วิทยานิพนธ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้น โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

BIOGAS PRODUCTION FROM VERMICELLI FACTORY WASTES BY ANAEROBIC DIGESTION

นางสาวสุดารัตน์ ภักดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

Biogas Production from Vermicelli Factory Wastes by Anaerobic Digestion

นามผู้วิจัย นางสาวสุดารัตน์ ภักดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

Biogas Production from Vermicelli Factory Wastes by Anaerobic Digestion

โดย

นางสาวสุดารัตน์ ภักดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2551

สุดารัตน์ ภักดี 2551: การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing. 118 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยถังปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียวอัตราสูงมีปริมาตรการใช้งาน 6.5 ลิตร ถังปฏิกิริยามีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซของระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องโดยมีสภาวะทดลองที่อุณหภูมิห้องและควบคุมค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการผสมกากถั่วและน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบโดยเฉลี่ยประมาณ 65,000 mg/l น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีการปรับสภาพให้มี pH เท่ากับ 7

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 88.82-95.12 และ 74.07-96.04 ตามลำดับ โดยเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มลดลงทั้ง 4 ระบบ ในขณะที่ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.0043 ถึง 0.0909 l/g COD ที่ถูกกำจัด ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐานในแต่ละวันอัตราการเกิดก๊าซมีความสม่ำเสมอ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.0 มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนสูงสุด ซึ่งมีก๊าซมีเทนสูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 50.64 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆระบบมีเสถียรภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือมีค่า VFA/ALK หรือกำลังบัฟเฟอร์ และพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

_____ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sudarat Pakdee 2008: Biogas Production from Vermicelli Factory Wastes by Anaerobic Digestion. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor. Mongkol Damrongsri, Dr.Ing. 118 pages.

The purpose of this research was to study the organic loading rate from vermicelli wastes that makes maximum biogas production by anaerobic digestion single phase with high-rate reactor at net volume 6.5 L. Reactors had continuously mixed well by stirrers. The raw vermicelli wastewater and vermicelli solid had been mixed to give an average 65,000 mg/L COD and used to control the volumetric loading rate of 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0 kg-COD/m^3-d with semi-continuous feed in laboratory condition. Influent wastewater had been adjusted pH to 7.

The result at volumetric loading rate of 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0 kg-COD/m^3-d could be treated the COD and suspended solids from 88.82 to 95.12% and 74.07 to 96.04% respectively. The removal efficiencies were decreased by increasing of volumetric loading rate while the gas production were increased according to the increasing of volumetric loading. Methane gas produced average was range from 0.0043 to 0.0909 l/g at standard temperature and pressure condition. At volumetric loading of 8.0 kg-COD/m^3-d gave the maximum biogas production which the percentage of maximum methane content was average 50.64 %. This study had properly buffer and pH to treat by anaerobic digestion.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.มงคล ดำรงค์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ชาติ เจียมไชยศรี ประธานการสอบ และ ศ.ดร.จงรักษ์ ผลประเสริฐ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณ คุณกาญจนา ทุยเวียง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สุดารัตน์ ภักดี

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	37
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	72
ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณ	98
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ตัวอย่างกากถั่ว	104
ภาคผนวก ง รูปการวิจัย	111
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากแผนกต่างๆของโรงงาน	4
2	ลักษณะสมบัติของน้ำจากน้ำ Recycle ภายในโรงงาน	8
3	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งทั่วไปภายในโรงงาน	9
4	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตโปรตีนก้อนของโรงงาน	9
5	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียรวมก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย	9
6	ชนิดและปริมาณก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	10
7	ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา	20
8	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	33
9	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ	35
10	แผนการดำเนินงานวิจัย	36
11	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของตัวอย่างกากถั่ว	38
12	ค่าเฉลี่ย COD ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ, ออกจากระบบ, COD ที่ถูกกำจัดและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดCOD ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	40
13	ค่าเฉลี่ย SS ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ, ออกจากระบบ, SS ที่ถูกกำจัดและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	42
14	อุณหภูมิในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ น้ำทิ้งจากระบบและถังปฏิกิริยา ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	44
15	พีเอชในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ น้ำทิ้งจากระบบและถังปฏิกิริยาที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	46
16	ค่า ORP ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ และถังปฏิกิริยาที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

17 ค่าเฉลี่ย VFA ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ถังปฏิกิริยาและที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 50

18 ค่าเฉลี่ย ALK ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ถังปฏิกิริยาและที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 51

19 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วน VFA/ALK ในน้ำเสียเข้าสู่ระบบและน้ำทิ้งจากระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 53

20 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง, ภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวันและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 55

21 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 59

22 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม SS ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 60

23 ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนชีวภาพที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ 62

ตารางผนวกที่

ก1 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d 73

ก2 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.0 kg-COD/m^3-d 74

ก3 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.0 kg-COD/m^3-d 75

ก4 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.0 kg-COD/m^3-d 76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก5	ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 2.0 kg-COD/m^3-d	77
ก6	ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 4.0 kg-COD/m^3-d	79
ก7	ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 6.0 kg-COD/m^3-d	81
ก8	ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 8.0 kg-COD/m^3-d	83
ก9	ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 2.0 kg-COD/m^3-d	85
ก10	ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 4.0 kg-COD/m^3-d	86
ก11	ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 6.0 kg-COD/m^3-d	87
ก12	ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 8.0 kg-COD/m^3-d	88
ก13	ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 2.0 kg-COD/m^3-d	89
ก14	ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 4.0 kg-COD/m^3-d	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ก15 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 6.0 kg-COD/m^3-d 93

ก16 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 8.0 kg-COD/m^3-d 95

ก17 ปริมาณตะกอนชีวภาพตลอดการทดลอง ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรต่างๆ 97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตแป้งจากถั่วเขียวของโรงงานสิทธินันท์	5
2	กระบวนการผลิตโปรตีนก้อนของโรงงานสิทธินันท์	6
3	กระบวนการผลิตวุ้นเส้นตรงของโรงงานสิทธินันท์	7
4	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสิทธินันท์	8
5	ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน	15
6	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	16
7	แผนภูมิอุปกรณ์การทดลองของระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	29
8	อุปกรณ์การทดลองของระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	30
9	แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง	34
10	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	41
11	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	43
12	อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	45
13	ค่าเฉลี่ย pH ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	46
14	ค่าเฉลี่ย ORP ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	48
15	ค่าเฉลี่ย VFA ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	50
16	ค่าเฉลี่ย ALK ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	52
17	ค่าเฉลี่ย VFA/ALK ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	53
18	การผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	56
19	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (CH_4) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	57
20	ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

21	ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม SS ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	60
22	ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนชีวภาพที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	62

ภาพผนวกที่

ข1	แสดงความดันของก๊าซชีวภาพในระบบเก็บก๊าซชีวภาพของการทดลอง	101
ง1	กากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นสิทธินันท์	112
ง2	น้ำเสียสังเคราะห์ได้จากการผสมกากถั่วและน้ำเสีย	113
ง3	เครื่องวัดปริมาณก๊าซที่เกิดจากระบบ	114
ง4	มิเตอร์วัดปริมาณก๊าซ	114
ง5	อุปกรณ์เก็บกักก๊าซ	115
ง6	peristatic pump	116
ง7	มอเตอร์	116
ง8	อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ	117

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ALK	=	Alkalinity (mg/l as $CaCO_3$)
CH_4	=	Methane Gas
CO_2	=	Carbondioxide Gas
Eff	=	Effluent
F/M Ratio	=	Food to Microorganism Ratio
		(kg COD/kg MLSS-Day)
g	=	gram
g/g	=	gram per gram
hr	=	hour
kg	=	kilogram
kg/m^3	=	kilogram per cubic metre
kg COD/kg MLSS-Day	=	kilogram Chemical Oxygen Demand per
		kilogram Mixed Liquor Suspended Solids per day
$kg\ COD/m^3\text{-}d$	=	kilogram Chemical Oxygen Demand per
		cubic metre per day
HRT	=	Hydraulic Retention Time
H_2	=	Hydrogen Gas
Inf	=	Influent
l	=	liter
l/d	=	liter per day
l/g	=	liter per gram
m	=	metre
m^3	=	cubic metre
mg/g	=	milligram per gram
mg/l	=	milligram per liter

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MLSS	=	Mixed Liquor Suspended Solids (mg/l)
N_2	=	Nitrogen Gas
ORP	=	Oxidation Reduction Potential (mV)
React	=	Reactor
SS	=	Suspended Solids (mg/l)
STP	=	Standard Temperature and Pressure (absolute pressure of 100 kPa and a temperature of 0 °C)
Temp	=	Temperature (°C)
µg/g	=	microgram per gram
VFA	=	Volatile Fatty Acid (mg/l as CH_3COOH)
VL	=	Volumetric Loading (kg-COD/m^3-d)

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

Biogas Production from Vermicelli Factory Wastes by Anaerobic Digestion

คำนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาประเทศและมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของทุกประเทศ ทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจากน้ำมันซึ่งประเทศไทยต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และกำลังประสบปัญหาราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ มาทดแทนการใช้น้ำมัน โดยที่พลังงานทดแทนจะต้องเป็นพลังงานที่สะอาด เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เพราะในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดของเสียลงได้อีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

สารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้น ทั้งนี้เนื่องจากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตวุ้นเส้นและโปรตีนจากถั่วเขียวเป็นน้ำเสียกลุ่มหนึ่งที่มีค่าความสกปรกสูงซึ่งมีค่าซีโอดี ประมาณ 20,000 mg/L และกากถั่วซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้มีค่าซีโอดีประมาณ 35,000 mg/l เมื่อนำมาผสมกันจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมากำจัดด้วยวิธีการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ได้ก๊าซมีเทนซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้และใช้เป็นพลังงานทดแทนด้วย และถือว่าเป็นแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานที่ดีอีกแนวทางหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่เดิมของโรงงานซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้(มั่นสิน, 2542)

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของกากถั่วและน้ำเสียของโรงงานดังกล่าวในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับภาคสนาม (large scale) ต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องเข้าใจถึงตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมสภาวะของระบบที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดก่อนเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาปริมาณของก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) และปริมาณก๊าซมีเทน (methane gas) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas production per organic weight removal)

2. เพื่อศึกษาระบบการทำงานของระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในการลดมลสารอินทรีย์ คือ COD (chemical oxygen demand) และ SS (suspended solids) ที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ (volumetric loading)

ขอบเขตการศึกษา

1. การศึกษาทดลองในครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งได้จากการผสมกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานผลิตวุ้นเส้นของบริษัท สิทธินันท์ จำกัด โดยจะใช้กากถั่วที่ผ่านกระบวนการบดโม่และน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่เดิมของโรงงาน มีอัตราส่วนกากถั่ว 50 กรัม (dry weight) ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร มีค่า COD ประมาณ 65,000 mg/l

2. การทดลองศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบอัตราสูง (single phase with high-rate reactor) ขนาด 6.5 ลิตร การดำเนินระบบเป็นไปแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous feed)

3. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อระบบ คือ ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์คือ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d โดยประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาดังต่อไปนี้

3.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อถังปฏิกิริยาต่อวันและปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และ ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ที่ถูกกำจัด

3.2 ศึกษาประสิทธิภาพของระบบในตรวจวิเคราะห์ในรูป COD และ SSของส่วนผสมที่เข้า (influent) และออก (effluent) จากระบบ

การตรวจเอกสาร

1. ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานสิทธินันท์

โรงงานสิทธินันท์ ตั้งอยู่เลขที่ 38/1 หมู่ 11 ถนนปทุมธานี-ลาดหลุมแก้ว ตำบลบางคูหลวง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ประกอบกิจการผลิตแป้งจากถั่วเขียวและวุ้นเส้นในขบวนการผลิตแป้งถั่วเขียว และวุ้นเส้นมีความต้องการใช้น้ำสูง และก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงมีปริมาณมาก โดยสามารถแยกกระบวนการผลิตหลักของโรงงานและช่วงเวลาการผลิตดังนี้

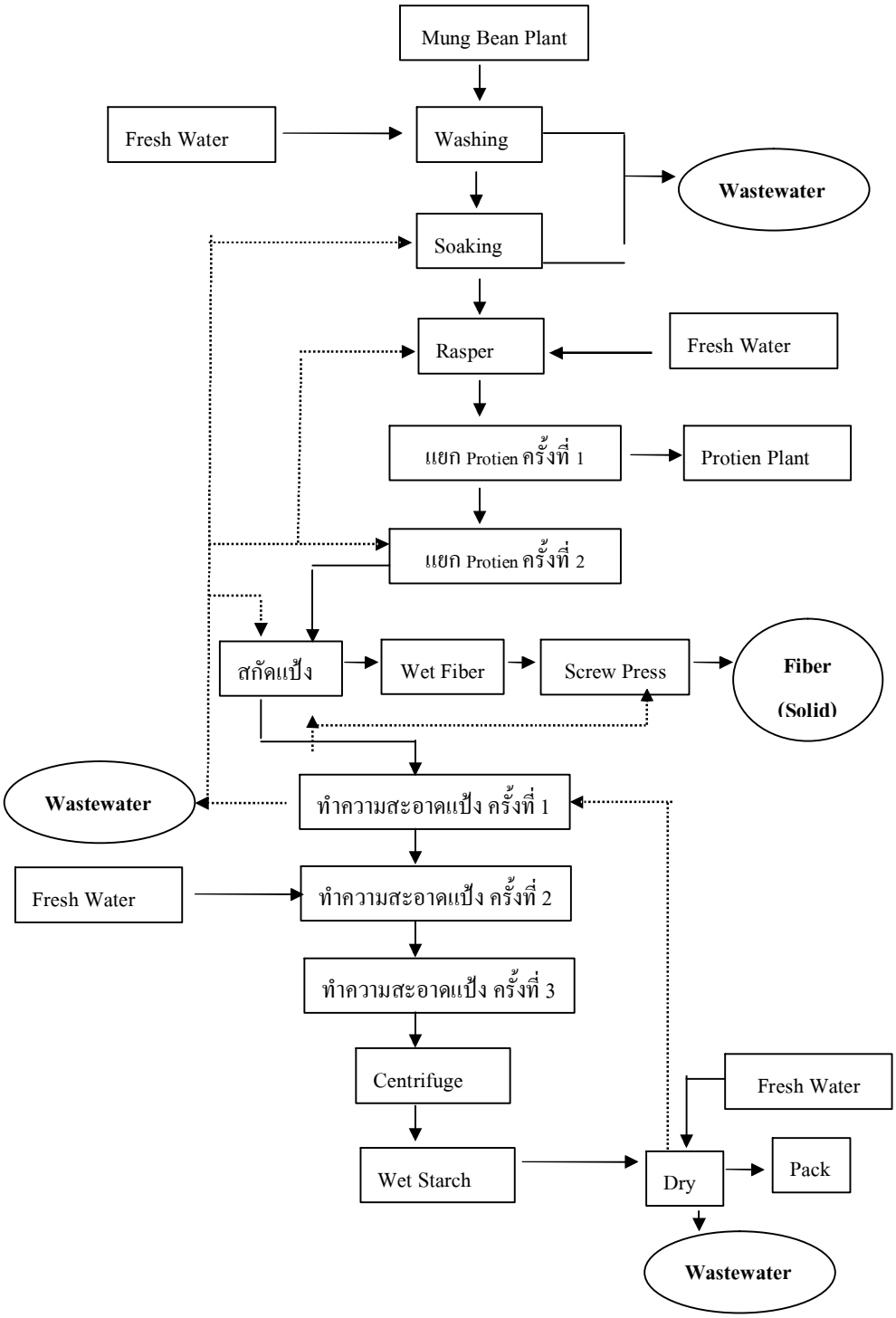
- กระบวนการผลิตแป้งจากเมล็ดถั่วเขียว ผลิตตลอด 24 ชั่วโมง และหยุดการผลิตช่วงเดือนตุลาคม – เดือนพฤศจิกายน
- กระบวนการผลิตโปรตีนก้อนจากน้ำโปรตีน ผลิตตลอด 24 ชั่วโมง และหยุดการผลิตช่วงเดือนตุลาคม – เดือนพฤศจิกายน
- กระบวนการผลิตวุ้นเส้นจากเม็ดถั่วเขียว ผลิต 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำการตามความต้องการของตลาด

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากแผนกต่างๆของโรงงาน

แหล่งกำเนิดน้ำเสีย	**ปริมาณน้ำเสีย (m^3/d)**
แผนกแป้ง	970.50
น้ำจากกากโปรตีน	636.00
แผนกวุ้นเส้น	600.00
น้ำ Recycle	180.00
ทั่วไป	26.54
ก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย	2,557.04

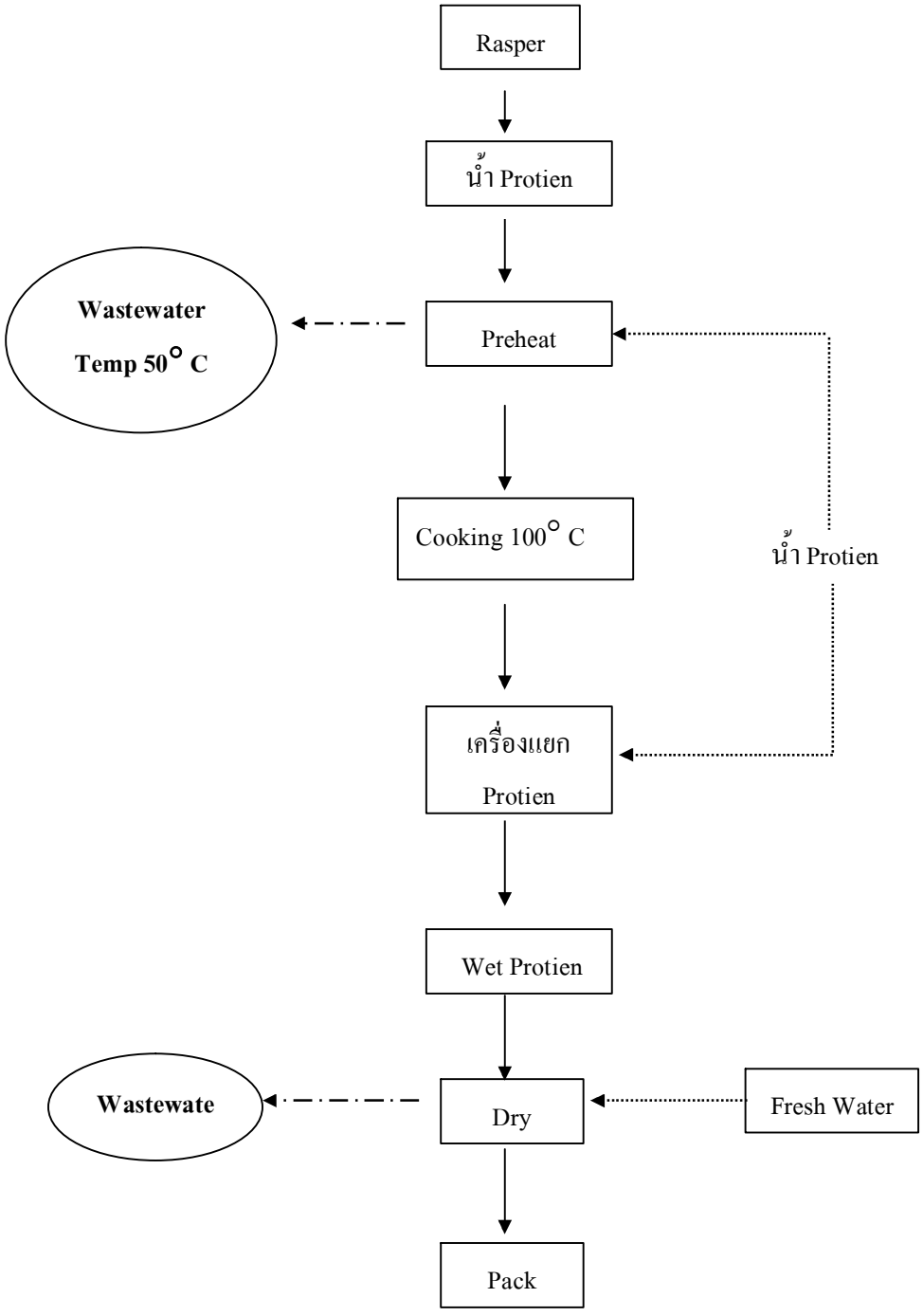
หมายเหตุ ข้อมูลในตารางที่ 2 สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับแผนการผลิตของโรงงาน และสถานการณ์ปัจจุบัน

ที่มา: ข้อมูลจากฝ่ายการผลิตของโรงงานสิทธินันท์ (2545)



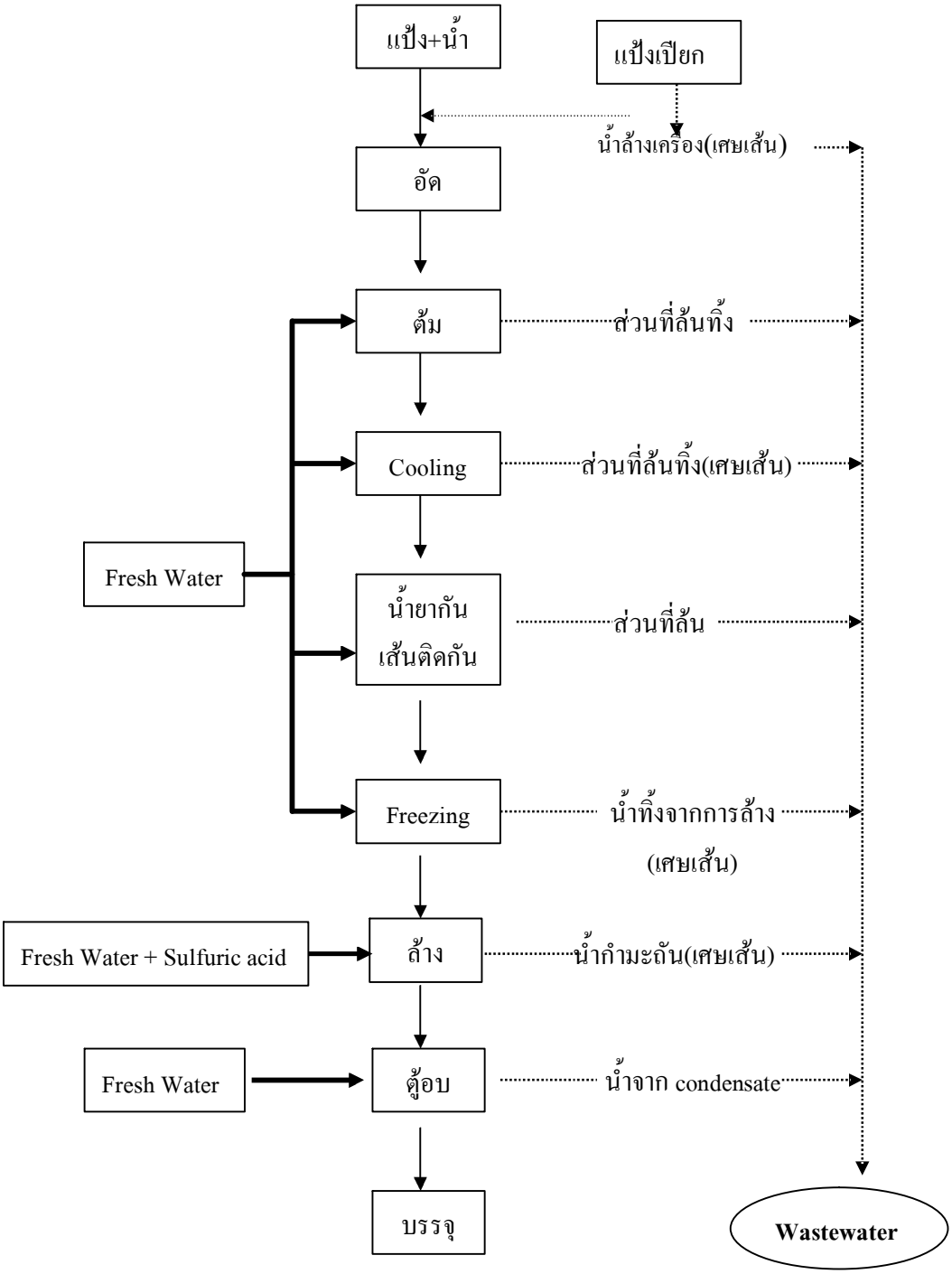
ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตแป้งจากถั่วเขียวของโรงงานสิทธินันท์

ที่มา: ฝ่ายการผลิตของโรงงานสิทธินันท์ (2545)



