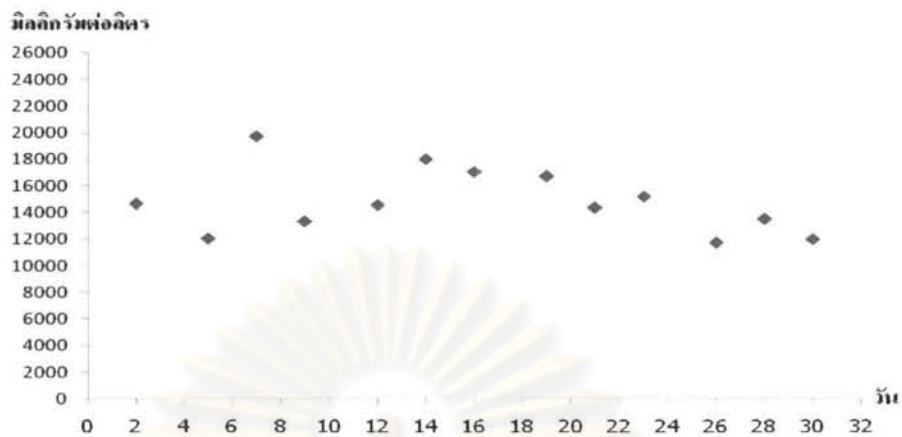


ข) กรดระเหยง่าย ความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด

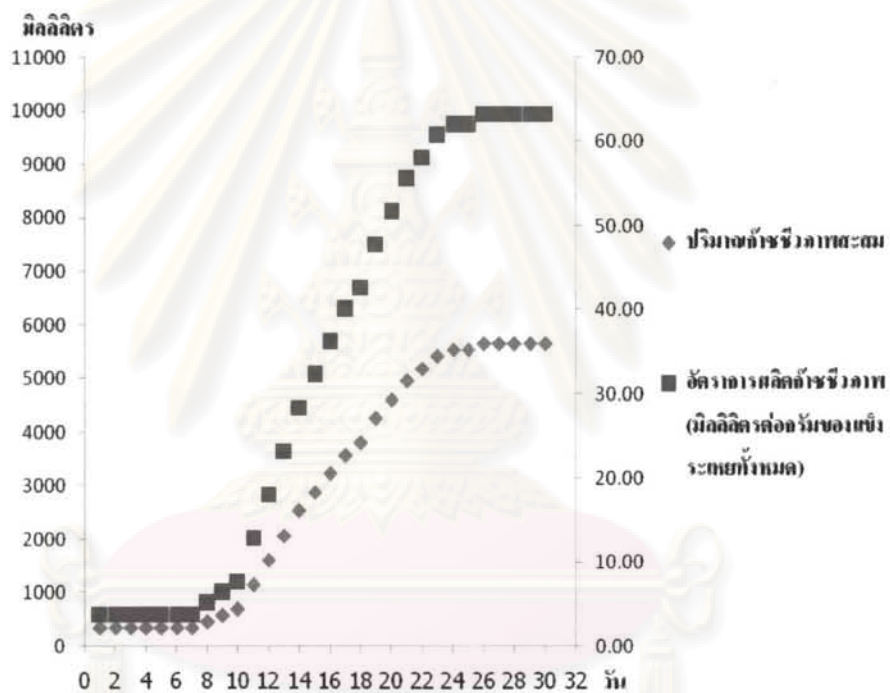


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:3)



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

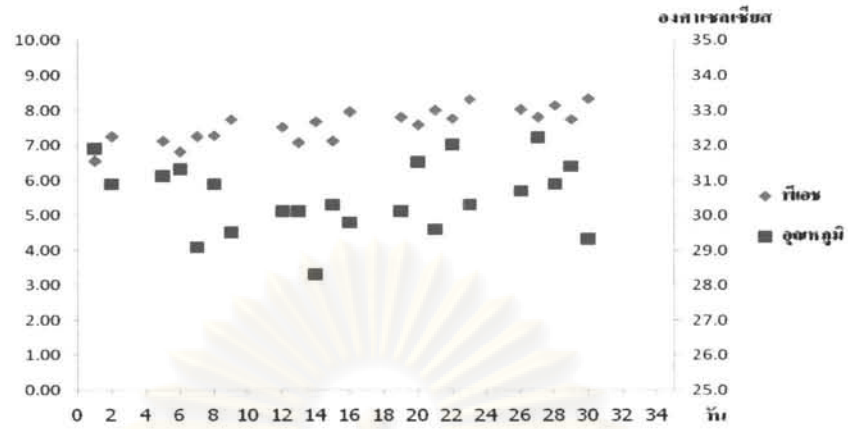
ภาพที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:3) (ต่อ)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

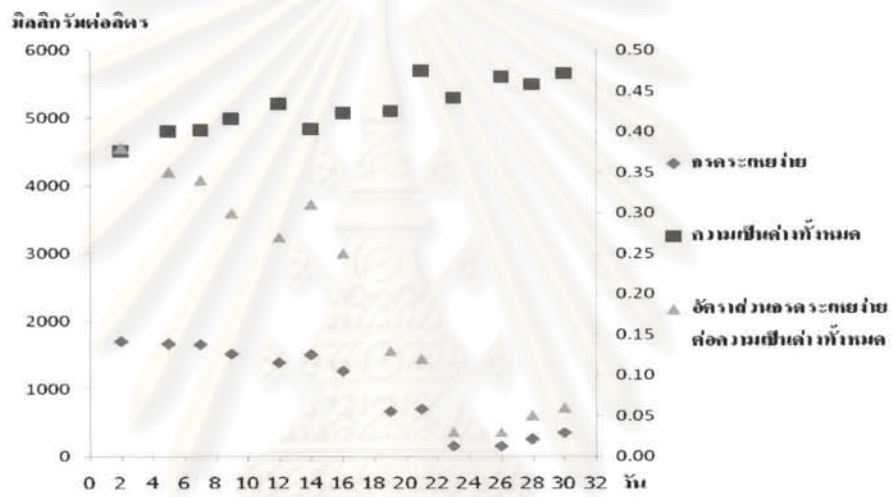
4.5.4 อัตราส่วน 1:4

การทดลองนี้เป็นการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วน 1:4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่า พีเอชของระบบเริ่มทดลองมีค่าต่ำกว่า 7 เล็กน้อย แต่เมื่อเดินระบบเรื่อยๆ พีเอชกลับมีแนวโน้มมากกว่า 7 ทำให้ง่ายต่อการควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนควรอยู่ที่พีเอชประมาณ 6.8–7.2 ซึ่งอาจมากกว่า 7 เพียงเล็กน้อยได้ แต่ไม่ควรต่ำ 6.5 เพราะจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทน (อมรพรรณ แจมเงิน, 2551) ซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุมที่พีเอชของระบบประมาณ 6.3 และจากกราฟพบว่ากรดระเหยง่ายมีแนวโน้มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลอง แสดงว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดระเหยง่ายได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกของการเดินระบบ ซึ่งจุลินทรีย์จะนำกรดระเหยง่ายไปใช้เป็นแหล่งพลังงานคาร์บอนเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและการดำรงชีพ ส่วนปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดพบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับชุดการทดลองแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหารอื่นๆ และเมื่อพิจารณาซีโอดีพบว่ามีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 16 วันแรก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่าสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยเป็นส่วนใหญ่ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 3,960 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 43.99 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด ใช้ระยะเวลาเดินระบบประมาณ 26 วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมจะพบว่าใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า โดยชุดควบคุมจะใช้เวลาประมาณ 32 วัน

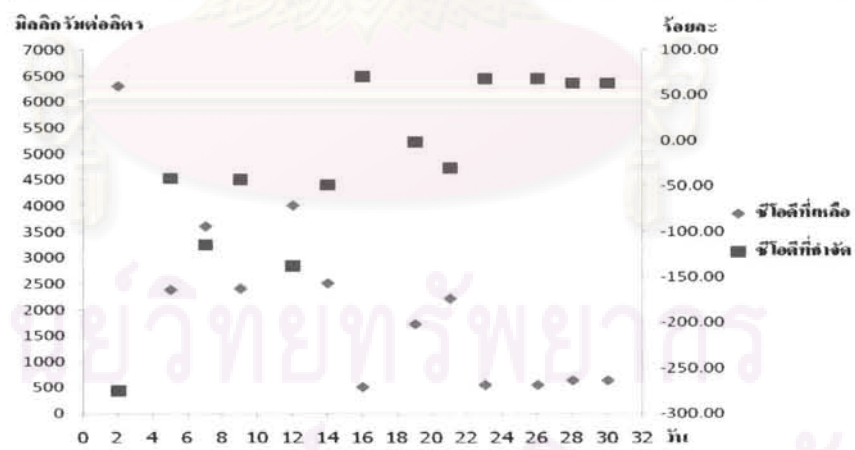
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วน 1:4 มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 62.78 และก๊าซอื่นๆ ร้อยละ 37.22 โดยช่วงแรกของการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า จุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตกรดระเหยง่ายจะสามารถผลิตกรดระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกมาก่อนข้างสูง เป็นผลให้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ในช่วงแรกของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซมีเทน และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพและปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในจุลินทรีย์ผสมใช้กรดอะซิติกเพื่อการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทน ทำให้จำนวนของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจนสูงสุด (วุฒิกัญท์ กุมมินทร์, 2544)



ก) พีเอชและอุณหภูมิ

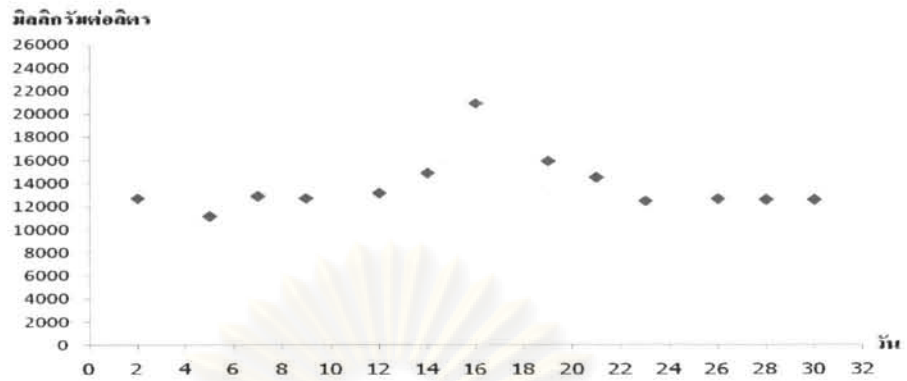


ข) กรดระเหยง่าย ความเป็นด่างทั้งหมด และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด

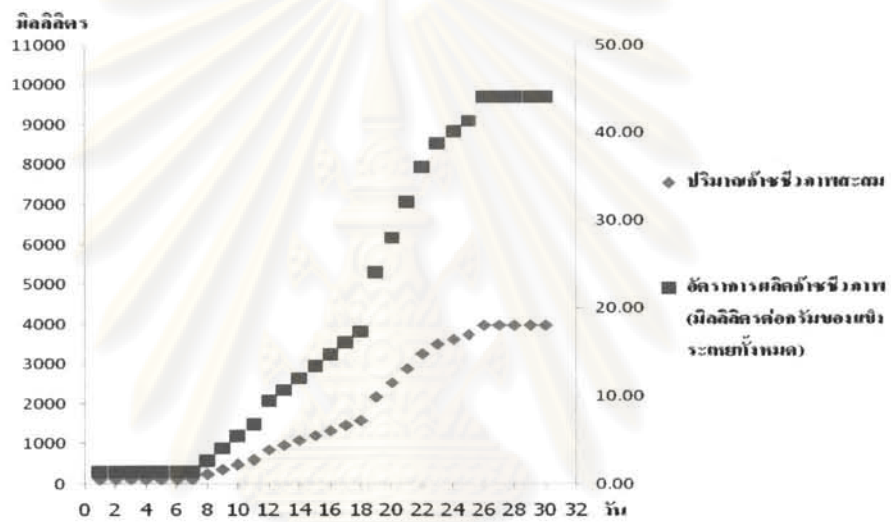


ค) ซีไอดี

ภาพที่ 4.12 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:4)