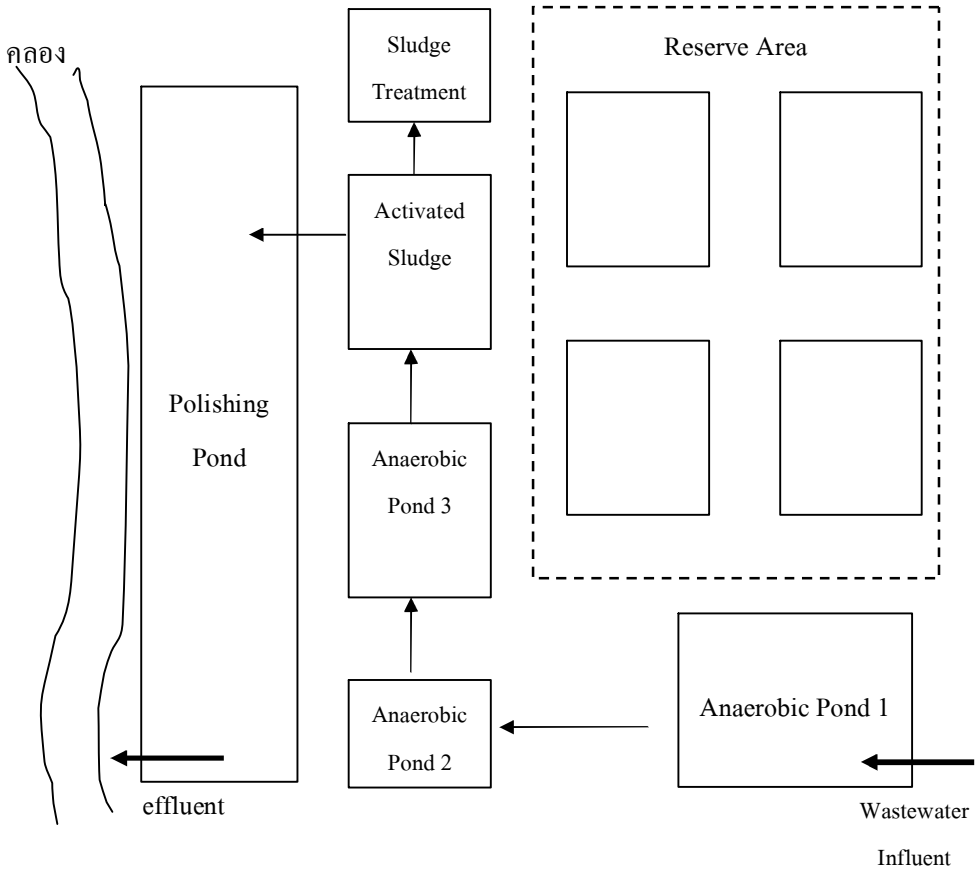
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตโปรตีนก้อนของโรงงานสิทธินันท์

ที่มา: ฝ่ายการผลิตของโรงงานสิทธินันท์ (2545)



ภาพที่ 3 กระบวนการผลิตวุ้นเส้นตรงของโรงงานสิทธินันท์

ที่มา: ฝ่ายการผลิตของโรงงานสิทธินันท์ (2545)



ภาพที่ 4 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสิทธินันท์

ที่มา: ฝ่ายการผลิตของโรงงานสิทธินันท์ (2545)

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของน้ำจากน้ำ Recycle ภายในโรงงาน

Parameters	**Unit**	**Range**
pH	-	7.0-7.6
COD	mg/l	120
BOD	mg/l	20
TKN	mg/l	0

ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งทั่วไปภายในโรงงาน

Parameters	Unit	Range
pH	-	6.0-9.0
COD	mg/l	50-160
BOD	mg/l	4-85
TKN	mg/l	0

ตารางที่ 4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตโปรตีนก้อนของโรงงาน

Parameters	Unit	Range
pH	-	4.8-6.8
COD	mg/l	17,200-32,600
BOD	mg/l	740-1,200
TKN	mg/l	32.4-91

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียรวมก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย

Parameters	Unit	Range
pH	-	4.4-6.6
COD	mg/l	4,000-19,000
BOD	mg/l	4,000-12,000
TKN	mg/l	200-400

หมายเหตุ ตารางที่ 2-5 เป็นข้อมูลที่โรงงานสิทธินันท์ได้ทำการเก็บรวบรวมในช่วงเวลา 5 ปี

ที่มา: ฝ่ายบำบัดน้ำเสียของโรงงานสิทธินันท์ (2545)

2. ขบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ (biological anaerobic process)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เป็นวิธีการที่ใช้แบคทีเรียไปย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี และจุลชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน จนทำให้มีโมเลกุลเล็กลง ในที่สุดเกิดเป็นก๊าซ ชีวภาพที่ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน(CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 80-90% ส่วนที่ถูกนำไปสังเคราะห์สร้างเซลล์ใหม่จึงมีปริมาณน้อยลง ซึ่งระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศนี้เหมาะกับพื้นที่ที่มีสภาพอากาศร้อน เช่นประเทศไทย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดต้องการอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (เสริมพลและไชยยุทธ์, 2527; ธนิตา, 2540)

ตารางที่ 6 ชนิดและปริมาณก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ชนิดของก๊าซ	**ร้อยละ**
มีเทน	50-68
คาร์บอนไดออกไซด์	25-35
ไนโตรเจน	2-7
ไฮโดรเจน	1-5
คาร์บอนมอนนอกไซด์	เล็กน้อย
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	เล็กน้อย
ก๊าซอื่น ๆ	เล็กน้อย

ที่มา: สมชัย (2548)

2.1 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศมี 2 ชนิด ได้แก่

2.1.1 แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

แบคทีเรียชนิดนี้ประกอบด้วย 2 พวก คือ แบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate anaerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนบ้าง (Facultative anaerobic bacteria) โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้ จะสร้างไฮโดรเจนจากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่ และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดา

2.1.2 แบคทีเรียที่สร้างมีเทน

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะเจริญเติบโตได้ช้าและยังเป็นเซลล์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมากโดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยนำคาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานจากไฮโดรเจน หลายชนิดใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวเพราะว่าแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ

$$HCOOH \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (1)$$

โดยแบคทีเรียชนิดนี้จะไวต่อการเปลี่ยนแปลง pH มากโดยช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ 6.6 – 7.4 (McCarty, 1964) ซึ่งจะสร้างมีเทนดังสมการต่อไปนี้

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (2)$$

โดยเรียกแบคทีเรียชนิดนี้ว่า Hydrogenotrophic methanogen

ข. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซีติคโดยใช้อะเซเตดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจะใช้พลังงานพอเพียงสำหรับการดำรงชีพ โดยการสร้างมีเทนเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$CH_3COOH + 4H_2 \longrightarrow 2CH_4 + 2H_2O \quad (3)$$

นอกจากการสร้างมีเทนจากการออกซิเดชันไฮโดรเจน มีเทนส่วนใหญ่ยังสร้างจากการแตกตัวของอะเซเตด ดังสมการ

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad (4)$$

พบว่าแบบนี้จะให้พลังงานน้อยกว่าแบบที่ใช้ออกซิเดชันไฮโดรเจนในปัจจุบันยังไม่มีการชี้ชัดว่าส่วนไหนสำคัญกว่ากัน แต่พอสรุปได้ว่า กลไกการสร้างมีเทนจะมีอะเซเตดเป็นตัวสำคัญ โดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเรียกว่า Acetoclastic methanogen

2.2 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

McCarty (1964) ได้กล่าวว่าปฏิกิริยาการย่อยแบบไร้อากาศแบ่งเป็น 4 ลำดับขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)
ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นที่ 1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง (Hydrolysis) สารประกอบอินทรีย์ประเภทซับซ้อน ทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกทำให้ละลายน้ำ โดยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ของแบคทีเรียจำพวก hydrolytic bacteria เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล

การเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลส และสารประกอบเชิงซ้อนอื่น ๆ ให้เป็นสารพวกเชิงเดี่ยวอย่างง่ายๆ เป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด (rate limiting step) ในการผลิตก๊าซมีเทน จากผลการทดลองของ Chan and Pearson (1970) พบว่า ขั้นตอนการย่อยสลายที่เป็นปฏิกิริยา hydrolysis เป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดของการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็น CH_4

ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของแบคทีเรียในกลุ่มแรกให้เป็นกรดอินทรีย์และสารอื่น

ขั้นที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียสร้างสารอะซิติกจำพวกอะซิโตน(acetone)จะเปลี่ยนสารจำพวก กรดไขมันระเหยง่าย ให้เป็นสารอะซิเตต, ฟอร์เมต, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารอาหารตั้งต้นของแบคทีเรียขั้นต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างก๊าซมีเทน(Methanogenesis) กรดอะซิติกเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 จะถูกแบคทีเรียในกลุ่ม Methanogenic Bacteria ย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 70%

$$CH_3COOH + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \quad (5)$$

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \quad (6)$$

กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะเซติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะเซติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกไม่กี่ชนิดในการสร้างมีเทน เช่น เมทธานอล และกรดฟอร์มิก และเมทธิลลามิน (เกรียงศักดิ์, 2543; จรรยา, 2545)

$$4CH_3OH \longrightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O \quad (7)$$

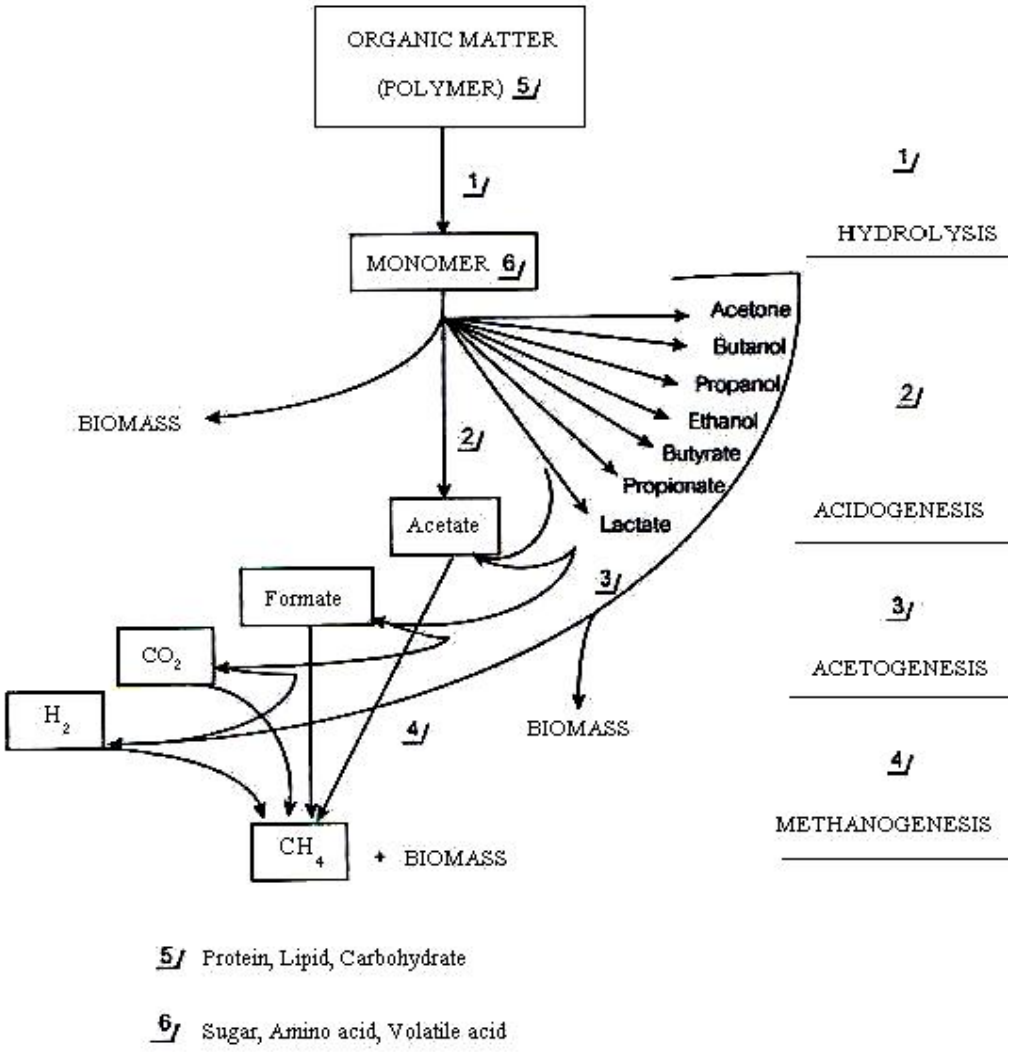
$$4HCOOH \longrightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O \quad (8)$$

ในสภาวะปกติแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะมีความสัมพันธ์กับแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiotic relationship) ซึ่งแตกต่างกับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระ ที่ไม่สามารถอยู่ร่วมกับแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ดังเช่น ก๊าซ H_2 และกรดอะซิติกเป็นสารสำคัญที่ถูกใช้ไปในการสร้าง CH_4 โดย methanogenic bacteria แต่เนื่องจาก acetogenic bacteria สามารถผลิตก๊าซ H_2 ได้อย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการใช้ก๊าซ H_2 มีค่าน้อยกว่าอัตราการผลิตแล้ว การสะสมตัวของก๊าซ H_2 จะเพิ่มสูงขึ้นจนเป็นพิษต่อ acetogenic bacteria ดังนั้นจึงต้องพึ่งพาอาศัย methanogenic bacteria เพื่อกำจัดก๊าซ H_2 และช่วยให้ระบบไม่ถูกยับยั้ง

เสริมพลและไชยยุทธ (2527) กล่าวว่า ที่สถานะสมดุลกรดอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรด จะถูก methanogenic bacteria ทำลายได้ทันที ถ้า methanogenic bacteria ทำลายไม่ทัน ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์จะเพิ่มมากขึ้นถึงขั้นยับยั้งการทำงานของระบบ ดังนั้นการตรวจวัดกรดอินทรีย์จะทำให้ผู้ควบคุมรับรู้การทำงานของระบบได้

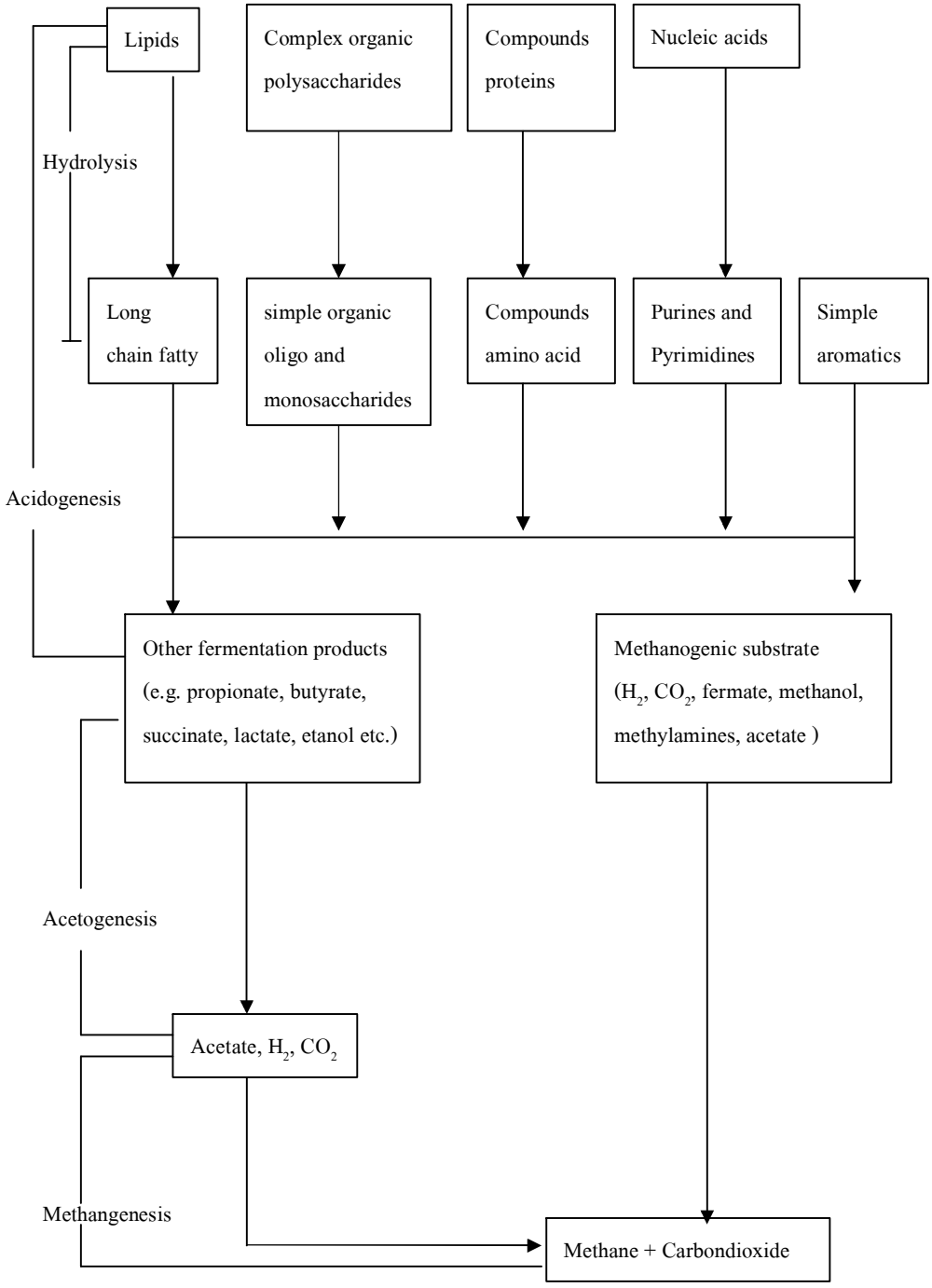
Metcalf and Eddy (2003) กล่าวว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะแสดงประสิทธิภาพการทำงานของระบบในการทำลาย Ultimate BOD (BODL) หรือ COD 1 kg จะเกิดก๊าซ CH_4ขึ้นประมาณ 159.14 ลิตร ที่สภาวะมาตรฐาน(STP)

McCarty(1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของซีโอดีที่ถูกกำจัดไว้ดังนี้ 1 ปอนด์ของซีโอดีหรือบีโอดี ที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 5.62 ลบ.ฟุต ที่ STP หรือ 1 กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตร ที่ STP (STP คือ Standard Temperature Presure, 0 ºC ความดัน 1 บรรยากาศ)



ภาพที่ 5 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

ที่มา: ธนิตา (2540)



ภาพที่ 6 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

ที่มา: Holland et al. (1987)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน มีข้อดีหลายประการ คือ

- ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนี้ไม่ต้องการออกซิเจนเลยซึ่งต่างจากระบบบำบัดแบบมีออกซิเจน ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายการให้อากาศกับระบบ

- ได้ก๊าซมีเทนมาเป็นแหล่งของพลังงาน

- ตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินที่มีคุณภาพ

- สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการกำจัดของเสียต่างๆ ได้

- สามารถลดปรากฏการเรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ โดยการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานนำมาใช้ประโยชน์

3. สภาวะแวดล้อมของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

เนื่องจากในระบบการบ่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ในการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้จุลินทรีย์นี้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และปัจจัยทางด้านการทำงาน

3.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factor)

3.1.1 อุณหภูมิ (Temperature) แบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 ºC (mesophilic temperature) ฉะนั้นเพื่อให้การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มนี้ดำเนินไปได้ด้วยดีให้ได้มาซึ่งก๊าซปริมาณมาก จะต้องรักษาอุณหภูมิภายใน

ถังหมักให้อยู่ในช่วงแบคทีเรียต้องการ ซึ่งอาจสูงได้ถึง 55 ºC (thermophilic temperature) ซึ่งอุณหภูมิในประเทศไทยไม่เป็นปัญหา ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ thermophilic จะสูงกว่าที่อุณหภูมิ mesophilic สำหรับของเสียทุกชนิดทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มาที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาตรถังหมักลง แต่ระบบการหมักที่มีอุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า mesophilic bacteria การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบ และยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย (Zupancic and Ros, 2003)

Masse and Masse (2001) รายงานว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนคือ 20 25 และ 30 ºC สามารถกำจัด COD ไปเป็นมีเทนได้เท่ากับ 84.2 88.7 และ 90.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัด COD ไปเป็นมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้น จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีกิจกรรมสูงด้วย

3.1.2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนนั้น มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เป็นอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของ pH ที่เกิดขึ้นภายในระบบนั้นเนื่องมาจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการ Acidogenesis กรดที่เกิดขึ้นจะทำให้ pH ในระบบลดลง และpH ที่ลดลงจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ Methanogenesis ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซลดลง โดย pH จะเป็นปัจจัยที่ทำให้กระบวนการเมทาบอลิซึมผิดปกติ และทำให้สมดุลเคมีเปลี่ยนแปลงหรืออาจทำให้แบคทีเรียตายได้ เมื่อ pH ลดลงมากๆ แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.6-7.6 ถ้า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว การผลิตมีเทนของแบคทีเรียที่สามารถผลิตมีเทนจะถูกยับยั้งเกือบทั้งหมดเมื่อ pH เท่ากับ 6.2 ปัญหาที่รุนแรงเกิดขึ้นได้ถ้า pH ลดลงต่ำกว่า 6.5 หากปฏิกิริยาการหมักเป็น 2 ระยะ ในระยะของการหมักกรดอินทรีย์จะมี pH อยู่ในช่วง 3.5-6.5 ขึ้นกับชนิดของน้ำเสีย ในระยะการสร้างมีเทน pH จะอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (เกรียงศักดิ์, 2543; สันทัด, 2549)

3.1.3. อัลคาลินิตี้ (Alkalinity) ค่าอัลคาลินิตี้ เป็นค่าความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไปในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าอัลคาลินิตี้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 2,000-5,000 mg/l as $CaCO_3$ (สันทัด, 2549) และมีอัตราส่วนของอัลคาลินิตี้ (Alkalinity ratio, α) ที่เหมาะสมคือ α มากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 โดย α เป็นอัตราส่วนระหว่าง อัลคาลินิตี้ของไบคาร์บอเนตที่ pH 7.5 ต่ออัลคาลินิตี้ของทั้งหมดที่ pH 4.3

3.1.4. กรดอินทรีย์ละเหย (Volatile fatty acid, VFA) กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ซึ่งถูกแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อค่า pH ของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น pH จะต่ำลง ระดับของกรดอะซิติคที่มีค่าไม่ควรเกิน 200 mg/l หรืออัตราส่วนของกรดโพรพิโอนิคต่อกรดอะซิติคเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดล้มเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993)

3.1.5. สารอาหาร (Nutrients) โดยทั่วไปต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 11% และ 2% ของปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้น ระบบนี้ปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าในสภาพที่มีออกซิเจน ดังนั้นอัตราส่วน BOD:N:P จะต่ำกว่า 100:5:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระบบใช้ออกซิเจนซึ่งก็คือ BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 หากมีอาหารเพียงพอในระบบก็จะทำให้แบคทีเรียทำงานได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นด้วย (ศิริพร, 2539)

3.1.6. สารยับยั้งและสารพิษ (inhibiting and Toxic Materials) สารบางอย่างถ้ามีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ ตัวอย่างสารพิษได้แก่

3.1.6.1. ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (light metal cation) ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^+) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หือการเติมการเคมีเพื่อปรับ pH ในระบบ จะมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน และขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

ไอออนประจุบวก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา: McCaty (1964)

ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน ไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซีเท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซีเท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca^{+}และ Mg^{2+} จะมากกว่าพิษของ Na^{+} และ K^{+} ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีวาเลนซี่สูงขึ้น ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบานั้นสามารถลดลงได้ถ้ามีไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย โดยจะทำให้ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียก antagonism แต่ในทางตรงกันข้าม ไอออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งเมื่อมีอยู่ร่วมกัน และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า synergism

3.1.6.2. ก๊าซบางชนิด

ก. แอมโมเนีย (ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เช่น โปรตีน เป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาขึ้นอยู่กับ pH ดังสมการ

$$NH_3 + H_2 \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^- \qquad (7)$$

ถ้า pH ต่ำกว่า 7.2 จะมี NH_4^+ มากกว่า แต่ถ้า pH สูงกว่า 7.2 จะมี NH_3 มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่า NH_4^+ แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูป NH_3 จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 mg/l แต่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000-9,000 mg/l

ข. ซัลไฟด์ (sulfide) เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนจากซัลเฟต (sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ หรือเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/l ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติมโลหะบางอย่าง เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับ pH ของของเหลวและส่วนประกอบก๊าซการที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมาก จะทำให้แบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้โดยกลุ่มของ Sulfate-Reducing Bacteria (SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculumจะสามารถใช้ซัลเฟต (SO_4^-) เป็นตัวรับอิออนตัวสุดท้ายได้ โดยซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการ

$$SO_4^- + 4H_2 + H^+ \longrightarrow HS- + 4H_2O \qquad \Delta G' = -152.2 \text{ KJ/mol} \qquad (8)$$

ค.โลหะหนัก (Heavy metal) ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอล โครเมียม นิเกิล เป็นต้น ซึ่งอิออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อ จุลินทรีย์และพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักจะละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใด และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของโฮโดรเจน-ซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้น เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้

3.1.6.3. คุณลักษณะสารอาหาร (substrate charecteristic) องค์ประกอบของสารอาหารจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของระบบภายในถังหมัก โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดเลือก จุลินทรีย์ที่จะใช้สารประกอบต่างๆ ซึ่งของเสียที่จะนำมาย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน มักประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้ได้แก่ ไขมัน กรดไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจนจากเซลล์สิ่งมีชีวิต

3.1.6.4. ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential) ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเกิดจากผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

ความแตกต่างด้านความสามารถให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสอง อาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆว่า ORP ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นน้ำส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญซึ่งในระบบไร้ออกซิเจนจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าค่า ORP เป็นบวกแสดงว่ามีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน แต่ค่าORP มีค่าเป็นลบแสดงว่ามีความสามารถเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

ประโยชน์ของ ORP ในการบำบัดน้ำเสีย

1. ใช้เพื่อควบคุมปัญหาด้านกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสีย
2. ควบคุมการเติมอากาศในกระบวนการย่อยตะกอน
3. ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน
4. ควบคุมปัญหาที่เกิดจากการออซิเดนท์ หรือดักแทนท์ในโรงงานอุตสาหกรรม

3.2 ปัจจัยทางด้านการทำงาน (operational factor)

ก. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามรถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน ทำให้เปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถัง

หมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาเก็บกักด้วย

ข. ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บกักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็จะลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบ ในอัตราที่เร็วกว่า จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ ถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาการเก็บกักให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก สามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา

ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (solid retention time, SRT) หมายถึงมวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ภายในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT = HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่ จุลินทรีย์อยู่ภายในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT>HRT)

ค. การกวน (mixing) การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีหลักการ คือ ทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับจุลินทรีย์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถักหมัก และทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องกวน สูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นถังหมัก หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม ใช้การสูบผ่านท่อน้ำเป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านประกอบกัน

4. ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศอาจใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือของเสียก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าถังปฏิกิริยาจะเป็นแบบใด แต่ไม่ว่าวัตถุประสงค์จะเป็นเช่นใดก็ตาม กระบวนการไร้อากาศก็มีลักษณะสำคัญร่วมกัน คือ สามารสร้างมีเทนจากสารอินทรีย์ โดยทั่วไปการบำบัดสลัดจ์มักเป็นถังรูปแบบเดียวคือถังย่อยสลัดจ์ (Sludge Digest Tank) ส่วนรูปแบบอื่นๆ มักใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (ธนิตา, 2540; ปริญญา, 2548; มงคล, ม.ป.ป)

1. ถังหมักแบบธรรมดา (conventional anaerobic digester) หรือถังหมักตะกอนอินทรีย์ (sludge digester)

ระบบแบบนี้ใช้ในการบำบัดสลัดจ์ซึ่งเป็นตะกอนอินทรีย์ (sludge) จากระบบตะกอนเร่ง (actvated sludge) แบ่งออกเป็น

ก. ถังหมักแบบอัตราต่ำ (low rate digester)

เป็นถังหมักที่ไม่มีการกวนให้กับตะกอนอินทรีย์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังหมักจึงช้าและไม่ทั่วถึง ของเหลวและตะกอนในถังหมักจะแยกออกเป็นส่วนๆ คือ (1) Scum layer เป็นชั้นของตะกอนที่ลอยตัว เนื่องจากมีรูพรุนหรือมีฟองก๊าซเกาะอยู่ (2) Supernatant layer เป็นชั้นของน้ำที่ตะกอนแยกตัวออก (3) activity digesting sludge layer เป็นส่วนที่มีการย่อยสลาย มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตหลายชนิดในชั้นนี้ และ (4) digested sludge เป็นตะกอนที่ย่อยสลายแล้วและตกลงสู่ก้นถังส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายซึ่งส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยสู่ส่วนบนของถังหมัก ซึ่งจะช่วยขยาย active layer ทำให้การย่อยสลายตะกอนเป็นไอย่างรวดเร็ว

ข. ถังหมักแบบอัตราสูง (high rate digester)

เป็นถังหมักแบบ continous stirred tank reactor (CSTR) ที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึง ปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นได้ดีกว่าแบบแรก เนื่องจากจุลินทรีย์จะสัมผัสกับน้ำเสียได้ทั่ว แต่น้ำที่ไหลออกมาต้องมีการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกก่อน สามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ประมาณ 50% ซึ่งจะเปลี่ยนไปในรูปก๊าซชีวภาพ

2. ถังหมักแบบสัมผัส (Anaerobic Contact)

ถังย่อยแบบนี้ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย สารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดอาจเป็นของแข็งหรือสารละลายก็ได้ ถังย่อยแบบสัมผัสนี้อาจเป็นถังปฏิกิริยาแบบมีการหมุนเวียนตะกอนหรือไม่มีก็ได้ แต่นิยมใช้แบบที่มีการหมุนเวียนตะกอน ดังนั้น ถังย่อยแบบสัมผัสจึงมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกับระบบเอเอส จนกระทั่งในบางครั้งอาจเรียกถังย่อยแบบนี้ว่าเป็นระบบเอเอสแบบ ไร้ออกซิเจน (Anaerobic Activated Sludge) อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีเหมือนกับระบบเอเอส การสะสมแบคทีเรียให้คงอยู่ในระบบไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นไม่สามารรถตกตะกอนได้ดีเหมือนสลัดจ์ของระบบเอเอส จึงมีการหลุดหนีของสลัดจ์เกิดขึ้นตลอดเวลาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

3. ถังหมักแบบแยกเชื้อเชื้อ (Two-stage anaerobic digestion)

เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรดและแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น แบคทีเรียพวกสร้างกรดเจริญได้ดีที่ pH ต่ำ และระยะเวลาเก็บกักน้อย ซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน ทำให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะ ไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวต่ำ จึงได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะ ไร้อากาศแบบแยกเชื้อ โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกัน และจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มเพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มนั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างเต็มที่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดีมากขึ้น (สมชาย, 2530; อาริยา, 2546)

4. ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter)

ระบบถังกรองไร้อากาศประกอบด้วยถังสูง ภายในบรรจุตัวกลาง(Media) น้ำเสียจะไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบน ทำให้น้ำท่วมตัวกลางอยู่ตลอดเวลา ทำให้แบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกจับอยู่ภายในถังกรอง น้ำที่ไหลออกมาจะมีความใสโดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอนต่างหาก แบคทีเรียบางส่วนที่ตายแล้วจะหลุดออกมากับน้ำทิ้งบ้างเล็กน้อย โดยปกติถังกรองไร้อากาศจะมีขนาดเล็กกว่าถังย่อยแบบธรรมดาเพราะใช้เวลากักเก็บน้ำต่ำกว่า ปัญหาที่สำคัญคือ ต้องหาวิธีการกระจายน้ำเสียให้ไหลเข้า ถังปฏิกิริยาให้ได้อย่างสม่ำเสมอ และมีปัญหาเรื่องของการอุดตันหากน้ำเสียมีปริมาณสารแขวนลอยสูงแต่สามารถแก้ได้โดยให้มีการตกตะกอนน้ำเสียก่อนส่งเข้าถังกรองไร้อากาศ (ธีระพงษ์, 2545)

5. ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor หรือ ABR)

ลักษณะของระบบนี้คือ มีแผ่นกั้นเพื่อบังคับให้น้ำเสียไหลมุดขึ้นลงอยู่ในแนวนอน ถังปฏิกิริยาจึงไม่จำเป็นต้องมีความสูงมากเหมือนของระบบอื่นๆ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ระบบนี้มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้พื้นที่ตกตะกอนสูงกว่าระบบอื่นๆ การแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำจึงสามารถทำได้ดีโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์แยกตะกอน ก๊าซสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ดีและง่ายเช่นกัน ลักษณะดังกล่าวทำให้การเก็บกักเซลล์สามารถกระทำได้อย่างดี จึงมีมวลแบคทีเรียสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก

6. ระบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศ (Anaerobic Fluidized Bed หรือ AFB)

ระบบนี้คล้ายคลึงกับระบบถังกรองไร้อากาศตรงที่มีน้ำไหลข้างล่างขึ้นข้างบน จัดเป็นระบบ Fixed Film แบบไร้ออกซิเจนที่มีสารตัวกลางขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายเป็นที่จับเกาะของแบคทีเรีย อัตราไหลของน้ำเสียจะต้องสูงมากจนกระทั่งทำให้มีการลอยตัวของสารตัวกลาง การใช้สารตัวกลางขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ซึ่งเท่ากับการมีแบคทีเรียจำนวนมหาศาลอยู่ในระบบ อัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้จึงสูงมาก ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าระบบอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ลักษณะการทำงานซึ่งต้องใช้สารตัวกลางลอยตัวตลอดเวลาก่อให้เกิดปัญหาในการออกแบบและควบคุมระบบหลายอย่าง และต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการทำให้สารตัวกลางลอยตัวสูงกว่าระบบอื่น ระบบนี้จึงยังไม่ได้รับความนิยม

7. ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket หรือ UASB)

ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวกลาง มีทิศทางไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นด้านบนโดยไม่ใช้ตัวกลาง แต่แบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่จนกระทั่งมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้ดี น้ำเสียที่ไหลเข้าถังปฏิกิริยาจะทำให้เม็ดแบคทีเรียลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ที่ไม่จมลงก้นถัง จุดอ่อนของระบบนี้คือการสร้างชั้นสลัดจ์เป็นเรื่องยาก และอาจถือได้ว่าเป็นเรื่องไม่ธรรมดาเนื่องจากธรรมชาติของแบคทีเรียไร้อากาศมักจะไม่จับกันเป็นฟล้อค ระบบนี้สามารถรับออร์กานิคโหลดได้สูงกว่าระบบไร้ออกซิเจนอื่นๆ และสามรถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพได้สูง เนื่องจากสามารถป้องกันมิให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบอื่นๆ (Metcralf and Eddy, 2003)

8. ระบบจานหมุนชีวภาพไร้อากาศ (Anaerobic Rotating Biological Contact หรือ AnRBC)

ลักษณะของระบบนี้คล้ายคลึงกับระบบจานหมุนชีวภาพธรรมดาแต่มีฝาปิดเพื่อไม่ให้สัมผัสกับอากาศ และมีช่องระบายก๊าซออกทางด้านบน จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ดีบนผิวแผ่นจาน ข้อดีคือสามารถรับออร์กานิคและไฮโดรลิคโหลดที่สูงขึ้นอย่างกะทันหันได้

อุปกรณ์และวิธีการ

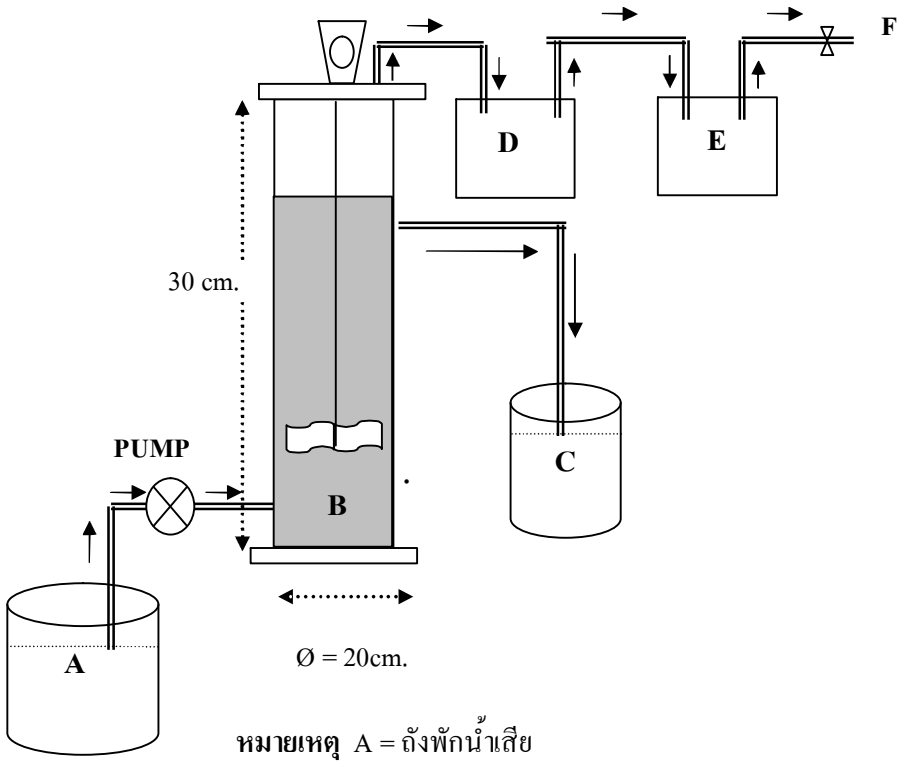
อุปกรณ์

1. ถังหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว แบบอัตราสูง (high rate anaerobic digester) ทำจากแผ่นอะคริลิกใส ทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีปริมาตรการใช้งาน 6.5 ลิตร ทำด้วยวัสดุทนทานต่อการกัดกร่อน ในการวิจัยครั้งนี้ถังปฏิกิริยา จำนวน 2 ถัง ต่อเข้ากับเครื่องวัดปริมาตรก๊าซ รายละเอียดตามภาพที่ 7 และ 8

2. ปั๊มสำหรับเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ เป็นแบบ peristaltic pump จำนวน 1 เครื่อง

3. เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 4 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร ลึก 19 เซนติเมตร ทำจากแผ่นอะคริลิคพลาสติก (acrylic plastic) จำนวน 2 ชุด ภายในกล่องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนดรัม (Drum) มีหน้าที่คอยดักก๊าซที่ถูกปล่อยผ่านท่อ ดรัมนี้จะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่มีแผ่นพลาสติกกั้นในแนวทะแยงมุม และส่วนเครื่องนับ (Counter) ที่แสดงจำนวนการพลิกของดรัมที่หลักการทำงานง่ายๆเพียง 2 หลักการ คือ การใช้ก๊าซแทนที่น้ำ และแรงดันของก๊าซ และเครื่องวัดปริมาตรก๊าซนี้จะต่อเข้ากับเครื่องเก็บก๊าซ เพื่อสามารถนำก๊าซไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซได้

4. ถังเก็บก๊าซ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียมภายในกลวง คว่ำกับถังน้ำ ทำหน้าที่ในการเก็บกักก๊าซที่ผ่านมาจากเครื่องวัดปริมาตรก๊าซ และมีส่วนเก็บตัวอย่างก๊าซ จำนวน 2 ชุด



หมายเหตุ A = ถังพักน้ำเสีย

B = ถังย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

C = ถังรับน้ำทิ้ง

D = อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซ

E = อุปกรณ์เก็บกักก๊าซ

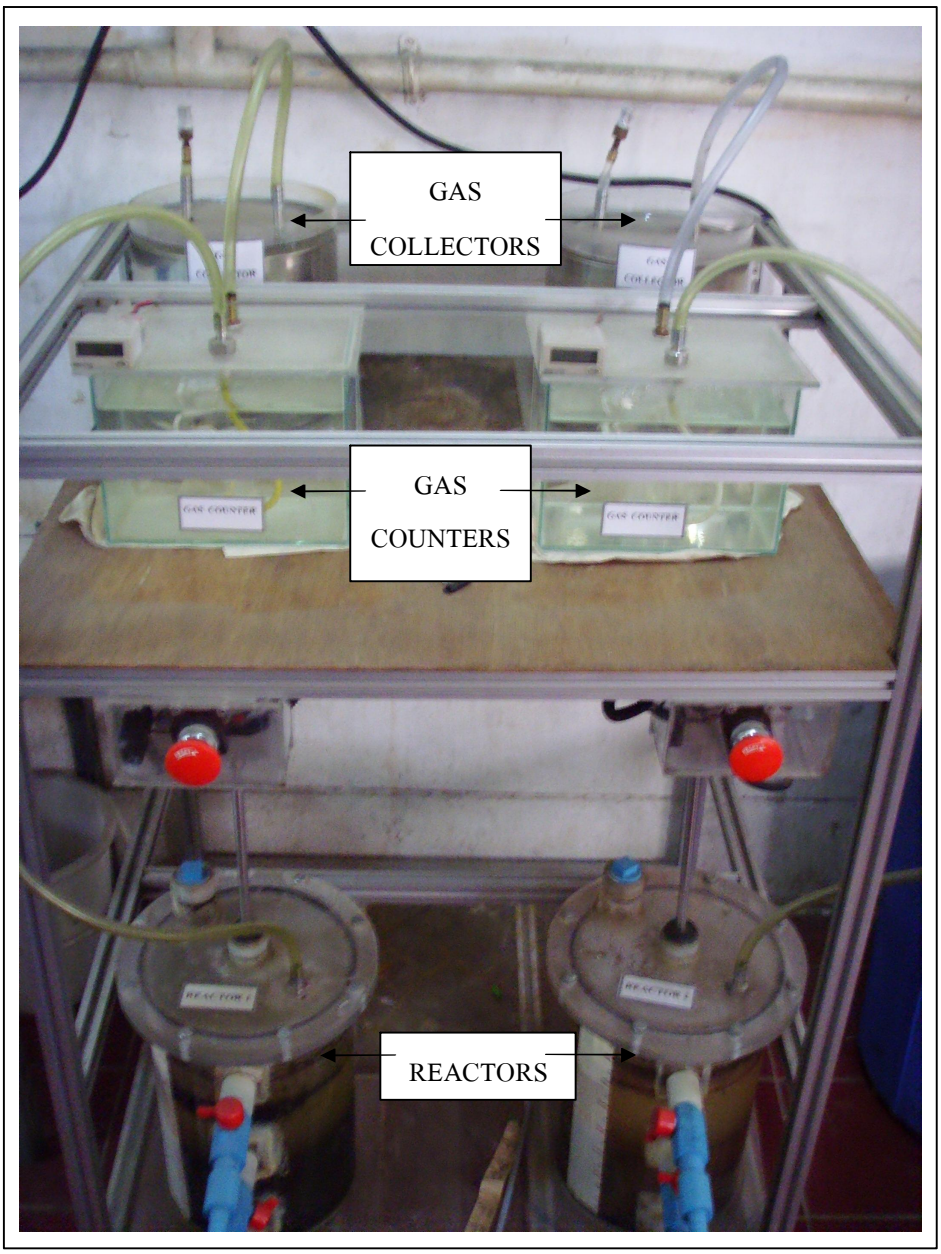
F = จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ

ภาพที่ 7 แผนภูมิอุปกรณ์การทดลองของระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

5. ถังน้ำดิบขนาด 5 ลิตร จำนวน 4 ถัง

6. เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบของการหมุนได้ตั้งแต่ 50-1000 รอบต่อนาที จำนวน 2 เครื่อง

7. ชุดเครื่องแก้วและชุด titration



ภาพที่ 8 อุปกรณ์การทดลองของระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

8. เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบ และการวิเคราะห์

Instruments/ Apparatus	**Company**	**Used for**
Balance (2 decimal point)	NC sciencetech CO.,LTD	Sample preparation
Balance (4 decimal point)	Chemoscience CO.,LTD	Chemical preparation
Centrifuge	Hettich Universal	ALK, VFA determination
Gas chromatography (GC)		
column TCD	Allilance Model GC6890	CH_4 determination
Gas tight syringe	Valco Instrument CO. made in USA.	CH_4 determination
Hood	Science Technilogy	Chemical preparation
ORP-meter	Hanna Instrument made in Romania	ORP determination
Oven 105º C	Memmert	SS determination
Oven 150º C	Scientific Promotion CO.,LTD	COD determination
pH-meter	Hanna Instrument made in Romania	pH determination
Peristaltic pump	Cole-Permen Instrument Company	
	System model NO.7553-756-600RPM	Sample feed
Sucction pump	made in USA.	SS determination
Temp-meter	Hanna Instrument made in Romania	Temp determination
Venoject tubes	Terumo Europe N.V. made in	Gas collection
	Belgium	

9. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่า COD, VFA และ Alkalinity

10. กระดาษกรอง GF/C WHAT MAN Ø 47 mm.

วิธีการ

1. การตรวจสอบคุณลักษณะกากถั่วและน้ำเสียเบื้องต้น

วิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของกากถั่วและน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยจากโรงงานวุ้นเส้นสิทธินันท์ ทำการวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น

1.1 กากถั่ว ลักษณะเป็นของเหลวข้นกึ่งของแข็ง นำมาตรวจคุณลักษณะเบื้องต้นในเรื่องความชื้น(moisture) และวิเคราะห์อาหารเสริม คือ TKN, NH_4^+, NO_2^-และ PO_4^- และตรวจสอบตัวแปรที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมคือ pH, COD, TOC (Anderson and Ingram,1993)

1.2 น้ำเสีย ทำการวิเคราะห์หา pH, COD, SS, VFA และ Alkalinity เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบการทดลองโดยวิธีมาตรฐานของ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (17^{th}ed.,1992)

2. การเตรียมกากถั่วและน้ำเสียเพื่อป้อนเข้าสู่ถังหมัก

กากถั่วและน้ำเสียที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบถังหมัก เตรียมขึ้นจากกากถั่วและน้ำเสียที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำมาผสมกันเพื่อให้ได้เกณฑ์ของการหมักไร้อากาศ คือ กากถั่ว 50 กรัม (dry weight) ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

3. ดำเนินการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบสภาพของถังหมักให้ใช้งานได้ การตรวจสอบรอยรั่วเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะระบบนี้จะต้องเป็นระบบปิดอย่างแท้จริง มิฉะนั้นแล้วก๊าซชีวภาพจะออกมาตามรอยรั่วต่างๆ ได้ เป็นเหตุให้แรงดันมีไม่มากพอที่จะแทนที่น้ำในระบบเก็บก๊าซชีวภาพ การทดสองสามารถทำได้โดยการเติมน้ำเข้าไปในถังหมักให้ระดับน้ำสูงกว่ารอยต่อต่างๆ แล้วสังเกตการรั่วซึมจากทุกด้าน ส่วนการทดสอบการรั่วของก๊าซชีวภาพทำได้โดย ใช้น้ำสบู่ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ แล้วเป่าลมเข้าถังหมัก จากนั้นอุดรอยรั่วทุกทางด้วยกาวซิลิโคน