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 4.12 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองผสมกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ต่อขยะเศษอาหาร (1:4) (ต่อ)

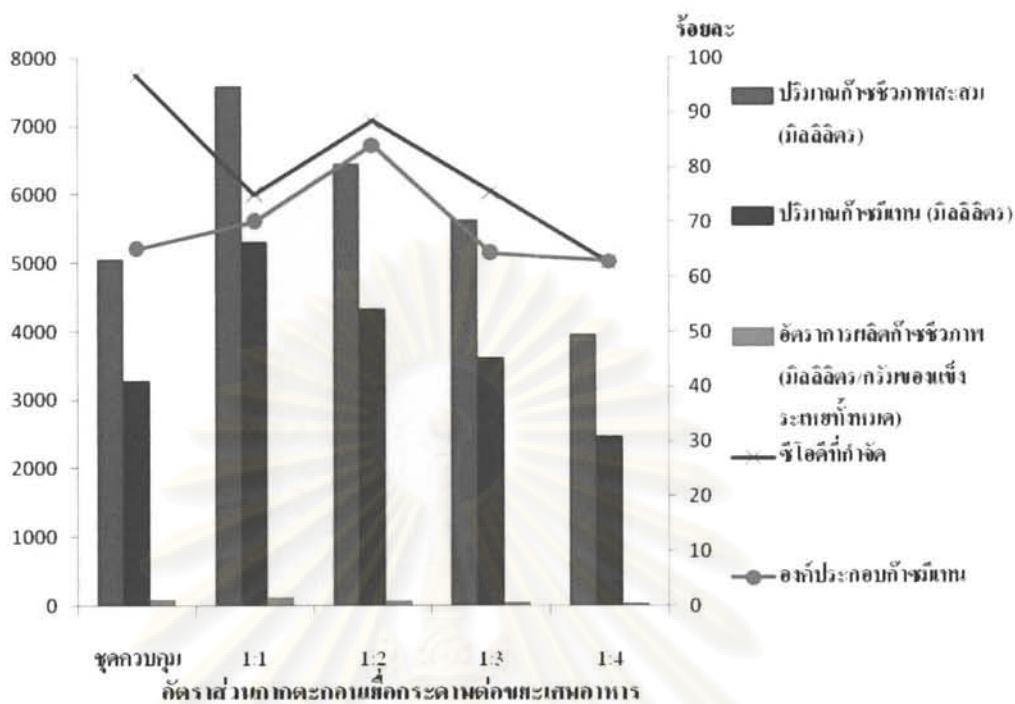
4.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดการทดลองการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

จากประสิทธิภาพข้างต้นพบว่า การเติมขยะเศษอาหารทำให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้น (มากกว่า 7 ตลอดการทดลอง) เนื่องจากเมื่อผสมขยะเศษอาหารแล้ว อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน จะเหมาะสมมากยิ่งขึ้น และระบบที่มีปริมาณไนโตรเจนมากพอจะทำให้เกิดแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งสามารถเป็นบัฟเฟอร์ป้องกันพีเอชของระบบได้สูง ส่วนปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดตลอดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษเพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดที่มากพอจะช่วยรักษาสมดุลของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้จุลินทรีย์สามารถดำรงชีพและเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ซีโอดีที่กำจัดมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขยะเศษอาหารให้มากขึ้น ยกเว้นอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4 ซีโอดีที่กำจัดมีปริมาณลดต่ำลง และเมื่อเทียบกับชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง อัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมดมีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลให้ระบบมีความเสถียรต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากยิ่งขึ้น โดยอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมดควรน้อยกว่า 0.4 จึงจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและเปลี่ยนสารอินทรีย์ในรูปกรดระเหยง่ายไปเป็นก๊าซชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว และถ้าอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมดมีค่ามากกว่า 0.8 ระบบจะเกิดสภาวะล้นเหลว ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อีก ส่วนก๊าซชีวภาพที่ได้พบว่ามีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงขึ้น โดยมีก๊าซมีเทนมากถึงร้อยละ 69.99 ซึ่งมากกว่าชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง โดยสามารถเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 77.77 และมากกว่าชุดควบคุมอยู่ร้อยละ 7.69 โดยช่วงแรกของการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตกรดระเหยง่ายจะสามารถผลิตกรดระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาค่อนข้างสูง เป็นผลให้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ในช่วงแรกของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซมีเทน และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพและปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในจุลินทรีย์ผสมใช้กรดอะซิติกเพื่อการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทน ทำให้จำนวนของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจนสูงสุด (วุฒิกัญท์ คุมมินทร์, 2544) ดังนั้นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ ชุดการทดลองแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1 เนื่องจากสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสะสมมากที่สุด (7,590 มิลลิลิตร) และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด (121.01

มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด) โดยใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 23 วัน ซึ่งน้อยกว่าชุดควบคุม แต่มากกว่าชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง และพบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้น้อยกว่าชุดควบคุม โดยสามารถกำจัดซีโอดีได้เพียงร้อยละ 75.00 ซึ่งน้อยกว่าชุดควบคุมอยู่ร้อยละ 22.51 และน้อยกว่าชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองอยู่ร้อยละ 1.22 ดังภาพที่ 4.13

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

พารามิเตอร์	อัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร				
	1:0	1:1	1:2	1:3	1:4
พีเอช	7.57	8.20	8.33	8.50	8.33
กรดระเหยง่าย/ความเป็นด่างทั้งหมด	0.01	0.13	0.05	0.05	0.06
อัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจน	126.37	22.92	28.35	24.10	36.12
ซีโอดีเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	4,680	4,000	3,120	1,840	1,680
ซีโอดีที่กำจัด (ร้อยละ)	96.79	75.00	88.46	75.54	62.50
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (กรัม)	55.45	62.72	81.00	89.11	90.02
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)	5,060	7,590	6,440	5,635	3,960
ปริมาณก๊าซมีเทน (มิลลิลิตร)	3,288	5,312	5,410	3,622	2,486
องค์ประกอบก๊าซมีเทน (ร้อยละ)	64.99	69.99	84.00	64.28	62.78
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด)	91.25	121.01	79.51	63.24	43.99
อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด)	59.30	84.69	66.79	40.65	27.62
ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม (วัน)	31	23	23	26	26



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วนกากตะกอนเนื้อกระดูกต่อขยะเศษอาหาร

4.6 เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเนื้อกระดูก

จากผลการทดลองชุดที่ 2 ทำให้ทราบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเนื้อกระดูกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที พร้อมปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด แต่กลับทำให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนลดต่ำลงจนไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 1984) ดังนั้นจึงนำผลจากการทดลองชุดที่ 3 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนกากตะกอนเนื้อกระดูกต่อขยะเศษอาหาร 1:1 เป็นอัตราส่วนที่มีก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด และมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นการทดลองชุดที่ 4 จึงเป็นการทดลองนำกากตะกอนเนื้อกระดูกมาปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง พร้อมผสมกับขยะเศษอาหารในอัตราส่วนกากตะกอนเนื้อกระดูกต่อขยะเศษอาหาร 1:1 โดยกำหนดให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนประมาณร้อยละ 5 และสามารถ

คำนวณปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารคิดเป็นน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองได้ ดังตารางที่ 4.9

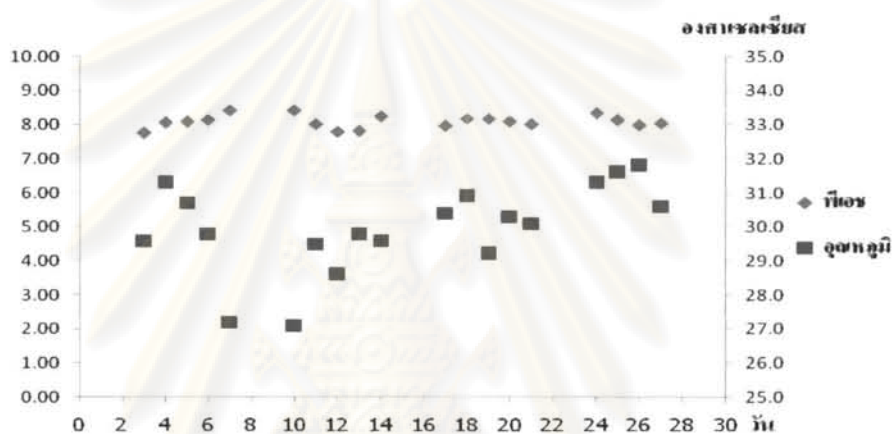
ตารางที่ 4.9 น้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษและขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง

ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	น้ำหนักกากตะกอน เยื่อกระดาษ (กรัม)	ขยะเศษอาหาร (กรัม)
26.71	224.65	224.65

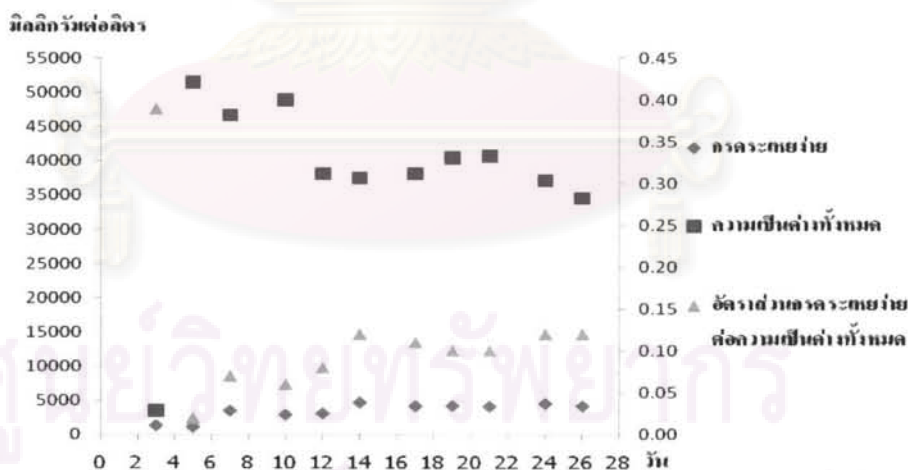
ซึ่งเมื่อดำเนินการทดลองหลังจากใส่วัตถุดิบทุกอย่างลงในถังหมักแล้ว ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบพบว่าพีเอชของระบบมีแนวโน้มมากกว่า 7 ตลอดช่วงการทดลอง แสดงว่าระบบมีปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดมากพอ จึงรักษาสมดุลของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมได้ ซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุมที่พีเอชของระบบประมาณ 6.3 ทำให้ประสิทธิภาพของระบบในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น และจากกราฟพบว่ากรดระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงวันที่ 14 (4,648 มิลลิกรัม/ลิตร) เนื่องจากจุลินทรีย์มีการย่อยสลายอินทรีย์ภายในระบบให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดระเหยง่าย จากนั้นจึงเริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากกรดระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์ในถังหมักนำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะส่งผลให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้น (7.96–8.33) ส่วนปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดพบว่ามีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากถูกดึงไปใช้เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมพีเอชของระบบไปให้น้อยกว่า 7 ซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น แต่มีค่าประมาณ 0.15 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงต่อการควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาซีโอดีพบว่ามีปริมาณสูงสุดในวันที่ 3 (8,367 มิลลิกรัม/ลิตร) เนื่องจากระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ดี จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์นำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อการดำรงชีพและการเจริญเติบโต แต่พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ลดลง โดยกำจัดซีโอดีได้เพียงร้อยละ 57.70 ซึ่งน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ระยะเวลาเดินระบบ 25 วัน) มีปริมาณเท่ากับ 14,280 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 185.96 มิลลิลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 63.33 และก๊าซอื่น ๆ ร้อยละ 36.67 ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ

ชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นจากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่น้อยกว่าชุดควบคุมและชุดการทดลองผสมจากตะกอนเยื่อกระดาษกับขยะเศษอาหาร เนื่องจากเมื่อลิกนินและเซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างเป็นน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยวจะแตกตัวพันธะไฮโดรเจนออกมาด้วย ทำให้ความดันพาร์เซิลในระบบไม่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกเพื่อผลิตก๊าซมีเทน จึงทำให้อุณหภูมิของก๊าซมีเทนต่ำลง แต่ขยะเศษอาหารที่ผสมลงไปในระบบจะกำจัดไฮโดรเจนด้วยวิธีดึงไฮโดรเจนไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ดังนั้นระบบจึงมีความดันพาร์เซิลลดต่ำลง ส่งผลให้กรดอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกมากขึ้น องค์กรประกอบของก๊าซมีเทนจึงเพิ่มสูงขึ้นตาม (Converti และคณะ, 1999)

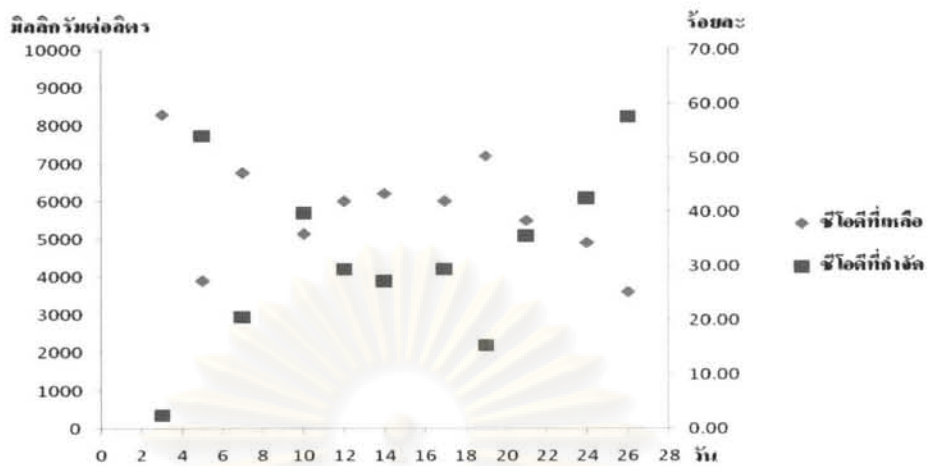


ก) พีเอชและอุณหภูมิ



ข) กรดอะซิติก, ความเป็นด่างทั้งหมด, อัตราส่วนกรดอะซิติกต่อความเป็นด่างทั้งหมด

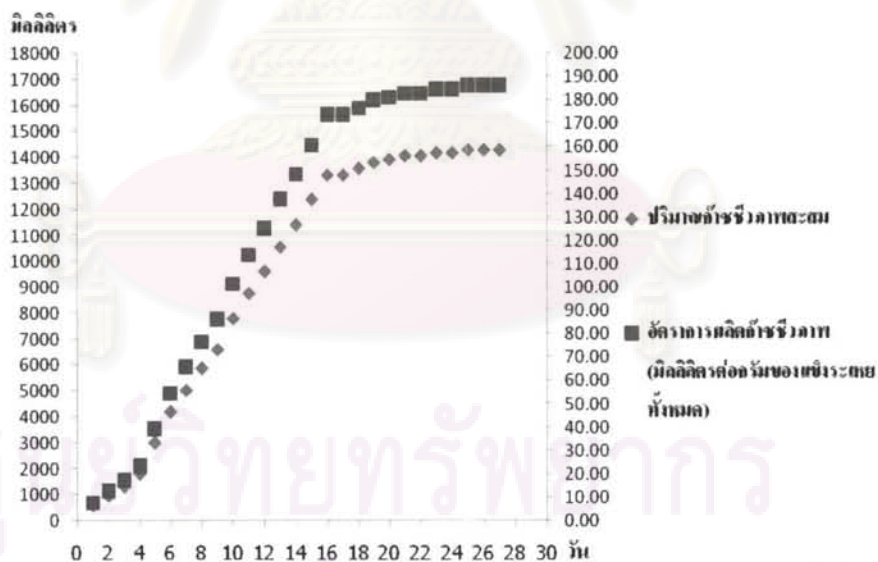
ภาพที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ



ก) ซีโอดี



ง) ปริมาณของแข็งแขวนลอย



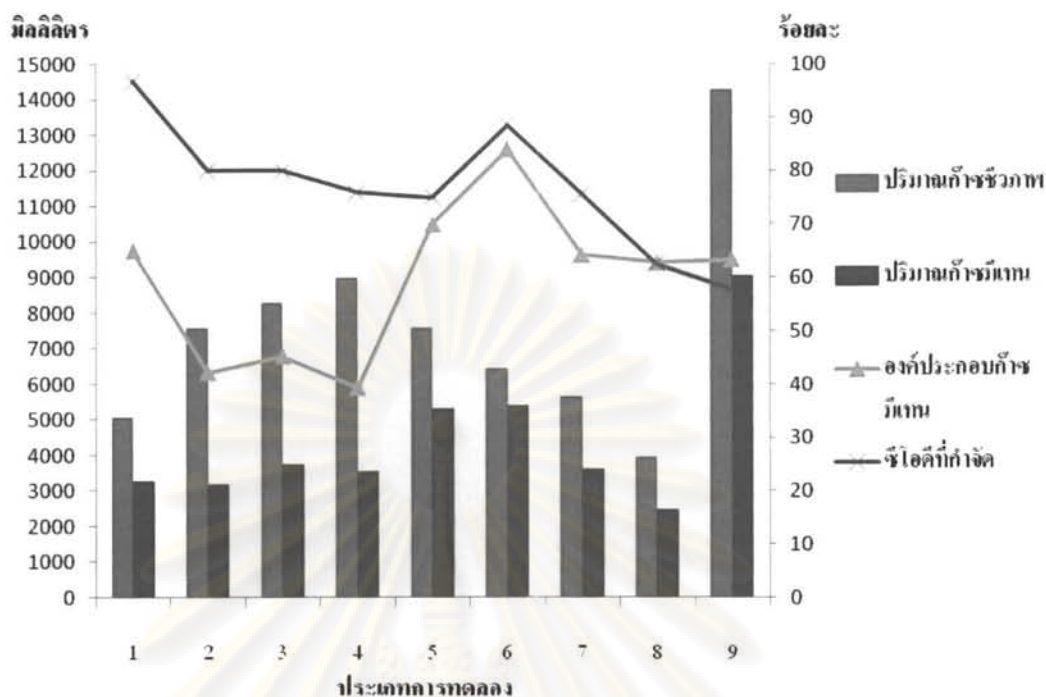
จ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ (ต่อ)

4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลอง

สภาวะ	ปริมาณ ก๊าซชีวภาพ (ลิตร)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมของแข็งระเหย ทั้งหมด)	องค์ประกอบ ก๊าซมีเทน (ร้อยละ)	ระยะเวลาเกิด ก๊าซ (วัน)	ของแข็งระเหย ทั้งหมด (กรัม)	ซีโอดีที่กำจัด (ร้อยละ)	กรดไขมันระเหย/ ความเป็นด่างทั้งหมด
ชุดควบคุม (กากตะกอนเยื่อกระดาษ)	5.06	0.091	64.99	31	55.45	96.79	0.01
การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษ ก่อนดำเนินการทดลอง							
- ให้ความร้อน	7.59	0.102	42.20	21	74.32	80.00	0.42
- ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	8.28	0.175	45.23	22	47.25	80.00	0.44
- ให้ความร้อนร่วมกับใช้สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์	9.00	0.181	39.37	23	49.84	75.93	0.43
อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะอาหาร							
- 1:1	7.59	0.121	69.99	23	62.72	75.00	0.13
- 1:2	6.44	0.080	84.00	23	81.00	88.46	0.05
- 1:3	5.64	0.063	64.28	26	89.11	75.54	0.05
- 1:4	3.96	0.044	62.78	26	90.02	62.50	0.06
การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วย การให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอก ไซด์ก่อนดำเนินการทดลองผสมขยะอาหาร 1:1	14.28	0.186	63.33	25	76.79	57.70	0.12



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดการทดลองต่างๆ

หมายเหตุ

- 1 = กากตะกอนเชื่อมกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ชุดควบคุม)
- 2 = กากตะกอนเชื่อมกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อน
- 3 = กากตะกอนเชื่อมกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 4 = กากตะกอนเชื่อมกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 5 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื่อมกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:1)
- 6 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื่อมกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:2)
- 7 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื่อมกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:3)
- 8 = อัตราส่วนกากตะกอนเชื่อมกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (1:4)
- 9 = กากตะกอนเชื่อมกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมขยะเศษอาหารอัตราส่วน 1:1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.10 พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณที่สูงกว่ากากตะกอนเชื้อกระดาษมาผสมกับขยะเศษอาหาร แต่จะมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของทั้งสองชุดการทดลองมาผสมกันจึงพบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดที่ชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองพร้อมผสมขยะเศษอาหาร 1:1

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

งานวิจัย	สารตั้งต้น	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ย	องค์ประกอบก๊าซ
Chulhwan และคณะ (2005)	กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง	0.52 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 79.5
Forster-Carneiro และคณะ (2008)	ขยะอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชน	0.05–0.18 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด	-
Chunmin และคณะ (2009)	กากตะกอนเชื้อกระดาษและกระดาษ	0.032 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด	-
ปิยชน สังข์กลิ่นหอม (2545)	ขยะเศษอาหาร	0.11–0.22 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่กำจัด	-
จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2546)	วัสดุเหลือทิ้งจากผลไม้บรรจุกระป๋อง	0.157–0.682 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 40.24
งานวิจัยครั้งนี้	กากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมัน	0.186 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 63.33

สำหรับก๊าซมีเทนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์และสามารถเผาไหม้ได้จะต้องมีองค์ประกอบอยู่ในช่วงร้อยละ 60–70 (Ayotamuno, 2008) ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นพบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองพร้อมผสมขยะเศษอาหารในอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1 ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้นและมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงต่อไป ซึ่งหากนำกากตะกอนเชื้อกระดาษ

น้ำหนัก 1 กิโลกรัม ผสมขยะเศษอาหาร 1 กิโลกรัม จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 31.79 ลิตร และผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 20.12 ลิตร