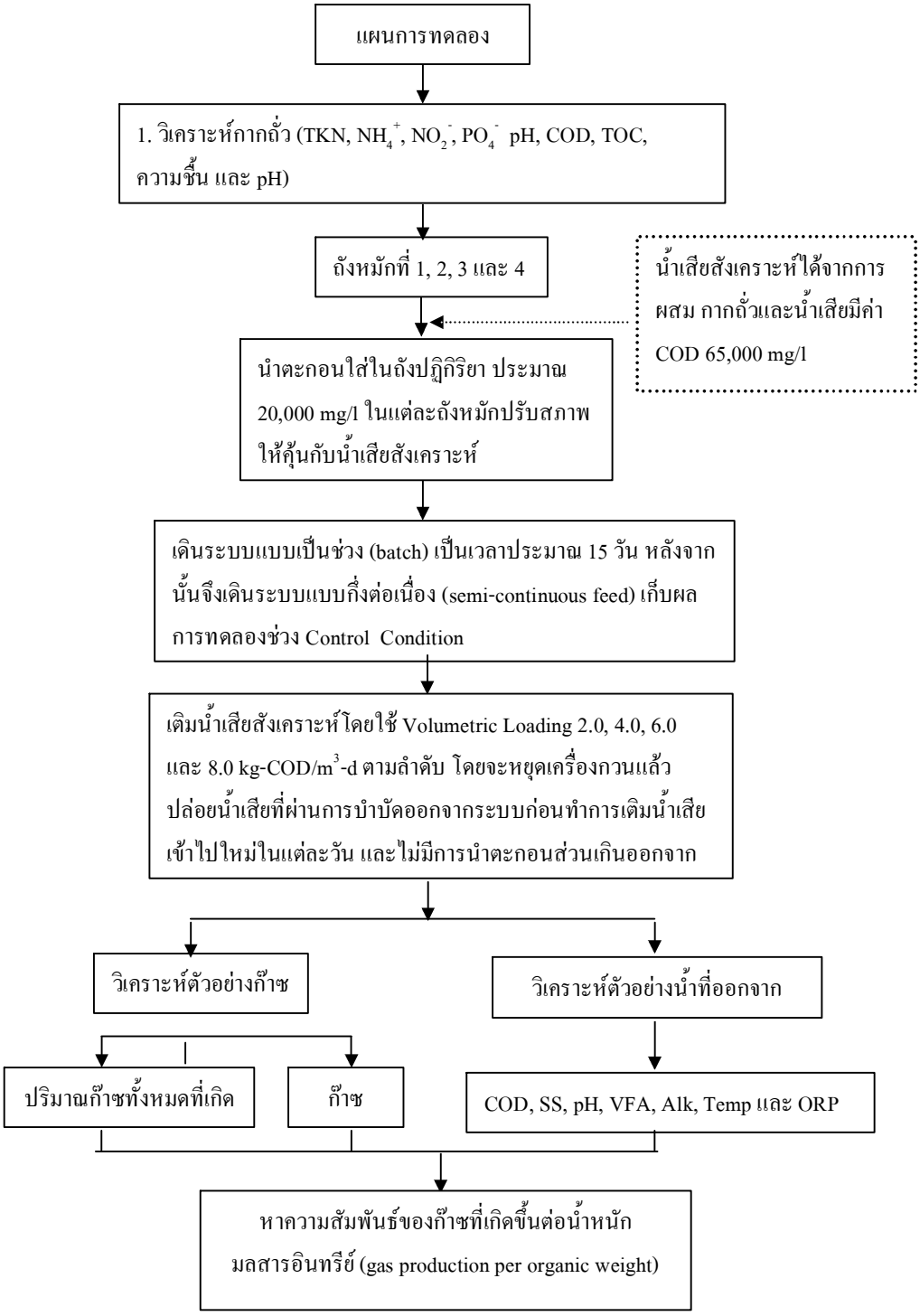
3.1 ระยะเริ่มต้นการหมัก (start up) เพื่อให้มีเชื้อแบคทีเรียอยู่ในระบบทำโดยการเติมส่วนผสมในอัตราส่วน กากถั่ว 1 กิโลกรัมต่อน้ำเสีย 6 ลิตรไปในถังหมักประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของถังทั้ง 2 ถัง (ประมาณ 4 ลิตร) ปิดระบบตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นเติมส่วนผสมลงในถังหมักด้วยอัตรา (Q) 0.2 ลิตรต่อวันด้วยปั๊ม โดยเติมทุกวันเพื่อรักษาระยะเวลาเก็บกักให้เป็น 10 วัน ขณะทำการเติมส่วนผสมเข้าให้เปิดท่อน้ำล้นออกเพื่อให้น้ำล้นออกมา 0.2 ลิตรสังเกตก๊าซชีวภาพเมื่อมีก๊าซเกิดขึ้นที่ถังปฏิกิริยาแล้ว เริ่มเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกากถั่วและน้ำเสีย

3.2 ขั้นศึกษาประสิทธิภาพของระบบ หรือสภาวะควบคุม (control condition) ในสภาวะควบคุมนี้จะพิจารณาจาก ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดมีความสม่ำเสมอ, ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดไม่พบก๊าซออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในตัวอย่าง และ ค่า COD ที่ออกจากระบบค่อนข้างคงที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนถึงสภาวะควบคุมประมาณ 15 วันมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) 4 ระดับคือที่ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d การเปลี่ยนแปลงค่า อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) นี้จะส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบแปรเปลี่ยนตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 8 และวัดประสิทธิภาพของระบบโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Influent) และน้ำเสียที่ออกจากระบบ (Effluent) ของระบบ นำมาวิเคราะห์หาค่า COD, SS, Temp, pH, VFA, Alkalinity และ ORP และทำการเก็บก๊าซเพื่อวิเคราะห์หาก๊าซมีเทนที่เกิด

ตารางที่ 8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

Run NO.	**Volume (l)**	**MLSS (mg/l) initial**	**Flow (l/d)**	**COD (mg/l)**	**F/M ratio (kg COD/kg MLSS-Day)**		**Volumetric Loading (kg-COD/m^3-d)**
					Range	**Average**	
1	6.5	20,000	0.2	65,000	0.0997-0.0828	0.0921	2.0
2	6.5	20,000	0.4	65,000	0.1998-0.1584	0.1779	4.0
3	6.5	20,000	0.6	65,000	0.2981-0.2203	0.2572	6.0
4	6.5	20,000	0.8	65,000	0.3983-0.2766	0.2766	8.0

4. แผนการดำเนินการทดลอง



ภาพที่ 9 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง

5. การวิเคราะห์ตัวอย่างกากถั่ว(Anderson and Ingram,1993) และตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Influent) ออกจากระบบ (Effluent)

ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Method for Examination of Water and Wastewater (17^{th}ed.,1992) ในการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ ตัวแปรต่อไปนี้คือ COD, SS, Temp, pH, VFA, ALK และ ORP และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ

ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
น้ำเข้าและน้ำออก	SS	ทุก 3 วัน
น้ำเข้า น้ำออก	COD	ทุก 3 วัน
น้ำเข้า น้ำออก และถังปฏิกิริยา	Temp	ทุกวัน
น้ำเข้า น้ำออก และถังปฏิกิริยา	pH	ทุกวัน
น้ำเข้า น้ำออก และถังปฏิกิริยา	VFA	ทุก 3 วัน
น้ำเข้า น้ำออก และถังปฏิกิริยา	ALK	ทุก 3 วัน
ถังปฏิกิริยา	ORP	ทุกวัน
จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ	ก๊าซมีเทน	ทุกวัน

สถานที่และระยะเวลาในการทำวิจัย

1. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

เริ่มดำเนินการวิจัยตั้งแต่ เดือนพฤษภาคม 2550 ถึง เดือนมีนาคม 2551 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 11 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 10

3. แหล่งทุนสนับสนุน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (สนพ.)

ตารางที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย

การปฏิบัติงาน	2550								2551		
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ตรวจเอกสาร	←	→									
เขียนโครงการวิทยานิพนธ์		←	→								
เตรียมอุปกรณ์และสารเคมี			←	→							
ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ						←	→				
รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล							←	→			
ทำรายงานวิทยานิพนธ์										←	→

ผลและวิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ในการบำบัดของเสียจากโรงงานวุ้นเส้นซึ่งได้แก่ กากถั่ว และน้ำเสีย ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้น้ำเสียและกากถั่วจากโรงงานวุ้นเส้นสิทธินันท์ จำกัด เป็นตัวแทนของน้ำเสีย โดยน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นน้ำเสียรวมจาก ถังพักน้ำเสียก่อนเข้าสู่บ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน มาควบคุมค่า COD ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบให้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 65,000 mg/l โดยทำการผสมกากถั่วจากโรงงานวุ้นเส้นต่อน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นในอัตราส่วน กากถั่ว 50 กรัม (dry weight) ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร การดำเนินระบบจะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Flow) โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่จะศึกษาเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ต่างๆ คือ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ แต่ละหัวข้อดังกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

การตรวจสอบคุณลักษณะกากถั่วเบื้องต้น

ในการทดลอง ได้เก็บตัวอย่างกากถั่วเขียวสดมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ความชื้น, pH, COD, TOC ,TKN, NH_4^+, NO_2^- และ PO_4^- ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 11 และพบว่า กากถั่วมีสีเหลืองอ่อน มีค่าเฉลี่ยของปริมาณต่างๆ คือ ความชื้น 73.71% pH 6.98 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสารอาหารต่างๆที่น้ำหนักแห้ง (dry weight) พบปริมาณ COD 34.57 g/l-g ปริมาณ TOC 228 g/l-g ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 16.18 mg/g ปริมาณแอมโมเนีย 4.12 mg/g ปริมาณไนไตรท์ 7.21 μg/g และปริมาณฟอสเฟต 1.7 mg/g

ตารางที่11 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของตัวอย่างกากถั่ว

Parameters	Unit	Vermicelli solid waste charecteristics		Standard diviation
		Range	Average	
Moisture	%	72.80-80.47	75.42	4.15
pH	-	6.97-7.01	6.99	0.02
COD	g/l (Dry weight)	12.17-48.69	34.57	10.68
TOC	g/l (Dry weight)	159.72-300.98	228	35.46
TKN	mg/g (Dry weight)	9.62-24.39	16.18	4.33
NH_4^+	mg/g (Dry weight)	1.94-6.69	4.12	1.44
NO_2^-	µg/g (Dry weight)	3.15-15.37	7.21	4.42
PO_4^-	mg/g (Dry weight)	0.45-1.96	1.7	1.56

หมายเหตุ ค่า parameters ต่างๆ ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกากถั่วจำนวน 10 ครั้ง

การวิเคราะห์ปริมาณมลสารอินทรีย์ที่เข้าและออกจากระบบ

การศึกษาถังย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของเสีย (So) มีการเปลี่ยนแปลงค่าภาระบรรทุก (Volumetric Loading) ในเทอมของ COD และ SS ผลการทดลองแสดงออกมาด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมลสารอินทรีย์ในเทอมต่างๆ กับเวลา เพื่อติดตามผล เริ่มจากระยะ start up ได้นำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ anaerobic pond ของบริษัท สิทธินันท์ จำกัด มาปรับให้มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา โดยมีใช้ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 20,000 mg/l ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบวันละร้อยละ 5 หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ โดยเริ่มป้อนน้ำเสียให้มีค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เท่ากับ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d ในถังปฏิกิริยาที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จนระบบเข้าสู่สภาวะควบคุม (control condition) แล้วจึงเริ่มนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ ในสภาวะควบคุมนี้จะพิจารณาจาก ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดมีความสม่ำเสมอ, ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดไม่พบก๊าซออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในตัวอย่าง และ ค่า COD ที่ออกจากระบบค่อนข้างคงที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนถึงสภาวะควบคุม

ประมาณ 15 วัน การดำเนินการทดลองจะเริ่มจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำๆ ก่อน แล้วค่อยเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ ตลอดการทดลองไม่มีการนำเอาตะกอนชีวภาพส่วนเกินออกจากระบบ

การเสนอผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยจะนำเสนอในสภาวะควบคุม (วันที่ 16-45 ของการทดลองรวมเวลาทั้งสิ้น 30 วัน) คือ ส่วนที่ 1 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD และ SS ที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ ส่วนที่ 2 สภาวะแวดล้อมของระบบ ได้แก่ pH, Temp, ORP, VFA, ALK และ VFA/ALK ส่วนที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่เกิด และส่วนที่ 4 ปริมาณตะกอนชีวภาพที่เพิ่มขึ้น

1. ประสิทธิภาพของระบบที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ

ในระยะนี้ซึ่งเป็นสภาวะควบคุม ผลการทดลองจะเสนอในรูปปริมาณ COD และ SS ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้า (influent) และออกจากระบบ (effluent) จะเป็นตัวแทนของระบบที่มีค่าภาระบรรทุก (Volumetric Loading) ต่างๆ

1.1 ปริมาณ COD ที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ

เมื่อระบบรับภาระบรรทุก 2.0 - 8.0 kg-COD/m^3-d น้ำเสียสังเคราะห์มีค่า COD เข้าระบบเฉลี่ยในช่วง 64,661-65,061 mg/l และค่า COD เฉลี่ยของน้ำที่ออกจากระบบในช่วง 3,168-7,200 mg/l ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD เฉลี่ยทั้ง 4 ระบบอยู่ในช่วง 88.81-95.12 % COD ที่ถูกกำจัดออกจากระบบเฉลี่ยอยู่ในช่วง 12.38-45.92 g/d จะเห็นได้ว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุด และมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ย COD ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ, ออกจากระบบ, COD ที่ถูกกำจัดและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดCOD ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

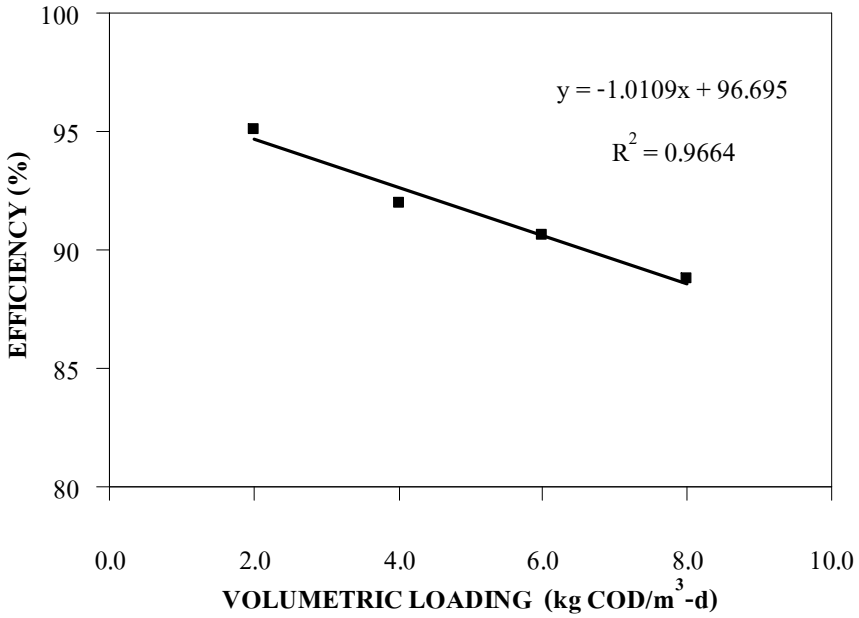
VL ($kg\text{-}COD/m^3\text{-}d$)	COD (mg/l)		COD Removal (g/d)	Efficiency (%)
	Influent	Effluent		
2.0	65,061 ± 2894	3,168 ± 291.9	12.38 ± 0.59	95.12 ± 0.53
4.0	65,061 ± 2894	5,207 ± 620.2	23.94 ± 1.27	91.97 ± 1.13
6.0	64,061 ± 3018	5,971 ± 372.3	34.85 ± 1.80	90.66 ± 0.68
8.0	64,661 ± 3272	7,200 ± 778.1	45.92 ± 2.84	88.81 ± 1.47

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 11 ครั้ง ครั้งละ 3 ซ้ำ,
± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี (COD) มีความสัมพันธ์กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) โดยมีลักษณะแปรผกผันกัน คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (COD) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี (COD) ในรูปสมการเส้นตรง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี (Y) แสดงได้ดังนี้

$$Y = -1.0095X + 96.69;\ 2.0 < X < 8.0\ ;\ R^2 = 0.966$$



ภาพที่ 10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

การทดลองของอวัสดา (2545) เป็นระบบการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 60.42 - 56.48 % ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.58 - 7.05 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ และ อารียา (2546) เป็นระบบการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 85.62-82.11 % ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.30-10.27 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนี้มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่าการทดลองของ อวัสดา (2545) แต่ต่ำกว่า อารียา (2546) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.0 kg-COD/m^3-d ซึ่งเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดของการทดลองนี้ ประสิทธิภาพการกำจัด COD เฉลี่ยเท่ากับ 74.08 % ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกากถั่วและน้ำเสียสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเศษอาหารแต่ระบบของ อารียา (2546) เป็นระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนซึ่งมีการแบ่งแยกเชื้อกันอย่างชัดเจนทำให้สภาพแวดล้อมเหมาะสมกับจุลินทรีย์ในถังกรดและถังก๊าซส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ดีกว่าระบบแบบขั้นตอนเดียว

การทดลองของ Fezzani and Cheikh (2007) เป็นระบบการย่อยสลายกากมะกอกและน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ที่ 71.54-13.95 % ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.19-10.84 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนี้มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่าทั้งนี้อาจเนื่องจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่ากากมะกอกและน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก

1.2 ปริมาณ SS ที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ

เมื่อระบบรับภาระบรรทุก 2.0 - 8.0 kg-COD/m^3-d น้ำเสียสังเคราะห์มีค่า SS เข้าระบบเฉลี่ยในช่วง 9,720-9,816 mg/l และค่า SS เฉลี่ยของน้ำที่ออกจากระบบในช่วง 384-2,521 mg/l ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด SS เฉลี่ยทั้ง 4 ระบบอยู่ในช่วง 74.08-96.05 % SS ที่ถูกกำจัดออกจากระบบเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.89-5.79 g/d จะเห็นได้ว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d มีประสิทธิภาพการกำจัด SS สูงสุด และมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

ตารางที่13 ค่าเฉลี่ย SS ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ, ออกจากระบบ, SS ที่ถูกกำจัดและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL (kg-COD/m^3-d)	SS (mg/l)		SS Removal (g/d)	Efficiency (%)
	Influent	Effluent		
2.0	9,816 ± 108.5	384 ± 78.4	1.89 ± 0.02	96.05 ± 0.86
4.0	9,720 ± 144.8	485 ± 42.1	3.69 ± 0.05	95.02 ± 0.41
6.0	9,774 ± 366.2	1,736 ± 243.4	4.82 ± 0.29	82.20 ± 2.72
8.0	9,759 ± 412.1	2,521 ± 558.2	5.79 ± 0.60	74.08 ± 6.11

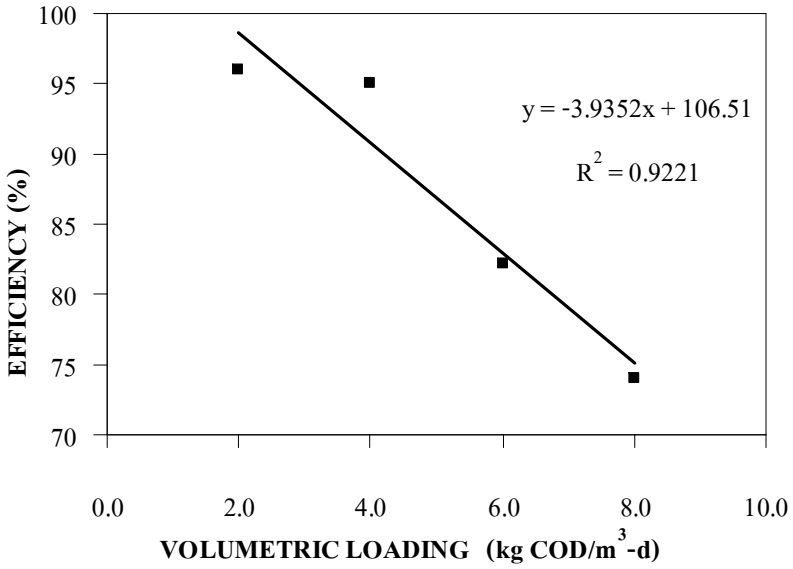
หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 11 ครั้ง ครั้งละ 3 ซ้ำ

± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) มีความสัมพันธ์กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) โดยมีลักษณะแปรผกผันกัน คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) ในรูปสมการเส้นตรง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (Y) แสดงได้ดังนี้

$$Y = -3.9344x + 106.51;\ 2.0 < X < 8.0;\ R^2 = 0.9221$$



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

2. สภาวะแวดล้อมของระบบ

2.1 อุณหภูมิ

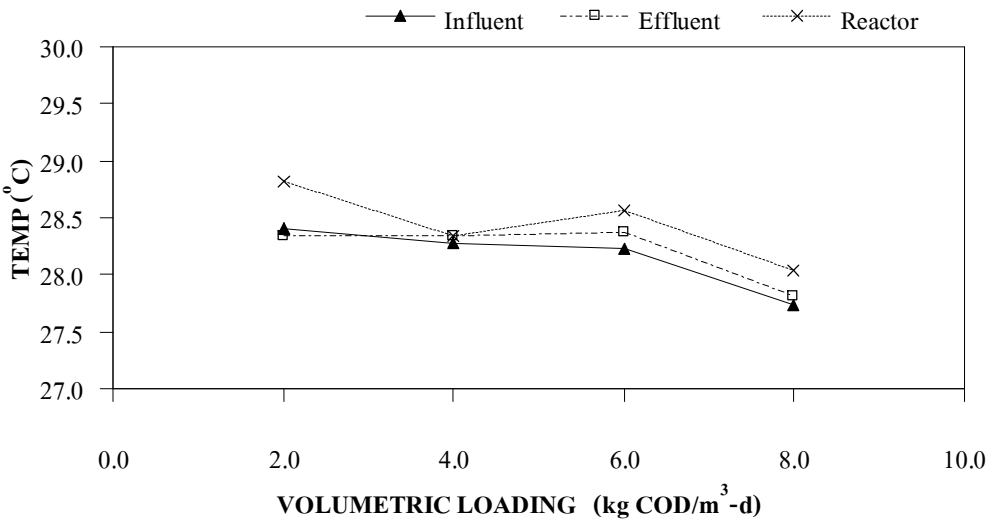
อุณหภูมิในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ ในน้ำทิ้งจากระบบ และในถังปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 12 และภาพที่ 27 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ (Influent) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 27.74-28.40 ˚C อุณหภูมิในน้ำทิ้ง (Effluent) จากระบบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 27.81-28.34 ˚C และอุณหภูมิในถังปฏิกิริยา(Reactor) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.03-28.82 ˚C ในแต่ละการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิจะแปรผันไปตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในช่วง Mesophilic มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 30 – 40 ˚C และช่วง Thermophilic มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 45-55 ˚C (สันทัด,2549) จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าค่าของอุณหภูมิไม่ได้รับผลกระทบแต่อย่างใดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ซึ่งอุณหภูมิขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 14 อุณหภูมิในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ น้ำทิ้งจากระบบและถังปฏิกิริยา ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL	TEMP (˚C)		
(kg-COD/m^3-d)	Influent	Effluent	Reactor
2.0	28.40 ± 1.31	28.34 ± 1.42	28.82 ± 1.39
4.0	28.27 ± 1.31	28.34 ± 1.39	28.34 ± 1.39
6.0	28.23 ± 0.80	28.37 ± 0.80	28.57 ± 0.75
8.0	27.74 ± 0.97	27.81 ± 1.08	28.03 ± 1.11

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง

± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 12 อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

2.2 พีเอช (pH)

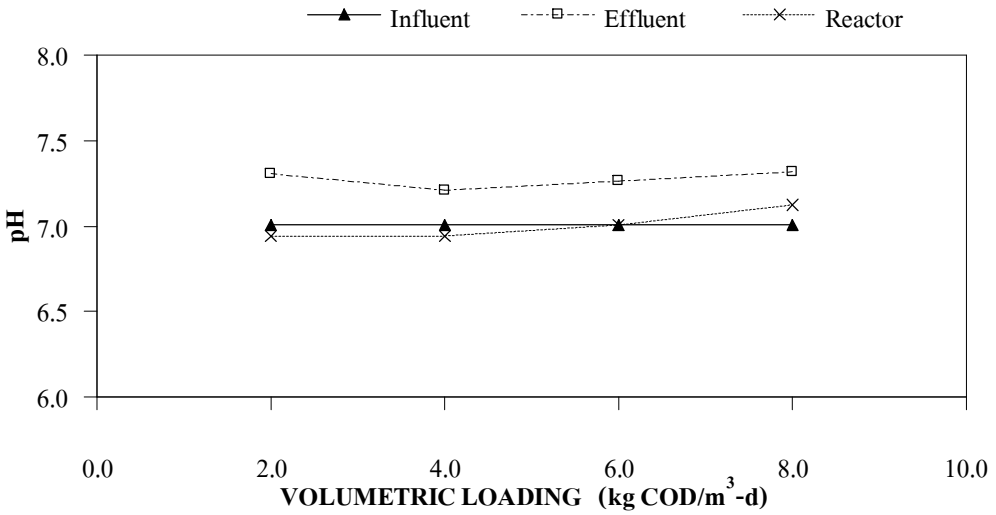
พีเอชในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ ถังปฏิกิริยาและในน้ำทิ้งจากระบบ แสดงในตารางที่ 13 และภาพที่ 28 น้ำเสียก่อนเข้าระบบจะถูกปรับพีเอชให้มีพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์และแบคทีเรียที่สร้างมีเทน จากการทดลองพบว่า พีเอชในถังปฏิกิริยาทั้ง 4 ระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.94-7.12 ซึ่งสอดคล้องกับ เสริมพล (2524) กล่าวว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6-7.6 ถ้าพีเอชสูงหรือ ต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง ที่ และจะเห็นว่าไม่มีช่วงใดที่มีค่า พีเอช ต่ำกว่า 6.2 ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของ ระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (Schroepfer, 1955; เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2518) เพราะสภาวะเป็นกรดนั้นจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน จากการทดลองพบว่าพีเอชจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศสารอินทรีย์ต่างๆจะถูกย่อยโดยแบคทีเรียสร้างกรดให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งถ้ากรดอินทรีย์เหล่านี้ไม่สามารถนำไปใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ทันก็จะเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้น กรดเหล่านี้จะทำให้พีเอชของระบบลดลง ถ้าระบบไร้ออกซิเจนมีกำลังบัฟเฟอร์พอเพียง อิทธิพลของกรดอินทรีย์ก็ปรากฏเพียงเล็กน้อยคือพีเอชจะลดลงไม่มาก แต่ถ้าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ไม่พอเพียง กรดอินทรีย์จะลดพีเอชของระบบทำให้เกิดการชะลออัตราการเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน และเมื่อปล่อยให้สภาวะเช่นนี้เกิดขึ้น

ต่อไปอีก พีเอชก็ยิ่งลดลงเพราะกรดอินทรีย์สะสมตัวเพิ่มขึ้นอีกจนในที่สุดถังย่อยจะไม่ให้ก๊าซมีเทนเลยจนทำให้ระบบล้มเหลว

ตารางที่ 15 พีเอชในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ น้ำทิ้งจากระบบและถังปฏิกิริยา ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL	pH		
(kg-COD/m^3-d)	Influent	Effluent	Reactor
2.0	7.01 ± 0.03	7.31 ± 0.06	6.94 ± 0.03
4.0	7.01 ± 0.03	7.21 ± 0.10	6.94 ± 0.04
6.0	7.01 ± 0.02	7.26 ± 0.08	7.01 ± 0.03
8.0	7.01 ± 0.02	7.32 ± 0.12	7.12 ± 0.07

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง
± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 13 ค่าเฉลี่ย pH ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

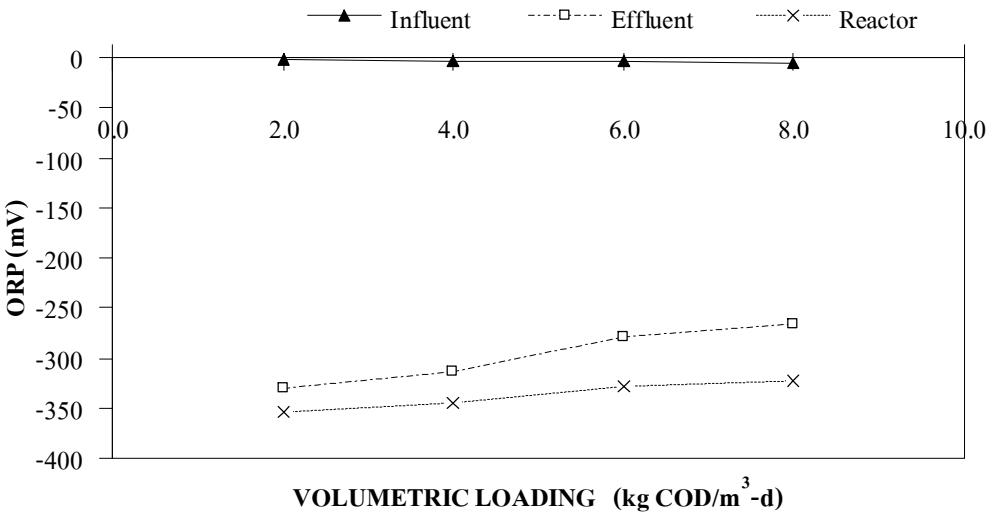
2.3 ค่า ORP (Oxidation Reduction Potential)

ค่า ORP ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงในตารางที่ 14 และภาพที่ 29 จากผลการศึกษาพบว่าค่า ORP ในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -2.17 ถึง -5.79 mV ถังปฏิกิริยามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -322.83 ถึง -354.8 mV และน้ำออกมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -266.13 ถึง-329.93 mV ซึ่งค่าที่ได้ในแต่ละการทดลองจากระบบที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรเดียวกันมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน และการที่ค่า ORP มีค่าที่เป็นลบนี้ แสดงให้เห็นว่าระบบเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ซึ่งสอดคล้องกับ มั่นสิน (2542) กล่าวว่า ถ้าค่า ORP เป็นบวกย่อมแสดงว่าปฏิกิริยาการย่อยแบบไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดขึ้นแต่ถ้าค่า ORP มีค่าเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยา ย่อยไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นได้ดี ORP จะแสดงถึงความสามารถในการรับ อิเล็คตรอนของสารละลายหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน พารามิเตอร์นี้วัดปริมาณความต่าง ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็คตรอนที่เกิดขึ้นในน้ำ ค่า ORP ที่ได้อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ โดยทั่วไปจะวัดค่า ORP ได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรตและวัด ORP ได้ค่าลบในน้ำเสียที่ปราศจากออกซิเจน เช่น ถ้า ORP วัดได้ค่าบวกแสดงว่าสารละลายนี้มีสารรับอิเล็คตรอนได้ดี แสดงว่าปฏิกิริยาย่อยสลายแบบ ไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นได้น้อยหรือไม่เกิดขึ้น เช่น มีออกซิเจนละลายน้ำเป็นต้น แต่ถ้าวัด ORP ได้ค่าเป็นลบแสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการรับอิเล็คตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็คตรอนได้ดี แสดงว่า ปฏิกิริยาย่อยไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นได้ดี จากการศึกษาค่า ORP ในถังปฏิกิริยามีค่าเกิน -300 mV ซึ่งแสดงว่าระบบเกิดการย่อยแบบไร้ออกซิเจนระบบมีเสถียรภาพในการบำบัดน้ำเสีย และพบว่า ORP ในถังปฏิกิริยามีค่าเป็นลบมากกว่าในน้ำ

ตารางที่ 16 ค่า ORP ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ และถังปฏิกิริยา ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL (kg-COD/m^3-d)	ORP (mV)		
	Influent	**Effluent**	**Reactor**
2.0	-2.17 ± 7.40	-329.93 ± 25.57	-354.80 ± 17.67
4.0	-3.60 ± 7.79	-313.00 ± 10.94	-345.03 ± 16.55
6.0	-3.27 ± 7.38	-279.43 ± 28.83	-328.37 ± 13.20
8.0	-5.79 ± 9.32	-266.13 ± 26.06	-322.83 ± 24.74

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง
± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 14 ค่าเฉลี่ยORP ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

2.4 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) เนื่องจากค่าของ VFA ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ จะบ่งชี้ถึงสภาพการทำงานของระบบ ว่าระบบสามารถทำงานได้ดีหรือไม่ ค่าเฉลี่ยของ VFA ในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบและในน้ำทิ้งจากระบบทั้ง 2 แสดงในตารางที่ 15 และภาพที่ 30

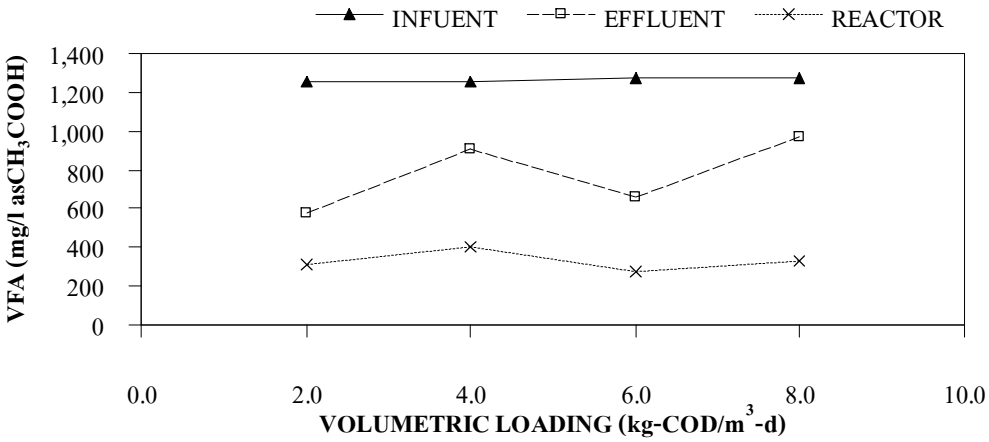
จากผลการศึกษาพบว่าในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ (Influent) มีค่า VFA เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,250-1,275 mg/l as CH_3COOH ค่า VFA ในน้ำทิ้ง (Effluent) จากระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 580.11-971.44 mg/l asCH_3COOH และค่า VFA ในถังปฏิกิริยามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 270-403.13 mg/l as CH_3COOH จากผลทดลองจะเห็นได้ว่าในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ (Influent) มีค่า VFA สูงกว่าปกติ แต่ค่า VFA ในน้ำทิ้งและในถังปฏิกิริยาที่ได้จากยังมีค่าที่ต่ำกว่าคำแนะนำ คือ 200-400 mg/l asCH_3COOH (มั่นสิน, 2542) และการที่ค่า VFA มีค่าที่ไม่สูงมากนักนี้ ทำให้ไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อการทำงานของจุลินทรีย์ประเภทสร้างมีเทนในย่อยสลายแบบไร้อากาศ ยกเว้นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.0 kg-COD/m^3 มีค่า VFA ในน้ำทิ้งสูงกว่าคำแนะนำเล็กน้อย แต่ระบบสามารถดำเนินไปได้โดยไม่ล้มเหลวแต่หาก VFA มากกว่า 2,000 mg/l as CH_3COOH จะทำ ให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง และถ้ามากถึง 8,000 - 10,000 mg/l as CH_3COOH จะเป็นพิษต่อระบบโดยตรง (มั่นสิน, 2542) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยที่สำคัญกว่า VFA คืออัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 17 ค่าเฉลี่ย VFA ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ถังปฏิกิริยาและที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VOLUMETRIC LOADING	VFA (mg/l as CH_3COOH)		
(kg-COD/m^3-d)	Influent	Effluent	Reactor
2.0	1,250 ± 100.7	580.11 ± 117.9	313.13 ± 41.5
4.0	1,250 ± 100.7	903.75 ± 180.1	403.13 ±1 43.4
6.0	1,275 ± 107.7	654.38 ± 257.8	270.00 ± 44.6
8.0	1,275 ± 107.7	971.44 ± 376.4	333.75 ± 39.3

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง

± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 15 ค่าเฉลี่ย VFA ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

2.5 อัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK)

ค่าความเป็นด่างที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 16 และภาพที่ 31 จากผลการศึกษาพบว่าในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ (Influent) ซึ่งมีการปรับสภาพ pH ให้มีค่าเท่ากับ 7 โดยใช้ NaOH 0.05 N มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,849-2,006 mg/l as$CaCO_3$ ในน้ำทิ้ง

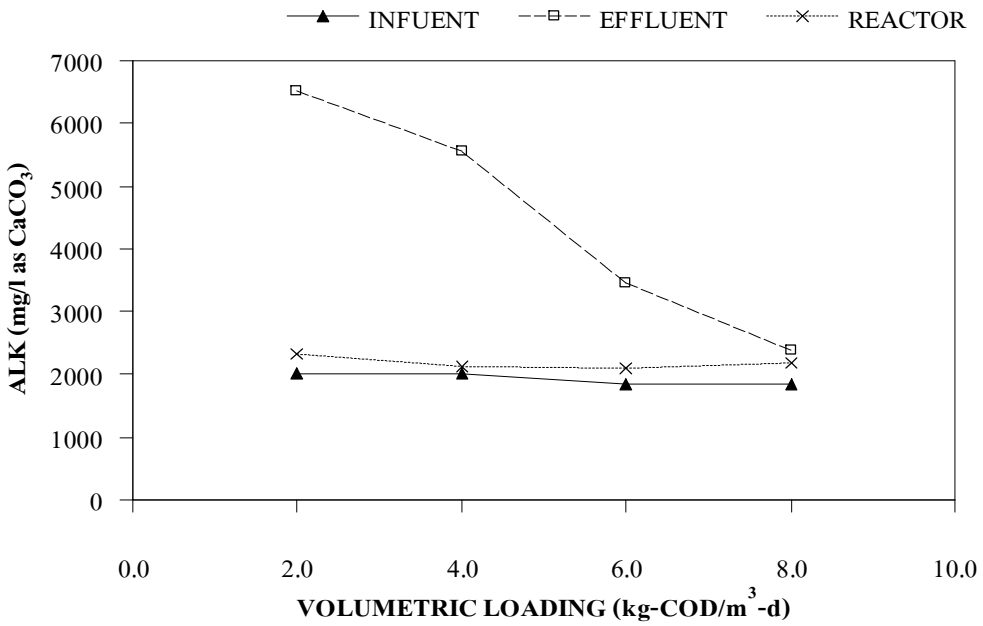
(Effluent) มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2,371-6,530 mg/l as$CaCO_3$ และในถังปฏิกิริยา (Reactor)มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2,110.00-2,312.50 mg/l as$CaCO_3$ ซึ่งค่าความเป็นด่างที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีค่าที่สูงกว่าคำแนะนำสำหรับการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ 1,500–2,000 mg/l as$CaCO_3$ (มั่นสิน, 2542) แต่เนื่องจากปัจจัยที่สำคัญกว่าสภาพความเป็นด่าง คืออัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK)

ตารางที่ 18 ค่าเฉลี่ย ALK ในการทำงานของระบบในน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ถังปฏิกิริยาและที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL	**ALK (mg/l as $CaCO_3$)**		
(kg-COD/m^3-d)	**Influent**	**Effluent**	**Reactor**
2.0	2,006 ± 360.6	6,530 ± 537.8	2,312 ± 234.1
4.0	2,006 ± 360.6	5,554 ± 347.3	2,134 ± 61.28
6.0	1,849 ± 441.7	3,450 ± 420.3	2,110 ± 53.54
8.0	1,849 ± 441.7	2,371 ± 363.8	2,180 ± 107.7

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง

± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 16 ค่าเฉลี่ย ALK ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

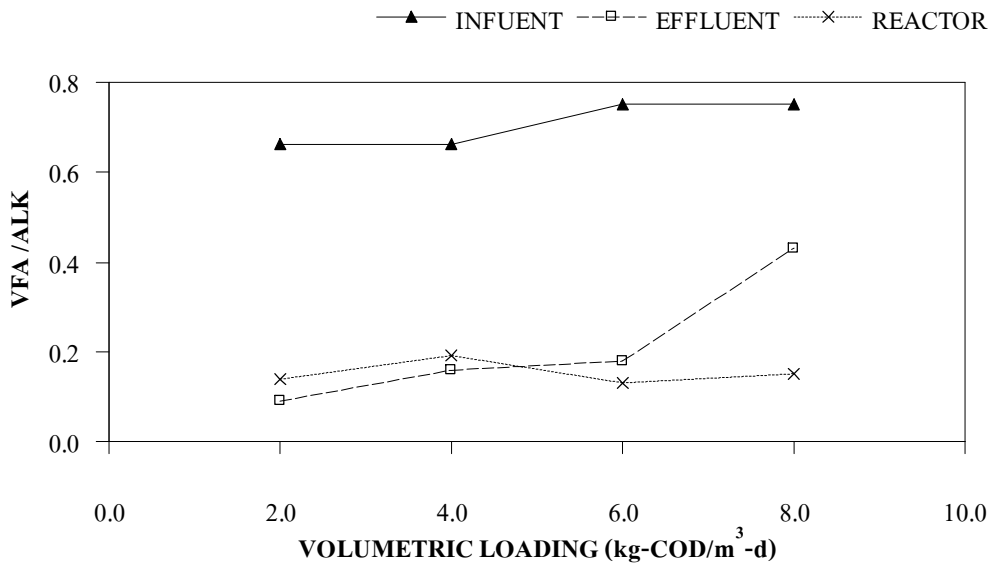
การพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่าของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK) ในการพิจารณาควรมีอัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.4 (มั่นสิน, 2542) จึงจะจัดว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงและไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดกรดในปริมาณที่สูงจนทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Borja et al., 2001) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่าง VFA/ALK จะแสดงให้เห็นว่าระบบกำลังจะเสียสมดุลกำลังบัฟเฟอร์ของระบบที่มีอยู่เริ่มลดลงและอาจไม่เพียงพอ จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วน VFA/ALK ในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบและในน้ำทิ้งจากระบบทั้ง 2 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงในดังตารางที่ 17 และภาพที่ 32

จากการศึกษา พบว่าอัตราส่วน VFA/ALK มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในน้ำทิ้งจากระบบ มีอัตราส่วน VFA/ALK เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.09-0.43 และในถังปฏิกิริยามีอัตราส่วน VFA/ALK เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.13-0.19 แสดงว่าระบบ มีเสถียรภาพในการทำงานและมีบัฟเฟอร์สูง โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ ในการปรับสภาพด่าง ถึงแม้ว่าสภาพด่างของระบบจะสูงกว่าคำแนะนำ คือ 1,500–2,000 mg/l as$CaCO_3$ (มั่นสิน, 2542) ก็ตาม

ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วน VFA/ALK ในน้ำเสียเข้าสู่ระบบและน้ำทิ้งจากระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VOLUMETRIC LOADING	VFA /ALK		
(kg-COD/m^3-d)	Influent	Effluent	Reactor
2.0	0.66 ± 0.23	0.09 ± 0.02	0.14 ± 0.02
4.0	0.66 ± 0.23	0.16 ± 0.03	0.19 ± 0.07
6.0	0.75 ± 0.36	0.18 ± 0.06	0.13 ± 0.02
8.0	0.75 ± 0.28	0.43 ± 0.19	0.15 ± 0.02

หมายเหตุ ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์จำนวน 30 ครั้ง
± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์



ภาพที่ 17 ค่าเฉลี่ย VFA/ALK ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

3. การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่เกิด

กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ นั้น มีก๊าซเกิดขึ้นในปริมาตรที่แตกต่างกัน อีกทั้งปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันด้วย การบันทึกผลการทดลองจะติดตามเฉพาะในสภาวะควบคุม (control condition) จะแยกพิจารณา 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) ที่เกิด และก๊าซมีเทน (methane) และส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas product per organic weight removal)

3.1 ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิด (total gas) และก๊าซมีเทน (methane)

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่ผสมกันระหว่างก๊าซชนิดต่างๆ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ได้จากการแทนที่น้ำ หาได้โดยการคำนวณจากตัวเลขมิเตอร์จากเครื่องวัดปริมาตรก๊าซในแต่ละถังปฏิกิริยา คูณด้วยปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการแทนที่น้ำในส่วนของดรัมด้วยวิธีดังกล่าวสามารถบันทึกปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหนึ่งวัน (litre/day) ที่เกิดขึ้น การเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดของถังปฏิกิริยาทั้ง 4 ระบบ ตลอดการทดลองในสภาวะคงที่ (steady state) ณ อุณหภูมิห้อง ต่อปริมาตรถังปฏิกิริยา (6.5 ลิตร) ต่อวัน มีค่า 0.03, 0.11, 0.32 และ 1.40 l/l-d การเปลี่ยนเป็นปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (standard temperature and pressure, STP) อุณหภูมิ 0 ºC และความดัน 1 บรรยากาศ ทำโดยคูณด้วย 0.910081 ดังการคำนวณที่ (ภาคผนวก ข) จากการคำนวณจะได้ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวัน มีค่า 0.03, 0.09, 0.28 และ 1.22 l/l-d ตามลำดับ

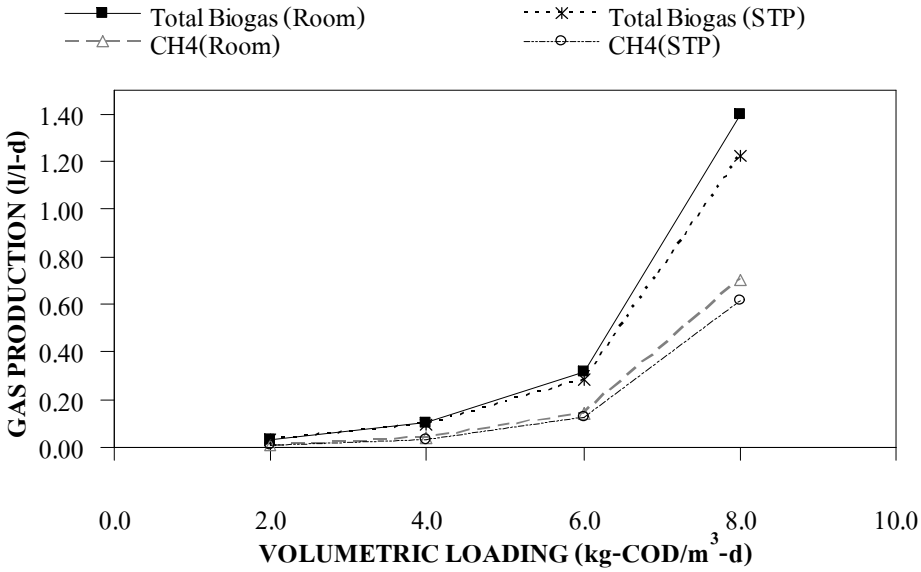
การนำก๊าซจากหลอดสุญญากาศ (venoject tube) มาวิเคราะห์ปริมาณมีเทน (% CH_4) ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) ทำโดยใช้ gas tight syringe ขนาดความจุ 5 µl โดยดูดก๊าซผ่านจุดยางด้านบนของหลอดสุญญากาศ แล้วนำก๊าซที่ดูดได้ไปฉีดเข้าเครื่อง GC โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับมีเทนมาตรฐานความเข้มข้น 99.99 % เป็นผลให้ทราบปริมาณมีเทน (% CH_4) ในก๊าซทั้งหมด (% composition)ในการทดลองนี้มีถังปฏิกิริยาที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ การเก็บก๊าซไปวิเคราะห์จะเก็บจากส่วนเก็บก๊าซของแต่ละถังปฏิกิริยา ก๊าซที่นำไปวิเคราะห์หาปริมาณมีเทน ได้จากตัวอย่างที่เก็บในสภาวะคงที่ (steady state) ผลการวิเคราะห์โดยเครื่อง GC ปรากฏ

ดังนี้คือ ถังปฏิกิริยาที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d มีเทนที่เกิดขึ้น ณ มีค่า 27.76 %, 33.85 %, 45.58 %และ 50.64 % ตามลำดับ ทำให้ทราบว่ามีปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวัน สำหรับแต่ละถังปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง (28 °C)มีค่า 0.01, 0.04, 0.14 และ 0.70 l/l-d และปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวัน ภายใต้สภาวะมาตรฐาน มีค่า 0.01, 0.03, 0.13 และ 0.62 l/l-d ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนที่เกิดมีความสัมพันธ์กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ โดยแปรผันกัน คือเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง 4 ระบบได้ว่าผลการทดลองได้ดังตารางที่18 และภาพที่ 33 และ34

ตารางที่ 20 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง, ภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวัน และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL / parameters	2.0	4.0	6.0	8.0
Total Biogas produced (l/l-d)				
-Room condition	0.0327±0.0053	0.1052±0.0140	0.3168±0.0296	1.3953±0.2494
-STP	0.0287±0.0047	0.0922±0.0122	0.2810±0.0263	1.2237±0.2187
CH_4 produced (l/l-d)				
-Room condition	0.0092±0.0024	0.0358±0.0086	0.1442±0.0167	0.7047±0.1306
-STP	0.0080±0.0021	0.0314±0.0075	0.1265±0.0147	0.6180±0.1145
% CH_4	27.76±4.51	33.85±4.96	45.58±3.87	50.64±4.31

หมายเหตุ ± แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างการวิเคราะห์

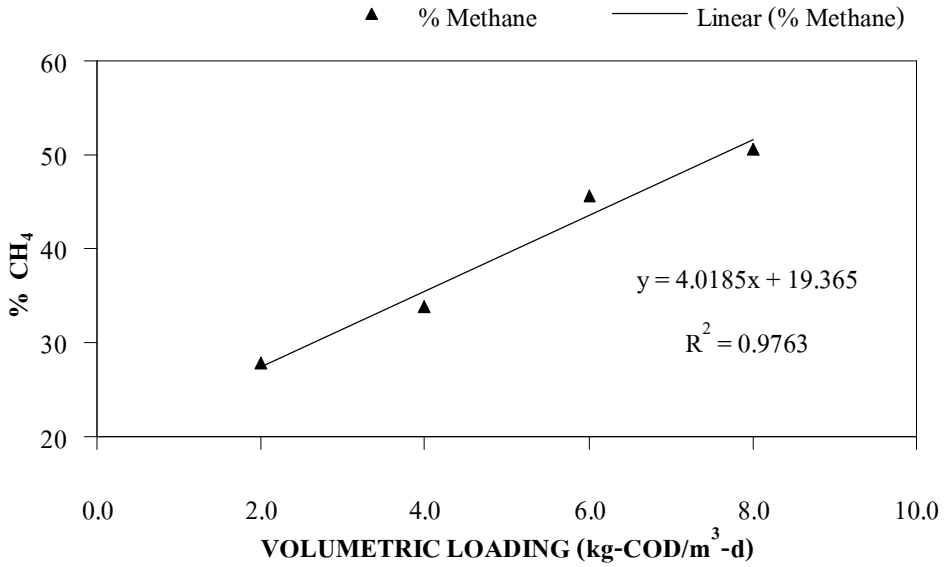


ภาพที่ 18 การผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อปริมาตรถังปฏิกิริยาต่อวัน ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (CH_4)ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) มีความสัมพันธ์กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) โดยมีลักษณะแปรผันกัน คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เพิ่มขึ้นก๊าซมีเทน (CH_4) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด(total gas) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับก๊าซมีเทน (CH_4) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด(total gas) ในรูปสมการเส้นตรง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกส ารอินทรีย์ (X) กับก๊าซมีเทน (CH_4)ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) แสดงได้ดังนี้

$$Y = 4.0185X + 19.365;\ 2.0 < X < 8.0\ ;\ R^2 = 0.9763$$



ภาพที่ 19 เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (CH_4) ในก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

การทดลองของอวัสดา (2545) เป็นระบบการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.214 - 0.270 l/l-d ที่ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.58 - 7.05 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ และ อารียา (2546) เป็นระบบการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.875 - 1.029 l/l-d ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.30 - 10.27 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนี้มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อปริมาตรถังปฏิกิริยา ต่อวัน (ลิตร/ลิตร-วัน) มีค่าสูงกว่าการทดลองของ อวัสดา (2545) และ อารียา (2546) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.0 kg-COD/m^3-d ซึ่งเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดของการทดลองนี้ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.40 l/l-d ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกากถั่วและน้ำเสียสามารถย่อยสลายและให้ก๊าซชีวภาพได้ง่ายกว่าเศษอาหาร

การทดลองของ Fezzani and Chikh (2007) เป็นระบบการย่อยสลายกากมะกอกและน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.07 – 3.00 l/l-d ที่ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.19 – 10.84 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถผลิต

ก๊าซชีวภาพได้ ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากของเสียที่นำมาใช้ในกระบวนการเป็นของเสียที่มีการผสมระหว่างของแข็งและน้ำเสียเหมือนกันทำให้สามารถย่อยสลายและให้ก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (gas product per organic weight removal)

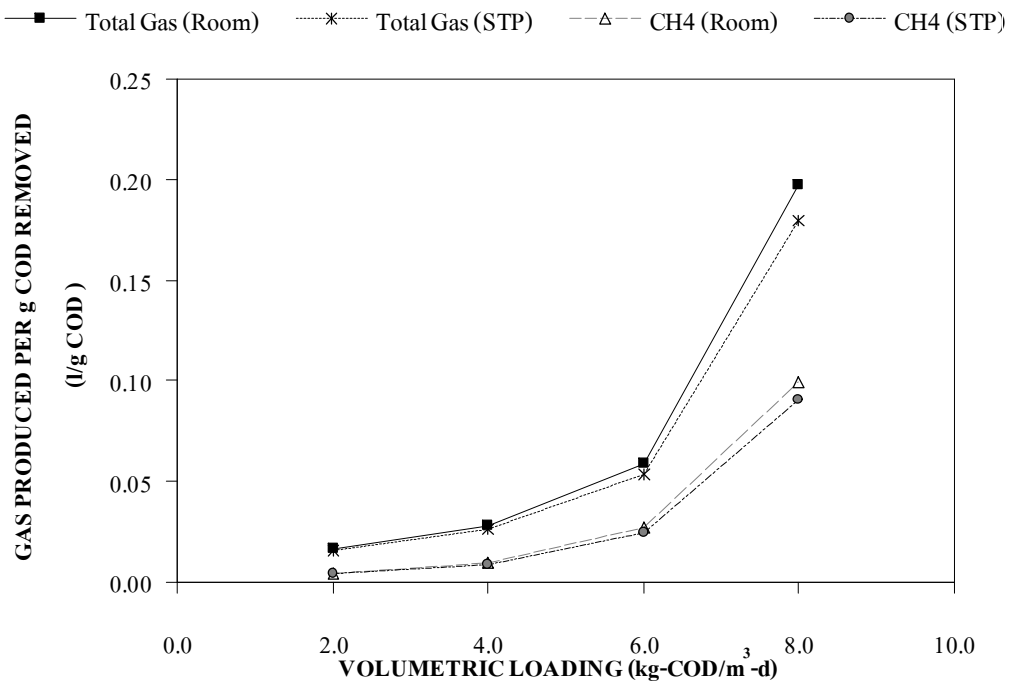
เมื่อพิจารณาก๊าซที่เกิดต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัด (gas produced per g COD removed) ในระยะสภาวะคงที่ ผลการทดลองได้ดังตารางที่ 21 และ ภาพที่ 37 พบว่า ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิห้องมีค่า 0.0172, 0.0286, 0.0591 และ 0.1973 l/g COD removed ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น ณ สภาวะ STP เฉลี่ยมีค่า 0.0156, 0.0260, 0.0538 และ 0.1795 l/g COD removed ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นโดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิห้องมีค่า 0.0048, 0.0097, 0.269 และ 0.0999 l/g COD removed ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ณ สภาวะ STP เฉลี่ยมีค่า 0.0043, 0.0088, 0.0245 และ 0.0909 l/g COD removed ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาก๊าซที่เกิดต่อกรัม SS ที่ถูกกำจัด (gas produced per g SS removed) ในระยะสภาวะคงที่ ผลการทดลองได้ดังตารางที่ 22 และ ภาพที่ 38 พบว่า ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิห้องมีค่า 0.1126, 0.1851, 0.4269 และ 1.5669 l/g SS removed ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น ณ สภาวะ STP เฉลี่ยมีค่า 0.1025, 0.1684, 0.3885 และ 1.4260 l/g SS removed ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นโดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิห้องมีค่า 0.0313, 0.0626, 0.1946 และ 0.7935 l/g SS removed ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ณ สภาวะ STP เฉลี่ยมีค่า 0.0285, 0.0570, 0.1771 และ 0.7221 l/g SS removed ตามลำดับ

จาก McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของซีโอดีที่ถูกกำจัดไว้ดังนี้ 1 กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตร ที่ STP จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการย่อยสลายกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0-8.0 kg-COD/m^3-d มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อกรัมของCOD ที่ถูกกำจัดน้อยกว่า McCarty (1964) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ได้ทำการทดลองมีค่าน้อยเกินไป สารตั้งต้นที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนมีน้อย ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่าตามทฤษฎี

ตารางที่ 21 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

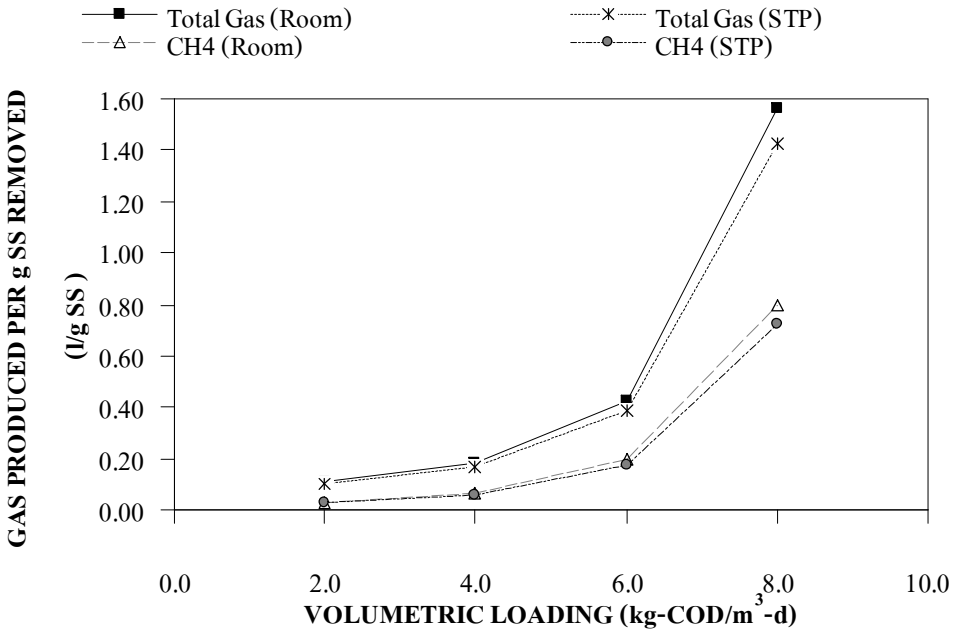
Volumetric Loading ($kg\text{-}COD/m^3\text{-}d$)	Total Gas Produced per g COD Removed (l/g)		CH_4 Produced per g COD Removed (l/g)		Compared with Theoritical CH_4 0.35 l per g COD Removed at STP
	Room	STP	Room	STP	%
2.0	0.0172	0.0156	0.0048	0.0043	1.23
4.0	0.0286	0.0260	0.0097	0.0088	2.51
6.0	0.0591	0.0538	0.0269	0.0245	7.00
8.0	0.1973	0.1795	0.0999	0.0909	25.97



ภาพที่20 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ตารางที่22 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม SS ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

Volumetric Loading ($kg\text{-}COD/m^3\text{-}d$)	Total Gas Produced per g SS Removed (l/g)		CH_4 Produced per g SS Removed (l/g)	
	Room	STP	Room	STP
2.0	0.1126	0.1025	0.0313	0.0285
4.0	0.1851	0.1684	0.0626	0.0570
6.0	0.4269	0.3885	0.1946	0.1771
8.0	1.5669	1.4260	0.7935	0.7221



ภาพที่21 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ ณ อุณหภูมิห้อง และภายใต้สภาวะมาตรฐานต่อกรัม SS ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

การทดลองนี้เพื่อทราบถึงก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักมลสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ SS ที่ถูกกำจัด ได้ผลดังกล่าวมาแล้วจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบ เมื่อผู้ใช้งานเติมกากถั่วและน้ำเสียเข้าระบบโดยทราบค่า COD และ SS อย่างใดอย่างหนึ่ง จะทราบว่าจะเกิดก๊าซชีวภาพเท่าไรทั้งในรูปก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทน จะทำให้สามารถกำหนดขนาดของระบบเก็บก๊าซชีวภาพได้อย่างเหมาะสมในการนำก๊าซไปใช้งาน นอกจากนี้โดยอาศัยประสิทธิภาพของระบบที่ได้จากการทดลอง มีประโยชน์ในการที่จะทราบว่า จะได้ก๊าซชีวภาพเท่าไร ในการทำลายมลสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ SS เพราะนอกจากการทดลองได้ทราบถึงปริมาตรก๊าซที่เกิดต่อกรัมมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด จะทำให้สามารถกำหนดขนาดของระบบเก็บก๊าซได้

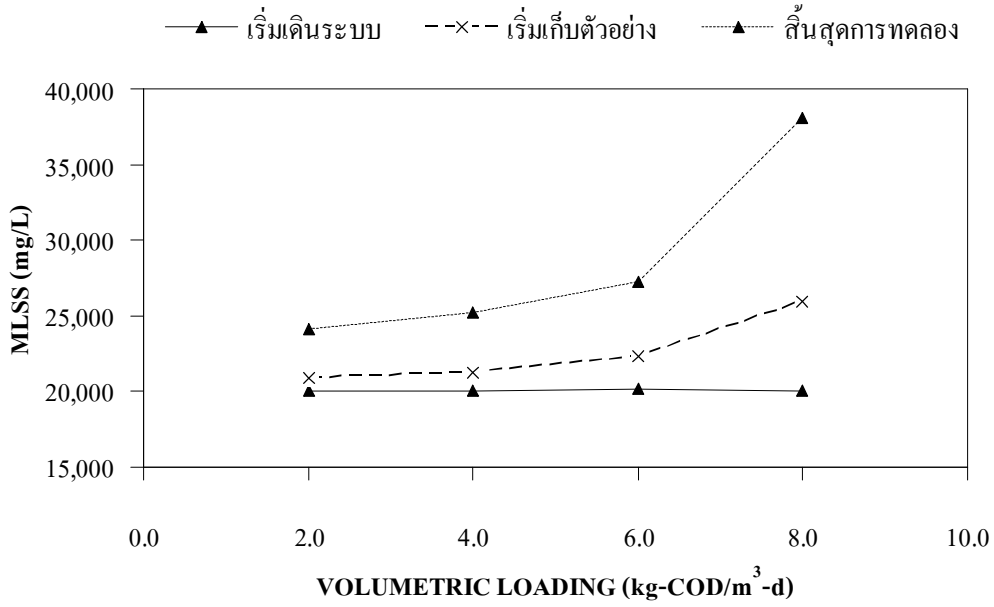
4. ปริมาณตะกอนชีวภาพที่เพิ่มขึ้น

ในการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ จะทำการเก็บตัวอย่างตะกอนชีวภาพจากถังปฏิกิริยาเพื่อนำค่าน้ำหนักตะกอนที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนชีวภาพที่เพิ่มขึ้นในรูปของแข็งแขวนลอย (MLSS) โดยจะไม่มีการนำเอาตะกอนชีวภาพส่วนเกินออกจากระบบ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 23 และ ภาพที่ 22 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกอนชีวภาพ มีความสัมพันธ์กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นปริมาณของตะกอนชีวภาพในรูปของแข็งแขวนลอย (MLSS) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่ระบบสำหรับจุลชีพมีมากกว่า ทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตได้มากกว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำๆ ปริมาณตะกอนชีวภาพจึงมีปริมาณสูง

ตารางที่ 23 ค่าปริมาณตะกอนชีวภาพที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL (kg-COD/m^3-d)	ปริมาณตะกอนชีวภาพ (mg/L)			
	เริ่มเดินระบบ	เริ่มเก็บตัวอย่าง	สิ้นสุดการทดลอง	ตะกอนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น
2.0	20,067	20,919	24,156	4089
4.0	20,022	21,287	25,250	5228
6.0	20,178	22,314	27,233	7055
8.0	20,083	25,929	38,067	17,984

หมายเหตุ เริ่มเดินระบบ = วันที่ 0
เริ่มเก็บตัวอย่าง = วันที่ 15
สิ้นสุดการทดลอง = วันที่ 45



ภาพที่ 22 ปริมาณตะกอนชีวภาพที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) 4 ระดับ คือ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m^3-d ตามลำดับ ในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) ภายใต้อุณหภูมิห้อง เพื่อหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด การทดลองใช้ถังปฏิกิริยาความจุ 6.5 ลิตร จำนวน 2 ถังโดยควบคุมค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบให้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 65,000 mg/l การดำเนินระบบเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous flow) วิเคราะห์ตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาพบว่า ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง สามารถลดมลสารอินทรีย์ในรูป COD และ SS จากกากถั่วและน้ำเสียโรงงานวุ้นเส้น และพบว่าที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 ระดับนี้ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารอินทรีย์มีค่าสูงสุดที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d ประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

2. ในถังปฏิกิริยาของทุกการทดลองมีค่าโออาร์พีเฉลี่ยอยู่ในช่วง -322.83 ถึง -354.80 มิลลิโวลท์ การที่ค่าโออาร์พีมีค่าที่เป็นลบนี้แสดงให้เห็นว่าสารละลายมีความสามารถรับอิเล็คตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็คตรอนได้ดีจะเกิดขึ้นในน้ำเสียที่ปราศจากออกซิเจนแสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

3. อุณหภูมิและพีเอชในการทำงานของระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.03-28.82 °C และ 6.94-7.32 ตามลำดับ ระบบมีค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันทุกการทดลองและใกล้เคียงช่วง Mesophilic มีค่าอยู่ระหว่าง 30 – 40 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในถังหมัก น้ำเสียก่อนเข้าระบบจะถูกปรับพีเอชให้มีพีเอชเท่ากับ 7 และในถังปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 6.94-7.12 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์และแบคทีเรียที่สร้างมีเทน

4. สภาพด่างในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ (Influent) มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,849.34-2,006.86 mg/l as$CaCO_3$ และในถังปฏิกิริยา (Reactor) มีค่าความเป็นด่างโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2,180.63-2,312.50 mg/l as$CaCO_3$ สำหรับการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีปัจจัยที่สำคัญกว่าสภาพความเป็นด่าง คืออัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK) จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK) ในถังปฏิกิริยาทุกชุดการทดลองมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง

5. การเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมด และก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ในแต่ละวันมีความสม่ำเสมอ ปริมาณคงที่เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นพบว่าจากการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 ระดับ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.0 kg-COD/m^3-d มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมด และอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุด ซึ่งมีก๊าซมีเทนร้อยละ 50.64 อยู่ในเกณฑ์ที่มีความเหมาะสมจะนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งควรอยู่ในช่วง 50-70 %

6. ปริมาณตะกอนชีวภาพที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

7. ในการนำไปใช้ประโยชน์ ถ้าโรงงานต้องการที่จะนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้เพื่อเป็นพลังงานทดแทน จากการทดลองอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.0 kg-COD/m^3-d มีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากให้ก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนสูงสุด

ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง มีประโยชน์ในด้านการออกแบบระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และระบบเก็บก๊าซชีวภาพให้มีขนาดที่เหมาะสม ถูกต้องตามหลักวิชาการ เป็นการประหยัดค่าลงทุนก่อสร้างระบบ ในการกำจัดของเสียจากโรงงานวุ้นเส้นและได้ก๊าซเชื้อเพลิงในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งสอดคล้องกับแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวด้านการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเมื่อเดินระบบเป็นแบบ pilot scale

2. ทดลองแบ่งแยกถังปฏิกิริยาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของถังสร้างกรด และส่วนของถังสร้างมีเทนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ

3. ทดลองเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรให้มากกว่า 8.0 กก.ซีโอดี ต่อ ลบ.ม.-วันเพื่อหาค่าสูงสุดที่ระบบสามารถก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4. ศึกษาและตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียในระบบโดย Molacular Technique เช่น FISH, PCR และ DGGR เป็นต้น

5. น้ำทิ้งที่ผ่านจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนยังคงมีความสกปรกเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ ดังนั้นต้องมีการติดตั้งระบบบำบัดเพื่อให้น้ำทิ้งมีความสกปรกอยู่ในเกณฑ์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2548. **การใช้พลังงาน**. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=254, 31 พฤศจิกายน 2548

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.

จรรยา เงินมูล. 2547. ระบบก๊าซชีวภาพ. **วารสารโลกพลังงาน ปีที่3 ฉบับที่7.** แหล่งที่มา: http://teenet.chiangmai.ac.th/emac/journal/2000/07/04.php, 3ธันวาคม 2548.

ธนิตา เกาศล. 2540. **สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของถังหมักไร้อากาศในการบำบัดตะกอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีระ เกรอต. 2529. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพ ฯ. 606 น.

ธีระพงษ์ วิมลจิตรานนท์. 2545. **การเปรียบเทียบสมรรถนะการบำบัดน้ำเสียจากมูลสุกรแบบไร้อากาศด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังสัมผัสไร้อากาศแบบไหลขึ้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นุษรา สินบัวทอง. 2537. **การศึกษาการทำงานของถังหมักไร้อากาศชนิดที่มีตัวกลางยึดเกาะในการบำบัดของเสียจากมูลโค**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปราโมทย์ ป้องสุธาธาร. 2548. โรงงานน้ำยางผลิต “ไบโอก๊าซ” ทดแทนน้ำมัน. หนังสือพิมพ์ **กรุงเทพธุรกิจ ฉบับวันที่ 14 ตุลาคม 2548 หน้า 10**. แหล่งที่มา : http://www.most.go.th/news/newspaper/default.asp?GID=1416.

มงคล ดำรงค์ศรี. ม.ป.ป. **ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน**. เอกสารประกอบการเรียน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มั่นสิน ตันฑุลเวศม์. 2534. การกำจัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน, น. 311-319. ใน **เอกสารประกอบการฝึกอบรม ผู้ควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย ครั้งที่ 3.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มั่นสิน ตันฑุลเวศน์. 2542. **เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม**. เล่มที่2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ลัดดา สาครมณีรัตน์. 2532. **การกำจัดน้ำเสียที่มีพีเอชต่ำด้วยบ่อหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริพร คุณาวิชชา. 2539. **การศึกษาการกำจัดไนเตรทจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานวุ้นเส้นโดยวิธีออกซิก-แอนแอโรบิกที่มีตัวกลาง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมชาย ดารารัตน์. 2529. **การศึกษาประสิทธิภาพและดัชนีในการออกแบบถังกรองไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมชาย เจียมธีรสกุล. 2530. **การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศ 2 ขั้นตอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมชัย จันทร์สว่าง. 2548. เทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ. **KU Electronic Magazine ฉบับที่ 3**. แหล่งที่มา: http://www.doae.go.th/library/html/detail/KUmagazine/september_43/techno/bio_gass.htm, 3 ธันวาคม 2548.

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. **ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา**. สำนักพิมพ์ท้อป, กรุงเทพฯ. 417 น.

สินีนุช ศศิยศชาติ. 2544. **บทบาทของสภาพด่างต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุเมธ ชวเดช. 2530. **ระบบหมักก๊าซชีวภาพ UASB เอกสารประกอบคำ บรรยาย เรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2527. **การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน**. สถาบันวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2550. **อนุรักษ์พลังงาน**. แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/index-T.html, 2 มกราคม 2551

อวัสดา ฉลานุวัฒน์. 2545. **อิทธิพลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อาริยา วิรัชวรกุล. 2546. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Anderson, J.M. and J.S.I Ingram. 1993. **Tropical Soil Biology and Fertility**. 2nd ed.,CAB International., U.K.

American Public Work Association (APHA). 1989. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 17th ed. APHA, Washington D.C.

Borja, R., E.Gonzalez, F. Raposo, F. Millan and A. Martin. 2001. Performance evaluation of a mesophilic anaerobic fluidized-bed reactor treating wastewater derived from the production of proteins from extracted sunflower flour. **Bioresource Technology.** 76: 45-52. Cited J. Iza. 1991. Fluidized-bed reactors for wastewater treatment. Wat. **Sci. Tech**. 15: 169-176

Chan, D.B. an E.A. Pearson. 1970. Comprehensive Studies of Solid Wastes Management-hydrolysis Rate of Cellulose in Anaerobic Fermentation. Califonai University, Berkley.

Dague, R.R. and R.E. Mckinney. 1996. Anaerobic Activated Sludge. **Journal of water pollution control federation.** 220-226

Fezzani, B. and R. B. Cheikh. 2007. Thermophili anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid wastes in tubular digester. **Journal of Chemical Engineering**. 195-203

Ghaly, A.E. 1996. Acompolish Study of Anaerobic Digestionn of Acid Cheese Whey and Diary Manuse in a Two-Stage Reactor. **Bioresource Techonoly**. 58: 61-71.

Holland, K.T., J.S. Knapp and J.G. Shoesmith. 1987. **Anaerobic Bacteria.** Chapmon and Hall. New York.

Malina, J. and F.G. Pohland. 1992. **Desing of Anaerobic Process for the Treatment of Industry and Municipal Wastewater Quality Managemeni Library.** Technomic Publishing CO. Inc., Lancaster, Pennsaylvania.

Marchaim, U. and C. Krause. 1993. Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. **Bioresource Techology**. 43: 195-203.

Masse, D.I., and L. Masse. 2001. The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment inanaerobic sequencing batch reactors. **Bioresource Technology**. 76: 91-98.

McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental part 1, 2, 3, 4. **Public Works**. 95 (9): 107-115.

Metcalf and Eddy. 2003. **Wastewater Engineerung: Treatment and Reuse**. 4 th ed. McGraw-Hill, New York.

Mtz.Viturtia A., J.Mata-Alvarcz and F.Cecchi. 1995. Two-Phase Continuous Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable wastes. **Conservation and Recycling**. 13: 259-267.

Patel ,H. and D. Madamwar. 2001. Single and Multichamber Fixed Film Anaerobic Reactor for Biomethane of Acidic Petrochemical Wastewater-System Performance. **Process biochemistry**. 36: 613-619.

Zupancic, G.D. and M. Ros. 2003.Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. **Renewable Energy**. 28: 2255-2267.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
16	64,000	9,835	3,200	300.00	95.00	96.95
19	66,000	9,940	3,200	332.50	95.15	96.65
22	68,000	9,840	3,450	490.00	94.93	95.02
25	68,000	9,860	3,450	500.00	94.93	94.47
28	60,000	9,950	3,500	507.50	94.17	94.90
31	60,000	9,890	3,200	365.00	94.67	96.31
34	66,666	9,750	3,420	300.00	94.87	96.92
37	68,000	9,810	2,760	330.00	95.94	96.64
40	66,000	9,720	2,750	350.00	95.83	96.40
43	64,000	9,566	2,750	366.67	95.70	96.17
45	65,000	9,816	3,170	385.00	95.12	96.08
average	**6,5061**	**9,816**	**3168**	**384.24**	**95.12**	**96.05**
sd	**2,89**	**108.53**	**291.85**	**78.39**	**0.53**	**0.86**

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
16	66,000	9,730	4,800	450.00	92.73	95.38
19	66,666	9,860	5,600	442.50	91.60	95.51
22	64,000	9,380	6,400	420.00	90.00	95.52
25	68,000	9,840	4,000	457.50	94.12	95.35
28	64,000	9,540	4,800	465.00	92.50	95.13
31	66,000	9,703	5,600	490.00	91.52	94.95
34	68,000	9,740	4,800	500.00	92.94	94.87
37	60,000	9,830	5,600	520.00	90.67	94.71
40	68,000	9,720	5,280	550.00	92.24	94.34
43	60,000	9,840	5,200	545.00	91.33	94.46
45	65,000	9,740	5,200	490.00	92.00	94.97
average	**65,061**	**9,720**	**5,207**	**485.55**	**91.97**	**95.02**
sd	**2,894**	**144.81**	**620.15**	**42.11**	**1.13**	**0.41**

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
16	60,000	9,950	5,920	1,320	90.13	86.73
19	68,000	9,780	6,560	2,170	90.35	77.81
22	66,000	9,686	5,280	1,915	92.00	80.23
25	64,000	9,040	5,600	1,965	91.25	78.26
28	64,000	9,606	5,920	1,495	90.75	84.44
31	68,000	9,865	6,240	1,670	90.82	83.07
34	60,000	9,420	5,760	1,750	90.40	81.42
37	60,000	9,895	6,240	1,580	89.60	84.03
40	64,000	9,947	6,400	1,550	90.00	84.42
43	66,666	10,520	5,760	1,880	91.36	82.13
45	64,000	9,800	6,000	1,800	90.63	81.63
average	**64,061**	**9,774**	**5,971**	**1,736**	**90.66**	**82.20**
sd	**3,018**	**366.21**	**372.28**	**243.37**	**0.68**	**2.72**

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
16	66,000	9,897	8,720	2,450	86.79	75.25
19	60,000	9,870	8,240	2,020	86.27	79.53
22	64,000	9,845	6,160	2,385	90.38	75.77
25	68,000	9,260	6,720	2,360	90.12	74.51
28	68,000	10,030	6,560	1,920	90.35	80.86
31	60,000	9,040	7,040	2,100	88.27	76.77
34	68,000	9,930	7,440	3,260	89.06	67.17
37	66,000	9,200	6,320	3,680	90.42	60.00
40	66,666	10,235	7,360	2,080	88.96	79.68
43	60,000	10,260	7,440	2,960	87.60	71.15
45	64,000	9,780	7,200	2,520	88.75	74.23
average	**64,606**	**9,759**	**7,200**	**2,521**	**88.81**	**74.08**
sd	**3,272**	**412.06**	**778.10**	**558.17**	**1.47**	**6.11**

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 2.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
16	7.01	28.8	-13	7.12	28.9	-355	6.98	29.0	-378
17	7.01	28.5	-14	7.21	28.5	-376	6.97	28.7	-389
18	7.01	28.2	-10	7.31	28.3	-378	6.95	28.5	-384
19	6.98	28.6	-5	7.29	28.5	-350	6.96	28.9	-378
20	6.98	28.8	2	7.3.0	28.8	-350	6.97	29.0	-362
21	6.98	27.5	5	7.32	27.5	-346	6.94	28.0	-389
22	7.04	27.7	-6	7.32	27.8	-350	6.91	28.1	-361
23	7.04	27.3	4	7.34	26.0	-334	6.89	27.5	-359
24	7.04	26.3	-9	7.34	25.7	-370	6.90	27.1	-379
25	7.05	26.5	3	7.28	26.5	-359	6.94	27.0	-363
26	7.05	26.6	-2	7.28	26.6	-365	6.92	27.1	-369
27	7.05	26.8	-5	7.31	26.8	-349	6.91	27.6	-359
28	6.97	27.0	-4	7.43	26.7	-325	6.88	26.9	-341
29	6.97	27.1	2	7.35	27.1	-333	6.89	27.4	-350
30	6.97	28.1	8	7.35	27.8	-330	6.92	27.8	-349
31	7.00	27.1	11	7.37	27.7	-321	6.91	27.8	-339
32	7.00	28.2	4	7.32	27.9	-315	6.93	28.0	-361
33	7.00	28.0	6	7.28	28.0	-316	6.95	28.0	-357
34	7.02	27.8	3	7.35	27.5	-315	6.94	27.9	-347
35	7.02	27.9	-5	7.27	28.4	-300	6.97	28.9	-338
36	7.02	29.0	-8	7.28	28.7	-313	6.90	29.4	-341

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
37	7.04	28.9	-11	7.27	28.8	-328	6.95	29.7	-339
38	7.04	29.5	-15	7.32	29.6	-304	6.99	30.1	-341
39	7.04	30.0	-5	7.40	29.8	-305	7.00	30.4	-333
40	7.00	30.1	8	7.35	29.9	-301	6.93	30.8	-329
41	7.00	29.9	9	7.37	30.2	-310	6.88	31.0	-341
42	7.00	29.8	3	7.34	30.3	-312	6.93	30.9	-351
43	7.02	30.0	-6	7.31	30.5	-303	6.95	31.0	-349
44	7.02	31.0	-10	7.32	30.8	-298	6.92	31.1	-339
45	7.02	30.9	-5	7.34	30.6	-287	6.98	30.9	-329
average	**7.01**	**28.40**	**-2.17**	**7.31**	**28.34**	**-329.93**	**6.94**	**28.82**	**-354.80**
sd	**0.03**	**1.31**	**7.40**	**0.06**	**1.42**	**25.57**	**0.03**	**1.39**	**17.67**

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 4.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
16	7.01	28.6	5	7.12	28.9	-312	6.95	28.9	-361
17	7.01	28.4	8	7.21	28.5	-319	6.96	28.5	-352
18	7.01	27.9	11	7.31	28.3	-321	6.97	28.3	-378
19	6.98	29.1	4	7.29	28.7	-329	6.94	28.7	-367
20	6.98	28.6	-3	7.21	28.9	-323	6.91	28.9	-367
21	6.98	27.5	-9	6.98	27.5	-336	6.89	27.5	-371
22	7.04	28.1	-14	7.02	27.8	-324	6.90	27.8	-357
23	7.04	25.9	-15	7.01	26.1	-325	6.94	26.1	-343
24	7.04	26.1	-17	7.05	25.7	-320	6.92	25.7	-342
25	7.05	26.3	-5	7.08	26.3	-309	6.91	26.3	-340
26	7.05	26.4	-3	7.09	26.6	-296	6.88	26.6	-365
27	7.05	26.7	2	7.31	27.1	-312	6.89	27.1	-349
28	6.97	26.7	-5	7.23	26.7	-317	7.00	26.7	-348
29	6.97	27.3	-8	7.28	27.0	-296	6.93	27.0	-331
30	6.97	27.6	-11	7.29	27.9	-321	6.88	27.9	-346
31	7.00	27.7	-14	7.30	27.7	-319	6.93	27.7	-339
32	7.00	28.0	-5	7.27	27.9	-316	6.95	27.9	-336
33	7.00	28.0	3	7.09	28.0	-316	6.92	28.0	-339
34	7.02	27.5	9	7.27	27.5	-315	6.98	27.5	-341
35	7.02	28.6	2	7.14	28.4	-297	6.97	28.4	-357
36	7.02	28.9	-11	7.21	28.7	-313	6.95	28.7	-339

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
37	7.04	29.1	-15	7.27	28.8	-318	6.96	28.8	-345
38	7.04	29.8	-6	7.32	29.6	-305	6.97	29.6	-347
39	7.04	29.4	-5	7.25	29.7	-310	6.94	29.7	-350
40	7.00	30.1	-8	7.27	29.9	-309	6.91	29.9	-323
41	7.00	29.9	2	7.25	30.2	-299	6.89	30.2	-331
42	7.00	29.7	5	7.29	30.3	-296	6.90	30.3	-305
43	7.02	30.0	4	7.25	30.5	-289	6.94	30.5	-314
44	7.02	30.2	-3	7.25	30.5	-315	6.97	30.5	-345
45	7.02	30.1	-6	7.25	30.5	-313	7.01	30.5	-323
average	**7.01**	**28.40**	**-2.17**	**7.31**	**28.34**	**-329.93**	**6.94**	**28.82**	**-354.80**
sd	**0.03**	**1.31**	**7.79**	**0.10**	**1.39**	**10.94**	**0.04**	**1.39**	**16.55**

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 6.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
16	6.98	28.8	2	7.29	29.2	-287	6.98	29.6	-314
17	6.98	28.6	8	7.28	28.8	-309	7.01	29.1	-325
18	6.98	29.0	11	7.16	29.3	-315	7.03	29.6	-324
19	7.03	29.2	4	7.13	29.2	-330	7.05	29.2	-348
20	7.03	29.1	6	7.18	28.9	-319	7.02	28.9	-356
21	7.03	28.9	1	7.19	29.0	-306	7.04	29.1	-343
22	7.01	29.1	-2	7.14	29.7	-303	7.01	29.7	-346
23	7.01	28.5	-5	7.25	28.9	-308	6.98	28.9	-339
24	7.01	26.6	-7	7.25	26.6	-278	6.97	28.9	-338
25	6.99	27.1	-6	7.28	27.5	-298	6.99	27.9	-341
26	6.99	27.1	4	7.23	27.8	-287	7.00	27.9	-336
27	6.99	28.0	-9	7.18	28.2	-299	7.05	28.2	-331
28	7.04	28.1	3	7.17	27.7	-271	7.02	28.0	-320
29	7.04	28.2	-2	7.21	28.2	-268	7.04	28.7	-315
30	7.04	29.1	-3	7.24	29.1	-275	7.01	29.1	-320
31	7.03	29.5	-9	7.21	29.7	-256	6.97	30.0	-314
32	7.03	29.3	-14	7.24	29.3	-276	7.03	29.3	-326
33	7.03	29.0	-15	7.28	28.8	-268	7.05	28.9	-317
34	7.02	28.8	-17	7.32	28.8	-258	7.00	29.0	-314
35	7.02	28.1	-10	7.41	28.3	-299	7.02	28.4	-339
36	7.02	27.9	-6	7.37	28.4	-278	6.97	28.4	-327

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
37	6.97	28.1	-7	7.36	28.1	-276	6.98	28.1	-330
38	6.97	28.2	-2	7.38	28.2	-248	7.03	28.2	-319
39	6.97	27.3	-1	7.22	27.1	-258	7.05	27.1	-321
40	7.04	27.3	2	7.32	27.7	-301	7.00	27.7	-348
41	7.04	28.0	9	7.40	28.5	-266	6.97	28.6	-320
42	7.04	28.1	-6	7.36	28.1	-239	7.02	28.2	-309
43	7.02	27.5	-14	7.20	27.3	-285	7.04	27.4	-339
44	7.02	27.2	-11	7.32	27.2	-215	7.01	27.3	-329
45	7.02	27.1	-2	7.32	27.6	-207	6.98	27.7	-303
average	**7.01**	**28.23**	**-3.27**	**7.26**	**28.37**	**-279.43**	**7.01**	**28.57**	**-328.37**
sd	**0.02**	**0.80**	**7.38**	**0.08**	**0.80**	**28.83**	**0.03**	**0.75**	**13.20**

ตารางผนวกที่ ก8 ค่าตัวแปรต่างๆของระบบ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 8.0 kg-COD/m^3-d

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
16	6.98	27.3	-5	7.18	27.8	-298	6.90	28.1	-304
17	6.98	28.3	-3	7.29	28.5	-269	7.00	28.8	-320
18	6.98	28.9	-9	7.22	29.8	-278	7.02	30.0	-315
19	7.03	29.5	-14	7.21	29.7	-256	7.01	30.1	-328
20	7.03	29.3	-15	7.31	29.3	-287	7.07	29.9	-333
21	7.03	29.0	-17	7.43	28.8	-265	7.11	29.1	-319
22	7.01	27.9	-11	7.35	28.1	-255	7.12	28.5	-318
23	7.01	28.1	-15	7.48	28.4	-287	7.15	28.5	-308
24	7.01	28.5	-6	7.45	28.4	-262	7.13	28.4	-301
25	6.99	28.2	-7	7.38	28.2	-248	7.09	28.3	-311
26	6.99	27.1	-2	7.18	26.8	-311	7.10	27.1	-321
27	6.99	27.5	-1	7.50	27.5	-209	7.14	27.9	-320
28	7.04	27.7	2	7.48	28.1	-238	7.17	28.2	-329
29	7.04	28.0	9	7.32	27.9	-246	7.15	28.1	-333
30	7.04	27.5	11	7.17	27.5	-306	7.11	27.9	-325
31	7.03	27.2	17	7.48	27.0	-257	7.18	27.3	-349
32	7.03	27.1	6	7.29	27.5	-253	7.16	27.6	-337
33	7.03	27.8	7	7.34	27.6	-257	7.14	27.6	-310
34	7.02	27.8	-8	7.32	27.8	-235	7.14	27.9	-307
35	7.02	27.5	-17	7.32	27.5	-224	7.13	27.7	-305
36	7.02	26.9	-22	7.41	27.0	-288	7.19	27.0	-311

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

DAY	INFLUENT			EFFLUENT			REACTOR		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
37	6.97	26.1	-13	7.49	25.7	-300	7.18	25.9	-354
38	6.97	24.7	-11	7.53	24.2	-320	7.20	24.5	-430
39	6.97	27.1	-14	7.28	27.7	-255	7.18	27.8	-310
40	7.04	26.8	-7	7.11	27.4	-276	7.14	27.5	-309
41	7.04	27.8	-8	7.21	28.2	-267	7.17	28.5	-302
42	7.04	27.2	-6	7.22	27.2	-235	7.19	27.3	-297
43	7.02	28.2	-9	7.17	28.2	-257	7.15	28.3	-311
44	7.02	28.3	-10	7.24	28.1	-267	7.14	28.4	-327
45	7.02	28.9	5	7.19	28.5	-278	7.12	28.6	-341
average	**7.01**	**27.74**	**-5.77**	**7.32**	**27.81**	**-266.13**	**7.12**	**28.03**	**-322.83**
sd	**0.02**	**0.97**	**9.32**	**0.12**	**1.08**	**26.06**	**0.07**	**1.11**	**24.74**

ตารางผนวกที่ ก9 ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร2.0 kg-COD/m^3-d

DAY	ALK (mg/l as $CaCO_3$)			VFA (mg/l as CH_3COOH)			VFA/ALK		
	INF	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**
16	2,225	6,642	2,025	1,200	812.50	215.63	0.54	0.12	0.11
19	1,225	6,250	2,144	1,500	806.25	328.13	1.22	0.13	0.15
22	1,922	6,933	2,031	1,246	543.75	337.50	0.65	0.08	0.17
25	2,250	6,583	2,375	1,189	687.50	309.38	0.53	0.10	0.13
28	1,958	6,675	2,156	1,239	531.25	271.88	0.63	0.08	0.13
31	1,531	6,592	2,750	1,350	487.50	328.13	0.88	0.07	0.12
34	2,225	7,625	2,563	1,196	525.00	309.38	0.54	0.07	0.12
38	2,269	7,038	2,319	1,181	543.75	346.88	0.52	0.08	0.15
40	2,244	6,375	2,456	1,211	562.50	328.13	0.54	0.09	0.13
43	2,219	5,563	2,306	1,193	600.00	356.25	0.54	0.10	0.15
AVERAGE	**2,007**	**6,628**	**2,313**	**1,250**	**610.00**	**313.13**	**0.66**	**0.09**	**0.14**
sd	**360.58**	**537.78**	**234.09**	**100.73**	**117.90**	**41.50**	**0.23**	**0.02**	**0.02**

ตารางผนวกที่ ก10 ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร4.0 kg-COD/m^3-d

DAY	ALK (mg/l as $CaCO_3$)			VFA (mg/l as CH_3COOH)			VFA/ALK		
	INF	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**
16	2,225	5,525	2,081	1,200.00	1,081	375.00	0.54	0.20	0.18
19	1,225	5,517	2,169	1,500.00	956.25	346.88	1.22	0.17	0.16
22	1,922	5,983	2,025	1,246.25	562.50	290.63	0.65	0.09	0.14
25	2,250	5,008	2,138	1,188.75	943.75	300.00	0.53	0.19	0.14
28	1,958	5,467	2,181	1,238.57	812.50	562.50	0.63	0.15	0.26
31	1,531	4,975	2,075	1,350.00	812.50	750.00	0.88	0.16	0.36
34	2,225	5,892	2,194	1,196.25	1112.50	375.00	0.54	0.19	0.17
38	2,269	5,775	2,138	1,181.25	693.75	365.63	0.52	0.12	0.17
40	2,244	5,542	2,225	1,211.25	1,069	328.13	0.54	0.19	0.15
43	2,219	5,863	2,119	1,192.50	993.75	337.50	0.54	0.17	0.16
AVERAGE	**2,007**	**5,555**	**2,134**	**1,250.48**	**903.75**	**403.13**	**0.66**	**0.16**	**0.19**
sd	**360.58**	**347.27**	**61.18**	**100.73**	**180.11**	**143.41**	**0.23**	**0.03**	**0.07**

ตารางผนวกที่ ก11 ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร6.0 kg-COD/m^3-d

DAY	ALK (mg/l as $CaCO_3$)			VFA (mg/l as CH_3COOH)			VFA/ALK		
	INF	EFF	REACT	INF	EFF	REACT	INF	EFF	REACT
16	1,806	3,825	2,013	1,270	862.50	234.38	0.70	0.23	0.12
19	2,231	3,038	2,169	1,200	225.00	337.50	0.54	0.07	0.16
22	1,231	3,119	2,031	1,466	450.00	290.63	1.19	0.14	0.14
25	1,874	3,125	2,144	1,256	431.25	309.38	0.67	0.14	0.14
28	1,222	3,019	2,156	1,463	393.75	262.50	1.20	0.13	0.12
31	2,213	3,144	2,081	1,196	675.00	328.13	0.54	0.21	0.16
34	1,292	3,938	2,119	1,316	843.75	253.13	1.02	0.21	0.12
38	2,238	4,125	2,138	1,208	900.00	225.00	0.54	0.22	0.11
40	2,206	3,750	2,100	1,193	956.25	206.25	0.54	0.26	0.10
43	2,181	3,425	2,150	1,189	806.25	253.13	0.54	0.24	0.12
AVERAGE	**1,849**	**3,451**	**2,110**	**1,276**	**654.38**	**270.00**	**0.75**	**0.18**	**0.13**
sd	**441.66**	**420.29**	**53.54**	**107.72**	**257.76**	**44.59**	**0.28**	**0.06**	**0.02**

ตารางผนวกที่ ก12 ค่าสภาพด่าง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และอัตราส่วนกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร8.0 kg-COD/m^3-d

DAY	ALK (mg/l as $CaCO_3$)			VFA (mg/l as CH_3COOH)			VFA/ALK		
	INF	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**	**INF**	**EFF**	**REACT**
16	1,806	2,881	2,194	1,270	328.13	375.00	0.70	0.11	0.17
19	2,231	2,994	2,138	1,200	468.75	365.63	0.54	0.16	0.17
22	1,231	2,750	2,225	1,466	928.13	328.13	1.19	0.34	0.15
25	1,874	2,044	2,119	1,256	862.50	337.50	0.67	0.42	0.16
28	1,222	2,050	2,231	1,463	1,088	403.13	1.20	0.53	0.18
31	2,213	2,119	1,956	1,196	1,163	328.13	0.54	0.55	0.17
34	1,292	2,150	2,094	1,316	751.88	309.38	1.02	0.35	0.15
38	2,238	2,319	2,331	1,208	1,406	271.88	0.54	0.61	0.12
40	2,206	2,306	2,281	1,193	1,416	328.13	0.54	0.61	0.14
43	2,181	2,106	2,238	1,189	1,303	290.63	0.54	0.62	0.13
AVERAGE	**1,849**	**2,372**	**2181**	**1276**	**971.44**	**333.75**	**0.75**	**0.43**	**0.15**
sd	**441.66**	**363.84**	**107.67**	**107.72**	**376.36**	**39.33**	**0.28**	**0.19**	**0.02**

ตารางผนวกที่ ก13 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 2.0 kg-COD/m^3-d

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
16	221	193.82	62.81	55.08	28.42
17	180	157.86	29.92	26.24	16.62
18	197	172.77	52.36	45.92	26.58
19	190	166.63	58.06	50.92	30.56
20	242	212.23	73.86	64.77	30.52
21	196	171.89	62.48	54.80	31.88
22	170	149.09	51.36	45.04	30.21
23	157	137.69	42.92	37.64	27.34
24	177	155.23	48.18	42.25	27.22
25	168	147.34	46.86	41.09	27.89
26	194	170.14	51.49	45.15	26.54
27	187	164.00	39.87	34.96	21.32
28	199	174.52	47.94	42.04	24.09
29	168	147.34	38.00	33.33	22.62
30	196	171.89	48.80	42.80	24.9
31	194	170.14	53.85	47.23	27.76
32	207	181.54	45.29	39.72	21.88
33	214	187.68	77.66	68.11	36.29
34	209	183.29	67.36	59.08	32.23
35	218	191.19	47.24	41.43	21.67

ตารางผนวกที่ ก13 (ต่อ)

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
36	210	184.17	52.04	45.64	24.78
37	219	192.06	60.79	53.32	27.76
38	266	233.28	91.00	79.81	34.21
39	229	200.83	75.82	66.50	33.11
40	243	213.11	75.89	66.55	31.23
41	238	208.73	64.50	56.56	27.1
42	269	235.91	73.19	64.19	27.21
43	276	242.05	67.48	59.18	24.45
44	295	258.72	91.92	80.62	31.16
45	245	214.87	86.04	75.46	35.12
AVERAGE	**212.47**	**186.33**	**59.50**	**52.18**	**27.76**
sd	**34.66**	**30.40**	**15.90**	**13.95**	**4.51**

ตารางผนวกที่ ก14 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 4.0 kg-COD/m^3-d

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
16	732	641.96	331.38	290.62	45.27
17	737	646.35	239.16	209.74	32.45
18	765	670.91	191.02	167.52	24.97
19	616	540.23	164.90	144.62	26.77
20	723	634.07	232.16	203.60	32.11
21	628	550.76	198.20	173.82	31.56
22	638	559.53	213.28	187.05	33.43
23	646	566.54	216.09	189.51	33.45
24	660	578.82	217.67	190.89	32.98
25	592	519.18	182.57	160.12	30.84
26	570	499.89	199.16	174.66	34.94
27	631	553.39	271.65	238.23	43.05
28	565	495.51	191.25	167.73	33.85
29	594	520.94	202.55	177.64	34.1
30	644	564.79	181.93	159.55	28.25
31	658	577.07	213.06	186.85	32.38
32	646	566.54	222.81	195.40	34.49
33	602	527.95	173.01	151.73	28.74
34	655	574.44	211.96	185.89	32.36
35	627	549.88	204.21	179.10	32.57

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
36	605	530.59	205.03	179.82	33.89
37	632	554.26	215.45	188.95	34.09
38	741	649.86	248.24	217.70	33.5
39	959	841.04	402.49	352.99	41.97
40	715	627.06	230.73	202.35	32.27
41	851	746.33	288.23	252.78	33.87
42	721	632.32	245.79	215.56	34.09
43	783	686.69	377.88	331.40	48.26
44	829	727.03	280.04	245.59	33.78
45	745	653.37	232.37	203.78	31.19
AVERAGE	**683.67**	**599.58**	**232.81**	**204.17**	**33.85**
sd	**90.73**	**79.57**	**55.87**	**49.00**	**4.96**

ตารางผนวกที่ ก15 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 6.0 kg-COD/m^3-d

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
16	2,145	1,902.62	981.98	861.20	45.78
17	2,020	1,791.74	906.37	794.89	44.87
18	2,046	1,814.80	886.94	777.85	43.35
19	2,036	1,805.93	928.01	813.86	45.58
20	1,865	1,654.26	916.27	803.57	49.13
21	1,819	1,613.45	895.49	785.35	49.23
22	1,975	1,751.83	908.30	796.58	45.99
23	2,178	1,931.89	845.72	741.69	38.83
24	2,260	2,004.62	902.19	791.22	39.92
25	1,991	1,766.02	838.81	735.63	42.13
26	2,093	1,856.49	939.13	823.62	44.87
27	1,771	1,570.88	840.34	736.98	47.45
28	2,134	1,892.86	1,041.61	913.49	48.81
29	2,228	1,976.24	1,052.95	923.44	47.26
30	2,310	2,048.97	982.21	861.40	42.52
31	2,407	2,135.01	1,067.50	936.20	44.35
32	2,420	2,146.54	1,058.75	928.52	43.75
33	2,053	1,821.01	905.78	794.37	44.12
34	2,082	1,846.73	935.44	820.38	44.93
35	2,178	1,931.89	898.86	788.30	41.27

ตารางผนวกที่ ก15 (ต่อ)

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
36	1,961	1,739.41	948.54	831.87	48.37
37	2,189	1,941.64	937.11	821.85	42.81
38	1,920	1,703.04	871.49	764.29	45.39
39	1,834	1,626.76	896.46	786.19	48.88
40	1,538	1,364.21	675.03	592.00	43.89
41	2,119	1,879.55	928.97	814.71	43.84
42	2,173	1,927.45	1,292.50	1,133.52	59.48
43	2,153	1,909.71	1,104.49	968.64	51.3
44	2,079	1,844.07	924.12	810.45	44.45
45	1,808	1,603.70	810.71	710.99	44.84
AVERAGE	**2,059.50**	**1,826.78**	**937.40**	**822.10**	**45.58**
sd	**192.56**	**170.80**	**108.77**	**95.39**	**3.87**

ตารางผนวกที่ ก16 ค่าการผลิตก๊าซ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร 8.0 kg-COD/m^3-d

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
16	7,799	6,839.72	4,249.68	3,726.97	54.49
17	9,876	8,661.25	5,158.23	4,523.77	52.23
18	10,494	9,203.24	5,897.63	5,172.22	56.2
19	8,906	7,810.56	4,629.34	4,059.93	51.98
20	2,664	2,336.33	1,346.65	1,181.01	50.55
21	9,994	8,764.74	4,518.29	3,962.54	45.21
22	11,210	9,831.17	4,852.81	4,255.91	43.29
23	8,899	7,804.42	4,830.38	4,236.24	54.28
24	8,086	7,091.42	4,055.13	3,556.35	50.15
25	10,764	9,439.59	5,561.50	4,877.44	51.67
26	9,674	8,484.10	4,518.73	3,962.92	46.71
27	10,294	9,027.84	4,370.83	3,833.22	42.46
28	11,083	9,719.35	4,981.58	4,368.85	44.95
29	8,275	7,257.18	4,437.88	3,892.02	53.63
30	9,933	8,711.24	4,549.31	3,989.75	45.8
31	7,806	6,845.42	4,210.29	3,692.42	53.94
32	9,764	8,563.03	5,716.82	5,013.65	58.55
33	9,116	7,994.73	4,488.72	3,936.61	49.24
34	9,116	7,994.73	4,622.72	4,054.13	50.71
35	8,777	7,697.43	4,173.46	3,660.13	47.55

ตารางผนวกที่ ก16 (ต่อ)

DAY	TOTAL GAS PRODUCED (ml/d)		CH_4 PRODUCED (ml/d)		% CH4
	Room	STP	Room	STP	
36	7,950	6,972.15	4,007.60	3,514.66	50.41
37	7,951	6,973.03	3,639.97	3,192.25	45.78
38	11,500	10,085.50	6,268.65	5,497.61	54.51
39	10,402	9,122.55	5,025.21	4,407.11	48.31
40	8,400	7,366.80	4,000.08	3,508.07	47.62
41	8,906	7,810.12	4,422.47	3,878.51	49.66
42	8,227	7,215.08	4,242.66	3,720.82	51.57
43	8,296	7,275.15	4,813.88	4,221.77	58.03
44	8,745	7,669.37	5,013.51	4,396.85	57.33
45	9,176	8,047.35	4,814.65	4,222.45	52.47
AVERAGE	**9,069.35**	**7,953.82**	**4,580.62**	**4,017.21**	**50.64**
sd	**1,621.04**	**1,421.65**	**848.62**	**744.24**	**4.31**

ตารางผนวกที่ ก17 ปริมาณตะกอนชีวภาพตลอดการทดลอง ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรต่างๆ

Day	MLSS (mg/l)				หมายเหตุ
	VL 2.0	VL 4.0	VL 6.0	VL 8.0	
0	20,067	20,022	20,125	20,083	
3	20,115	20,175	20,299	20,554	
6	20,355	20,256	20,712	21,593	Start up
9	20,527	20,335	21,423	23,199	
12	20,654	20,784	21,420	24,396	
15	20,865	21,048	22,042	25,604	
18	20,920	21,287	22,130	25,929	
21	21,146	22,139	22,884	28,893	
24	21,282	22,983	23,172	30,311	
27	21,678	23,030	23,771	30,797	
30	22,065	23,710	24,008	31,481	
33	22,992	24,042	24,842	32,721	เก็บตัวอย่าง
36	23,130	24,619	25,687	34,357	
39	23,882	24,965	26,602	36,959	
42	23,792	25,181	26,917	37,839	
45	24,156	25,250	27,233	38,067	
average	**21,726.57**	**22,489**	**23,329**	**28,924**	
sd	**1,420**	**1,960**	**2,370**	**6,103**	

ภาคผนวก ข

รายละเอียดการคำนวณ

รายละเอียดการคำนวณ

1. การคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading)

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ในรูปของซีโอดี (COD)
สูตรคำนวณ

$$\text{Volumetric Loading (kg-COD/m}^3\text{-d)} = \frac{Q \times So}{V}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (m^3/d)
So = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบในรูปของ COD (mg/l)
V = ปริมาตรกักเก็บน้ำเสียของระบบ (m^3)

2. การคำนวณระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time: HRT)

HRT หมายถึง ระยะเวลาที่น้ำเสียถูกเก็บกักอยู่ภายในถังปฏิกิริยา โดยเริ่มตั้งแต่น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยาจนกระทั่งออกจากถังปฏิกิริยา คำนวณได้จากสูตร

$$HRT = V/Q$$

เมื่อ HRT = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (d)
V = ปริมาตรเก็บกักน้ำเสียของถังปฏิกิริยา (m^3)
Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (m^3/d)

3. ประสิทธิภาพในการบำบัด

ประสิทธิภาพในการบำบัด หมายถึง ความสามารถของถังปฏิกิริยาในการลดปริมาณ COD และ SS โดยวัดจากน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นตัวชี้วัด
สูตรคำนวณ

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{(So - Se) \times 100}{So}$$

เมื่อ So = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ SS ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mg/l)

Se = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ SS ในน้ำทิ้งจากระบบ (mg/l)

4. การเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (room conditions) เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (standard temperature and pressure, STP)

สภาวะการทดลองห้อง คือ อุณหภูมิ ถึง 28.03-28.82 °C เฉลี่ย 28.44°C (273.15+28.44) = 301.59 K

ความดันก๊าซในระบบเก็บก๊าซ p1

สภาวะมาตรฐาน STP คือ อุณหภูมิ 0 ºC (273.15 K)

ความดัน 1 บรรยากาศ (1.013×10^5)

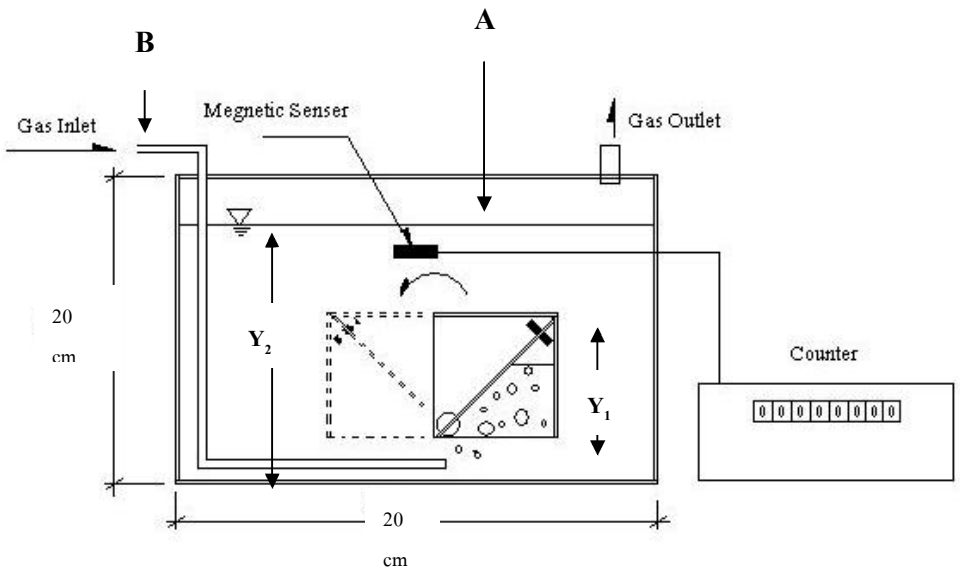
จากสูตร

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \quad (1)$$

เมื่อ P_1, P_2 = ความดันก๊าซที่สภาวะทดลองและที่ STP ตามลำดับ

T_1, T_2 = อุณหภูมิ (ในหน่วย Kelvin) สภาวะทดลองและที่ STP ตามลำดับ

V_1, V_2 = ปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลองและที่ STP ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ข1 แสดงความดันของก๊าซชีวภาพในระบบเก็บก๊าซชีวภาพของการทดลอง

หาความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 และ V_2

จากสมการ (1) $$V_2 = \frac{P_1V_1}{T_1} \text{ X } \frac{T_2}{P_2} \quad (2)$$

$$= \frac{P_1V_1}{301.59} \text{ X } \frac{273.15 \text{ K}}{1 \text{ atm}} \quad (3)$$

จากสมการ (3) จะหาค่า P_1 ได้ดังนี้

จากภาพภาคผนวกที่ ข2 $Y1 = 20 - h - 10$ cm (4)

ความดันที่จุด a = ความดันที่จุด b

ความดันที่ P_1 = ความดันที่ P_2

$P_1+pGY_2 = P_2+pGY_1$

$P_1 = P_2 + pG (Y_1-Y_2)$ (5)

ดังนั้น P_1 $= P_2+pGh$ ด้วย

โดยที่ P2 = 1.013×105 N/m^2 หรือ 1 atm

p = 1,000 kg/m^3

g = 9.8 m/s^2

h = ความสูงของก๊าซที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซ (cm) ได้จากการทดลอง

หาค่า P1 จาก (5)

P1 = P2+ (1000kg/m^3 X 9.8 m/sec^2 X 5)

P1 = 1.013 X 10^5 N/m^2 + 490 N/m2

P1 = 101790 N/m^2

นำค่า P1 ไปแทนในสมการที่ (3)

จะได้ $V2 = \frac{101790}{301.59} V1 \times \frac{273.15}{101300}$

V2 0.910081 V1

จะเห็นได้ว่า ปริมาตรก๊าซที่ STP = 0.910081X ปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง

5. ก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

5.1 ก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 212.47 ml/d (จากตารางภาคผนวกที่ ก13)

การเติม COD ถูกกำจัดในหนึ่งวัน (จากตารางภาคผนวกที่ 1)

= $Q (S_0-S)$

= 0.2 l (65066.6-3168)

= 12.38 g/d

ดังนั้นก๊าซทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัด

= 212.47/12.38

= 0.0172 l/g

5.2 ก๊าซมีเทน (methane)

ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m^3-d d มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 59.50 ml/d (จากตารางภาคผนวกที่ ก13)

การเติม COD ถูกกำจัดในหนึ่งวัน = 12.38 g/d

ดังนั้นก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัด

= 59.50/12.38

= 0.0043 l/g

ในการคำนวณค่าก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD และ SS ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆทำโดยวิธีเดียวกันแต่แทนค่าตัวแปรดังกล่าวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์กากถั่ว

การวิเคราะห์กากถั่ว

การวิเคราะห์กากถั่วประยุกต์มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินทางเคมี

1. การเตรียมตัวอย่างกากถั่ว

ตัวอย่างกากถั่วที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีนั้นจะใช้ตัวอย่างกากถั่วสด หากยังไม่วิเคราะห์ให้เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 0 °C

2. สารอินทรีย์คาร์บอน (TOC)

การหาสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในตัวอย่างด้วยวิธีวัดสี

สารเคมี

ก. Barium chloride 0.4% ละลาย แบเรียมคลอไรด์ 4 กรัมในน้ำ 1 ลิตร

ข. Potassium dichromate 5% ละลายโปแตสเซียมไดโครเมต 50 กรัมในน้ำ 1 ลิตร

ค. Sucrose (Stock Solution) อบซูโครส 15 กรัม ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ละลายซูโครส 11.886 กรัมในน้ำกลั่น 100 มล. สารละลายนี้จะมี 50 มก/มล C

ง. การเตรียม Standard Solution ปิเปต Stock Solution 0 5 10 15 20 และ 25 มล. แล้วทำให้เป็น 100 มล. คิดเป็นความเข้มข้น 0 2.5 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 มก/มลC จากนั่นปิเปต Standard Solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 2 มล. ใส่ลงใสหลอดทดลองที่ฝาปิด(หลอดซีโอดี)

จ. กรดซัลฟุริคเข้มข้น

วิธีการทดลอง (with external heating)

ก. ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในหลอดซีโอดี และเติมน้ำกลั่นในหลอดตัวอย่าง 2 มล.

ข. เติม Potassium dichromate 5% จำนวน 10 มล ลงในแต่ละหลอดตัวอย่าง และ Standard Solution

ค. ค่อยๆเติมกรดซัลฟุริค 5 มล. เขย่าให้เข้ากันใสตู้ดูดควันนำไปอบที่ 150 °C 30 นาที

ง. ทิ้งให้เย็น เทลงขวดรูปชมพู่ เติม Barium chloride 0.4% 50 มล. เขย่าทิ้งไว้ 1 คืน

จ. นำน้ำใสด้านบนไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm.

3. ไนเตรทไนโตรเจน

ชั่งตัวอย่าง 3 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ เติม K_2SO_4 0.5M (87 กรัม1ลิตร) 20 มล. นำไปเขย่า 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นกรองตัวอย่างหรือนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง

สารเคมี

ก. NaOH 4 M ละลาย 160 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร

ข. Salicylic acid 5% ละลาย Salicylic acid 5 กรัม ในกรดซัลฟุริค 95 มล. (เตรียมก่อนการทดลอง 1 วัน เก็บไว้ในที่มืดและเย็น มีอายุ 7 วัน)

ค. Nitrate Stock Solution อบ Potassium nitrate 10 กรัม ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่งโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ละลาย 7.233กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี 1000 ไมโคกรัม/มล NO_3^--N

ง. การเตรียม Standard Solution ปิเปต Stock Solution 5 มล. แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล.ด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาเขย่า สารละลายนี้จะมีความเข้มข้น 50 ไมโครกรัม/มล NO_3^--N จากนั้นปิเปตสารละลายนี้ 0 2 4 6 8 และ 10 จากนั่นปิเปต Standard Solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 0.5 มล.ใส่ลงในหลอดทดลอง

วิธีทำ

ก. ปิเปตตัวอย่างใส 0.5 มล.ใส่ลงในหลอดทดลอง

ข. เติม 1 มล. Salicylic acid 5% เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ทำในตู้ดูดควัน)

ค. เติม 10 มล. NaOH 4 M เขย่าตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง (แต่ไม่เกิน 12 ชั่วโมง)

ง. วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 nm

4. ไนไตรท์ไนโตรเจน

ชั่งตัวอย่าง 5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ เติม KCl 2 M (149.1กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร) 50 มล. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมงที่ความเร็วรอบ 200 rpm จากนั่นกรองตัวอย่างหรือนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง น้ำใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ไนไตรท์และแอมโมเนียไนโตรเจน

สารเคมี

ก. Diazotizing reagent ละลายซัลฟานิลาไมด์ 0.5 กรัม ใน HCl 2.4 N (HCl 37.7 % 19.5 มล.ในน้ำกลั่นแล้วทำให้มีปริมาตร 100 มล) เก็บในตู้เย็น

ข. Coupling reagent ละลาย N-(1-naphthyl)-ethylenediamine hydrochloride 0.3 กรัม ใน HCl 0.12 N (HCl 37.7% 9.74 มล.ในน้ำกลั่นแล้วทำให้มีปริมาตร 1 ลิตร) 100 มล.เก็บในตู้เย็น

ค. Nitrite Stock Solution ละลาย Sodium nitrite 0.247 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี 50 ไมโครกรัม/มล NO_2^- -N เก็บในตู้เย็น

ง. การเตรียม Standard Solution ปิเปต Stock Solution 2 มล.แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล.ด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาเขย่า สารละลายนี้จะมีความเข้มข้น 1 ไมโครกรัม/มล NO_2^- -N จากนั้น ปิเปตสารละลายนี้ 0 1 2 3 4 5 และ 6 มล. แล้วทำให้เป็น 50 มล. ด้วย KCl 2 M คิดเป็น 0 1 2 3 4 5 และ 6 ไมโครกรัม NO_2^- -N จากนั้นปิเปต Standard Solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 2 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง

วิธีทำ

ก. ปิเปตสารใสที่สกัดได้ 2 มล.ใส่ลงในหลอดทดลอง

ข. เติมน้ำกลั่น 43 มล.ลงในหลอดทดลอง ปิดฝาแล้วเขย่า

ค. เติม 1 มล. Diazotizing reagent ปิดฝาเขย่า ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

ง. เติม 1 มล. Coupling reagent ปิดฝาเขย่า ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที

จ. เติมน้ำกลั่นจากกระทั่งมีปริมาตร 50 มล. ปิดฝาเขย่า

ฉ. นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm.

5. แอมโมเนียมไนโตรเจน

ดำเนินการเหมือนการสกัดไนไตรท์ไนโตรเจน

สารเคมี

ก. Reagent N1 ละลาย sodium salicylate 34 กรัม sodium sitrate 25 กรัม และ sodium tartrate 25 กรัมในน้ำกลั่น 750 มล. เติม sodiumnitroprusside 0.12 กรัม แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (เตรียมก่อนการใช้ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และเก็บไว้ในที่มืด)

ข. Reagent N2 ละลาย NaOH 30 กรัม ในน้ำกลั่น 750 มล.ในตู้ดูดควันทิ้งไว้ให้เย็น เติม sodium hypochloride 5% 10 มล. แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (เตรียมก่อนใช้ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และเก็บไว้ในที่มืด)

ค. Ammonium Stock Solution อบ Ammonium sulphate 7 กรัม ที่อุณหภูมิ105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ละลาย4.714 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี 1000 ไมโครกรัม/มล. NH_4^+-N

ง. การเตรียม Standard Solution ปิเปต Stock Solution 10 มล. แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาเขย่า สารละลายนี้จะมีความเข้มข้น 100 ไมโครกรัม/มล. NH_4^+-N จากนั้นปิดเปตสารละลายนี้ 0 5 10 15 20 และ 25 แล้วทำให้เป็น 100 มล. ด้วย KCl 2 M 0 5 10 15 20 และ25 ไมโครกรัม/มล. NH_4^+-N จากนั้นปิเปต Standard solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 1 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง

วิธีทำ

ก. ปิเปตสารใสที่สกัดได้ 1 มล. ลงในหลอดทดลอง

ข. เติม Reagent N1 5 มล. เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

ค. เติม Reagent N2 5 มล. เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

ง. นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 655 nm.

6. ไนโตรเจนทั้งหมด

ย่อยตัวอย่างด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซีลีเนียมและกรดซัลฟุริก สามารถนำสารละลายที่ผ่านการย่อยไปใช้หาไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสทั้งหมดได้

สารเคมีที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างดิน

Digestion mixture ละลาย selenium powder 0.42 กรัม และ lithium sulphate 14 กรัม ใน hydrogen peroxide 30 % 305 มล. ผสมให้เข้ากันในตู้ดูดควัน จากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟุริก 420 มล. ในสารละลายผสมที่วางไว้ในอ่างน้ำเย็น (ระหว่างการผสมจะเกิดความร้อนสูงให้ใช้น้ำแข็งในการหล่อเย็นจะช่วยลดความร้อนได้เร็วยิ่งขึ้น) สารผสมนี้มีอายุ 4 อาทิตย์ และเก็บไว้ในตู้เย็น

วิธีการย่อยตัวอย่างดิน

ก. ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในขวดเจดาล เติม Digestion mixture 4.4 มล.

ข. ย่อยที่อุณหภูมิ 360 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สารละลายใสไม่มีสีและตะกอนเป็นสีขาว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

ค. เติมน้ำกลั่น 50 มล. เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นปรับปริมาตรเป็น100 มล. หากยังไม่ดำเนินการวิเคราะห์ตัวอย่างทันทีให้เก็บไว้ในตู้เย็น

ง. ใช้กระบอกตวง Digestion mixture 50 มล. ใส่ลงในขวดเจดาล ดำเนินการย่อยที่อุณหภูมิเดียวกันกับตัวอย่าง หลังทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 50 มล. เท่าเดิมด้วยน้ำกลั่น สารละลายนี้ Standard Solution มีไว้สำหรับการเตรียม และเก็บไว้ในตู้เย็น

สารเคมีที่ใช้การหาไนโตรเจนทั้งหมด

เหมือนกันสารเคมีที่ใช้ในการหาแอมโมเนียมไนโตรเจน แต่วิธีเตรียม Standard Solution ให้ทำดังนี้ ปิเปต Stock Solution 10 มล. แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาเขย่า สารละลายนี้จะมีความเข้มข้น 100 ไมโครกรัม/มล NH_4^+-N จากนั้นปิเปตสารละลายนี้ 0 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัม/มล NH_4^+-N เติมสารละลาย Digestion mixture ที่ผ่านการย่อย 4.4 มล.แล้วทำให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น คิดเป็น 0 5 10 15 20 และ 25ไมโครกรัม/มล NH_4^+-N จากนั้นปิเปตStandard Solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 0.5 ใส่ลงในหลอดทดลอง

วิธีทำ

ให้ทำเหมือนวิธีการหาแอมโมเนียมไนโตรเจน

7. ฟอสฟอรัสทั้งหมด

การย่อยตัวอย่างให้ทำเหมือนกันไนโตรเจนทั้งหมด

สารเคมี

ก. Ascorbic acid 1% ละลาย Ascorbic acid 1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มล. เตรียมเมื่อใช้

ข. Molybdate reagent 0.4 กรัม ในน้ำกลั่น 400 มล. จากนั้นเทสารละลายดังกล่าวผสมกันในขวดปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟุริคเข้มข้น 54 มล. ในตู้ดูดควัน ทิ้งไว้ให้เย็นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บไว้ในตู้เย็น สารละลายนี้มีอายุ 4 อาทิตย์

ค. Phosphorus Stock Solution อบ $K_2H_2PO_4$ 7 กรัม ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ละลาย 4.394 ในน้ำ 1 ลิตร สารละลายนี้จะมี 1000 ไมโครกรัม /มลP

ง. การเตรียม Standard Solution ปิเปต Stock Solution 2 มล. แล้วทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาเขย่า สารละลายนี้จะมีความเข้มข้น 20 ไมโครกรัม /มลP จากนั้นปิเปตสารละลายนี้ 0 5 10 15 20 และ 25 เติมสารละลาย Digestion mixture ที่ผ่านการย่อย 4.4 มล. แล้วทำให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น คิดเป็น 0 1 2 3 4 และ 5 จากนั้นปิเปต Standard Solution ที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างละ 1 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง

วิธีทำ

ก. ปิเปตสารละลายใสที่ผ่านการย่อย 1 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง

ข. เติม Ascorbic acid 1% 4 มล.

ค. เติม Molybdate reagent 3 มล. เขย่า

ง. ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

จ. นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 nm.

ภาคผนวก ง

รูปการวิจัย

ภาพผนวกที่ ง1 กากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นสิทธินันท์

ภาพผนวกที่ ง2 น้ำเสียสังเคราะห์ได้จากการผสมกากถั่วและน้ำเสีย

ภาพผนวกที่ ง3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซที่เกิดจากระบบ

ภาพผนวกที่ ง4 มิเตอร์วัดปริมาณก๊าซ

ภาพผนวกที่ ง5 อุปกรณ์เก็บกักก๊าซ

ภาพผนวกที่ ง6 peristatic pump

ภาพผนวกที่ ง7 มอเตอร์

ภาพผนวกที่ ง8 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	สุดารัตน์ ภักดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	8 มิถุนายน 2525
สถานที่เกิด	น่าน
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนวิจัยที่ได้รับ	กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (สนพ.)