สำหรับค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษพบว่ากากตะกอนเชื้อกระดาษ 1 ตัน จะใช้ความร้อน 22.73 กิโลวัตต์/ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 56.83 บาท และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 86.02 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 3,440 บาท แต่ค่าใช้จ่ายดังกล่าวสามารถลดลงได้จากกระบวนการผลิตเชื้อกระดาษของโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาว เคลือบมัน เนื่องจากในกระบวนการผลิตจะมีขั้นตอนการต้มเชื้อ ซึ่งจะต้องเติมสารเคมีประเภท โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปเพื่อให้ชิ้นไม้สับแตกตัวเป็นเส้นใย โดยสารเคมีดังกล่าวจะอยู่ในรูปสารละลายสีค่า ซึ่งจะถูกกำจัดโดยวิธีระเหยน้ำออก จากนั้นแยกสารเคมีทั้ง 2 ชนิดออกจากกัน โดยนำส่วนหนึ่งกลับไปใช้ในขั้นตอนการต้มเชื้อและอีกส่วนหนึ่งส่งกำจัด ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งกำจัดสามารถนำมาใช้ในการทดลองได้ ส่วนความร้อนนั้น จะได้จากไอน้ำที่ทิ้งออกสู่บรรยากาศในขั้นตอนการต้มเชื้อเช่นกัน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงเกินพอต่อการนำมาปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ กล่องขาวเคลือบมันนั้นพบว่า มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันไปตามสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยตามการทดลองทั้ง 4 การทดลองดังนี้

5.1.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.09 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.99 ใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 31 วัน

5.1.2 การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 และด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลองพบว่า กากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนพร้อมปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้มากที่สุด หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.18 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 39.37 โดยพบว่าองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ได้น้อยกว่ากากตะกอนเยื่อกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น และใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 23 วัน

5.1.3 จากการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 พบว่าอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด เท่ากับ 7,590 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.12 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 69.99 ซึ่งใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 23 วัน

5.1.4 จากการทดลองทั้ง 3 การทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด คือ ควรบำบัดกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 ก่อนดำเนินการทดลอง พร้อมผสมกับขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1 เนื่องจากการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษก่อนดำเนินการทดลอง จะเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และการผสมกับขยะเศษอาหารจะเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 14,280 มิลลิลิตร หรือคิดเป็น

อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.19 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยทั้งหมด และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 63.33 โดยใช้ระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 25 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาอุณหภูมิในการปรับสภาพเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับภาคตะกอนเชื้อกระดาษให้สูงขึ้น ประมาณ 170–180 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ
- 2) ควรปรับปรุงระบบให้มีการทำงานแบบต่อเนื่อง โดยแยกถังหมักกรดออกจากถังหมักก๊าซ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ
- 3) ควรศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อพัฒนาระบบให้ใช้งานได้จริง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. **คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545.
- จิรวัดน์ ชาลิวรรณ. **ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจน อัตราการย่อยวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรจุระป้องกัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- ชลิดา อุตะเกา. **ศักยภาพของขยะผักผลไม้ในการผลิตมีเทนแบบไร้อากาศ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- ชานู สุริยวิจิตรเสริม, วรารณ วิโรจน์ชัยยันต์ และวิเศษพล ทรัพย์มณี. **ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหาร โรงอาหารวิศวกรรมศาสตร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- ณัฐวิทย์ โดทินา. **การดูดซับสารหนูโดยใช้กากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและตะกอนสลัดจ์จากโรงประปา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548.
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. **ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์** [Online]. กรุงเทพฯ: ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2552. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchname.asp?VID=634> [10 กรกฎาคม 2552]
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. **คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ**. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ: ฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ, 2546.
- ทักษณีย์ วุฒิคุณ. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากของแข็งที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- ทัศนีย์ เจียรพสุอนันต์. **การผลิตเอทานอลจากขยะเศษอาหาร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

ปิยชน สังข์กลิ่นหอม. การบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบท่อไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. โครงการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลในกรุงเทพมหานครและเชียงใหม่ (เฟส 2). กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, 2549.

พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานฉบับสมบูรณ์การศึกษาและสาธิตการผลิตพลังงานไฟฟ้า/ความร้อนจากขยะชุมชน [Online]. กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, 2548. แหล่งที่มา: <http://e-lib.dede.go.th/mmm-data/Bib10440.pdf> [4 พฤษภาคม 2552]

พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานของประเทศไทย ปี 2551 (เบื้องต้น). กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552.

พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เทคโนโลยีย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน [Online]. กรุงเทพฯ: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=454> [4 พฤษภาคม 2552]

พลังงาน, กระทรวง. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. ประเภทของชีวมวล [Online]. กรุงเทพฯ: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551. แหล่งที่มา: <http://www.efc.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=hGfTu8zx7jWvD4by&doc=Bgqtvz94LrZj7Hf2> [4 พฤษภาคม 2552]

พลังงาน, กระทรวง. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยตั้งปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ [Online]. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551. แหล่งที่มา: http://www.erdj.or.th/mix-waste/?mix=Experimental_procedures5 [15 ตุลาคม 2552]

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ: แชน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร, 2542.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน. คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ [Online]. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2551. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/I_Standard/index.html [15 ตุลาคม 2552]

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน. คู่มือการควบคุม และป้องกันมลพิษอากาศ สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยี น้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน, 2550.

วุฒิกัญช์ คุมมินทร์. การผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารที่ความเข้มข้นสูง โดยการหมักแบบ ชั้นกรองไร้อากาศ 2 ขั้นตอนร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2544.

สกานต์ ศิริมะณีวัฒนา และวรรณะ ชมศร. สภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5 (นครราชสีมา). หลักการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ [Online]. นครราชสีมา: ศูนย์วิชาการและบริการข้อมูลพลังงานภูมิภาคที่ 5, 2551. แหล่งที่มา: <http://www.region5.m-energy.go.th/document/51/waste/03.2.doc> [4 พฤษภาคม 2552]

สุพรรณิ ชาญประเสริฐ. ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการหมักกาก ณะเชื้อแบบอับอากาศ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาชีววิทยา ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, 2536.

สุพิศ ไกรมาก. การศึกษาการสลายทางชีวภาพของส่วนผสมขยะและสัดตั้งน้ำเสียในการหมักปุ๋ย แบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.

สุรพล สายพานิช. กระบวนการเร่งตะกอนคอนแทกส์สเตบิลไลเซชันแบบแอนแอโรบิก. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

อมรพรรณ แดมเงิน. การผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะชุมชนเก่าด้วยระบบหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญา โทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

อวิศดา ฉลานวัฒน์. อิทธิพลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการผลิต ก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.

อาริยา วิรัชวรกุล. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะ ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ศึกษาศาสตร์, ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.

อิสรี รอดทัศนาศ. การปรับสภาพกากตะกอนเยื่อกระดาษเหลือทิ้งขั้นต้นเพื่อผลิตเอทานอลจากกระบวนการย่อยให้เป็นน้ำตาล โดยใช้เอนไซม์และการหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2550.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. การนำวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจ. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2548.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. สถิติอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษและผลิตภัณฑ์ [Online]. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2552. แหล่งที่มา: http://www.oie.go.th/industry_stat/show_industry_stat.asp [2 พฤศจิกายน 2552]

ภาษาอังกฤษ

Ahring, B., De Baere, L., Lissens, G., Thomsen, A. and Verstraete, W. Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste. **Environmental Science Technology** 38 (2004): 3412–3424.

Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste – activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science** 34 (2008): 770–772.

Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Igoni, A.H., Ogaji, S.O.T., Robert, S.D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy** 85 (2008): 430–438.

Cai, C., Liu, L., Pei, H., Sun, J., Wang, S. and Zhang, J. Corn stover pretreatment by inorganic salts and its effects on hemicelluloses and cellulose degradation. **Bioresource Technology** 100 (2009): 5865–5871.

Carrere H, Delgene J, Valo A. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. **J Chem Technol Biotechnol** 79 (2004): 197–203.

Chen, M., Xia, L. and Zhao, J. Comparison of four different chemical pretreatments of corn stover for enhancing enzymatic digestibility. **Biomass and Bioenergy** 33 (2009): 1381–1385.

Chulhwan P., Chunyeon L., Howard A.C., Sangyong K. and Yu C. Upgrading of anaerobic digestion by incorporation two different hydrolysis processes. **Bioscience and Bioengineering** 100 (2005): 164–167.

- Chunmin, W., Dehan, W., Shaoquan, W. and Yunqin, L. Alkali pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge. **Journal of Hazardous Materials** 170 (2009): 366–373.
- Chynoweth, D.P., Lyberatos, G., Pullammanappallil, P.C. and Svoron, S.A. Stable performance of anaerobic digestion in the presence of a high concentration of propionic acid. **Bioresouce Technology** 78 (2001): 165–169.
- Converti, A., Del Borghi, A., Del Borghi, M., Palazzi, E. Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge. **Bioprocess Engineering** 20 (1999): 553–566.
- Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. **Updated guidebook on biogas development energy resources development serious No.27**. New York: United Nation, 1984.
- Emma, M., Honghi, T. and Nicholas, W. Pretreatment of pulp mill secondary sludge for high-rate anaerobic conversion to biogas. **Bioresource Technology** 100 (2009): 5729–5735.
- Espinosa Llorens Ma. Del, C. and Lopez Torres, M. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solids wastes. **Waste Management** 28 (2008): 2229–2234.
- Foqelbolm, C.J. and Johan, G. **Chemical Pulping**. Finland: Fapet Jyvaskyla, 2000.
- Forster-Carneiro, T., Perez M. and Romero, L.I. Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solids waste. **Bioresource Technology** 99 (October 2008): 6763–6770.
- Kim J., Kim S., Kim T., Lee M. and Park C. Effects of various pre-treatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. **Biosci Bioeng** 95 (2003): 271–275.
- Tchobanoglou, G., Theisen, H. and Vigil, S.A. **Integrated solids waste management**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- UNEP. **Environmental Management in the pulp and paper industry**. New York: United Nations, 1996.
- United State Environmental Protection Agency (EPA). **Design manual for sludge treatment and disposal**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1979.
- Verma, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organic in municipal solid wastes**. Columbia University, 2002.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองต้องการกากตะกอนเยื่อกระดาษที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4 หมายถึง

$$\begin{array}{ll} \text{น้ำ 100 มิลลิกรัม} & \text{มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 4 มิลลิกรัม} \\ \text{น้ำ 1 ลิตร เท่ากับ } 10^6 \text{ มิลลิกรัม} & \text{มีปริมาณของแข็งทั้งหมด } \frac{4 \times 10^6}{100} \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{array}$$

เพราะฉะนั้นในการทดลองจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดังนั้น ปริมาณกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ใช้ในการหมักร้อยละ 60 ของปริมาตรถังหมัก
5 ลิตร ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมด $3 \times 40,000 = 120,000$ มิลลิกรัม

กากตะกอนเยื่อกระดาษมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 66.46 หมายถึง

$$\begin{array}{ll} \text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด 66.46 มิลลิกรัม} & \text{จากกากตะกอนเยื่อกระดาษ 100 มิลลิกรัม} \\ \text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด 120,000 มิลลิกรัม} & \text{จากกากตะกอนเยื่อกระดาษ} \\ \frac{120,000 \times 100}{66.46} \text{ มิลลิกรัม} & = 180,560 \text{ มิลลิกรัม} \end{array}$$

ดังนั้น ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษต้องใช้กากตะกอนเยื่อ
กระดาษทั้งหมดประมาณ 180.56 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของกากตะกอนเชื้อกระดาศ

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
1	8.06	31.5	0	21	7.01	30.1	2,760
2	-	-	0	22	-	-	2,760
3	6.20	31.4	115	23	-	-	2,760
4	6.20	31.3	345	24	7.16	31.4	2,875
5	6.24	31.0	460	25	7.14	29.8	2,990
6	6.04	30.9	575	26	7.09	30.2	3,220
7	6.51	28.6	690	27	6.94	31.3	3,565
8	-	-	805	28	7.12	31.5	3,795
9	-	-	805	29	-	-	4,370
10	6.12	30.9	920	30	-	-	4,830
11	6.43	29.8	920	31	7.32	30.7	5,060
12	6.62	29.8	920	32	7.31	31.0	5,060
13	6.51	30.3	920	33	7.50	29.6	5,060
14	6.24	29.3	1,035	34	7.12	29.9	5,060
15	-	-	1,265	35	7.57	30.2	5,060
16	-	-	1,380				
17	6.47	29.9	1,495				
18	6.73	30.7	2,185				
19	6.79	29.9	2,645				
20	7.05	31.8	2,760				

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ปริมาณซีโอดีของกากตะกอนเยื่อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	2,400	2,440	2,400	2,413	23.09
5	8,800	8,800	8,800	8,800	0.00
7	3,400	3,400	3,480	3,427	46.19
10	3,500	3,550	3,550	3,533	28.17
12	3,600	3,690	3,600	3,630	51.96
14	850	800	850	833	28.87
17	4,200	4,200	4,200	4,200	0.00
19	3,840	3,840	3,840	3,840	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
21	2,720	2,720	2,720	2,720	0.00
24	7,200	7,200	7,200	7,200	0.00
26	3,400	3,440	3,440	3,427	23.09
28	1,360	1,400	1,360	1,373	23.09
31	350	350	350	350	0.00
33	300	300	250	283	28.87
35	200	150	150	167	28.87

ตารางที่ ข-3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของกากตะกอนเยื่อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	56,800	56,920	56,840	56,853	61.10
5	53,250	53,300	53,250	53,267	28.87
7	41,250	41,150	41,200	41,200	50.00
10	64,250	64,250	64,350	64,283	57.74
12	53,250	53,250	53,200	53,233	28.87
14	53,750	53,700	53,750	53,733	28.87
17	56,600	56,550	56,650	56,600	28.87
19	55,700	55,650	55,650	55,667	28.87

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
21	57,000	57,050	57,000	57,017	28.87
24	77,450	77,450	77,500	77,467	28.87
26	49,250	49,300	49,300	49,283	28.87
28	50,950	51,000	51,000	50,983	28.87
31	54,100	54,150	54,150	54,133	28.87
33	51,100	51,100	51,150	51,117	28.87
35	37,950	37,950	37,900	37,933	28.87

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ปริมาณครุระเหยง่ายของกากตะกอนเชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	195	200	200	198	2.87
5	415	410	410	412	2.87
7	1,430	1,435	1,435	1,433	2.87
10	1,005	1,005	1,000	1,003	2.87
12	1,545	1,550	1,550	1,548	2.87
14	1,620	1,630	1,625	1,625	5.00
17	1,670	1,665	1,670	1,665	2.87
19	1,270	1,270	1,270	1,270	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
21	700	700	700	700	0.00
24	955	955	960	957	2.87
26	620	630	630	627	5.77
28	395	400	395	395	2.87
31	345	345	345	345	0.00
33	73	73	73	73	0.00
35	41	41	41	41	0.00

ตารางที่ ข-5 ปริมาณความเป็นค่าทั้งหมดของกากตะกอนเชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	1,860	1,850	1,850	1,853	5.77
5	1,970	1,980	1,990	1,980	10.00
7	3,410	3,420	3,400	3,410	10.00
10	2,290	2,280	2,300	2,290	10.00
12	3,900	3,890	3,890	3,893	5.77
14	3,880	3,880	3,890	3,883	5.77
17	3,900	3,900	3,900	3,900	0.00
19	3,100	3,100	3,110	3,103	5.77

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
21	3,010	3,020	3,010	3,013	5.77
24	3,450	3,450	3,460	3,453	5.77
26	3,500	3,500	3,490	3,497	5.77
28	3,340	3,340	3,350	3,343	5.77
31	3,310	3,300	3,310	3,307	5.77
33	3,260	3,260	3,260	3,260	0.00
35	2,830	2,830	2,830	2,830	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ทีเอชของการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง

วันที่	ให้ความร้อน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3	6.87	7.53	7.68
4	6.53	6.69	6.83
5	6.63	6.86	6.84
6	6.74	7.01	6.88
7	6.51	6.76	6.81
10	6.90	7.11	7.07
11	7.12	7.92	7.67
12	7.43	8.21	8.08
13	6.96	7.86	7.66

วันที่	ให้ความร้อน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
14	6.93	7.22	7.24
17	7.00	7.26	7.25
18	6.97	7.27	7.31
19	7.15	7.46	7.41
20	6.95	7.34	7.53
21	7.01	7.31	7.29
24	6.94	7.25	7.25
25	7.81	7.36	7.43

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิของการปรับสภาพเบื้องต้นภาคตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (องศาเซลเซียส)

วันที่	ให้ความร้อน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3	29.4	29.2	29.3
4	30.9	30.5	30.0
5	29.9	29.5	29.5
6	28.4	28.3	28.8
7	30.0	30.2	29.6
10	30.5	30.7	30.3
11	30.1	30.5	30.1
12	30.0	30.2	30.0
13	31.1	30.8	30.3

วันที่	ให้ความร้อน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
14	29.8	29.6	29.9
17	28.3	28.3	28.1
18	29.5	30.1	29.0
19	30.3	30.3	30.3
20	31.1	30.9	30.4
21	30.8	30.7	30.4
24	31.4	31.6	30.7
25	31.5	32.1	31.1

ตารางที่ ๓-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเชื้อกระดาษด้วยการให้ความร้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (มิลลิลิตร)

วันที่	ให้ความร้อน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
1	805	345	1,200
2	1,035	690	1,560
3	1,380	1,265	2,040
4	1,725	2,070	2,520
5	2,530	2,875	3,480
6	3,335	3,565	4,440
7	3,910	4,255	5,040
8	4,485	4,945	5,640
9	5,060	5,405	6,000
10	5,405	5,865	6,360
11	5,750	6,210	6,720
12	6,095	6,555	7,080
13	6,325	6,900	7,320
14	6,555	7,130	7,560
15	6,785	7,360	7,800
16	7,015	7,590	8,040
17	7,130	7,820	8,280
18	7,245	7,935	8,520
19	7,360	8,050	8,640
20	7,475	8,165	8,760
21	7,590	8,165	8,880
22	7,590	8,280	8,880
23	7,590	8,280	9,000
24	7,590	8,280	9,000
25	7,590	8,280	9,000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 ปริมาณซีไอดีของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) ($n = 3$)

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อน

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	4,200	4,300	4,300	4,267	57.74
5	3,300	3,200	3,300	3,267	57.74
7	3,960	3,870	3,870	3,900	51.96
10	4,700	4,700	4,600	4,667	57.74
12	5,300	5,300	5,300	5,300	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	4,600	4,500	4,500	4,533	57.74
17	3,100	3,100	3,100	3,100	0.00
19	1,600	1,700	1,700	1,667	57.74
21	1,080	1,080	1,080	1,080	0.00
24	900	800	800	833	57.74

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	5,600	5,700	5,700	5,700	57.74
5	4,100	4,000	4,000	4,033	57.74
7	4,860	4,770	4,860	4,830	57.74
10	6,100	6,100	6,100	6,100	0.00
12	6,300	6,300	6,300	6,300	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	5,700	5,800	5,800	5,767	57.74
17	3,500	3,600	3,600	3,567	57.74
19	2,700	2,700	2,800	2,733	57.74
21	2,520	2,520	2,520	2,520	0.00
24	1,000	1,000	1,000	1,000	0.00

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	6,700	6,700	6,700	6,700	0.00
5	5,000	5,000	5,000	5,000	0.00
7	5,310	5,310	5,310	5,310	0.00
10	7,100	7,000	7,100	7,033	57.74
12	7,500	7,500	7,600	7,533	57.74

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	6,500	6,500	6,500	6,500	0.00
17	5,000	5,000	5,000	5,000	0.00
19	2,700	2,700	2,700	2,700	0.00
21	2,700	2,790	2,790	2,760	51.96
24	1,300	1,400	1,400	1,367	57.74

ตารางที่ ก-5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อน

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	47,900	47,850	47,850	47,867	28.87
5	43,850	43,800	43,850	43,833	28.87
7	52,450	52,400	52,450	52,433	28.87
10	50,050	50,000	50,000	50,017	28.87
12	49,050	49,050	49,050	49,050	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	61,000	61,000	60,950	60,983	28.87
17	53,000	53,000	53,050	53,017	28.87
19	55,800	55,800	55,850	55,817	28.87
21	43,600	43,600	43,600	43,600	0.00
24	47,850	47,850	47,850	47,850	0.00

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	43,450	43,450	43,450	43,450	0.00
5	40,700	40,700	40,700	40,700	0.00
7	45,100	45,050	45,050	45,067	28.87
10	45,850	45,800	45,800	45,817	28.87
12	45,200	45,200	45,250	45,217	28.87

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	59,500	59,450	59,450	59,467	28.87
17	50,850	50,850	50,850	50,850	0.00
19	42,550	42,500	42,550	42,533	28.87
21	39,100	39,100	39,100	39,100	0.00
24	39,550	39,550	39,550	39,550	0.00

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	35,050	35,050	35,050	35,050	0.00
5	70,450	70,450	70,500	70,467	28.87
7	89,900	89,900	89,850	89,883	28.87
10	78,950	78,950	78,950	78,950	0.00
12	68,150	68,150	68,150	68,150	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	129,550	129,500	129,500	129,517	28.87
17	60,250	60,250	60,300	60,267	28.87
19	58,100	58,150	58,150	58,133	28.87
21	49,450	49,450	49,500	49,467	28.87
24	52,000	52,000	52,050	52,017	28.87

ตารางที่ ก-6 ปริมาณครุระเหยง่ายของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร)

(n = 3)

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อน

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	1,690	1,690	1,695	1,692	2.89
5	1,825	1,825	1,825	1,825	0.00
7	1,725	1,725	1,725	1,725	0.00
10	1,350	1,350	1,355	1,352	2.89
12	1,110	1,110	1,105	1,108	2.89

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	910	905	905	907	2.89
17	755	750	755	753	2.89
19	555	550	550	552	2.89
21	350	350	350	350	0.00
24	275	275	275	275	0.00

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	1,750	1,750	1,755	1,752	2.89
5	1,900	1,900	1,895	1,898	2.89
7	1,750	1,755	1,755	1,753	2.89
10	1,550	1,555	1,550	1,552	2.89
12	1,330	1,325	1,325	1,327	2.89

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	1,100	1,100	1,105	1,102	2.89
17	950	950	955	952	2.89
19	805	805	805	805	0.00
21	675	675	675	675	0.00
24	600	605	605	603	2.89

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	2,060	2,055	2,055	2,057	2.89
5	2,325	2,325	2,325	2,325	0.00
7	2,150	2,150	2,150	2,150	0.00
10	1,800	1,805	1,805	1,803	2.89
12	1,650	1,650	1,650	1,650	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	1,400	1,400	1,400	1,400	0.00
17	1,250	1,250	1,250	1,250	0.00
19	1,050	1,055	1,055	1,053	2.89
21	760	765	760	762	2.89
24	625	625	625	625	0.00

ตารางที่ ก-7 ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อน

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	7,670	7,660	7,660	7,663	5.77
5	8,990	9,000	9,000	8,997	5.77
7	8,500	8,500	8,500	8,500	0.00
10	5,850	5,850	5,850	5,850	0.00
12	3,900	3,900	3,900	3,900	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	3,090	3,090	3,100	3,093	5.77
17	2,400	2,400	2,400	2,400	0.00
19	1,600	1,600	1,600	1,600	0.00
21	900	900	900	900	0.00
24	650	650	650	650	0.00

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	8,680	8,690	8,680	8,683	5.77
5	10,300	10,290	10,300	10,297	5.77
7	10,110	10,100	10,100	10,103	5.77
10	7,900	7,900	7,890	7,897	5.77
12	6,420	6,420	6,410	6,417	5.77

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	5,060	5,050	5,050	5,053	5.77
17	3,540	3,550	3,550	3,547	5.77
19	2,550	2,550	2,550	2,550	0.00
21	1,700	1,700	1,700	1,700	0.00
24	1,360	1,370	1,360	1,363	5.77

การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	8,800	8,810	8,810	8,807	5.77
5	12,600	12,590	12,590	12,593	5.77
7	11,500	11,500	11,500	11,500	0.00
10	9,200	9,210	9,210	9,207	5.77
12	7,850	7,850	7,850	7,850	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
14	6,400	6,400	6,410	6,403	5.77
17	5,050	5,050	5,050	5,050	0.00
19	3,150	3,150	3,150	3,150	0.00
21	2,200	2,200	2,200	2,200	0.00
24	1,450	1,440	1,450	1,447	5.77



ภาคผนวก ง

ผลการทดลองศึกษาการแปรผันอัตราส่วนภาคตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 พิเศษของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร

วันที่	1:1	1:2	1:3	1:4	วันที่	1:1	1:2	1:3	1:4
1	7.75	7.05	6.94	6.55	16	8.15	8.28	8.16	7.95
2	7.88	8.08	7.88	7.25	19	7.98	8.13	7.94	7.80
5	7.84	7.55	7.61	7.12	20	7.95	7.78	7.70	7.57
6	7.96	7.07	7.13	6.81	21	7.92	8.13	8.27	7.99
7	8.26	7.59	7.62	7.25	22	8.03	7.83	7.80	7.76
8	8.39	7.24	7.37	7.28	23	7.83	8.59	8.61	8.31
9	7.62	7.76	7.83	7.74	26	7.74	8.21	8.13	8.01
12	7.79	7.72	7.67	7.52	27	7.93	7.83	8.01	7.80
13	7.64	7.29	7.22	7.07	28	8.04	8.21	8.29	8.14
14	7.98	7.93	7.75	7.67	29	8.12	7.83	7.95	7.74
15	7.61	7.56	7.31	7.12	30	8.20	8.33	8.50	8.33

ตารางที่ ง-2 อุณหภูมิของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (องศาเซลเซียส)

วันที่	1:1	1:2	1:3	1:4	วันที่	1:1	1:2	1:3	1:4
1	29.5	31.3	32.3	31.9	16	30.5	29.6	29.8	29.8
2	30.9	30.9	30.6	30.9	19	29.3	30.2	30.3	30.1
5	30.6	30.7	30.6	31.1	20	30.1	32.2	32.0	31.5
6	29.5	32.5	31.8	31.3	21	30.7	29.8	29.8	29.6
7	27.4	29.2	29.2	29.1	22	31.2	32.6	32.3	32.0
8	27.9	32.2	31.7	30.9	23	31.3	30.3	29.9	30.3
9	29.3	29.2	29.0	29.5	26	31.5	30.5	30.5	30.7
12	28.4	30.0	30.1	30.1	27	30.2	32.7	32.4	32.2
13	29.5	30.8	30.4	30.1	28	30.5	30.2	30.6	30.9
14	29.7	28.4	28.0	28.3	29	31.1	31.5	31.3	31.4
15	30.5	31.0	30.7	30.3	30	30.9	28.8	29.0	29.3

ตารางที่ ๓-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการแปรรูปอัตราส่วนกากตะกอนเชื้อกระดาษต่อ
ขยะเศษอาหาร (มิลลิลิตร)

วันที่	1:1	1:2	1:3	1:4
1	230	1,265	345	120
2	460	1,265	345	120
3	805	1,265	345	120
4	1,035	1,265	345	120
5	1,610	1,265	345	120
6	2,185	1,265	345	120
7	2,530	1,265	345	120
8	3,105	1,380	460	240
9	3,565	1,610	575	360
10	4,370	1,840	690	480
11	5,060	2,415	1,150	600
12	5,865	2,990	1,610	840
13	6,440	3,565	2,070	960
14	6,785	4,140	2,530	1,080
15	7,015	4,600	2,875	1,200
16	7,245	5,060	3,220	1,320
17	7,245	5,520	3,565	1,440
18	7,360	5,865	3,795	1,560
19	7,360	6,095	4,255	2,160
20	7,475	6,095	4,600	2,520
21	7,475	6,210	4,945	2,880
22	7,475	6,325	5,175	3,240
23	7,590	6,440	5,405	3,480
24	7,590	6,440	5,520	3,600
25	7,590	6,440	5,520	3,720
26	7,590	6,440	5,635	3,960
27	7,590	6,440	5,635	3,960
28	7,590	6,440	5,635	3,960
29	7,590	6,440	5,635	3,960
30	7,590	6,440	5,635	3,960

ตารางที่ ๔-4 ปริมาณชีโอดีของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) ($n = 3$)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	5,800	5,900	5,900	5,867	57.74
5	2,700	2,700	2,700	2,700	0.00
7	3,690	3,690	3,690	3,690	0.00
9	4,410	4,410	4,500	4,440	51.96
12	3,400	3,300	3,400	3,367	57.74
14	3,500	3,500	3,500	3,500	0.00
16	2,100	2,100	2,100	2,100	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	5,850	5,850	5,850	5,850	0.00
21	5,040	5,130	5,130	5,100	51.96
24	4,100	4,000	4,000	4,033	57.74
26	3,000	3,000	3,000	3,000	0.00
28	2,500	2,500	2,500	2,500	0.00
30	1,000	1,100	1,000	1,033	57.74

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	3,600	3,600	3,600	3,600	0.00
5	2,660	2,590	2,660	2,637	40.41
7	2,790	2,700	2,790	2,760	51.96
9	2,900	2,900	2,900	2,900	0.00
12	2,000	1,900	2,000	1,967	57.74
14	2,500	2,500	2,500	2,500	0.00
16	500	600	500	533	57.74

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	1,620	1,710	1,710	1,680	51.96
21	1,200	1,200	1,300	1,233	57.74
23	630	630	630	630	0.00
26	270	270	180	240	51.96
28	270	360	360	330	51.96
30	270	360	360	330	51.96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-4 ปริมาณซีโอดีของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3) (ต่อ)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	4,500	4,500	4,500	4,500	0.00
5	3,780	3,850	3,850	3,827	40.41
7	3,420	3,510	3,420	3,450	51.96
9	2,300	2,300	2,300	2,300	0.00
12	5,000	5,000	5,000	5,000	0.00
14	3,500	3,500	3,500	3,500	0.00
16	1,200	1,300	1,300	1,267	57.74

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	2,520	2,610	2,520	2,550	51.96
21	1,800	1,900	1,900	1,867	57.74
23	810	810	810	810	0.00
26	360	270	360	330	51.96
28	360	450	450	420	51.96
30	450	450	540	480	51.96

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	6,300	6,300	6,300	6,300	0.00
5	2,380	2,380	2,310	2,357	40.41
7	3,600	3,600	3,600	3,600	0.00
9	2,400	2,400	2,400	2,400	0.00
12	4,000	4,000	4,000	4,000	0.00
14	2,500	2,500	2,500	2,500	0.00
16	400	400	500	433	57.74

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	1,710	1,710	1,710	1,710	0.00
21	2,200	2,200	2,100	2,167	57.74
23	630	540	540	570	51.96
26	450	450	540	480	51.96
28	630	630	630	630	0.00
30	630	630	630	630	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕-5 ปริมาณของแข็งแวนลอยของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	57,250	57,300	57,250	57,267	28.87
5	35,300	35,300	35,300	35,300	0.00
7	42,950	42,950	43,000	42,967	28.87
9	49,000	48,950	49,000	48,983	28.87
12	48,100	48,050	48,100	48,083	28.87
14	58,100	58,150	58,100	58,117	28.87
16	57,550	57,550	57,550	57,550	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	49,800	49,800	49,850	49,817	28.87
21	51,850	51,850	51,850	51,850	0.00
24	47,500	47,500	47,450	47,483	28.87
26	45,700	45,650	45,650	45,667	28.87
28	41,200	41,250	41,200	41,217	28.87
30	38,700	38,650	38,700	38,683	28.87

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	16,200	16,150	16,150	16,167	28.87
5	14,400	14,400	14,400	14,400	0.00
7	22,500	22,500	22,500	22,500	0.00
9	16,200	16,150	16,150	16,167	28.87
12	16,000	16,000	16,050	16,017	28.87
14	15,600	15,600	15,550	15,583	28.87
16	18,600	18,600	18,550	18,583	28.87

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	15,800	15,750	15,750	15,767	28.87
21	14,550	14,600	14,550	14,567	28.87
23	14,950	14,950	14,900	14,933	28.87
26	15,900	15,900	15,900	15,900	0.00
28	16,000	16,000	15,950	15,983	28.87
30	13,800	13,800	13,800	13,800	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕-5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3) (ต่อ)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	14,650	14,650	14,650	14,650	0.00
5	12,050	12,050	12,050	12,050	0.00
7	19,750	19,750	19,750	19,750	0.00
9	13,350	13,350	13,350	13,350	0.00
12	14,550	14,600	14,550	14,567	28.87
14	18,000	18,050	18,000	18,017	28.87
16	17,050	17,050	17,050	17,050	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	16,700	16,750	16,750	16,733	28.87
21	14,400	14,400	14,350	14,383	28.87
23	15,200	15,200	15,150	15,183	28.87
26	11,700	11,700	11,700	11,700	0.00
28	13,500	13,500	13,500	13,500	0.00
30	12,050	12,000	12,000	12,017	28.87

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	12,700	12,700	12,700	12,700	0.00
5	11,150	11,100	11,100	11,117	28.87
7	12,850	12,850	12,850	12,850	0.00
9	12,700	12,700	12,700	12,700	0.00
12	13,100	13,100	13,100	13,100	0.00
14	14,850	14,850	14,900	14,867	28.87
16	20,900	20,900	20,900	20,900	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	15,900	15,950	15,900	15,917	28.87
21	14,450	14,450	14,500	14,467	28.87
23	12,450	12,450	12,450	12,450	0.00
26	12,600	12,550	12,600	12,583	28.87
28	12,500	12,500	12,550	12,517	28.87
30	12,550	12,550	12,550	12,550	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-6 ปริมาณคระเหยง่ายของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อ
ขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) ($n = 3$)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	1,250	1,250	1,250	1,250	0.00
5	2,580	2,575	2,575	2,577	2.89
7	2,245	2,240	2,240	2,242	2.89
9	2,750	2,750	2,750	2,750	0.00
12	2,450	2,445	2,450	2,448	2.89
14	3,425	3,425	3,425	3,425	0.00
16	3,100	3,100	3,100	3,100	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	3,495	3,500	3,500	3,498	2.89
21	4,105	4,100	4,100	4,102	2.89
24	3,855	3,855	3,860	3,857	2.89
26	3,305	3,300	3,300	3,302	2.89
28	2,550	2,550	2,550	2,550	0.00
30	2,245	2,245	2,240	2,243	2.89

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	1,900	1,900	1,900	1,900	0.00
5	1,880	1,880	1,875	1,878	2.89
7	1,935	1,930	1,930	1,932	2.89
9	1,605	1,600	1,600	1,602	2.89
12	1,550	1,550	1,550	1,550	0.00
14	1,000	1,005	1,000	1,002	2.89
16	550	550	550	550	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	245	240	240	242	2.89
21	165	170	165	167	2.89
23	100	100	100	100	0.00
26	100	100	100	100	0.00
28	100	100	100	100	0.00
30	445	440	445	443	2.89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕-6 ปริมาณคระเหยง่ายของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อ
ขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3) (ต่อ)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	2,120	2,125	2,125	2,123	2.89
5	1,785	1,785	1,790	1,787	2.89
7	1,835	1,835	1,835	1,835	0.00
9	1,505	1,510	1,510	1,508	2.89
12	2,260	2,260	2,260	2,260	0.00
14	1,900	1,900	1,900	1,900	0.00
16	1,660	1,660	1,660	1,660	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	1,300	1,295	1,300	1,298	2.89
21	845	845	845	845	0.00
23	250	250	250	250	0.00
26	200	200	200	200	0.00
28	150	150	150	150	0.00
30	400	405	405	402	2.89

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	1,700	1,705	1,700	1,702	2.89
5	1,660	1,660	1,660	1,660	0.00
7	1,650	1,655	1,655	1,653	2.89
9	1,520	1,515	1,520	1,518	2.89
12	1,390	1,390	1,385	1,388	2.89
14	1,495	1,500	1,500	1,498	2.89
16	1,255	1,250	1,250	1,252	2.89

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	660	660	660	660	0.00
21	700	700	700	700	0.00
23	150	150	150	150	0.00
26	150	150	150	150	0.00
28	250	250	250	250	0.00
30	350	350	350	350	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔-7 ปริมาณความเป็นต่างทั้งหมดของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อ
ขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) ($n = 3$)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	29,190	29,190	29,200	29,193	5.77
5	29,880	29,880	29,880	29,880	0.00
7	27,800	27,810	27,800	27,803	5.77
9	30,540	30,540	30,550	30,543	5.77
12	26,400	26,400	26,400	26,400	0.00
14	25,400	25,400	25,400	25,400	0.00
16	26,200	26,200	26,200	26,200	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	26,290	26,300	26,300	26,297	5.77
21	26,950	26,960	26,950	26,953	5.77
24	24,990	25,000	25,000	24,997	5.77
26	22,390	22,400	22,400	22,397	5.77
28	20,130	20,140	20,140	20,137	5.77
30	17,500	17,500	17,500	17,500	0.00

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	7,190	7,200	7,200	7,197	5.77
5	7,680	7,680	7,680	7,680	0.00
7	7,520	7,520	7,530	7,523	5.77
9	7,200	7,210	7,200	7,203	5.77
12	7,680	7,680	7,680	7,680	0.00
14	8,260	8,250	8,250	8,253	5.77
16	8,190	8,180	8,180	8,183	5.77

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	8,310	8,320	8,310	8,313	5.77
21	8,220	8,210	8,220	8,217	5.77
23	8,080	8,080	8,080	8,080	0.00
26	8,400	8,400	8,400	8,400	0.00
28	8,300	8,300	8,300	8,300	0.00
30	8,100	8,100	8,100	8,100	0.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔-7 ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของการแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3) (ต่อ)

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	6,970	6,970	6,970	6,970	0.00
5	6,900	6,910	6,910	6,907	5.77
7	7,020	7,020	7,030	7,023	5.77
9	6,910	6,920	6,920	6,917	5.77
12	7,400	7,400	7,400	7,400	0.00
14	7,010	7,010	7,020	7,013	5.77
16	7,200	7,210	7,200	7,203	5.77

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	7,450	7,450	7,450	7,450	0.00
21	7,810	7,800	7,800	7,803	5.77
23	8,000	8,000	8,000	8,000	0.00
26	8,200	8,190	8,200	8,197	5.77
28	8,050	8,050	8,050	8,050	0.00
30	7,960	7,960	7,960	7,960	0.00

อัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
2	4,500	4,500	4,500	4,500	0.00
5	4,780	4,780	4,790	4,783	5.77
7	4,830	4,820	4,820	4,823	5.77
9	4,980	4,980	4,980	4,980	0.00
12	5,200	5,210	5,200	5,203	5.77
14	4,830	4,840	4,840	4,837	5.77
16	5,060	5,060	5,060	5,060	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
19	5,110	5,100	5,100	5,103	5.77
21	5,700	5,690	5,700	5,697	5.77
23	5,300	5,300	5,300	5,300	0.00
26	5,600	5,600	5,600	5,600	0.00
28	5,500	5,500	5,500	5,500	0.00
30	5,660	5,650	5,650	5,653	5.77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
1	-	-	600
2	-	-	960
3	7.76	29.6	1,320
4	8.06	31.3	1,800
5	8.09	30.7	3,000
6	8.15	29.8	4,200
7	8.42	27.2	5,040
8	-	-	5,880
9	-	-	6,600
10	8.42	27.1	7,800
11	8.02	29.5	8,760
12	7.79	28.6	9,600
13	7.81	29.8	10,560
14	8.24	29.6	11,400

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
15	-	-	12,360
16	-	-	13,320
17	7.96	30.4	13,320
18	8.17	30.9	13,560
19	8.17	29.2	13,800
20	8.10	30.3	13,920
21	8.01	30.1	14,040
22	-	-	14,040
23	-	-	14,160
24	8.33	31.3	14,160
25	8.13	31.6	14,280
26	7.98	31.8	14,280
27	8.05	30.6	14,280

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

ตารางที่ จ-2 ปริมาณชีโอดีของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอน เชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	8,400	8,400	8,300	8,367	57.74
5	3,800	3,900	3,900	3,867	57.74
7	6,750	6,750	6,750	6,750	0.00
10	5,130	5,130	5,040	5,100	51.96
12	6,100	6,000	6,100	6,067	57.74
14	6,100	6,200	6,200	6,167	57.74

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
17	6,000	6,100	6,100	6,067	57.74
19	7,110	7,200	7,200	7,170	51.96
20	5,580	5,490	5,490	5,200	51.96
24	4,800	4,800	4,900	4,833	57.74
26	3,600	3,500	3,500	3,533	57.74

ตารางที่ จ-3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	38,100	38,150	38,150	38,133	28.87
5	49,350	49,400	49,400	49,383	28.87
7	50,600	50,600	50,650	50,617	28.87
10	57,600	57,600	57,600	57,600	0.00
12	57,250	57,200	57,200	57,217	28.87
14	53,100	53,100	53,150	53,117	28.87

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
17	50,150	50,200	50,200	50,183	28.87
19	41,500	41,500	41,550	41,517	28.87
20	45,250	45,250	45,300	45,267	28.87
24	41,650	41,650	41,650	41,650	0.00
26	39,500	39,450	39,500	39,483	28.87

ตารางที่ จ-4 ปริมาณกรดระเหยง่ายของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	1,355	1,350	1,350	1,352	2.89
5	1,145	1,145	1,145	1,145	0.00
7	3,490	3,495	3,495	3,493	2.89
10	2,895	2,890	2,895	2,893	2.89
12	3,080	3,075	3,080	3,078	2.89
14	4,645	4,650	4,650	4,648	2.89

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
17	4,140	4,140	4,140	4,140	0.00
19	4,170	4,175	4,175	4,175	2.89
20	4,055	4,050	4,050	4,052	2.89
24	4,475	4,480	4,475	4,477	2.89
26	4,115	4,115	4,115	4,115	0.00

ตารางที่ จ-5 ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนเชื้อกระดาษ (มิลลิกรัม/ลิตร) (n = 3)

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
3	3,460	3,460	3,460	3,460	0.00
5	51,550	51,550	51,550	51,550	0.00
7	46,710	46,700	46,700	46,703	2.89
10	48,920	48,910	48,910	48,913	2.89
12	38,120	38,110	38,110	38,113	2.89
14	37,480	37,480	37,480	37,480	0.00

วันที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	\bar{X}	S.D.
17	38,100	38,090	38,100	38,097	2.89
19	40,400	40,410	40,400	40,403	2.89
20	40,690	40,700	40,700	40,697	2.89
24	37,100	37,100	37,100	37,100	0.00
26	34,500	34,500	34,500	34,500	0.00



ภาคผนวก ก

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเยื่อกระดาษ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รายงานการทดสอบ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง
เยื่อกระดาษที่ผ่านการฟอกขาว

เครื่องหมาย / ครา

หมายเลขปฏิบัติการ

L52/11068.1 วิทยาศาสตร์บี

ผลการทดสอบ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง

ลิกนิน

8.9

อัลฟาเซลลูโลส

93.7

เบต้าเซลลูโลส

3.9

แกมมาเซลลูโลส

2.4 วิทยาศาสตร์บี

ชื่อผู้ให้บริการ นางสาวนิษฐา วิมลรัตน์

ที่อยู่ผู้ให้บริการ 66/14 หมู่ 3 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง 21130

ลักษณะตัวอย่าง เยื่อสีขาว บรรจุในถุงพลาสติก

วันที่ทดสอบ 16 ธันวาคม 2552 – 8 กุมภาพันธ์ 2553

วิธีทดสอบ 1. ลิกนิน ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-02

2. อัลฟาเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99

3. เบต้าเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99

4. แกมมาเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผู้รับรอง

(นายจรรยา ธงไชย)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รายงาน

(นายยุทธนาพงศ์ แดงเพ็ง)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้อย่างอื่นในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน้า 2/2
ถนนพระรามที่ 6 วาหเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

ภาพที่ ๑-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลส

ของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อน



วิทยาศาสตร์บริการ

รายงานการทดสอบ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง

เยื่อกระดาษที่ผ่านการฟอกขาว

เครื่องหมาย / ครา

NaOH + Temp.

หมายเลขปฏิบัติการ

LS2/H-1091

ผลการทดสอบ

วิทยาศาสตร์บริการ

ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง

ลิกนิน

5.1

อัลฟาเซลลูโลส

90.1

เบต้าเซลลูโลส

8.3

แกมมาเซลลูโลส

กรมวิทยาศาสตร์

ชื่อผู้ให้บริการ

นางสาวกนิษฐา วัฒนรัตน์

ที่อยู่ผู้ให้บริการ

66/14 หมู่ 3 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง 21130

ลักษณะตัวอย่าง

เยื่อสีขาว บรรจุในถุงพลาสติก

วันที่ทดสอบ

16 ธันวาคม 2552 – 8 กุมภาพันธ์ 2553

วิธีทดสอบ

1. ลิกนิน ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-02
2. อัลฟาเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99
3. เบต้าเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99
4. แกมมาเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 203 cm-99

วิทยาศาสตร์บริการ

ผู้รับรอง

(นายจรรยา ธงไชย)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รายงาน

(นายชุตินาทพงศ์ แดงเพ็ง)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้าง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน้า 2/
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

ภาพที่ ๑-4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสของกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาคผนวก ข
ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารสถาบัน 3 ซุฬาลงกรณ์ ซอย 62 พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0 2218 8101 0 2218 8032 โทรสาร (662) 254 021

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) 254-02

รายงานเลขที่ 725/2552

หน้า 1

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง ปุ๋ยน้ำชีวภาพ จำนวน 12 ตัวอย่าง
 ใบส่งตัวอย่าง รหัส S523034
 เจ้าของตัวอย่าง นางสาวกนิษฐา วิมลรัตน์
 วัตถุประสงค์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุไนโตรเจน
 เครื่องมือวิเคราะห์ NITROGEN ANALYZER (FP-428)
 วิธีวิเคราะห์ Combustion method determines nitrogen released at high temperature in pure oxygen and measured by thermal conductivity detector.
 วันที่วิเคราะห์ 6 พฤศจิกายน 2552
 ผลวิเคราะห์

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	%N1	%N2	%N3	%N4	%N เฉลี่ย
1	อุณหภูมิต่ำ	0.282	0.282	0.295	0.222	0.266
2	1:1	0.559	0.596	0.624	0.468	0.562
3	เขี้ยว (0:1)	0.146	0.143	0.149	0.112	0.135
4	ขยะ (1:0)	1.080	1.374	1.439	1.080	1.298
5	NaOH+H ⁺	0.031	0.030	0.031	0.023	0.028
6	In	0.067	0.065	0.068	0.051	0.062

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	%N1	%N2	%N3	%N4	%N เฉลี่ย
7	2:1	0.481	0.506	0.530	0.398	0.478
8	3:1	0.551	0.586	0.614	0.461	0.554
9	4:1	0.374	0.385	0.403	0.302	0.363
10	NaOH	0.023	0.022	0.023	0.017	0.021
11	ข้าวโพด	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	Seed	0.318	0.322	0.337	0.253	0.304

ภาพที่ ข-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

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 875/2552

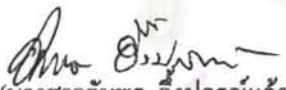
หน้า 1/1

รายงานผลการวิเคราะห์

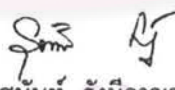
ตัวอย่าง ผงเศษอาหาร จำนวน 2 ตัวอย่าง
 ใบส่งตัวอย่าง รหัส S523629
 เจ้าของตัวอย่าง นางสาวกนิษฐา วิมลรัตน์
 วัตถุประสงค์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุไนโตรเจน
 เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS/O ANALYZER (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)
 วิธีวิเคราะห์ Gaseous products freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by frontal analysis with quantitatively detected by thermal conductivity detector.
 วันที่วิเคราะห์ 23 ธันวาคม 2552

ผลวิเคราะห์

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง	%N1	%N2	%N3	%N4	%N เฉลี่ย
1	รวม	1.94	1.60	1.77	1.88	1.80
2	In	1.30	1.29	1.34	1.17	1.28


 (นางสาวอัมพร อึ้งปกรณ์แก้ว)

ผู้วิเคราะห์


 (นางสุนันท์ รังมิกาญจน์ส่อง)

หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์



(ผศ.ดร. สุพงษ์ นิมกุลรัตน์)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือฯ

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิจัย
 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเท่านั้น

อป/สน

ภาพที่ ข-1 ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ต่อ)



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณและผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (ร้อยละ)

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHR1.C00 09/07/22 08:47:18

0.0 |-----| 0.689

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.689	10128650	1387621	E		100	
TOTAL			10128650	1387621			100	

วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเยื่อกระดาษ

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=3 DATA=1:CHR1.C00 09/07/22 08:49:46

0.0 |-----| 0.689

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.689	1215993	328934			100	
TOTAL			1215993	328934			100	

Area จากกราฟ Standard เท่ากับ 10128650 คิดเป็นองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 99.95

Area จากกราฟกากตะกอนเยื่อกระดาษเท่ากับ 1215993 คิดเป็นองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ

$$1215993 \times 99.95 = 12.00$$

10128650

ดังนั้น กากตะกอนเยื่อกระดาษมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 12.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕ - 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนจากทุกชุดการทดลอง

สภาวะ	องค์ประกอบของก๊าซมีเทน (ร้อยละ)		
	10 วัน ของการทดลอง	20 วัน ของการทดลอง	30 วัน ของการทดลอง
ชุดควบคุม (กากตะกอนเยื่อกระดาษ)	12.00	64.99	51.43
การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษ ก่อนดำเนินการทดลอง			
- ให้ความร้อน	42.20	5.53	1.72
- ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	45.23	7.37	3.03
- ให้ความร้อนร่วมกับใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	39.37	14.02	6.80
การแปรผันอัตราส่วนกากตะกอนเยื่อกระดาษต่อ ขยะเศษอาหาร			
- 1:1	69.99	68.41	68.25
- 1:2	67.27	84.00	53.30
- 1:3	64.28	60.77	50.70
- 1:4	62.78	59.95	12.10
การปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการให้ ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน ดำเนินการทดลองผสมขยะเศษอาหาร 1:1	63.33	42.27	24.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/07/22 08:47:18

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.689	10128650	1387621	E		100	
TOTAL			10128650	1387621			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=3 DATA=1:@CHRM1.C00 09/07/22 08:49:46

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.689	1215993	328934			100	
TOTAL			1215993	328934			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=5 DATA=1:@CHRM1.C00 09/07/22 08:54:44

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.658	6586036	1387907	E		100	
TOTAL			6586036	1387907			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=7 DATA=1:@CHRM1.C00 09/07/22 08:59:34

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.662	5211422	1387958	S E		99.923	
	2	1.397	4025	110	T		0.077	
TOTAL			5215446	1388068			100	

ภาพที่ ข-1 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทนของภาคตะกอนเยื่อกระดาษ

Standard ของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/28 08:59:54

0.0 |-----| 0.483

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.483	7242406	1387976	S	E	100	
TOTAL			7242406	1387976			100	

ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=7 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/28 09:15:16

0.0 |-----| 0.474

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.474	3058084	1250498	S	V	99.973	
	4	1.493	827	103	T		0.027	
TOTAL			3058084	1250498			100	

Standard ของก๊าซมีเทน 20 วันและ 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:13:54

0.0 |-----| 0.558

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.558	7568316	1387799	E		100	
TOTAL			7568316	1387799			100	

ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=7 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:28:58

0.0 |-----| 0.552

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.552	418943	155349			100	
TOTAL			418943	155349			100	

ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=10 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:36:58

0.0 |-----| 0.548

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.548	130004	48612	V		99.4628	
	4	1.832	702	74			0.5372	
TOTAL			130706	48686			100	

**ภาพที่ ข-2 ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของภาคตะกอนเยื่อกระดาษ
ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนก่อนดำเนินการทดลอง**

Standard ของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/28 08:59:54

0.0 |-----| 0.483

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.483	7242406	1387976	S	E	100	
TOTAL			7242406	1387976			100	

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=3 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/28 09:02:02

0.0 |-----| 0.478
0.297
1.500

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.297	217	19			0.0066	
	2	0.478	3277555	1377654	S	V	99.9692	
	3	1.5	795	101	T		0.0242	
TOTAL			3278566	1377774			100	

Standard ของก๊าซมีเทน 20 วันและ 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:13:54

0.0 |-----| 0.558

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.558	7568316	1387799	S	E	100	
TOTAL			7568316	1387799			100	

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=9 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:34:10

0.0 |-----| 0.545
1.845

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.545	558411	204869	S		99.8297	
	4	1.845	952	100			0.1703	
TOTAL			559363	204969			100	

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=6 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:23:28

0.0 |-----| 0.555
1.894

** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.555	229609	85392			99.5129	
	3	1.894	1124	114			0.4871	
TOTAL			230733	85507			100	

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=7 DATA=1:CHRM1.C00 09/11/20 09:28:58

ภาพที่ ข-3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซมีเทนของกากตะกอนเยื่อกระดาษ
ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง

Standard ของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/28 08:59:54

0.0 |-----| 0.483

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.483	7242406	1387976	S	E	100	
TOTAL			7242406	1387976			100	

ผลวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=4 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/28 09:04:14

0.0 |-----| 0.485
1.502

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.485	2852830	1198561	S	V	99.9722	
	4	1.502	794	100	T		0.0278	
TOTAL			2853625	1198661			100	

Standard ของก๊าซมีเทน 20 วันและ 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/11/20 09:13:54

0.0 |-----| 0.558

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.558	7568316	1387799	E		100	
TOTAL			7568316	1387799			100	

ผลวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=4 DATA=1:@CHRM1.C00 09/11/20 09:18:30

0.0 |-----| 0.554
1.918

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.554	1061921	372434	S		99.8706	
	3	1.918	1376	138			0.1294	
TOTAL			1063297	372571			100	

ผลวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=5 DATA=1:@CHRM1.C00 09/11/20 09:21:14

0.0 |-----| 0.558

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.558	515119	188017	SV		100	
TOTAL			515119	188017			100	

ภาพที่ ๔-4 ผลวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซมีเทนของภาคตะกอนเยื่อกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดำเนินการทดลอง

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/06 13:00:56



** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.742	10807608	1387449	E		100	
TOTAL			10807608	1387449			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=3 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/06 13:04:18



** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.38	549	34			0	
	3	0.767	7567928	1387642	E		100	
TOTAL			7568476	1387675			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=4 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/06 13:06:52



** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.307	2951	243			0	
	3	0.746	7397684	1387771	E		100	
TOTAL			7400635	1388014			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=5 DATA=1:CHRM1.C00 09/10/06 13:09:12



** CALCULATION REPORT **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.538	2619	252			0	
	2	0.739	7380812	1387794	E		100	
TOTAL			7383431	1388047			100	

ภาพที่ ๕-5 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วน

กากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:1

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:00:56

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.742	10807608	1387449	E		100	
TOTAL			10807608	1387449			100	

ผลวิเคราะห์ห้องที่ประกอบของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=6 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:11:56

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.737	7273416	1387932	E		100	
TOTAL			7273416	1387932			100	

ผลวิเคราะห์ห้องที่ประกอบของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=7 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:14:22

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.336	2022	172			0	
	3	0.755	7227613	1387992	E		100	
TOTAL			7229634	1388164			100	

ผลวิเคราะห์ห้องที่ประกอบของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=9 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:19:14

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.21	1118	107			0	
	2	0.742	5763686	1387969	E		100	
TOTAL			5764803	1388076			100	

ภาพที่ ๕-6 ผลวิเคราะห์ห้องที่ประกอบของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วน

กากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:2

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:00:56

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.742	10807608	1387449	E		100	
TOTAL			10807608	1387449			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=13 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:33:44

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.233	667	54			0	
	2	0.75	6950644	1388377	E		100	
TOTAL			6951310	1388431			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=14 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:36:26

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.742	6571315	1388424	E		100	
TOTAL			6571315	1388424			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=8 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:16:42

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.445	1878	170			0	
	2	0.75	5482299	1387971	E		100	
TOTAL			5484177	1388140			100	

ภาพที่ ๗-7 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วน

กากตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:3

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=2 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:00:56

0.0  0.742

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.742	10807608	1387449	E		100	
TOTAL			10807608	1387449			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=10 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:23:14

0.0  0.750

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	3	0.75	6788486	1388044	E		100	
TOTAL			6788486	1388044			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=11 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:28:52

0.0  0.750

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.75	6482459	1388190	E		100	
TOTAL			6482459	1388190			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=12 DATA=1:@CHRM1.C00 09/10/06 13:31:16

0.0  0.308 0.743

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.308	1988	175			0	
	2	0.743	1308574	457214			100	
TOTAL			1310562	457389			100	

ภาพที่ ๘-8 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทนของการแปรผันอัตราส่วน

ภาคตะกอนเยื่อกระดาษต่อขยะเศษอาหาร 1:4

Standard ของก๊าซมีเทน

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=3 DATA=1:@CHRM1.C00 10/01/19 08:36:24

- 0.0 |----- 0.529

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.529	7277880	1388131	VE		100	
TOTAL			7277880	1388131			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 10 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=26 DATA=1:@CHRM1.C00 10/01/19 09:26:30

- 0.0 |----- 0.520

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.302	1098	135			0.0238	
	2	0.52	4611065	1256179	VE		99.9762	
TOTAL			4612162	1256313			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 20 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=19 DATA=1:@CHRM1.C00 10/01/19 09:16:18

- 0.0 |----- 0.524

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1	0.524	3078099	847567			100	
TOTAL			3078099	847567			100	

ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทน 30 วันของการทดลอง

C-R7A CHROMATOPAC CH=1 REPORT No.=14 DATA=1:@CHRM1.C00 10/01/19 09:05:00

- 0.0 |----- 0.521

**** CALCULATION REPORT ****

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2	0.521	1781750	523125	S		100	
TOTAL			1781750	523125			100	

ภาพที่ ข-9 ผลวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซมีเทนของภาคตะกอนเยื่อกระดาษ
ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์
ก่อนดำเนินการทดลองผสมขยะเศษอาหาร 1:1

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนิษฐา วิมลรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 11 กรกฎาคม 2529 สถานที่เกิด จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย