



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง
แปรรูป โดยถังหมักไร้อากาศ

Biogas Production from Organic Sludges of Modified Starch Factory

Wastewater Treatment Plant by Anaerobic Digester

นามผู้วิจัย นางสาวพรพิมล พันธุ์สุนทร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สิงสีทงี มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสีย
โรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป โดยถังหมักไร้อากาศ

Biogas Production from Organic Sludges of Modified Starch
Factory Wastewater Treatment Plant by Anaerobic Digester

โดย

นางสาวพรพิมล พันธุ์สุนทร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2558

พรพิมล พันธสุนทร 2558: การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสีย
โรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูป โดยถังหมักไร้อากาศ ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng. 110 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์และ
ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดใน
การเดินระบบแบบแบทช์ และการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 – 8.0
 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูปโดยการใช้ถังหมักไร้อากาศ
ขนาดห้องทดลองปริมาตร 12 ลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและควบคุม pH

ผลการศึกษการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายตะกอน
อินทรีย์ของระบบแบบแบทช์ พบว่าตะกอนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง
มีการสะสมก๊าซมีเทนสูงสุด 60.81, 49.78 และ 30.08 % ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูก
กำจัดมีค่า 0.361, 0.196 และ 0.030 L/g-COD_u ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่า 0.220,
0.097 และ 0.009 L/g-COD_u และระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอน AS ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0
และ 8.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ มีปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ย 33.81, 36.50, 38.40 และ 43.37 %
ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ย 0.035, 0.031, 0.039 และ 0.040
 L/g-COD_u ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.012, 0.012, 0.015 และ
0.018 L/g-COD_u ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เปรอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอน
อินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และการเดินระบบแบบกึ่ง
ต่อเนื่องของตะกอนแป้ง ปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-
 $\text{COD/m}^3\text{-d}$ มีค่า 15.63 และ 23.05 % ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของ
มีค่าเฉลี่ย 0.160 และ 0.086 L/g-COD_u ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่มี
ค่าเฉลี่ย 0.025 และ 0.020 L/g-COD_u ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เปรอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซมีเทน
ต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ ต่ำกว่าที่อัตราภาระ
บรรทุกสารอินทรีย์ 6.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pornpimon Phanthusoontorn 2015: Biogas Production from Organic Sludges of Modified Starch Factory Wastewater Treatment Plant by Anaerobic Digester. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Mongkol Damrongsri, Dr.Ing. 110 pages.

This thesis is to study biogas production from organic sludges, the total amount of biogas and methane in generated biogas by weight of organic sludge, which was eliminated in batch and semi-continuous flow system, at 2.0–8.0 kg-COD/m³-d Volumetric loading of modified starch factory wastewater treatment plant by anaerobic digester. The experiment was performed in 12-liter lab scaled anaerobic digester at room temperature and controlled pH.

The result from batch system showed that three types of sludge, which are AS sludge, coagulation sludge and starch have the highest accumulated methane level at 60.81, 49.78 and 30.08%, 0.361, 0.196 and 0.030 L/g-COD_{re} of biogas by eliminated organic sludge weight, and 0.220, 0.097 and 0.009 L/g-COD_{re} of methane by eliminated organic sludge weight, respectively. While AS sludge in Semi-Continuous Flow system at stable state of 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0 kg-COD/m³-d volumetric loading presented 33.81, 36.50, 38.40 and 43.37 % of average amount of methane, 0.035, 0.031, 0.039 and 0.040 L/g-COD_{re} of biogas by eliminated organic sludge weight, and 0.012, 0.012, 0.015 and 0.018 L/g-COD_{re} of methane by eliminated organic sludge weight, respectively. The study also showed that the level and amount of methane by eliminated organic sludge weight increase along with volumetric load. And starch in Semi-Continuous Flow system, at stable state of 2.0 and 6.0 kg-COD/m³-d volumetric load, has 15.63 and 23.05% average amount of methane, 0.160 and 0.086 L/g-COD_{re} of biogas by eliminated organic sludge weight, and 0.025 and 0.020 L/g-COD_{re} of methane by eliminated organic sludge weight, respectively. It indicated that level and amount of methane by eliminated organic sludge weight at 2.0 kg-COD/m³-d volumetric load is less than one in 6.0 kg-COD/m³-d.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี ที่ให้ทุนในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. พีรกานต์ บรรเจิดกิจ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เบญจกรณ์ ประภักดี ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยมหิดล และ ผศ.ดร. มงคล ดำรงค์ศรี ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์และแนะนำสิ่งที่จะต้องมาโดยตลอด รวมถึงตรวจสอบ ตักเตือน และปรับแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อัน เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการสำเร็จการศึกษา และต่อวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอพระคุณ คุณกาญจนา ทุยเวียง และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ การสนับสนุน รวมถึงให้ความร่วมมือในการติดต่อประสานงาน และดำเนินเรื่องต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ในที่สุด

พรพิมล พันธุ์สุนทร

เมษายน 2558

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และคำจำกัดความ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและอ้างอิง	72
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	78
ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณ	107
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	4
2	ชนิดและปริมาณก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	6
3	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย	29
4	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ	31
5	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของตะกอน	34
6	ปริมาณก๊าซชีวภาพ ปริมาณก๊าซมีเทนและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด	35
7	ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	36
8	ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	39
9	ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ของระบบแบบแบทช์ (Batch)	43
10	ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	46
11	ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	47
12	ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ของระบบแบบแบทช์ (Batch)	49
13	ประสิทธิภาพในการกำจัด SS ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	51
14	ประสิทธิภาพในการกำจัด SS ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	53
15	ค่า SS ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0kg-COD/m ³ -d	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน AS	79
ก2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน โคลเอกกุลเลชั่น	80
ก3 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอนแป้ง	81
ก4 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	82
ก5 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 4 kg-COD/m ³ -d	83
ก6 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	84
ก7 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 8 kg-COD/m ³ -d	85
ก8 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	86
ก9 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	87
ก10 การผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน AS ของระบบแบบแบทช์ (Batch)	88
ก11 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน โคลเอกกุลเลชั่นระบบแบบแบทช์ (Batch)	89
ก12 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอนแป้งระบบแบบแบทช์ (Batch)	90
ก13 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	91
ก14 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 4 kg-COD/m ³ -d	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก15	การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	93
ก16	การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 8 kg-COD/m ³ -d	94
ก17	การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแฉ่ง ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	95
ก18	การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแฉ่งที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	96
ก19	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน Excess Sludge จากระบบ AS หลังผ่านเครื่องรีดตะกอนตะกอน โคนอกกู่เลชัน และตะกอนแฉ่ง	97
ก20	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	98
ก21	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 4 kg-COD/m ³ -d	99
ก22	ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	100
ก23	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 8 kg-COD/m ³ -d	101
ก24	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแฉ่งที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m ³ -d	102
ก25	พารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแฉ่งที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m ³ -d	103
ก26	ผลของ VFA, Alkalinity และ VFA/ Alkalinity ระบบแบบแบทช์ (Batch)	104
ก27	ผลของ VFA และ Alkalinity ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS	105
ก28	ผลของ VFA และ Alkalinity ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแฉ่ง	106

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด	5
2	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	10
3	ขนาดและองค์ประกอบของถังปฏิกรณ์	26
4	ลักษณะของระบบจริงที่ใช้ในการทดลอง	27
5	ตัวอย่างตะกอนแป้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูปของบริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี	28
6	ตัวอย่างตะกอน AS จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูปของบริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี	29
7	แผนการทดลองการเดินระบบแบบแบทช์ (Batch)	32
8	แผนการทดลองการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)	33
9	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสะสมตะกอนชนิดต่างๆ ของระบบแบบแบทช์ (Batch)	37
10	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดของระบบแบบแบทช์ (Batch)	37
11	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดของระบบแบบแบทช์ (Batch)	38
12	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน AS ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	39
13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์กับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน	40
14	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่การบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	40
15	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์กับก๊าซชีวภาพต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด	41
16	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่การบรรทุกต่างๆ	41
17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์กับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน	42
18	เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (CH ₄) ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	43
19	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่การบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	44

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่การะบรทุกต่าง ๆ	44
21	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของตะกอนชนิดต่างๆ ระบบแบบแบทช์ (Batch)	46
22	ค่า COD ของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	48
23	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซี โอดีที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	49
24	ค่า COD ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	50
25	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	50
26	การเปลี่ยนแปลงของ SS ของระบบแบบแบทช์	52
27	ประสิทธิภาพในการกำจัดของ SS ที่สภาวะคงที่ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	53
28	ประสิทธิภาพในการกำจัด SS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	54
29	ค่าพีเอชของตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)	55
30	ค่าพีเอชของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	56
31	ค่าพีเอชของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	57
32	ค่า ORP ตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)	58
33	ค่า ORP ของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	59
34	ค่า ORP ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	60
35	ค่า VFA ของตะกอนชนิดต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch)	61
36	ค่า VFA ของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์	62
37	ค่า VFA ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	63
38	ค่า Alkalinity ของตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)	64
39	ค่า Alkalinity ของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์	65
40	ค่า Alkalinity ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	66
41	ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอนชนิดต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch)	67
42	ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอน AS ที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์	68
43	ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอนแป้งที่อัตราการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ	69

คำอธิบายสัญลักษณ์ ค่าย่อ และคำจำกัดความ

BOD	=	Biochemical Oxygen Demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ (mg/L)
CH ₃ COOH	=	Acetic Acid คือ กรดอะซิติก
CH ₄	=	Methane Gas คือ ก๊าซมีเทน
CO ₂	=	Carbondioxide Gas คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
COD	=	Chemical Oxygen Demand คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ด้วยวิธีทางเคมี (mg/L)
HS ⁻	=	Hydrogen Sulfide ion คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน
ORP	=	Oxidation Reduction Potential คือ ศักยภาพในการให้และรับอิเล็กตรอน (mV)
OLR	=	Organic Loading Rate คือ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (kg-COD/m ³ -d)
pH	=	Power of Hydrogen ion คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง
Q	=	Flow Rate คือ อัตราการไหล (m ³ /d)
SS	=	Suspended Solids คือ ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)
S ₀	=	Influent Soluble Substrate Concentration คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mg/L)
Se	=	Effluent Soluble Substrate Concentration คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (mg/L)
Temp	=	Temperature คือ อุณหภูมิ (°C)
VFA	=	Volatile Fatty Acid คือ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในรูปกรดอะซิติก (mg/L as CH ₃ COOH)
VL	=	Volumetric Loading คือ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (kg-COD/m ³ -d)

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และคำจำกัดความ (ต่อ)

VSS	=	Volatile Suspended Solid คือ ปริมาณของแข็งแขวนลอย ระเหยง่าย (mg/L)
V	=	Volume คือ ปริมาตรเก็บกักน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสีย แบบไร้อากาศ (m ³)
ตะกอนอินทรีย์	=	ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานเป็งมันสำปะหลังแปรรูป บริษัท สยาม มอลทิฟายด์ สตาร์ช จำกัด
ตะกอนแป้ง	=	ตะกอนจากการตกตะกอนในบ่อตกตะกอนแป้งเบื้องต้น
ตะกอนโคแอกกูเลชัน	=	ตะกอนจากกระบวนการ Coagulation
ตะกอน AS	=	ตะกอนส่วนเกินจากระบบ AS หลังผ่านเครื่องรีดตะกอน
ก๊าซชีวภาพ	=	Biogas ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซอื่นๆ

การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป โดยถังหมักไร้อากาศ

Biogas Production from Organic Sludges of Modified Starch Factory Wastewater Treatment Plant by Anaerobic Digester

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความเจริญก้าวหน้าทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วจึงส่งผลให้ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานสูงขึ้นเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร ภาคธุรกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคขนส่งประกอบกับการผลิตพลังงานภายในประเทศยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ ทำให้ประเทศต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เชื้อเพลิงต่างๆ ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกที และคงจะต้องหมดไปในอนาคต นอกจากนี้ ราคาของเชื้อเพลิงดังกล่าว ยังมีความผันผวนไปในแนวทางที่สูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจและการเมืองของโลกปัญหาด้านพลังงานนับเป็นปัญหาสำคัญของประเทศและมีผลกระทบต่อการพัฒนาของประเทศไทยมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพลังงานจากแหล่งต่างๆ มาทดแทน โดยการหันกลับมาใช้พลังงานหมุนเวียนแทน (Renewable energy) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นต้นซึ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีแบบหมักไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนแบบอื่นๆ และในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดของเสียลงได้อีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) การนำของเสียชนิดต่างๆ มาผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ขยะ ผักผลไม้ ของเสียจากฟาร์มสุกร น้ำเสียชุมชน เศษอาหาร น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้มีการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกริยาให้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่า BOD ต่ำๆ ได้ต่างจากในอดีตที่ต้องมีค่า BOD สูงๆ ในอุตสาหกรรมที่มีค่า BOD สูง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป อุตสาหกรรมน้ำตาล เป็นต้น หลักการสำคัญของระบบบำบัดจะใช้อุณหภูมิย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนในน้ำเสีย ทำให้ประหยัด

พลังงานในการเติมอากาศ มีตะกอนส่วนเกินในรูปของมวลจุลินทรีย์น้อย ระบบสามารถรองรับ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง มีความต้องการสารอาหารอินทรีย์น้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) และยังได้พลังงานที่เกิดจากระบบได้แก่ ก๊าซมีเทน ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ได้แก่ นำไปใช้ในเป็นก๊าซหุงต้มอาหาร หรือใช้กับเครื่องยนต์

ในการศึกษานี้ จึงทำการนำตะกอน 3 ประเภท มาผลิต Biogas โดยถ่วงหมักใริ้อากาศเพื่อ ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าตัวแปรต่างๆ เช่น Volumetric loading ในระดับ ห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยจำลองการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองเดิน ระบบแบบแบทช์ (Batch) และการทดลองเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) โดย กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับ ภาคสนามต่อไปดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมสภาวะของระบบที่ เกี่ยวข้องกับการบำบัดก่อนเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (Total Biogas) และอัตราส่วนของก๊าซมีเทน (Methane gas) ในก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายตะกอนอินทรีย์ 3 ชนิด จากการบำบัดน้ำเสียโรงงานเป็งมันสำปะหลังแปรรูป โดยถังหมักไร้อากาศ
2. ศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ควบคุมการทำงานของระบบ เช่น ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric loading) เป็นต้น

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาตะกอน 3 ชนิด ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนเป็ง ของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเป็งมันของ บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด
2. การทดลองศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบแบทช์ (Batch) ขนาด 12 ลิตร ปริมาตรที่ใช้ทดลอง 11.5 ลิตร มีการปั่นกววน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและควบคุม pH โดยประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัด
3. การทดลองศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังหมักไร้อากาศ การเดินระบบเป็นไปแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ขนาด 12 ลิตร ปริมาตรที่ใช้ทดลอง 11.5 ลิตร มีการปั่นกววน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและควบคุม pH ได้แก่ ตะกอน AS ที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ และตะกอนเป็งที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ โดยประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

การตรวจเอกสาร

1. คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง

อุตสาหกรรมการผลิตแปรงมันสำปะหลังแปรรูปเป็นอุตสาหกรรมที่มีน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีความสกปรกในรูปบีโอดี ซีโอดีและปริมาณของแข็งค่อนข้างสูง องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแปรงมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 1

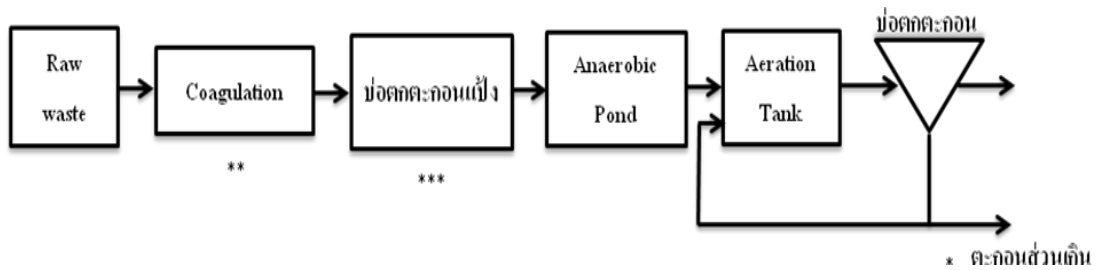
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแปรงมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	โรงงาน ขนาดเล็ก	โรงงาน ขนาดกลาง	โรงงาน ขนาดใหญ่	มาตรฐานน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรม
pH	4.75	4.69	6.33	5.5-9.0
COD (mg/l)	13,000	15,000	19,300	400
BOD (mg/l)	6,465	10,555	12,645	60
TKN (mg/l)	228	248	512	200
TS (mg/l)	13,030	12,550	19,845	-
SS (mg/l)	7,445	5,790	6,990	150
TDS (mg/l)	5,580	6,820	12,850	5000

ที่มา: โสภิตา (2541)

ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูป บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด

1. น้ำเสียจากกระบวนการผลิต
2. กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation)
3. บ่อตกตะกอนเป็ง
4. บ่อบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
5. บ่อบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ
6. บ่อตกตะกอนและเครื่องรีดตะกอน (Decanter)



ภาพที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป บริษัท สยาม มอดิไฟด์ สตาร์ช จำกัด

หมายเหตุ * หมายถึง ตะกอน AS
 ** หมายถึง ตะกอนโคแอกกูเลชัน
 *** หมายถึง ตะกอนแป้ง

2. กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหรือแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ใช้แบคทีเรียชนิดไร้อากาศหลายกลุ่มไปย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ได้แก่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีและจุลชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนจนทำให้มีโมเลกุลเล็กลงในที่สุดเกิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีประมาณ 80-90% ส่วนก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง สามารถให้พลังงานความร้อนได้ประมาณ 9,000 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร หรือ 21,000 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจึงสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ โดยสามารถนำไปเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรงใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

ตารางที่ 2 ชนิดและปริมาณก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ชนิดของก๊าซ	ร้อยละ
มีเทน	50-68
คาร์บอนไดออกไซด์	25-35
ไนโตรเจน	2-7
ไฮโดรเจน	1-5
คาร์บอนมอนอกไซด์	เล็กน้อย
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	เล็กน้อย
ก๊าซอื่นๆ	เล็กน้อย

ที่มา: สมชัย (2548)

กระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็น โมเลกุลเล็ก การเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) และการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทน โดยแต่ละขั้นตอนจะอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของซีโอดีสูง ๆ ลดลงก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดอื่น

3. ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Step of organic decomposition) ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ในการผลิตก๊าซชีวภาพต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มาจากวัตถุดิบแต่ละประเภทให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศมี 2 ชนิด สามารถแบ่งได้ดังนี้ ได้แก่ จุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทนจุลินทรีย์ชนิดนี้ประกอบด้วย 2 พวกคือจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate anaerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบ้าง (Facultative anaerobic bacteria) โดยจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะสร้างไฮโดรเจนจากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนและแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดาและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจะเจริญเติบโตได้เข้าและยังเป็นเซลล์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมากโดยจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

ก. จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนโดยนำพลังงานจากไฮโดรเจนและนำคาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์หลายชนิดใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวเพราะว่าแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายดังสมการ

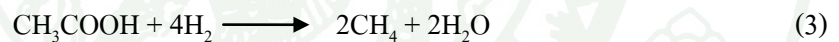


โดยจุลินทรีย์ชนิดนี้จะไวต่อการเปลี่ยนแปลง pH มากโดยช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคือ 6.6 – 7.4 (McCarty, 1964) ซึ่งจะสร้างมีเทนดังสมการต่อไปนี้



โดยเรียกจุลินทรีย์ชนิดนี้ว่า Hydrogenotrophic Methanogen

ข. จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก โดยใช้อะซิเตตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานซึ่งจะใช้พลังงานพอเพียงสำหรับการดำรงชีพโดยการสร้างมีเทนเป็นดังสมการต่อไปนี้



นอกจากการสร้างมีเทนจากการออกซิเดชันไฮโดรเจนมีเทนส่วนใหญ่ยังสร้างจากการแตกตัวของอะซิเตตดังสมการ



พบว่าแบบนี้จะให้พลังงานน้อยกว่าแบบที่ใช้ออกซิเดชันไฮโดรเจนในปัจจุบันยังไม่มี การชี้ชัดว่าส่วนไหนสำคัญกว่ากันแต่พอสรุปได้ว่ากลไกการสร้างมีเทนจะมีอะซิเตตเป็นตัวสำคัญ โดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเรียกว่า Acetoclastic Methanogen

ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (McCarty, 1964) ได้กล่าวว่าเป็นปฏิกิริยาการย่อยแบบไร้อากาศแบ่งเป็น 4 ลำดับขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 : ขั้นที่ 1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง (Hydrolysis) สารประกอบอินทรีย์ประเภทซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ได้เช่นคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันจะถูกทำให้ละลายน้ำโดยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ของแบคทีเรียจำพวก Hydrolytic Bacteria เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นนี้เป็นเพียงการเปลี่ยน สารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล การเปลี่ยนแปลงของเซลล์ูโลสและสารประกอบเชิงซ้อน อื่นๆ ให้เป็นสารพวกเชิงเดี่ยวอย่างง่ายเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด (Rate Limiting Step) ในการผลิตก๊าซ มีเทนจากผลการทดลองของ Chan and Pearson (1970) พบว่าขั้นตอนการย่อยสลายที่เป็นปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดของการเปลี่ยนเซลล์ูโลสเป็นก๊าซมีเทน

ขั้นตอนที่ 2 : เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลอย่างง่ายจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็น กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) โดยกระบวนการที่มีชื่อเรียกรวมๆ ว่า กระบวนการหมัก (Fermentation) โดยการบวนการนี้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะเรียกว่า กระบวนการสร้างกรด (Acidogenic step) ซึ่งจะเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Fermentative bacteria หรือ Acid forming bacteria กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรดนี้จะมีอยู่หลายชนิดคือ Acetic acid, Propionic acid, Butyric acid, Valeric acid จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความสำคัญและเป็นกลุ่ม หลักในขั้นตอนนี้อาจเรียกรวมๆ ว่า Acid forming bacteria หรือ Acidogen ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งเป็น แบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจนอิสระ (Fermentative bacteria)

ขั้นตอนที่ 3 : เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งมีอยู่หลายชนิดเช่น Propionic acid, Lactic acid และอื่นๆ ให้เป็นกรดอะซิติก (Acetic acid) โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Homogenic lacteria โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะเรียกเป็น Facultative bacteria

ขั้นตอนที่ 4 : การสร้างก๊าซมีเทน(Methanogenesis) กรดอะซิติกเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 จะ ถูกแบคทีเรียในกลุ่ม Methanogenic Bacteria ย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 70%



กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆให้เป็นกรดอะเซติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้นอกจากกรดอะเซติก และไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกไม่กี่ชนิดในการสร้างมีเทนเช่นเมทานอลและกรดฟอร์มิกและเมทิลลามีนิ (เกรียงศักดิ์, 2543; จรรยา, 2545)

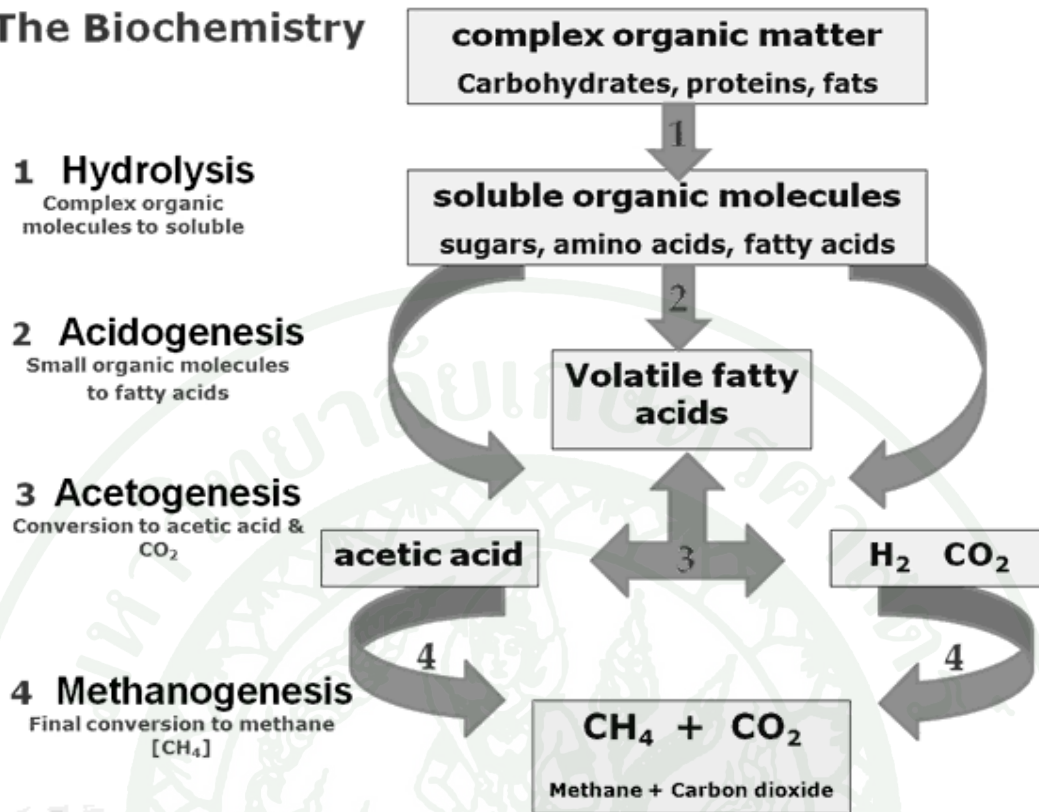


เสริมพล และ ไชยยุทธ (2527) กล่าวว่าในสภาวะปกติแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะมีความสัมพันธ์กับแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiotic relationship) ซึ่งแตกต่างกับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระที่ไม่สามารถอยู่ร่วมกับแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนดังเช่นก๊าซ H_2 และกรดอะซิติกเป็นสารสำคัญที่ถูกใช้ไปในการสร้าง CH_4 โดย Methanogenic bacteria แต่เนื่องจาก Acetogenic bacteria สามารถผลิตก๊าซ H_2 ได้อย่างรวดเร็วถ้าอัตราการใช้ก๊าซ H_2 มีค่าน้อยกว่าอัตราการผลิตแล้วการสะสมตัวของก๊าซ H_2 จะเพิ่มสูงขึ้นจนเป็นพิษต่อ Acetogenic bacteria ดังนั้นจึงต้องพึ่งพาอาศัย Methanogenic bacteria เพื่อกำจัดก๊าซ H_2 และช่วยให้ระบบไม่ถูกยับยั้งและที่สถานะสมดุลกรดอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูก Methanogenic Bacteria ทำลายได้ทันทีถ้า Methanogenic Bacteria ทำลายไม่ทันความเข้มข้นของกรดอินทรีย์จะเพิ่มมากขึ้นถึงขั้นยับยั้งการทำงานของระบบดังนั้นการตรวจวัดกรดอินทรีย์จะทำให้ผู้ควบคุมรับรู้การทำงานของระบบได้

Metcalf and Eddy (2003) กล่าวว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะแสดงประสิทธิภาพการทำงานของระบบในการทำลาย Ultimate BOD (BOD_L) หรือ COD 1 kg จะเกิดก๊าซ CH_4 ขึ้นประมาณ 159.14 ลิตรที่สภาวะมาตรฐาน (STP)

McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของซีโอดีที่ถูกกำจัดไว้ดังนี้ 1 ปอนด์ของซีโอดีหรือบีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 5.62 ลบ.ฟุตที่ STP หรือ 1 กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตรที่ STP (STP คือ Standard Temperature Pressure, 0 °C ความดัน 1 บรรยากาศ)

The Biochemistry



ภาพที่ 2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

ที่มา: Onofre Monge Amaya, 2013

การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนมีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนี้ ไม่ต้องการออกซิเจนเลย ซึ่งต่างจากระบบบำบัดแบบมีออกซิเจนทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายการให้อากาศกับระบบ
- ได้ก๊าซมีเทนมาเป็นแหล่งของพลังงาน
- ตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินที่มีคุณภาพ
- สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโดยการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานนำมาใช้ประโยชน์
- สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหากำจัดของเสียต่างๆ ได้

ข้อเสีย

- แบบที่เรียกใช้บำบัดเจริญเติบโตช้า ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบ (Start up) นาน
- ในการบำบัดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ทำให้มีกลิ่นเหม็น อีกทั้งน้ำเสียอาจมีสีดำจากการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับสารประกอบโลหะต่างๆ ในน้ำเสีย เกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ที่มีสีดำ

4. สภาพแวดล้อมของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วย จุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดีในการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้จุลินทรีย์นี้ อยู่ในสภาวะสมดุลกันซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านการทำงาน

4.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor)

4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature) แบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mesophilic Temperature) ฉะนั้นเพื่อให้การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มนี้ดำเนินไปได้ด้วยดีให้ได้มาซึ่งก๊าซปริมาณมากจะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังหมักให้อยู่ในช่วงแบคทีเรียต้องการซึ่งอาจสูงได้ถึง $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Thermophilic Temperature) ซึ่งอุณหภูมิในประเทศไทยไม่เป็นปัญหาปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ Thermophilic จะสูงกว่าที่อุณหภูมิ Mesophilic สำหรับของเสียทุกชนิดทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มาที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาณถังหมักลงแต่ระบบการหมักที่มีอุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ Thermophilic Bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า Mesophilic Bacteria การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบและยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย (Zupancic and Ros, 2003)

Masse and Masse (2001) รายงานว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนคือ 20, 25 และ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถกำจัด COD ไปเป็นมีเทนได้เท่ากับ

84.2, 88.7 และ 90.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัด COD ไปเป็นมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีกิจกรรมสูงด้วย

Kim *et al.* (2006) พบว่าจากการศึกษาระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศในช่วงอุณหภูมิที่ 30 – 55 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน แต่ในขณะที่ผลการทดลองของอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำที่สุด โดยทำการศึกษาจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศจากของเสียเศษอาหาร

4.1.2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เป็นอย่างมากการเปลี่ยนแปลงของ pH ที่เกิดขึ้นภายในระบบนั้นเนื่องมาจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการ Acidogenesis กรดที่เกิดขึ้นจะทำให้ pH ในระบบลดลงและ pH ที่ลดลงจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ Methanogenesis ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซลดลงโดย pH จะเป็นปัจจัยที่ทำให้กระบวนการเมทาบอลิซึมผิดปกติและทำให้สมดุลเคมีเปลี่ยนแปลงหรืออาจทำให้แบคทีเรียตายได้เมื่อ pH ลดลงมากๆแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.6-7.6 ถ้า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วการผลิตมีเทนของแบคทีเรียที่สามารถผลิตมีเทนจะถูกยับยั้งเกือบทั้งหมดเมื่อ pH เท่ากับ 6.2 ปัญหาที่รุนแรงเกิดขึ้นได้ถ้า pH ลดลงต่ำกว่า 6.5 หากปฏิบัติการหมักเป็น 2 ระยะในระยะเวลาของการหมักกรดอินทรีย์จะมี pH อยู่ในช่วง 3.5-6.5 ขึ้นกับชนิดของน้ำเสียในระยะเวลาการสร้างมีเทน pH จะอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (เกรียงศักดิ์, 2543; สันทัด, 2549)

ประเทือง (2552) ศึกษาการสร้างบ่อก๊าซชีวภาพสำหรับกำจัดน้ำเสียและเศษอาหารจากโรงอาหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่าสามารถลดค่า pH ของน้ำเสียจาก 4.54 เป็น 5.73 มีผลทำให้ไม่เกิดก๊าซชีวภาพเนื่องจากสภาพน้ำเสียที่ลงในบ่อก๊าซชีวภาพมีสภาพเป็นกรด ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงควรปรับสภาพน้ำเสียให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่บ่อก๊าซชีวภาพ

4.1.3. อัลคาลินิตี (Alkalinity) ค่าอัลคาลินิตีเป็นค่าความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่างโดยทั่วไปในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าอัลคาลินิตีอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 2,000-5,000 mg/l as CaCO₃ (สันทัด, 2549) และมีอัตราส่วนของอัลคาลินิตี (Alkalinity ratio, a) ที่

เหมาะสมคือ a มากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 โดย a เป็นอัตราส่วนระหว่างอัลคาลินิตีของไบคาร์บอเนตที่ pH 7.5 ต่ออัลคาลินิตีของทั้งหมดที่ pH 4.3

Cordoba *et al.* (1984) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตนมพบว่า เมื่อเติม โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อเพิ่มค่าด่างในระบบ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพการกำจัด COD 88.70% - 91.40% ที่ภาระการเติมสารอินทรีย์ในช่วง 6.0 – 10.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ และช่วยป้องกันค่าพีเอชของระบบไม่ลดลงต่ำกว่า 6.9 และผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.14 $\text{L-CH}_4/\text{d}$ แต่การเพิ่มค่าด่างในระบบจะมีผลต่อประสิทธิภาพอย่างชัดเจน เมื่อภาระการเติมสารอินทรีย์สูงกว่า 6 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$

4.1.4. กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid, VFA) กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรดซึ่งถูกแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงานปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อค่า pH ของระบบคือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น pH จะต่ำลงระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าไม่ควรเกิน 200 mg/l หรืออัตราส่วนของกรดโพรพิโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดลิ่มเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993)

Pullammanappallil *et al.* (2001) รายงานว่าอัตราของการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกไปเป็นกรดอะซิติก จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมดุลของระบบ โดยที่ถ้ามีกรดโพรพิโอนิกเหลืออยู่ในถังเป็นปริมาณมาก อัตราการเกิดก๊าซจะลดลงทำให้ระบบลิ่มเหลวได้

4.1.5. สารอาหาร (Nutrients) โดยทั่วไปต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 11% และ 2% ของปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นระบบนี้ปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าในสภาพที่มีออกซิเจนดังนั้นอัตราส่วน BOD:N:P จะต่ำกว่า 100:5:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระบบใช้ออกซิเจนซึ่งก็คือ BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 หากมีอาหารเพียงพอในระบบก็จะทำให้แบคทีเรียทำงานได้ดีทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นด้วย (ศิริพร, 2539)

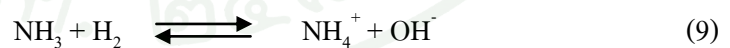
Sharma and Singh (2001) ได้ศึกษาผลการเติมสารอาหารเสริมรอง นิกเกิล (Ni) เหล็ก (Fe) และ โคบอลต์ (Co) พบว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ COD และการทำงานของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ดีขึ้น

4.1.6. ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (Light metal cation) ได้แก่โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^+) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการเติมการเคมีเพื่อปรับ pH ในระบบจะมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด

ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน ไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca^+ และ Mg^{2+} จะมากกว่าพิษของ Na^+ และ K^+ ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีวาเลนซ์สูงขึ้น ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาสามารถลดลงได้ถ้ามีไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วยโดยจะทำให้ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลงซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียก Antagonism แต่ในทางตรงกันข้ามไอออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งเมื่อมีอยู่ร่วมกันและเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Synergism

4.1.7. ก๊าซบางชนิด

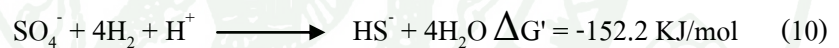
ก. แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเช่น โปรตีนเป็นแอมโมเนียในโตรเจนซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาขึ้นอยู่กับ pH ดังสมการ



ถ้า pH ต่ำกว่า 7.2 จะมี NH_4^+ มากกว่าแต่ถ้า 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

Sung and Liu (2003) รายงานว่าแอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ความเข้มข้น 4.92 และ 5.77 g/L มีผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงเท่ากับ 39% และ 64% ตามลำดับ แต่ถ้าปรับสภาพแบคทีเรียพวก Acetoclastic methanogen ด้วยแอมโมเนียไนโตรเจน ความเข้มข้นสูง จะทำให้สามารถทนต่อปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น และช่วงพีเอชที่กว้างขึ้น ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่สามารถยับยั้งได้ 100% เกิดในช่วง 8 -13 g/L ขึ้นอยู่กับการปรับสภาพและระบบพีเอช

ข. ซัลไฟด์ (Sulfide) เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบหรือเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เช่น โปรตีนซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/l ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้นดังนั้นการเติมโลหะบางอย่างเช่นเหล็กสามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับ pH ของของเหลวและส่วนประกอบก๊าซการที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมากจะทำให้แบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้โดยกลุ่มของ Sulfate-Reducing Bacteria (SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculum จะสามารถใช้ซัลเฟต (SO₄) เป็นตัวรับไอออนตัวสุดท้ายได้โดยซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการ



Sterling *et al.* (2001) ศึกษาการย่อยสลายมูลวัวนมภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศ พบว่า แอมโมเนียไนโตรเจนมีผลต่อการสร้างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะลดลงไป 50% ของอัตราการผลิตเดิม

ค. โลหะหนัก (Heavy metal) ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์และพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของ โลหะหนักจะละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใดและพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้นเพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนัก เกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอนถ้าของเสียนั้นมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไปเกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้

4.1.8. คุณลักษณะสารอาหาร (Substrate Characteristic) องค์ประกอบของสารอาหารจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของระบบภายในถังหมักโดยจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดเลือกจุลินทรีย์ที่จะใช้สารประกอบต่างๆซึ่งของเสียที่จะนำมาย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนมักประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆเหล่านี้ได้แก่ไขมันกรดไขมันคาร์โบไฮเดรตโปรตีนและกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจนจากเซลล์สิ่งมีชีวิต

4.1.9. ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential) ปฏิกริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่งเรียกว่าปฏิกริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเกิดจากผลรวมของปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

ความแตกต่างด้านความสามารถให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โปเทนเชียลหรือเรียกสั้นๆว่า ORP ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นน้ำส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกริยารีดอกซ์โดยที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญซึ่งในระบบไร้ออกซิเจนจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกเป็นตัวรับอิเล็กตรอนถ้าค่า ORP เป็นบวกแสดงว่ามีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนแต่ค่า ORP มีค่าเป็นลบแสดงว่ามีความสามารถเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

ประโยชน์ของ ORP ในการบำบัดน้ำเสีย

1. ใช้เพื่อควบคุมปัญหาด้านกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสีย
2. ควบคุมการเติมอากาศในกระบวนการย่อยตะกอน
3. ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน
4. ควบคุมปัญหาที่เกิดจากการออกซิเดนต์หรือคัลแทนท์ในโรงงานอุตสาหกรรม

4.2 ปัจจัยทางด้านการทำงาน (operational factor)

ก. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกันทำให้เปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมักหรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไปซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาเก็บกักด้วย ถ้าระยะเวลาเก็บกักนานทำให้

ระบบถังหมักจะมีขนาดใหญ่และระบบจะเกิดการล้มเหลว เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สูงขึ้น ทำให้ค่าพีเอชลดลงและมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ในทางตรงกันข้ามระยะเวลาเก็บกักสั้น ทำให้อัตราการไหลของน้ำสูง ทำให้แบคทีเรียทำงานในระยะเวลาที่น้อย ประสิทธิภาพของระบบลดลง ค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่ใช้อากาศอยู่ในช่วงประมาณ $1 - 15 \text{ kg-VS/m}^3\text{-d}$ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบและอัตราการย่อยสลายของแบคทีเรียในระบบ (Barnet, 1978)

ข. ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time, HRT) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บกักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบได้ โดยการเพิ่มระยะเวลาการเก็บกักให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมักกล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลาระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (Solid retention time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวันในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอนมีระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT = HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอนมีระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT > HRT)

อวัสดา (2545) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเก็บกัก อัตราการป้อนสารอินทรีย์และความถี่ในการเติมของเหลวต่อประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์สารและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายเศษอาหารด้วยระบบถังหมักไม่ใช้อากาศ พบว่าประสิทธิภาพของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักมากขึ้นและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลดลง

ค. การกวน (mixing) การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีหลักการคือทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอยเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับจุลินทรีย์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยและป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆของถังหมักและทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกันวิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธีเช่น ใช้เครื่องกวนสูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นถัง

หมักหมยเวียนตะกอนด้วยปั๊มใช้การสูบลำน้ำเป็นต้นซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆด้านประกอบกัน

Prasad *et al.* (2007) ได้ศึกษาการกวนตะกอนในการหมักมูลสัตว์ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพของการกวนตะกอนแบบต่อเนื่อง, แบบไม่ต่อเนื่อง (กวน 2 ชั่วโมง หยุด 2 ชั่วโมง) และกวนแบบขั้นต่ำ (กวน 10 นาที หยุด 10 นาที) พบว่าการกวนตะกอนทั้ง 3 วิธี สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าการหมักที่ไม่มีการกวนตะกอน โดยการกวนตะกอนแบบไม่ต่อเนื่อง มีปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่ากวนแบบต่อเนื่อง 1.3% และการกวนตะกอนแบบขั้นต่ำ มีปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่าการกวนแบบต่อเนื่อง 12.5% ของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

5. การทำงานของระบบย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาจำแนกตามลักษณะการป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. การทำงานระบบแบทช์ (Batch operation) เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาเพียงครั้งเดียวให้เต็มระบบในการเริ่มต้นระบบ (Star Up) หลังจากเริ่มต้นระบบจะทำการปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแบคทีเรียในระบบและจะไม่มีสารอินทรีย์เพิ่มเข้าสู่ระบบอีก สามารถสังเกตการย่อยสลายสารอินทรีย์จนหมดสังเกตได้จากไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงถ่ายหรือสูบลำน้ำทิ้งไป แล้วทำการเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบนี้เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณมากๆ แต่ต้องใช้ระยะเวลาาน ระบบการหมักแบบนี้ประสิทธิภาพไม่ดีนักและความเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

Rodriguez *et al.* (1998) ศึกษาการหมักมูลฝอยชุมชนในถังหมักแบบแบทช์ (Batch) ขึ้นตอนเดียว โดยไม่มีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ถังหมักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร สูง 2.85 เมตร เมื่อไหลเวียนน้ำชะขยะที่ปริมาณ 2.25 L/d หลังจากทำการหมัก 40 วัน จะได้มีการสะสมของกรดสูงที่สุด โดยเป็นกรดบิวทริก 19 g/L อะซิติก 7 g/L และโพรพิโอนิก 2 g/L เริ่มเกิดก๊าซมีเทนหลังจากทำการหมัก 100 วัน โดยมีสัดส่วนมีเทนเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดเป็นร้อยละ 60 ในวันที่ 245

2. การทำงานระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi - continuous operation) เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาในลักษณะเป็นช่วงๆ แต่สม่ำเสมอ โดยทำการป้อน

สารอินทรีย์เข้าและถ่ายวัสดุหมักที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์ แล้วออกจากระบบหรือถังปฏิกริยา ระบบนี้เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำ และถังหมักหรือถังปฏิกริยาจะมีท่อป้อน วัตถุดิบลงในระบบและท่อสำหรับให้วัตถุดิบเก่าในระบบที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไหลล้นออกมา หรือถ่ายทิ้ง ปกติจะเติมสารอินทรีย์ทุกวันๆ ละครั้ง การหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของ แบคทีเรีย เนื่องจากช่วยให้เกิดสภาวะคงตัว (Steady - state) ของระบบ เพราะแบคทีเรียในกลุ่มที่ สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของสารอาหาร ช่วยลดปัญหาการเพิ่มสารอาหาร เข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน (Shock load) มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบดี มีปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น สม่าเสมอและนิยมใช้ทั่วไป

Rene and Gunnar (2007) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไม่ใช้อากาศ จากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกร เศษผลไม้ เศษผัก และของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ ทำการหมักระบบ แบบกึ่งต่อเนื่อง ขนาดถังหมัก 2 ลิตร ทำการเติม OLR ในช่วง 0.14 - 0.34 m^3/kg -VSadded พบว่า การหมักร่วมระหว่างวัตถุดิบสองชนิดขึ้นไป จะเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงมากกว่าการ หมักเพียงวัตถุดิบชนิดเดียว

3. การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous operation) เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ ระบบหมักหรือถังหมักปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วัตถุดิบที่หมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบ หมักหรือถังปฏิกริยาช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบจะสูงที่สุด แต่การเติมวัตถุดิบตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่นั้น จำเป็นต้องมีเครื่องสูบลูกสูบวัตถุดิบ ดังนั้นในทางปฏิบัติ ระบบนี้อาจจะมีความยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้ในการ ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กในชนบท

Fantozzi and Buratti (2009) รายงานการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไม่ใช้ อากาศ โดยใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน ในถังหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ผลการทดลองพบว่าส่วนผสมมูลสุกรกับมูล ไก่มีปริมาณก๊าซชีวภาพผลิตสูงสุดมีค่า $0.35 Nm^3/kg$ -VS พบว่าจะเกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าการใช้มูลวัวเป็นสารอาหาร

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lei Sunet *et al.* (2012) การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากน้ำเสียของโรงงานแปรงมันสำปะหลัง โดยเครื่องปฏิกรณ์จะใช้อัตราการไหลแบบ Up-flow หลายขั้นตอน จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการทดลอง 22 วัน โดยกำหนดค่าซีโอดี (COD) เริ่มต้นที่ 4000 mg/l ในช่วงระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย (HRT) 6.0 ชั่วโมง สามารถกำจัดค่าซีโอดี (COD) ได้สูงถึง 87.9 % นอกจากนี้ ในช่วงอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 10.2 - 40.0 kg-COD/m³-d ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียที่ (HRT) คงที่ 6.0 ชั่วโมง สามารถกำจัดซีโอดีได้ 77.5-92.0% และอัตราการเกิดก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.31 และ 0.73 g-COD_{CH₄}/g VSS-d จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตะกอนพบว่า *Methanothrix spp.* และ *Methanosarcina spp.* เป็นจุลินทรีย์ ที่สามารถทำให้เกิดก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดี (COD) สูงได้

Chiu-Yue *et al.* (2008) การชุดทดลองแบบกะ (Batch) และชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อประเมินอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักแป้งมันสำปะหลัง (ความเข้มข้นซีโอดี (COD) 20 g/L) ที่ 35°C โดยผสมกับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ ในการเริ่มต้นระบบ มีการกำหนดค่า pH (ช่วง 5 - 7) และความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้น (ช่วง 5 - 60 g-COD/L) จากการทดลองพบว่า ในชุดการทดลองแบบกะ (Batch) ระยะเวลาที่เก็บ (HRT) มีผลกระทบต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยประเมินอยู่ในรูปของปริมาณการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen Yield) และอัตราการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Production Rate) ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมที่ pH 5.5 ทำให้ปริมาณการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen Yield) สูงสุด เท่ากับ 1.1 mol-H₂/mol-hexose อัตราการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Production Rate) เท่ากับ 10.4 mmol-H₂/L-h และ Butyrate เท่ากับ 7,700 mg-COD/L ในชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง ระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสม คือ 4 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen Yield) สูงสุด เท่ากับ 1.5 mol-H₂/mol-hexose อัตราการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Production Rate) เท่ากับ 450 mmol-H₂/L-d และความเข้มข้นต่ำสุดของ Butyrate เท่ากับ 3000 mg-COD/L และจากการทดลอง พบว่า ระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด คือ 4-6 ชั่วโมง

นิลวรรณ (2009) การทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากมูลสุกร โดยใช้กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศในถังหมักย่อยแบบกวนต่อเนื่อง (Completely Stirred Tank Reactor) ในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic ที่ 55±2 °C) โดยทำการออกแบบและจัดสร้างระบบต้นแบบ ขนาด 1 m³ ใช้กรรมวิธีการเติมน้ำเสียแบบครั้งคราว (Batch Feeding) เพื่อนำมา

เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบอุณหภูมิต่ำและไม่มี การกวนซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไป โดยการควบคุมน้ำเสียดังต้นให้มีสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าประมาณของน้ำเสียในฟาร์มสุกรในประเทศไทย โดยในการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาเก็บน้ำเสีย (HRT) ระหว่าง 4 ถึง 6 วัน ในขณะที่ค่าสำหรับการออกแบบระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น ๆ ที่มีการกวนผสม และทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ (Mesophilic 25 - 35 °C) จำเป็นต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 วันสำหรับประเทศไทย จากนั้นทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ค่า COD, pH, VFA และสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า ระบบใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพียง 4 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียถึง 84% ที่อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ 4.8 kg-COD/m³-d สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 1,006 L/d โดยมีสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 65.6% ผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงกว่าระบบก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงกว่าระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น แต่หากนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สมควรนำไปใช้กันของเสียที่มีความเข้มข้นของชีวมวลสูง

อุกฤษ (2549) การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในกระบวนการซีแควนซ์เชิงแบทช์สองสล็อตประกอบด้วยปฏิกรณ์ 2 ถังถังแรกคือแอนแอโรบิก-แอนออกซิก-แอโรบิกซีแควนซ์เชิงแบทช์ (A₂O-SBR) ทำงานควบคู่ไปกับถังที่สองคือระบบตรึงฟิล์มไนตริไฟเคชันซีแควนซ์เชิงแบทช์ (N-SBBR) น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์เลียนแบบน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศแล้วโดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนและแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนคงที่ไว้เท่ากับ 4 / 1 ตลอดทุกการทดลองทำการทดลองโดยแปรค่าภาระบรรทุกอินทรีย์เท่ากับ 0.53, 0.80 และ 1.06 kg-COD/m³-d โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด คือ การทดลองชุดแรกแปรค่าเวลากักเก็บน้ำเป็น 18, 12 และ 9 ชั่วโมงและการทดลองชุดที่สองแปรค่าความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 400, 600 และ 800 mg/L จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและซีโอดีที่ภาระรับสารอินทรีย์เดียวกันของการทดลองที่แปรค่าเวลากักเก็บน้ำกับการทดลองที่แปรค่าความเข้มข้นมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยที่ภาระอินทรีย์สูงสุดที่ทดลองคือ 1.06 kg-COD/m³-d ได้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าเล็กน้อยประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและซีโอดีมีค่ามากกว่าร้อยละ 77 และ 95 ตามลำดับอย่างไรก็ดีถ้าพิจารณาในรูปของภาระสารอินทรีย์ที่กำจัดได้ การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าระบบมากขึ้นภาระการกำจัดสารอินทรีย์ก็จะมากขึ้น โดยที่ได้ภาระกำจัดสารอินทรีย์ของการทดลองแปรค่าเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 0.18, 0.27 และ 0.31 kg-COD/MLSS-d และภาระกำจัดสารอินทรีย์ของการทดลองแปรค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.15, 0.20 และ 0.20 kg-COD/MLSS-d ที่

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.53, 0.80 และ 1.06 kg-COD/m³-d ตามลำดับ ส่วนในถัง N-SBBR กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แต่พบปริมาณไนโตรเจนสะสมมากขึ้นเมื่อภาระบรรทุกสูงขึ้นอย่างไรก็ดีไนโตรเจนยังถูกจับใช้ในสภาวะแอนอโรบิกในถัง A₂O-SBR ได้ดี

Heo *et al.* (2003) ศึกษาการใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งย่อยสลาย ร่วมกับเศษอาหารในประเทศเกาหลีใต้ในอัตราส่วน และเวลาเก็บกักที่ต่าง ๆ กัน โดยใช้ถังปฏิริยาแบบกวนสมบูรณ์ขนาด 3.5 L ที่อุณหภูมิ 35 °C จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วน 50:50 และเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน ใช้อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ 3.14 kg-VS/m³-d จะให้อัตราการเกิดมีเทนที่ดีที่สุดที่ 0.37 m³-CH₄/kg-VS และกำจัด VS ที่ 53.7%

Benjamin *et al.* (2001) ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของการย่อยสลายร่วม โดยใช้มูลสุกรผสมกับมูลไก่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน โดยใช้ถังปฏิริยาแบบแบทช์ (Batch) ขนาด 125 mL ทำการทดลองทั้งหมด 113 วัน รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 35 ± 2 °C ลักษณะของน้ำเสียจะมีค่า COD อยู่ในช่วง 9,750 – 17,400 mg/L และค่า VS เท่ากับ 7,000 – 14,000 mg/L ซึ่งอัตราส่วนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ 80:20 (มูลสุกร : มูลไก่) โดยปริมาตร โดยได้ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.13 m³-CH₄/kg-VS ของ VS ที่ถูกกำจัด

Faisal และ Unno (2001) Modified Anaerobic Baffled Bioreactor (MABR) ได้ถูกศึกษาภายใต้สภาวะคงตัวสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์ม มีการผลิตก๊าซมีเทน 0.32-0.42 L-CH₄/g-COD_{re} ซึ่งสอดคล้องกับส่วนประกอบมีเทน 67.3-71.2 % ในช่วง HRT 3-10 วัน การกำจัดซีโอดี และ oil & grease เป็น 87.4 - 95.3% และ 44.1 - 91.3% ตามลำดับ นอกจากนี้การผลิต VFA ในปริมาณ 1,450 mg/L ที่ HRT 3 วัน และมีแนวโน้มลดลงเหลือ 608 mg/L ที่ HRT 10 วัน

เพ็ญศิริ (2551) ทำการทดลองกักตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทดลองในขวดซีรัมขนาด 120 mL พบว่า ค่า SMA เริ่มต้นของตะกอนจุลินทรีย์มีค่าค่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.07 และ 0.08 g-COD-CH₄/g-VSS-d จากนั้นทดลองในถังปฏิริยาแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ระดับห้องปฏิบัติการจำนวน 3 ถัง โดยแบ่งเป็นการทดลองภายใต้สภาวะ Thermophilic (55 °C) 2 ถัง ปฏิริยา (ถังปฏิริยาที่ 1 ไม่เติมสารอาหารเสริมและถังปฏิริยาที่ 2 เติมสารอาหารเสริม) และสภาวะ Mesophilic (30±1 °C) 1 ถังปฏิริยา เวลาทดลอง 200 วัน พบว่า ค่า SMA ของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิริยา Thermophilic ที่ 1 และ 2 สูงขึ้นเล็กน้อยคือเท่ากับ 0.15 และ 0.14 g-COD-CH₄/g-VSS-d ตามลำดับ และในถังปฏิริยา Mesophilic มีค่า SMA เท่ากับ 0.09 g-COD-CH₄/g-VSS-d

จักรพันธ์ (2553) ได้ทำการศึกษาก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยการย่อยสลายร่วมกับหญ้านาเปียร์และเศษอาหาร พบว่าน้ำเสียฟาร์มสุกร: หญ้านาเปียร์ที่อัตราส่วน 70:30 และน้ำเสียฟาร์มสุกร: เศษอาหารที่อัตราส่วน 60:40 ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 มีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 77% และ 95% ตามลำดับ มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) สูงสุดที่ 10 วันเท่ากับ 629 mL-CH₄/g-VS และ 486 mL-CH₄/g-VS เมื่อเทียบกับน้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 200 mL-CH₄/g-VS

นฤมล และ ธนินยา (2555) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม พบว่าน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ 10 กรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 2,025 mL-CH₄/CODremoved และมีประสิทธิภาพการบำบัด COD เท่ากับ 38.5%

Lei Zannng *et al.* (2011) ศึกษาการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษอาหารร่วมกับน้ำเสียมูลสุกร พบว่าค่า COD ของเศษอาหารเท่ากับ 238,500 mg/L ค่าพีเอช 6.5 มีอัตราการผลิตมีเทน 479.5 mL-CH₄/g-VSadded ส่วนน้ำเสียมูลสุกรค่า COD เป็น 92,800 mg/L ค่าพีเอช 6.6 มีอัตราการผลิตมีเทน 242.3 mL-CH₄/g-VSadded ที่การหมักร่วมมูลสุกรร้อยละ 17 ร่วมกับเศษอาหารร้อยละ 83 มีอัตราการผลิตมีเทน 388 mL-CH₄/g-VSadded

พรรณนิภา (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระดาษสาโดยการย่อยสลายร่วมกับมูลวัวและเศษอาหาร โดยตั้งปฏิกรณ์ ASBR พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำเสียและมูลวัว คือ 70:30 มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) เท่ากับ 0.330 L-CH₄/g-VSadded และสำหรับการทดลองที่ไม่มีกากวน พบว่า อัตราส่วนที่ผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุดคือ 10:90 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) เท่ากับ 0.316 L-CH₄/g-VSadded

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1.1 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)
- 1.1.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
- 1.1.3 เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- 1.1.4 ตู้อบ (Hot air oven)
- 1.1.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น HANNA HI 3222
- 1.1.6 เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- 1.1.7 Automatic pipette aid
- 1.1.8 อุปกรณ์เก็บก๊าซ
- 1.1.9 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี รุ่น GC6890
- 1.1.10 ตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C
- 1.1.11 ตู้เย็นอุณหภูมิ 20 °C
- 1.1.12 ชุดเครื่องกรองความดัน
- 1.1.13 เครื่องมือสำหรับการกลั่นแอมโมเนีย (Distillation apparatus)

1.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี

- 1.2.1 กระจกบอขวด (Cylinder)
- 1.2.2 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- 1.2.3 หลอดทดลอง (Test tube)
- 1.2.4 ปีกเกอร์ (Beaker)
- 1.2.5 บิวเรต (Burette)
- 1.2.6 ปิปेट (Pipette)

- 1.2.7 ขวดปริมาตร(Volumetric flask)
- 1.2.8 แท่งแก้วคนสาร (Stirrer rod)
- 1.2.9 ช้อนตักสารเคมี (Spatula)
- 1.2.10 แท่งแม่เหล็กกวนสาร(Magnetic bar)
- 1.2.11 ลูกยางคูดบีเปิด (Bulb)
- 1.2.12 ปากคีบ(Forceps)
- 1.2.13 ถ้วยอะลูมิเนียม (Aluminum weighing dishes)
- 1.2.14 กระจกกรอง GF/C ขนาด4.7 เซนติเมตร
- 1.2.15 ขวดเจลดาลท์(Kjeldahl flask)
- 1.2.16 ถ้วยระเหย (Evaporating disc)
- 1.2.17 ขาตั้งพร้อมตัวหนีบยึด
- 1.2.18 ขวดซีโอดี (COD bottle)
- 1.2.19 ขวดบีโอดี (BOD bottle)
- 1.2.20 คิวเวตต์ (Cuvette)

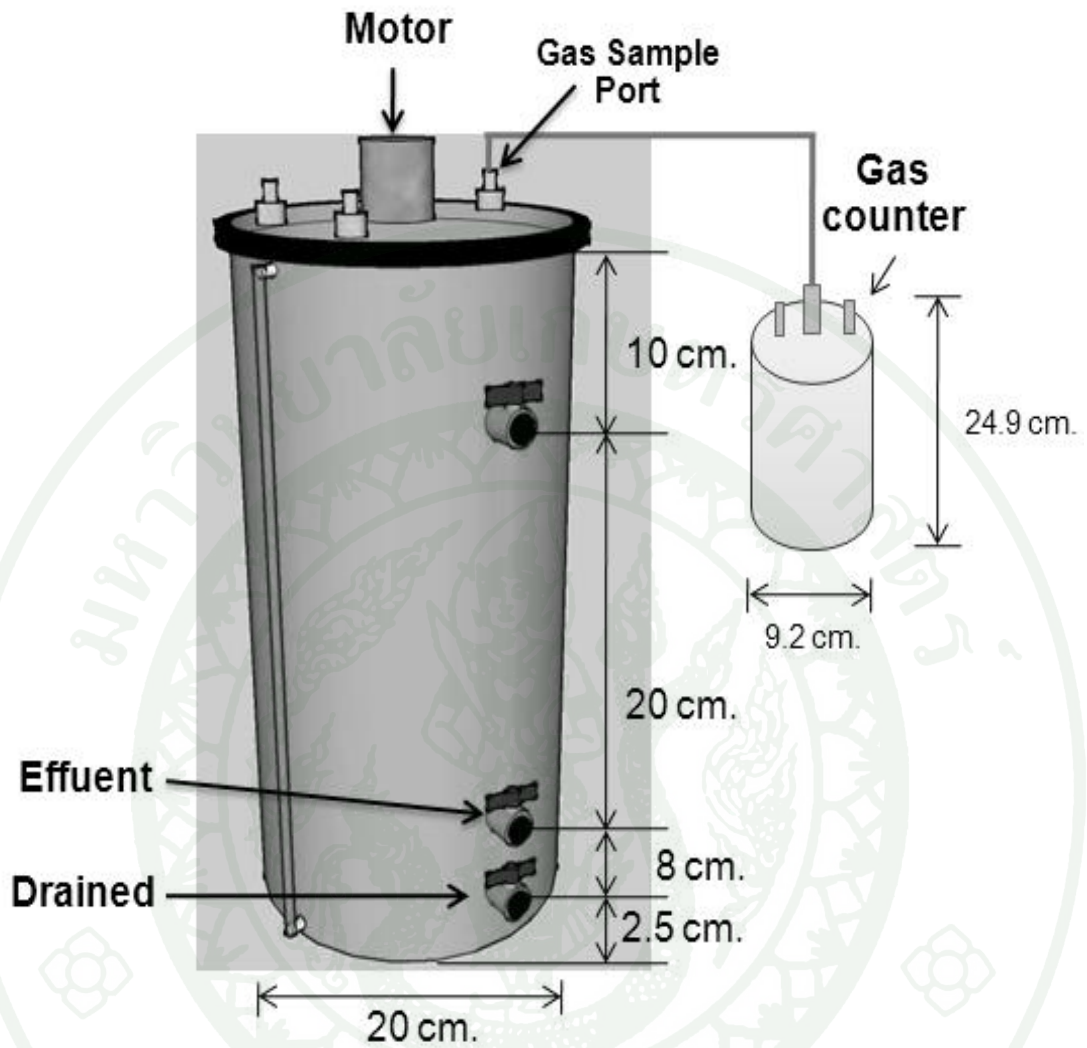
1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ COD, BOD, VFA และ Alkalinity (Standard Methods for Examination of water and wastewater, 1998)

1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

1.4.1 ชุดทดลองระบบแบบแบทช์ (batch) และชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous flow) ประกอบด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 38.2 เซนติเมตร โดยมีปริมาตรความจุของถัง 12 ลิตร ปริมาตรการใช้งาน 11.5 ลิตร

1.4.2 ติดตั้งวาล์วขนาด 4/8 หุน เพื่อทำการใส่น้ำเสีย (inlet) ติดตั้งวาล์วขนาด 1/4 หุน สำหรับช่องเก็บก๊าซชีวภาพ (Gas Collection) และจุดเก็บตัวอย่าง (take sample) จุกระบายตะกอน (drainage) ในภาพที่ 2 แสดงลักษณะของระบบจริงที่ใช้ในการทดลอง และไบกวนและอุปกรณ์เก็บปริมาตรก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement)

1.4.3 ชุดอุปกรณ์เก็บก๊าซ ประกอบด้วยท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.2 เซนติเมตร สูง 24.9 เซนติเมตร โดยมีปริมาตรความจุ 1.7 ลิตร



ภาพที่ 3 ขนาดและองค์ประกอบของถังปฏิกรณ์



ภาพที่ 4 ลักษณะของระบบจริงที่ใช้ในการทดลอง

2. วิธีการ

2.1 ตะกอนอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

ตะกอนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังแปรรูปของ บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี



ภาพที่ 5 การเก็บตะกอนแข็งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูปของบริษัท สยาม มอดิไฟด์ สตาร์ช จำกัด



ภาพที่ 6 ตัวอย่างตะกอน AS โรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูปของบริษัท สยาม มอดิไฟด์ สตาร์ช จำกัด

2.2 การตรวจสอบคุณลักษณะตะกอน AS, ตะกอนจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน และ ตะกอนแป้ง เบื้องต้น

วิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของ AS, ตะกอนจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน ตะกอน แป้งและน้ำเสียที่ใช้สำหรับเป็นเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ TS, pH, COD, BOD, VFA, Alkalinity, SS และ VSS โดยวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (17th ed., 1992) และคู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (ดร.มัน ลิน ตันทุลเวศน์ และดร.มันรักษ์ ตันทุลเวศน์ พิมพ์ครั้งที่ 5., 2551) แสดงดังตารางที่ 3

2.3 การเก็บตัวอย่างวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

การเก็บก๊าซชีวภาพ ทำการเก็บโดยใช้เข็มฉีดยาคูดตัวอย่างก๊าซจากช่องเก็บก๊าซของ ตัวถังปฏิกรณ์ จากนั้นนำมาเก็บในหลอดสุญญากาศ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยใช้ เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี รุ่น GC6890 วิเคราะห์ก๊าซ CO₂, CH₄, N₂, O₂ สำหรับก๊าซอื่นๆในระบบ จะถูกระบุเป็นอื่นๆ (Other Gas) โดยก๊าซแต่ละชนิดมีผลการวิเคราะห์ในหน่วยร้อยละของ องค์ประกอบก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
TS	อบแห้งที่ 103-105 °C
pH, ORP, Temperature	pH-ORP-Temperature meter
COD	Closed Reflux Method
BOD	Azide Modification Method
VFA as CH ₃ COOH	Titration Method
Alkalinity	Titration Method
SS	ผ่านกรองก่อนอบแห้งที่ 103-105 °C
VSS	ผ่านกรองก่อนอบแห้งที่ 550 °C

3. การดำเนินการทดลอง

3.1 เริ่มต้นระบบ (start up)

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ชุดการทดลองแบบแบทช์ (Batch) เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปัจจัยในการควบคุมระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายดังกล่าว โดยจะทำการสร้างถังปฏิกรณ์ทั้งหมด 3 ชุด ดำเนินการทดลองเดิมจุลินทรีย์และตะกอนอินทรีย์จากการคำนวณความหนาแน่นของตะกอน โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนวิธีการทดลอง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความประสิทธิภาพของระบบรวมถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด

ส่วนที่ 2 ชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous flow) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากตะกอน Excess sludge จากระบบ AS หลังผ่านเครื่องรีดตะกอน และตะกอนแบ่ง การทดลองในถังปฏิกรณ์ทั้งหมด 2 ชุด ดังภาพที่ 7 แสดงขั้นตอนวิธีการทดลอง โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

ก. ระยะเวลาเริ่มต้นการหมัก (Start up) เริ่มต้นด้วยการนำเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปงมันสำปะหลังแปรรูปจากบริษัท สยามมอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี มาปรับสภาพให้จุลินทรีย์มีความคุ้นเคยกับตะกอนที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ตะกอน AS และตะกอนแบ่ง สังเกตก๊าซชีวภาพ เมื่อมีก๊าซเกิดขึ้นที่ถังปฏิกรณ์

ข. ขั้นตอนศึกษาประสิทธิภาพของระบบหรือสภาวะควบคุม (control condition) ในสภาวะควบคุมนี้จะพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอทำการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดไม่พบก๊าซออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในตัวอย่างและค่า COD ที่ออกจากระบบค่อนข้างคงที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนถึงสภาวะควบคุมประมาณ 15 วัน มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ของตะกอน Excess sludge จากระบบ AS หลังผ่านเครื่องรีดตะกอน 4 ระดับคือที่ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ และตะกอนแบ่งเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) 2 ระดับ คือที่ 2.0 และ 6.0 $\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) นี้จะส่งผลให้อัตราการไหล

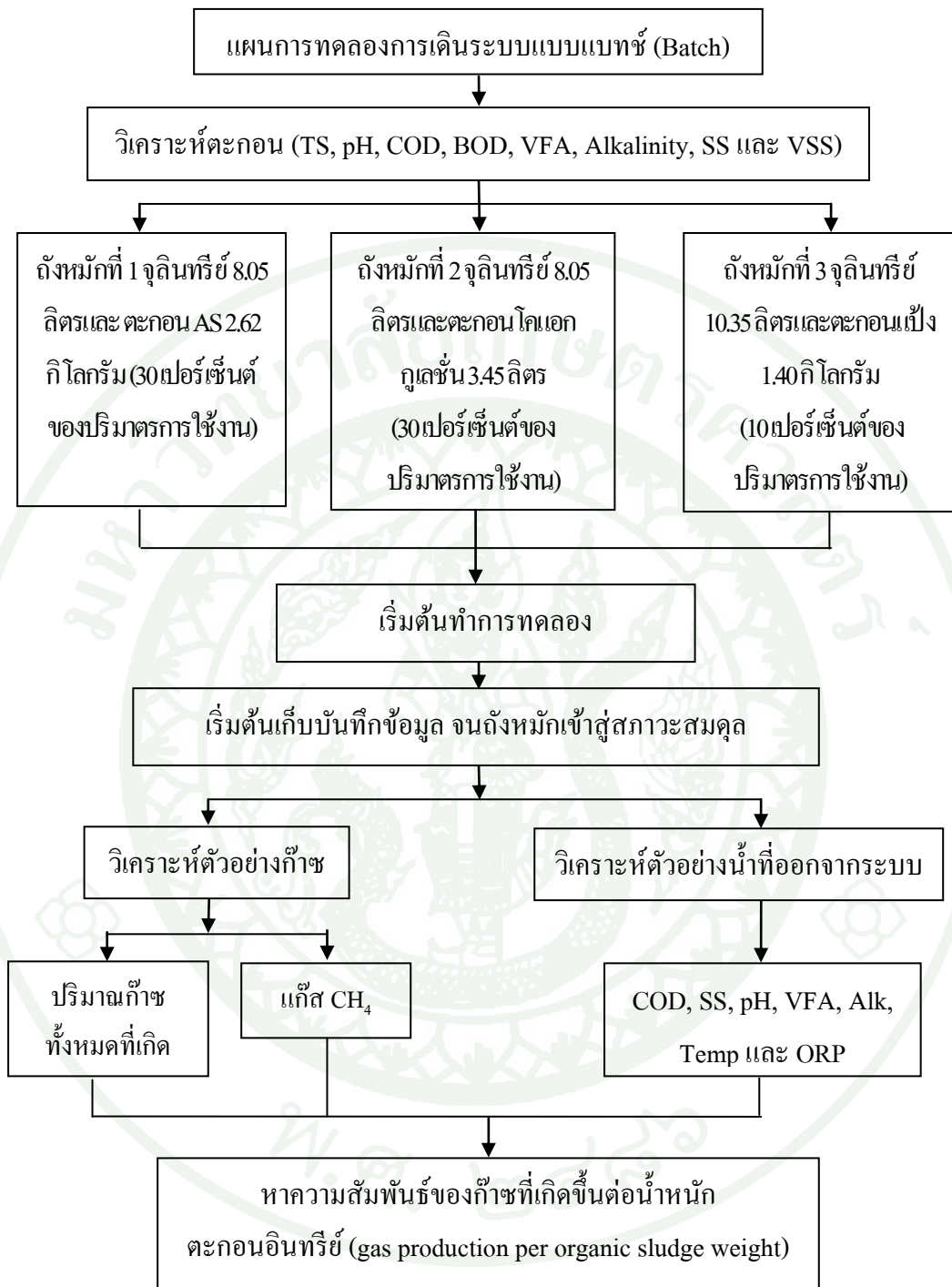
ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบแปรเปลี่ยนตามไปด้วยและวัดประสิทธิภาพของระบบโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Influent) และน้ำเสียที่ออกจากระบบ (Effluent) ของระบบนำมาวิเคราะห์หาค่า COD, SS, Temp, pH, VFA, Alkalinity และ ORP และทำการเก็บก๊าซเพื่อวิเคราะห์หาก๊าซมีเทนที่เกิด

3.2 ระยะเวลาเก็บข้อมูล

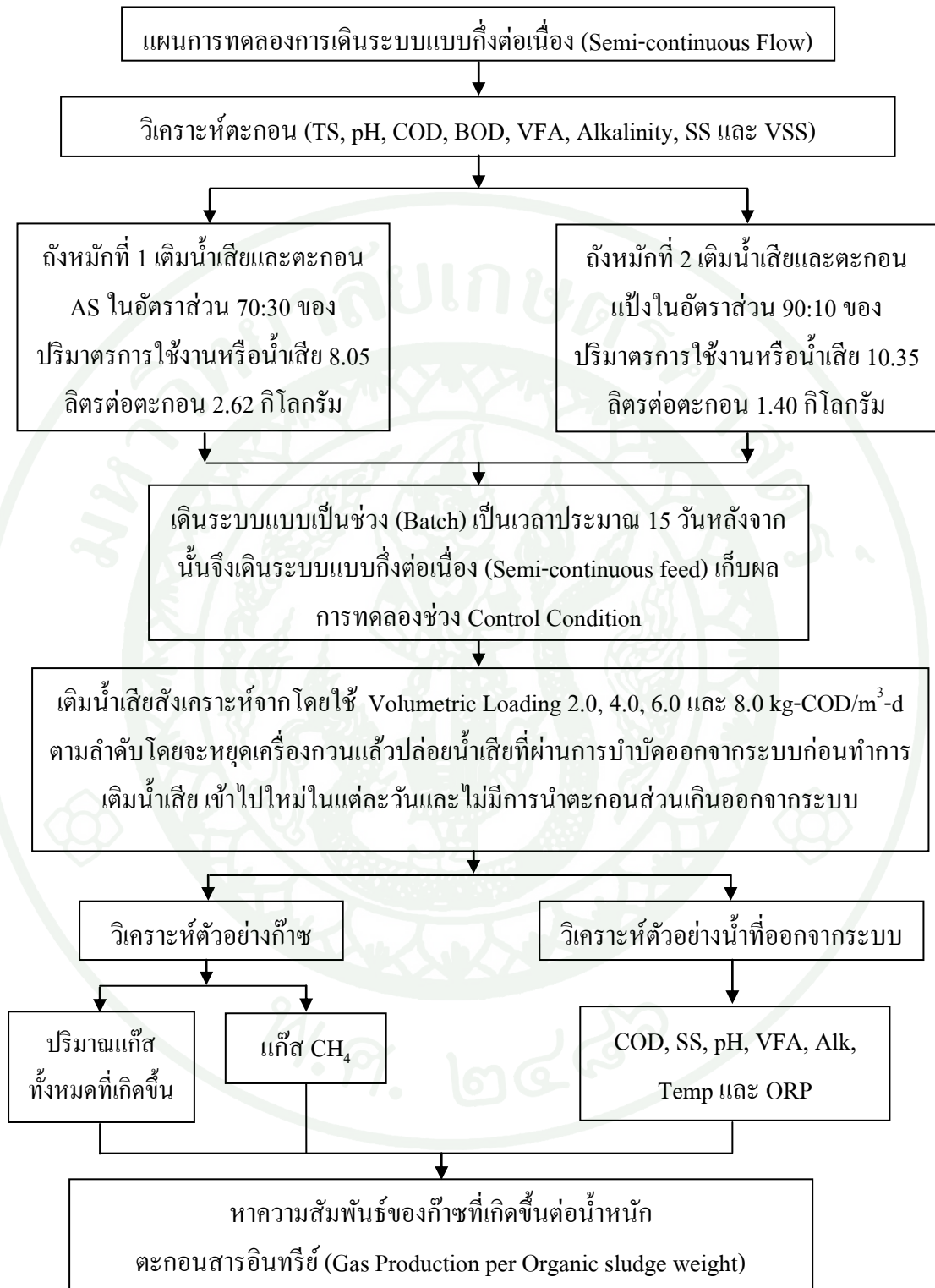
ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Method for Examination of Water and Wastewater (17th ed. 1992) ในการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่อไปนี้คือ COD, SS, Temp, pH, VFA, ALK และ ORP และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ

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



ภาพที่ 7 แผนการทดลองการเดินระบบแบบแบทช์ (Batch)



ภาพที่ 8 แผนการทดลองการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)

ผลและวิจารณ์

การทดลองนี้เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด ด้วยถังหมักไร้อากาศ ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ ระบบแบบเบทช์ (Batch) ซึ่งใช้ตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Flow) ซึ่งได้แก่ ตะกอน AS และตะกอนแป้ง โดยการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (27-31°C) และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่อัตราภาระบรรจุสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ต่างๆ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ แต่ละหัวข้อดังกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบคุณลักษณะตะกอนเบื้องต้น

การทดลองได้การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างตะกอนที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ความชื้น, pH, COD, BOD, SS และ VSS ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5 น้ำเสียใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) มีค่า COD, BOD, SS และ VSS เท่ากับ 7,319.5, 2,829.8 และ 4,210.4 mg/l ตามลำดับ และค่า pH เท่ากับ 7.22

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของตะกอน

Sludge	ลักษณะ
ตะกอน AS	ตะกอนสีน้ำตาลอ่อนแข็งกึ่งเหลว (Sludge cake) มีกลิ่นเล็กน้อย
ตะกอนโคแอกกูเลชัน	ตะกอนสีเหลืองอ่อน เหลวข้น มีกลิ่นเหม็น
ตะกอนแป้ง	ตะกอนสีขาว แข็งกึ่งเหลว (Sludge cake) มีกลิ่นเหม็น

การศึกษการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในระบบแบบเบทช์ (Batch) และแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) โดยหาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของเสีย (S_0) ที่ค่าภาระบรรจุต่างๆ (Volumetric Loading) ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง 45 วัน โดยระยะที่เริ่มทำการทดลอง (startup) ได้นำตะกอน Excess Sludge จากระบบ AS

ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง จากโรงงานสยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัดมาปรับให้คุ้นเคยกับน้ำเสีย (Seed) โดยน้ำเสียที่ใช้มีตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้น 4,210.4 mg/L จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองในสภาวะควบคุมเป็นระยะเวลาที่ทำการทดลอง 45 วัน ตลอดการทดลองไม่มีการนำตะกอนชีวภาพส่วนเกินออกจากระบบ นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของตะกอน

พารามิเตอร์	หน่วย	ตะกอน	ตะกอน	ตะกอนแป้ง
		Excess Sludge	โคแอกกูเลชัน	
ความชื้น	%	89.54 – 91.03	-	50.14 – 52.55
pH	-	7.25 – 7.43	7.03 – 7.12	4.41 – 4.57
COD	g/g (Dry weight)	3.26 – 5.47	13.79 – 16.78	2.93 – 8.62
BOD	g/g (Dry weight)	1.27 – 1.63	4.31 – 4.80	1.05 – 3.68
SS	mg/l	-	16,420	-
VSS	mg/l	-	10,861	-

หมายเหตุ ค่า parameters ต่างๆ ได้จากการวิเคราะห์ 5 ครั้ง

2. การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ

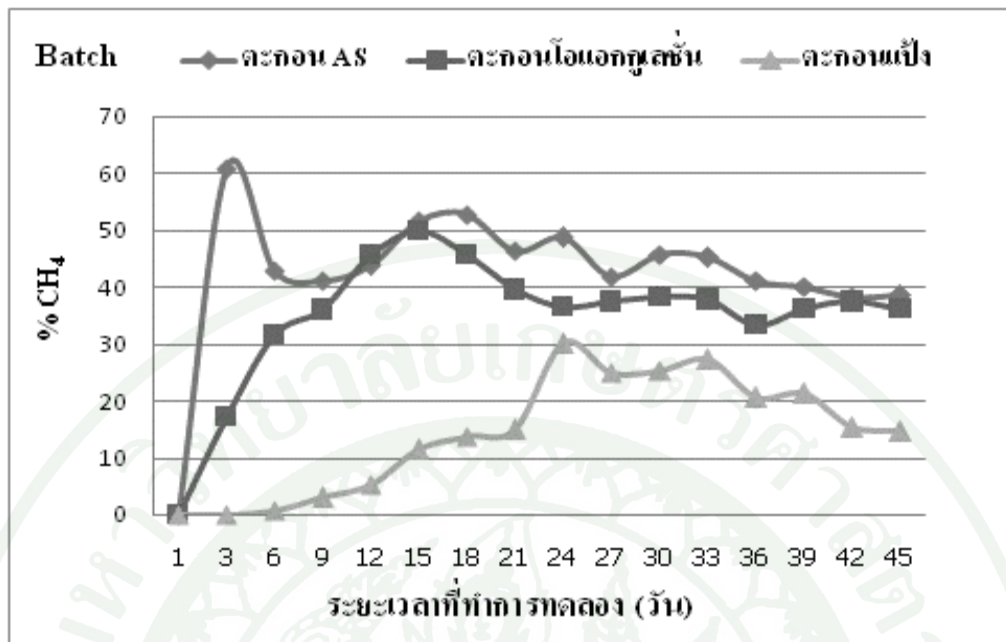
ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วยก๊าซชนิดต่างๆ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในการทดลองก๊าซที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่แตกต่างกันทั้งในระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอนแต่ละชนิด และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ นั้น จะถูกเก็บภายใต้แรงดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง โดยการเก็บปริมาตรก๊าซจะใช้วิธีการแทนที่น้ำ บันทึกผลการทดลองในสภาวะควบคุม (control condition)

1.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด (total gas) และก๊าซมีเทน (methane)

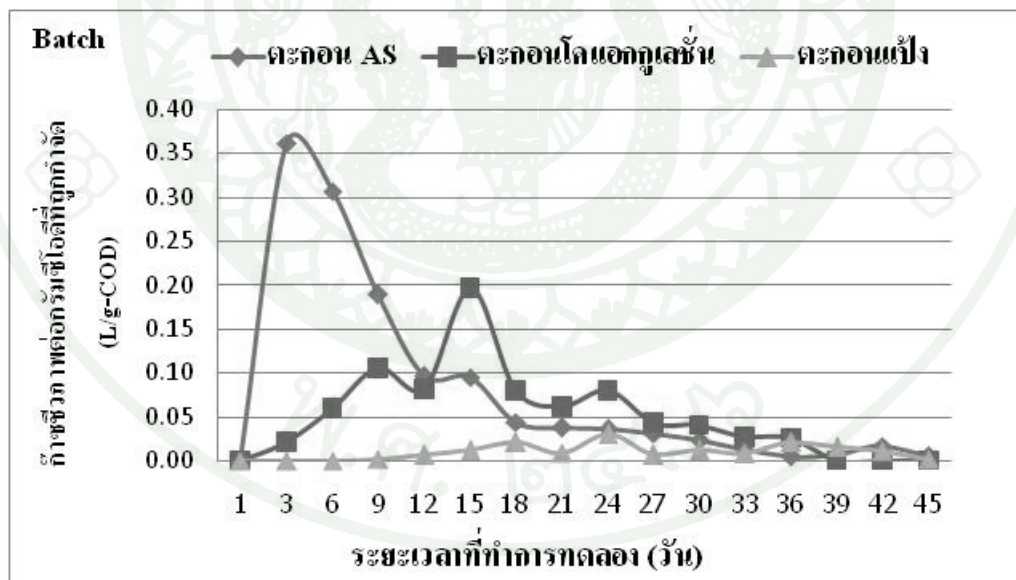
เมื่อนำก๊าซชีวภาพในการทดลองระบบแบบแบทช์ (Batch) โดยดึงหมักไว้อากาศของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้งเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น จะพบว่า การทดลองตะกอน AS ที่ระยะเวลาการย่อยสลาย 3 วัน การสะสมก๊าซมีเทนสูงสุด 60.81 % ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อวัน มีค่า 8.70 L/d คำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทนได้ มีค่า 5.29 L/d จากปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนสามารถหาปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดได้ มีค่าเท่ากับ 0.361 L/g-COD_{re} และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.220 L/g-COD_{re} ตะกอนโคแอกกูเลชันที่ระยะเวลาการย่อยสลาย 15 วัน การสะสมก๊าซมีเทนสูงสุด 49.78 % ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อวัน มีค่า 2.31 L/d หรือปริมาณก๊าซมีเทน 1.15 L/d สามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดได้ มีค่าเท่ากับ 0.196 L/g-COD_{re} และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.097 L/g-COD_{re} และตะกอนแป้งที่ระยะเวลาการย่อยสลาย 24 วัน การสะสมก๊าซมีเทนสูงสุด 30.08 % ก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อวัน มีค่า 1.85 L/d หรือปริมาณก๊าซมีเทน 0.56 L/d สามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.030 L/g-COD_{re} และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.009 L/g-COD_{re} สัดส่วนของการเกิดก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดี (COD) ที่ถูกกำจัดมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้และสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมในระหว่างการดำเนินระบบ

ตารางที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ ปริมาณก๊าซมีเทนและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด

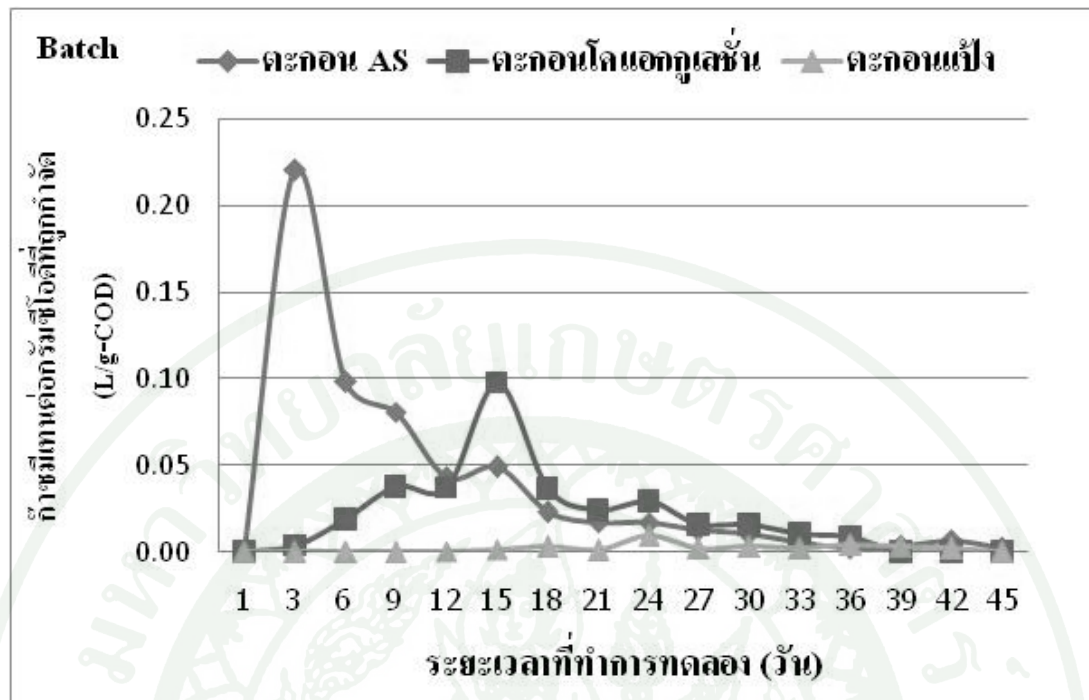
Sludge	Total Biogas produced per g COD removed (L/g)	CH ₄ produced per g COD removed (L/g)	% CH ₄
ตะกอน AS	0.361	0.230	60.81
ตะกอน โคแอกกูเลชัน	0.196	0.097	49.78
ตะกอนแป้ง	0.009	0.030	30.08



ภาพที่ 9 เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนสะสมจากตะกอนชนิดต่างๆ ของระบบแบบแบทช์ (Batch)



ภาพที่ 10 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดของระบบแบบแบทช์ (Batch)

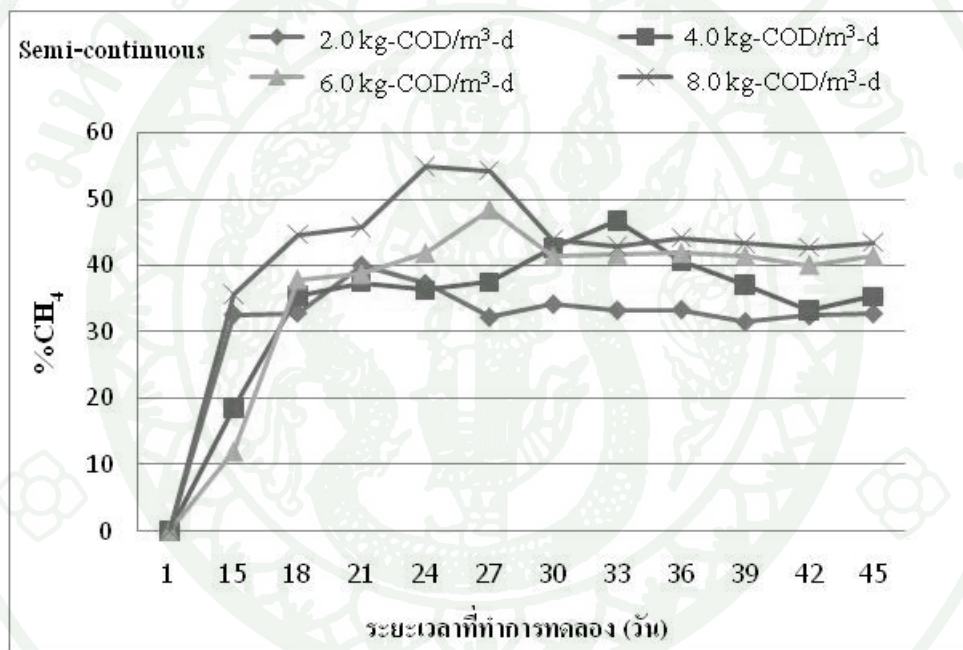


ภาพที่ 11 ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดของระบบแบบแบทช์ (Batch)

การวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพของการทดลองระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ทดลองที่อุณหภูมิห้อง ระบบบำบัดระบบรุกรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ มีปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ยของแต่ละระบบมีค่าเท่ากับ 33.81, 36.50, 38.40 และ 45.17 % ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวันที่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.55, 1.24, 2.29 และ 2.98 L/d จากเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนทำให้ทราบถึงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.52, 0.52, 0.89 และ 1.33 L/d และปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 0.035, 0.031, 0.039 และ 0.041 L/g-COD_{re} ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.012, 0.012, 0.016 และ 0.019 L/g-COD_{re} จากการศึกษาพบว่าที่อัตราภาระบรุกรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m³-d เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราภาระบรุกรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน โดยตรงกับอัตราภาระบรุกรทุกสารอินทรีย์

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

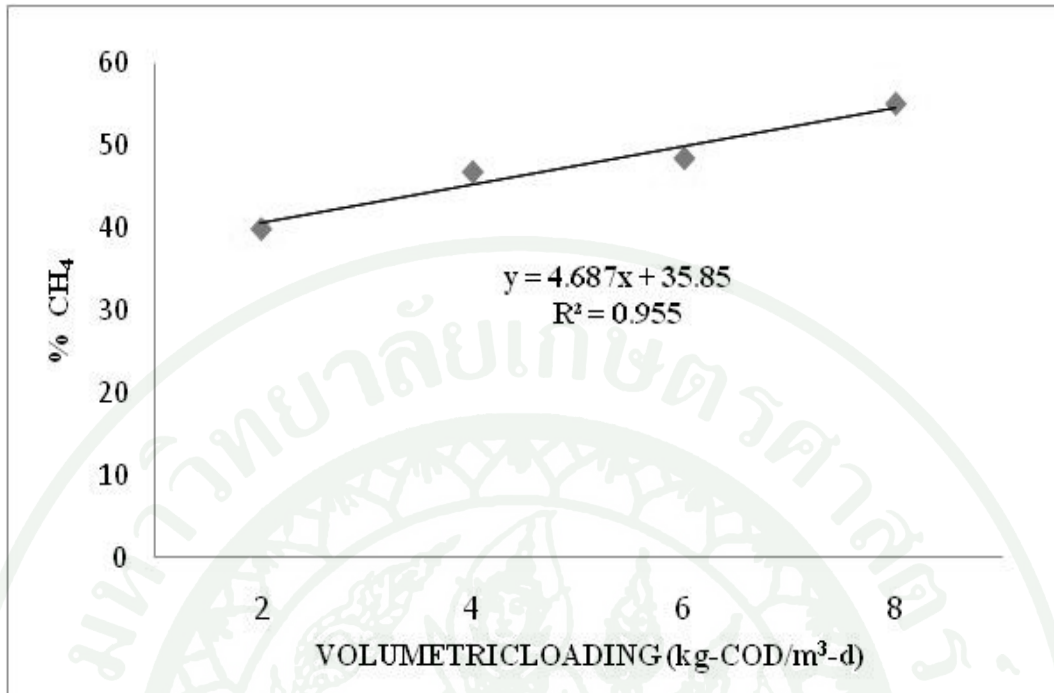
VL (kg-COD/m ³ -d)	Biogas produced per g COD removed (L/g)	CH ₄ produced per g COD removed (L/g)	% CH ₄
2.0	0.0346 ± 0.0006	0.0114 ± 0.0007	33.81 ± 6.15
4.0	0.0389 ± 0.0007	0.0148 ± 0.0033	36.50 ± 10.32
6.0	0.0410 ± 0.0019	0.0171 ± 0.0001	38.40 ± 14.11
8.0	0.0416 ± 0.0005	0.0181 ± 0.0005	43.37 ± 16.25



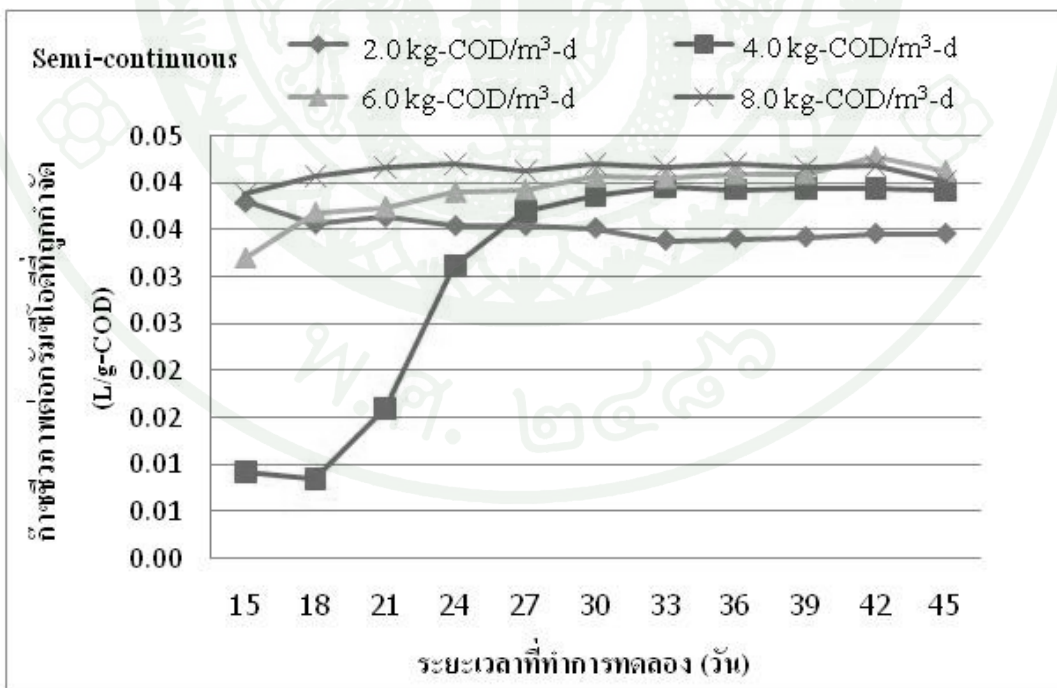
ภาพที่ 12 เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนสูงสุดที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับกับเปอร์เซนต์ก๊าซมีเทน (Y) ดังนี้

$$Y = 4.687X + 35.85; 2.0 < X < 8.0; R^2 = 0.955$$



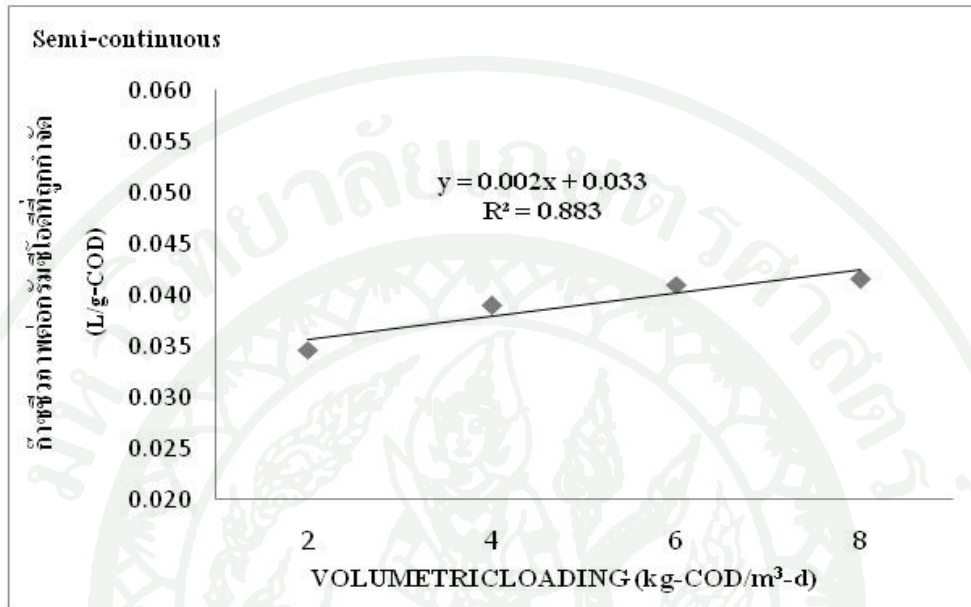
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน



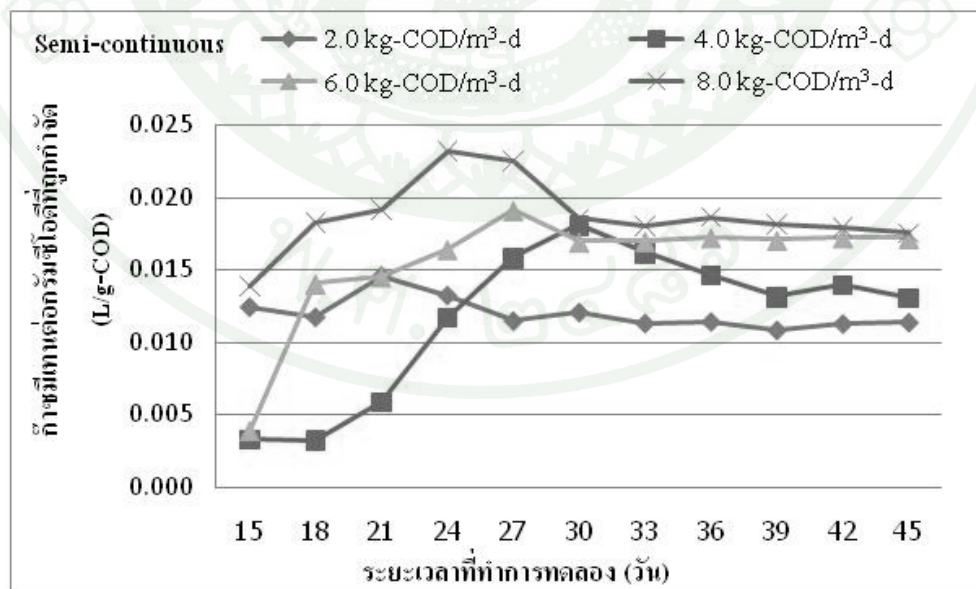
ภาพที่ 14 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับก๊าซชีวภาพต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด (Y) ดังนี้

$$Y = 0.002X + 0.033; 2.0 < X < 8.0; R^2 = 0.883$$



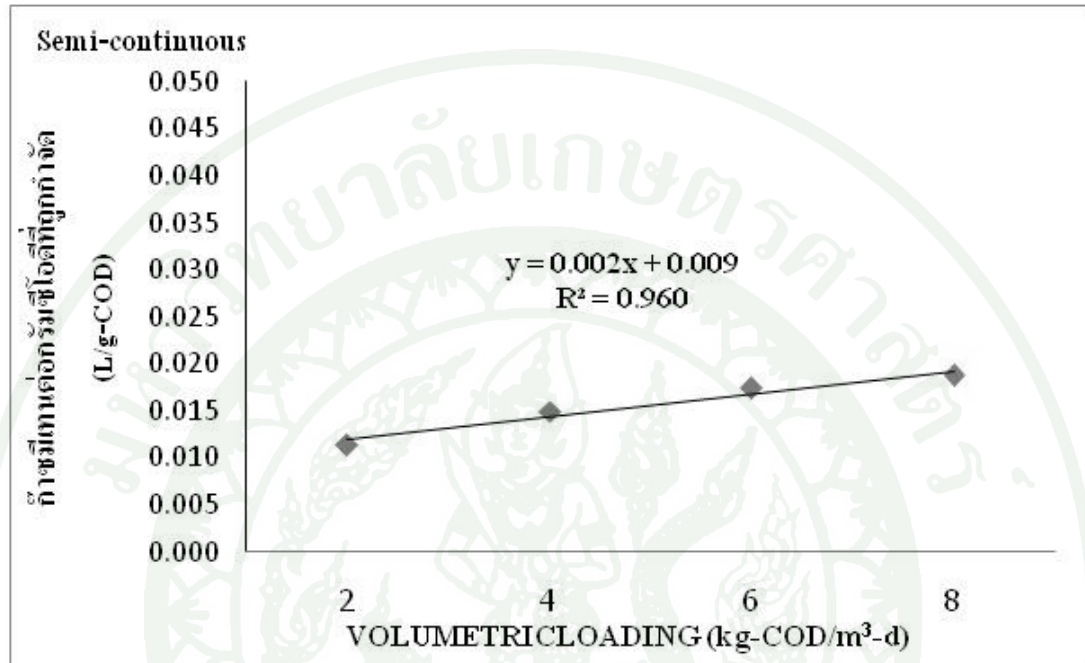
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับก๊าซชีวภาพต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด



ภาพที่ 16 ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่ภาระบรรทุกต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด (Y) ดังนี้

$$Y = 0.002X + 0.009; 2.0 < X < 8.0; R^2 = 0.960$$

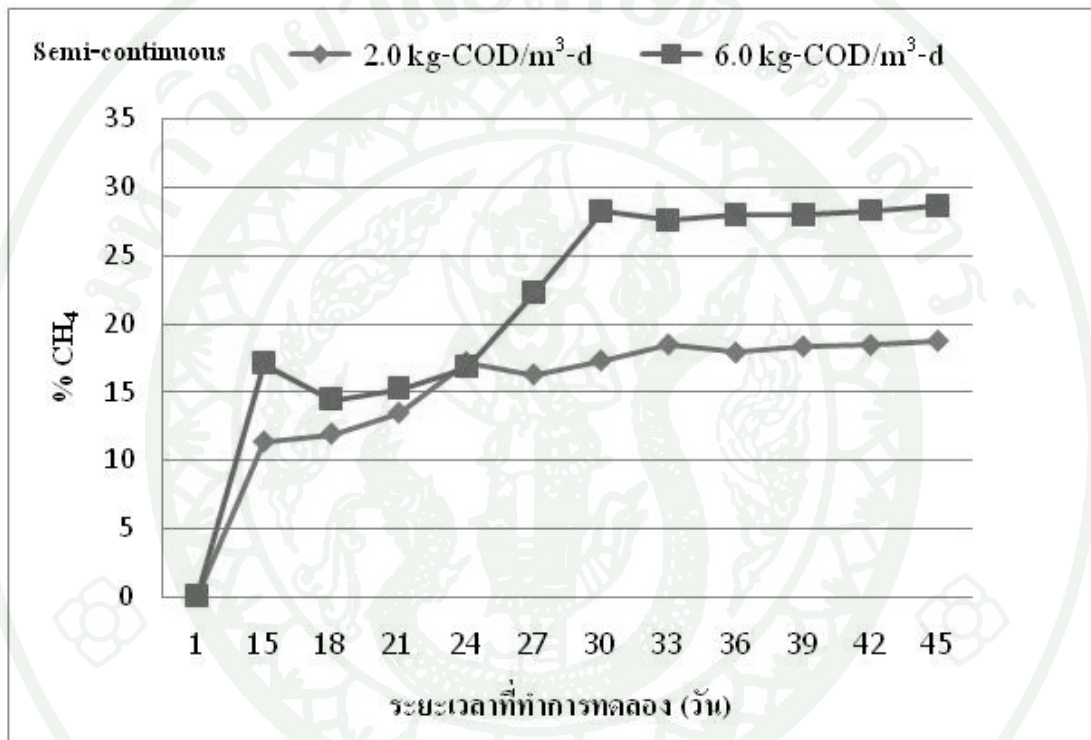


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด

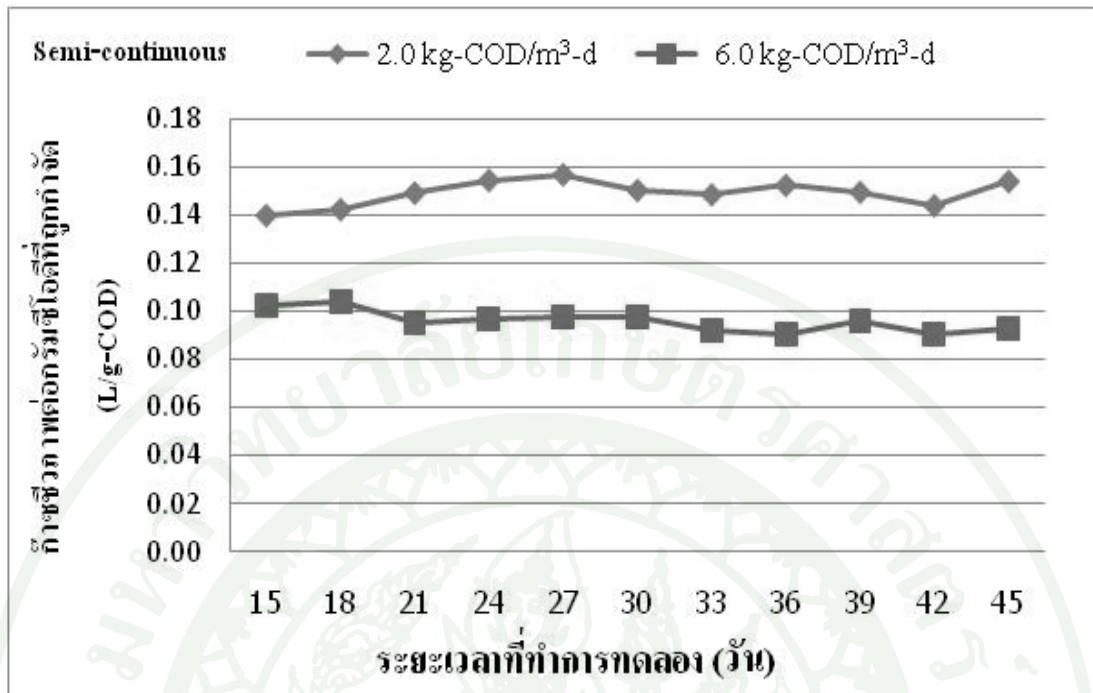
การทดลองตะกอนแป้งในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ระบบรับภาระบรรทุก 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d การทดลองที่อุณหภูมิห้องมีปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่ามีปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 16.20 และ 23.05 % ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวันที่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.38 และ 3.17 L/d จากเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนทำให้ทราบถึงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน มีค่าเฉลี่ยแต่ละระบบเท่ากับ 0.39 และ 0.74 L/d และปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 0.149, 0.0919 L/g-COD_c ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.024, 0.021 L/g-COD_c จากการศึกษาพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดกับก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมากกว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.0 kg-COD/m³-d

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยการผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ

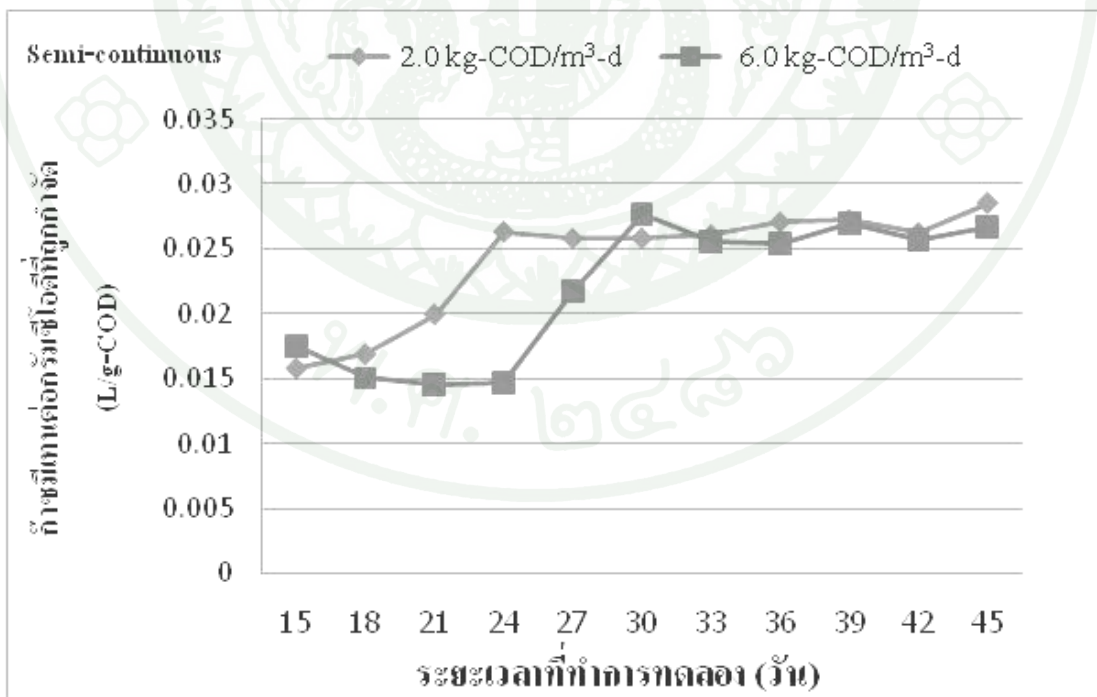
VL (kg-COD/m ³ -d)	Total Biogas produced per g COD removed (L/g)	CH ₄ produced per g COD removed (L/g)	% CH ₄
2.0	0.149 ± 0.0067	0.024 ± 0.0052	16.20 ± 2.98
6.0	0.092 ± 0.0145	0.021 ± 0.0046	23.05 ± 5.67



ภาพที่ 18 เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทน (CH₄) ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d



ภาพที่ 19 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ



ภาพที่ 20 ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ (COD) ที่ถูกกำจัดที่ภาระบรรทุกต่างๆ

การทดลองของ Fezzani and Chikh (2007) เป็นระบบการย่อยสลายกากมะกอกและน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ $0.07 - 3.00 \text{ L/d}$ ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ $1.19 - 10.84 \text{ kg-COD/m}^3\text{-d}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน AS สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้สูงกว่า และระบบแบบแบทช์ (Batch) ตะกอนโคแอกกูเลชันและตะกอนแป็ง และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ตะกอน AS หลังผ่านเครื่องรีดตะกอนและตะกอนแป็งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกับ Fezzani and Chikh (2007)

จาก McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของชีโอดีที่ถูกกำจัดไว้ดังนี้ 1 กรัมของชีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตร จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบแบบแบทช์ (Batch) และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัดน้อยกว่า McCarty (1964) ทั้งนี้จะเนื่องมาจาก ค่ากรดไขมันระเหย (VFA) ในระบบแบบแบทช์ของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป็ง และค่ากรดไขมันระเหย (VFA) ในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง มีค่าสูงกว่าค่าที่เหมาะสม คือ $200 - 400 \text{ mg/l as CH}_3\text{COOH}$ (มันลิน, 2546) และพีเอชของตะกอนแป็งในระบบมีค่าต่ำกว่าช่วงค่าที่เหมาะสม คือ $6.5 - 7.5$ (เกรียงศักดิ์, สันทัด, 2549) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง

3. ประสิทธิภาพของระบบ

ระบบแบทช์ (Batch) และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)

ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในระบบแบบแบทช์ (Batch) และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) โดยนำเสนอผลการทดลองในสภาวะควบคุม น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้า (influent) และออกจากระบบ (effluent) ของตะกอนแต่ละชนิดและที่ค่าการบรรทุก (Volumetric Loading) ต่างๆ

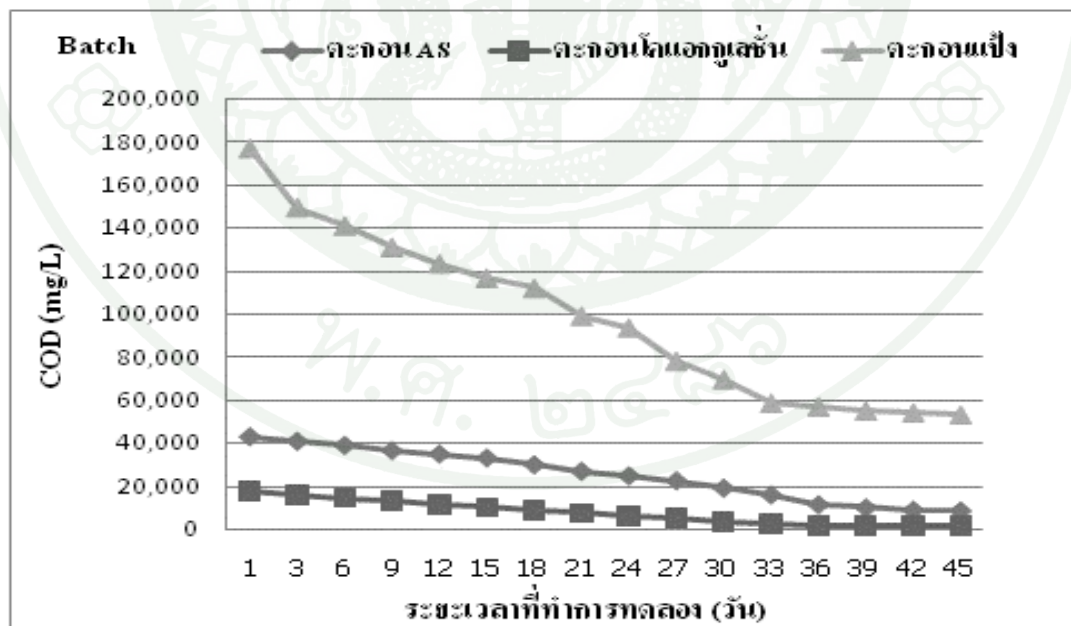
3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดี (COD)

ในการทดลองระบบแบบแบทช์ (Batch) การทดลองตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป็ง มีค่า COD ที่เข้าระบบมีความเข้มข้น $42,666 \text{ mg/L}$, $17,436 \text{ mg/L}$ และ $176,666 \text{ mg/L}$ ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาการย่อยสลาย 3 วัน พบว่าค่า COD มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องทั้ง

สามถึง จนกระทั่งที่ระยะเวลาการย่อยสลาย 24 วันค่าความเข้มข้นของ COD ของตะกอน AS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงจนแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ COD ที่ออกจากระบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8,398 mg/L และที่ระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ค่าความเข้มข้นของ COD ของตะกอน โคนอกกุเลชั่นและตะกอนแป้งมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่า COD เท่ากับ 1,422 mg/L และ 53,198 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีของ ตะกอน AS ตะกอนโคนอกกุเลชั่น และตะกอนแป้งมีค่าเท่ากับ 80.32%, 91.84% และ 69.89% ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ของระบบแบบแบทช์ (Batch)

Sludge	COD (mg/l)		Efficiency (%)
	Influent	In Reactor	
ตะกอน AS	42,666	8,398	80.32
ตะกอนโคนอกกุเลชั่น	17,436	1,422	91.84
ตะกอนแป้ง	176,656	53,198	69.89

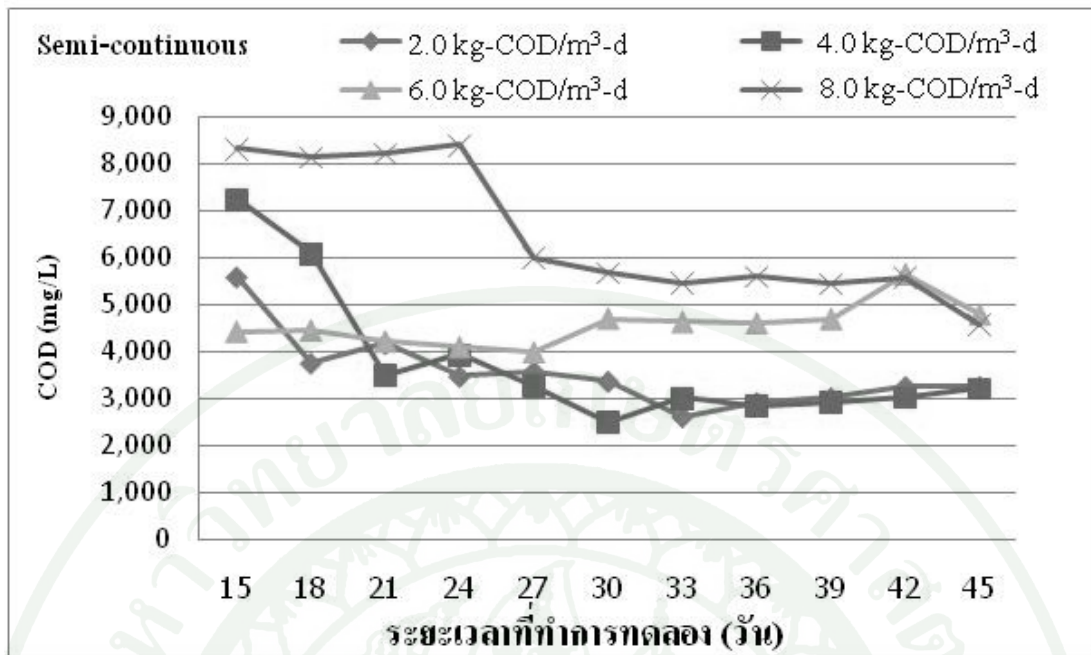


ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของตะกอนชนิดต่างๆ ระบบแบบแบทช์ (Batch)

ในการทดลองระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) การทดลองตะกอน AS ระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 – 8.0 kg-COD/m³-d น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่า COD เข้มข้นเฉลี่ยในช่วง 28,264 - 32,675 mg/L และน้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของ COD ที่สถานะคงที่ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d ค่าเฉลี่ยของแต่ละระบบเท่ากับ 3,059, 2,923, 4,245 และ 5,384 mg/L ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของทั้ง 4 ระบบ อยู่ที่ 90.42, 89.91, 85.32 และ 81.42 % จากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ระบบที่มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d และมีประสิทธิภาพลดลงเรื่อยๆเมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันกับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ในรูปของสมการเส้นตรง ดังภาพที่ 23

ตารางที่ 11 ค่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 – 8.0 kg-COD/m³-d

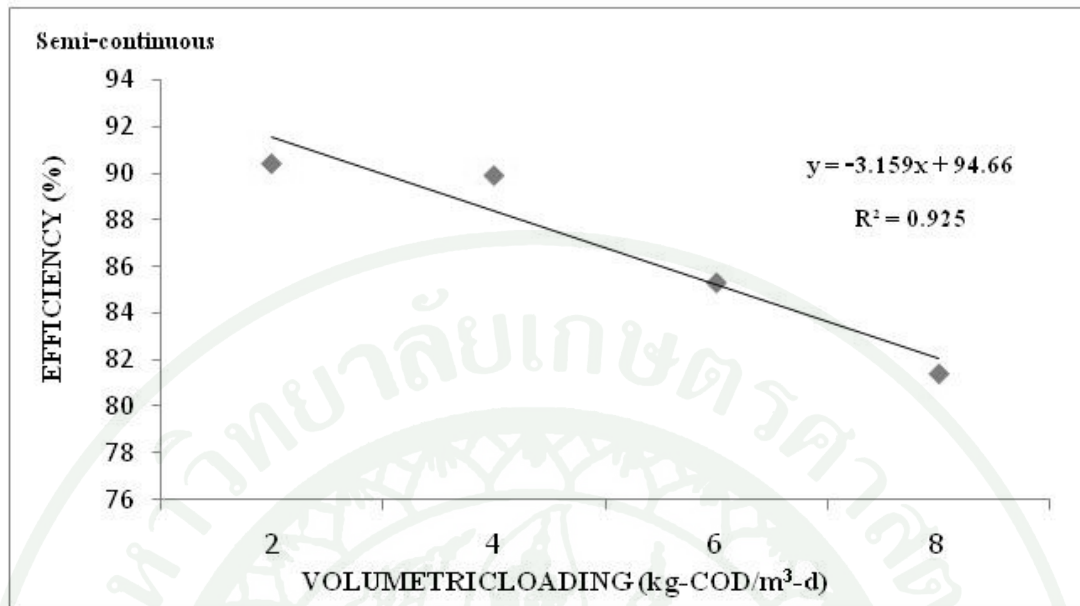
VL (kg-COD/m ³ -d)	COD (mg/l)		COD Removal (g/d)	Efficiency (%)
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)		
2.0	30,499 ± 2,176	3,059 ± 298	21 ± 0.37	90.42 ± 1.63
4.0	29,703 ± 1,439	2,923 ± 295	41 ± 0.68	89.91 ± 1.47
6.0	29,703 ± 1,439	4,245 ± 461	57 ± 2.44	85.32 ± 1.53
8.0	29,703 ± 1,439	5,384 ± 281	75 ± 2.60	81.42 ± 2.83



ภาพที่ 22 ค่า COD ของตะกอน AS ของน้ำเสียที่ออกจากระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับประสิทธิภาพการกำจัด COD (Y) ดังนี้

$$Y = -3.159X + 94.66; 2.0 < X < 8.0; R^2 = 0.925$$

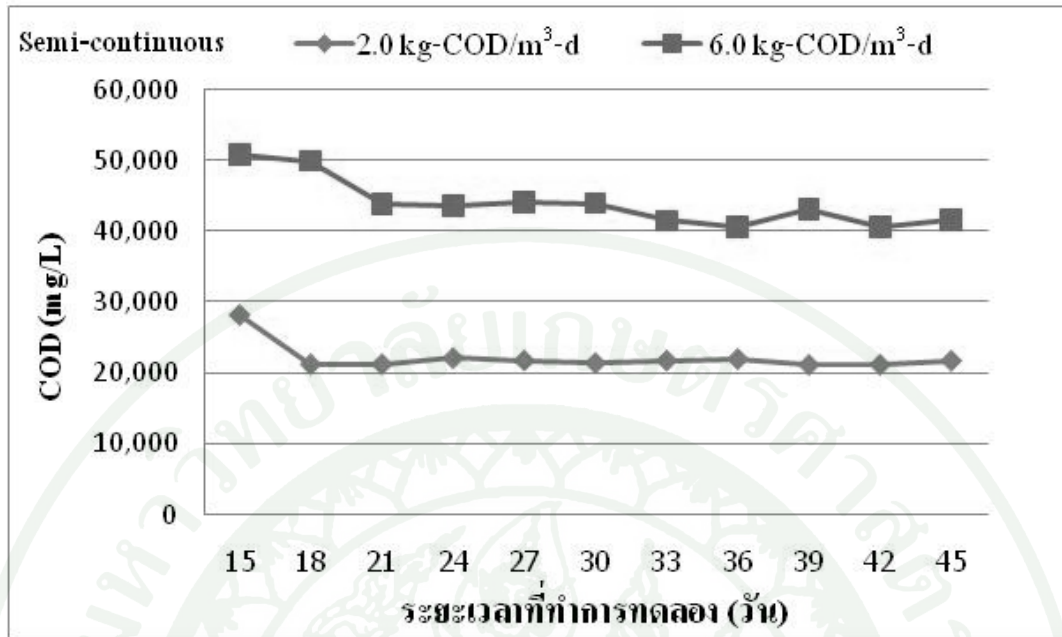


ภาพที่ 23 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

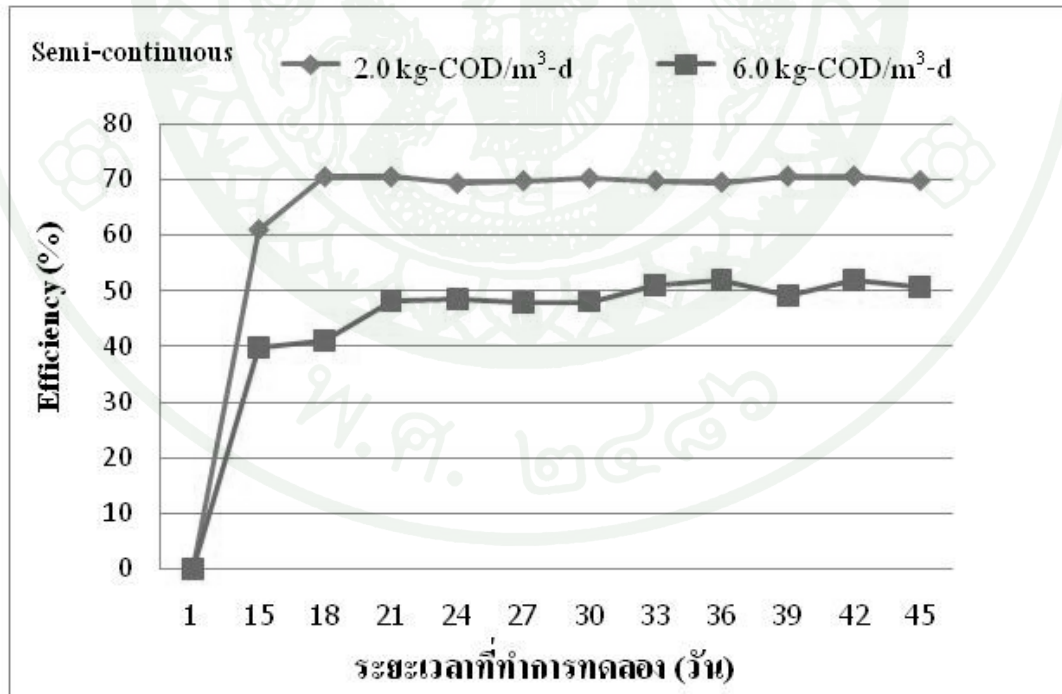
การทดลองตะกอนแป้ง ระบบบำบัดระบบบรรทุก 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่า COD เข้มข้นอยู่ในช่วง 72,534 – 84,552 mg/L และน้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของ COD ที่สถานะคงที่ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d มีค่าเฉลี่ยของแต่ละระบบเท่ากับ 21,621 และ 41,863 mg/L ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สถานะคงที่เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 70.19 และ 50.49 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระบบที่มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d และมีประสิทธิภาพลดลงที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m³-d

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d

VL (kg-COD/m ³ -d)	COD (mg/l)		COD Removal	
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	(g/d)	Efficiency (%)
2.0	72,544	21,621 ± 376	16.14 ± 0.12	70.19 ± 0.51
6.0	84,563	41,863 ± 1,305	34.84 ± 1.07	50.49 ± 1.54



ภาพที่ 24 ค่า COD ของตะกอนแป้งของน้ำเสียที่ออกจากระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

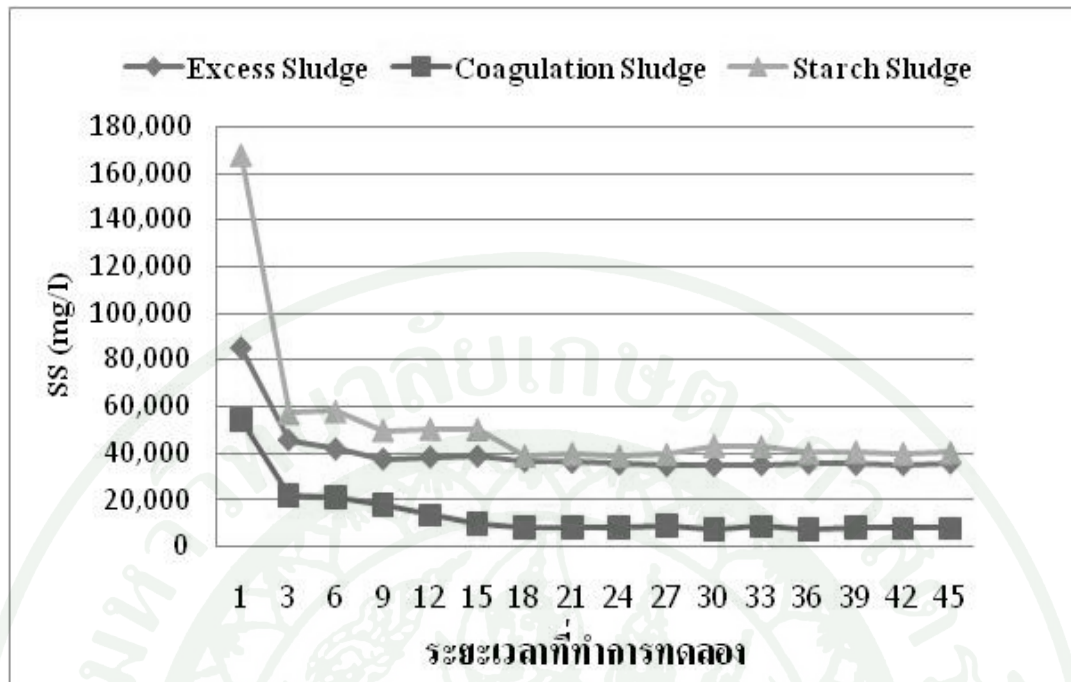
จากการศึกษาพบว่าการทดลองระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอนทั้ง 3 ชนิด และการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ของตะกอน AS มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการศึกษา (ปิยชน, 2545) การบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอาหารด้วยระบบไร้ออกซิเจนคือ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ 80-90 จากการทดลองสอดคล้องกับคำแนะนำของวรพจน์ (2549) เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าระบบเพิ่มขึ้น ภายในระยะเวลาการย่อยสลายที่กำหนดและจุลินทรีย์เท่าเดิม ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทันจึงมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ในระบบมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบจะลดลง

3.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS)

ในการทดลองระบบแบบแบทช์ (Batch) การทดลองตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง มีค่า SS ที่เข้าระบบมีค่า 42,667 mg/L, 54,163 mg/L และ 167,355 mg/L และค่า SS ของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าน้อยที่สุดของทั้งสามระบบ 34,530 mg/L, 7,060 mg/L และ 38,950 mg/L ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด SS สูงสุดของแต่ละระบบอยู่ที่ 59.42, 86.97 และ 76.73 % ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ค่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ของระบบแบบแบทช์ (Batch)

Sludge	SS (mg/l)		Efficiency (%)
	Influent	Effluent	
Excess Sludge	42,666	34,530	59.42
Coagulation Sludge	54,163	7,060	86.97
Starch Sludge	167,355	38,950	76.73



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงของ SS ของระบบแบบแบทช์ (Batch)

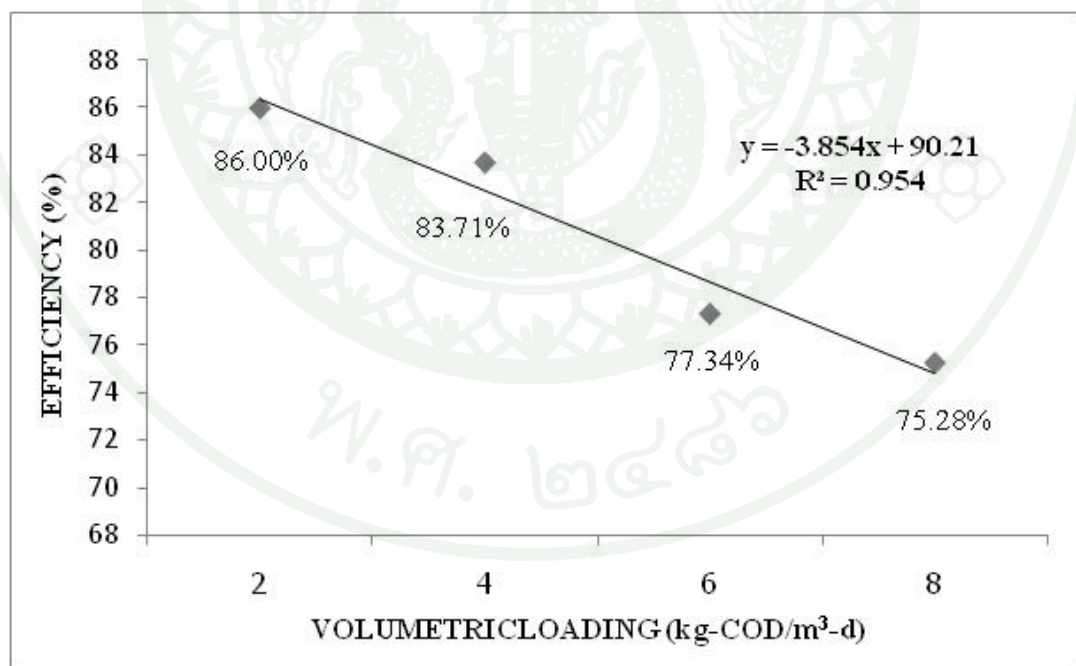
ในการทดลองระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) การทดลอง AS ระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 – 8.0 kg-COD/m³-d ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่า SS เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในช่วง 39,007 – 44,133 mg/L และค่า SS ที่ออกจากระบบที่สภาวะที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5,853, 5,646, 8,918 และ 9,921 mg/L ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด SS เฉลี่ยของทั้ง 4 ระบบมีค่า 87.16, 85.89, 78.20 และ 75.75 % จะเห็นได้ว่าที่ระบบที่มีประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d และมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น หรือประสิทธิภาพการกำจัดค่า SS มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันกับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ คือ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดค่า SS มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์กับประสิทธิภาพการกำจัดค่า SS ในรูปของสมการเส้นตรง ภาพที่ 28

ตารางที่ 14 ค่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

VL (kg-COD/m ³ -d)	SS(mg/l)		SS Removal (g/d)	Efficiency (%)
	Influent	Effluent		
2.0	39,713 ± 263	5,853 ± 683	24.94 ± 1.87	87.16 ± 2.58
4.0	39,949 ± 1,738	5,646 ± 1,156	39.51 ± 1.39	85.89 ± 3.02
6.0	40,929 ± 3,204	8,918 ± 1,283	53.96 ± 1.49	78.20 ± 2.16
8.0	40,929 ± 3,204	9,921 ± 1,581	69.69 ± 3.77	75.75 ± 4.10

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (X) กับประสิทธิภาพการกำจัด SS (Y) ดังนี้

$$Y = -3.854X + 90.21; 2.0 < X < 8.0; R^2 = 0.954$$

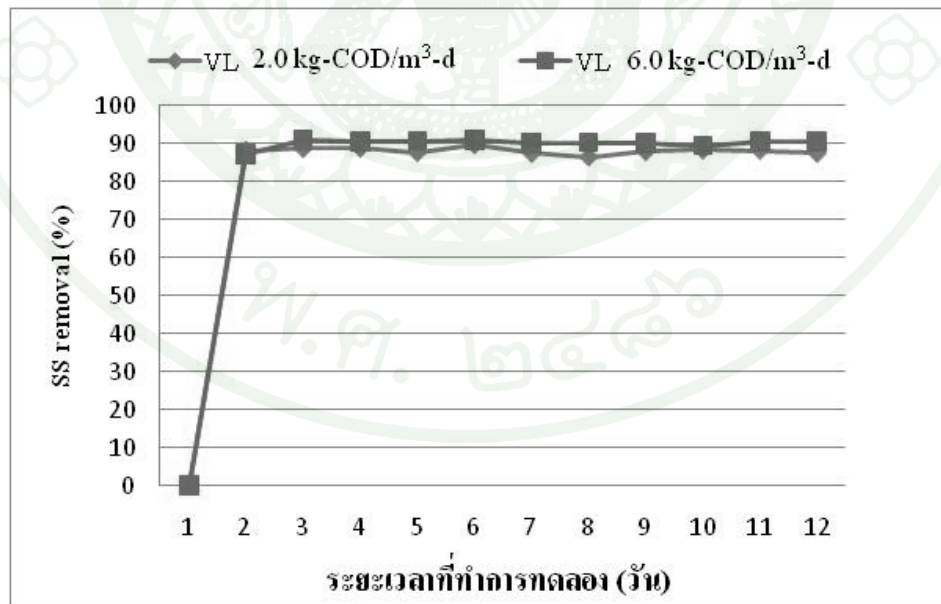


ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่สภาวะคงที่ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

การทดลองตะกอนแป้ง ระบบบำบัดระบบรรทุก 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d น้ำเสียสังเคราะห์มีค่า SS ที่เข้าระบบเข้มข้น 68,300 และ 70,800 mg/L และน้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของ SS ที่สภาวะคงที่ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8,177 และ 7,059 mg/L ตามลำดับส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด SS เฉลี่ยที่สภาวะคงที่ของทั้ง 2 ระบบอยู่ในช่วง 88.03 และ 90.03 % จะเห็นได้ว่าที่ระบบที่มีประสิทธิภาพการกำจัด SS สูงสุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d และมีประสิทธิภาพลดลงที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m³-d เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดค่า SS มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 15 ค่า SS ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด SS ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0kg-COD/m³-d

VL (kg-COD/m ³ -d)	COD (mg/l)		COD Removal (g/d)	Efficiency (%)
	Influent	Effluent		
2.0	68,300	8,177 ± 1,117	170.01 ± 29.50	89.66 ± 2.99
6.0	70,800	7,059 ± 599	576.11 ± 105.24	87.17 ± 3.13

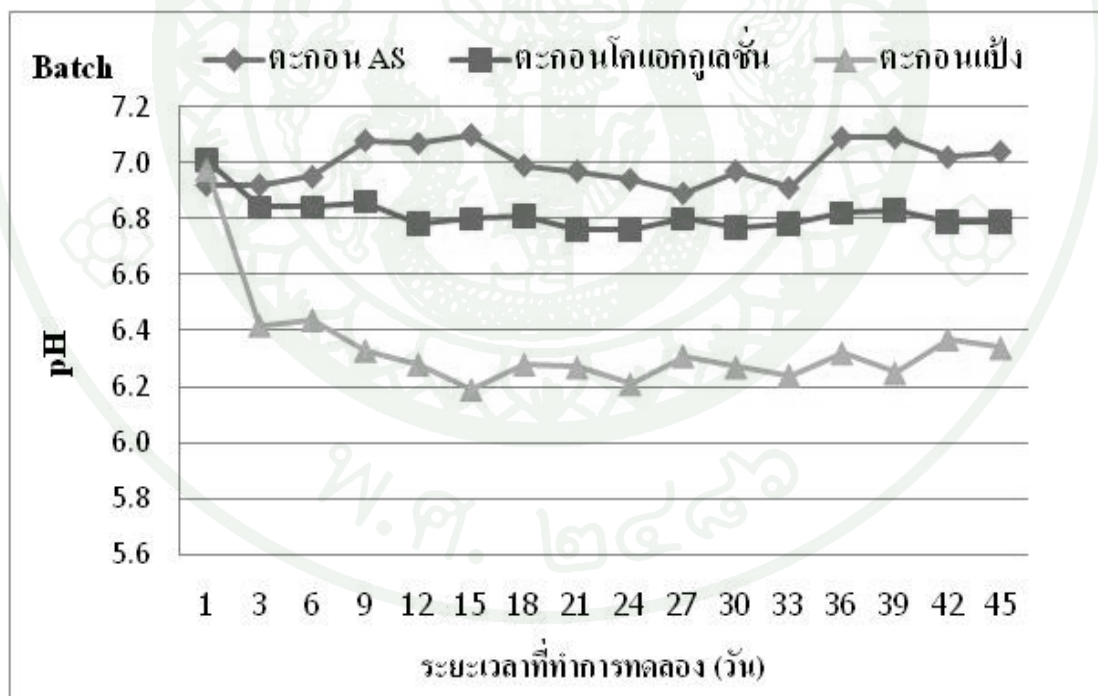


ภาพที่ 28 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด SS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

4. สภาพแวดล้อมของระบบ

4.1 พีเอช (pH)

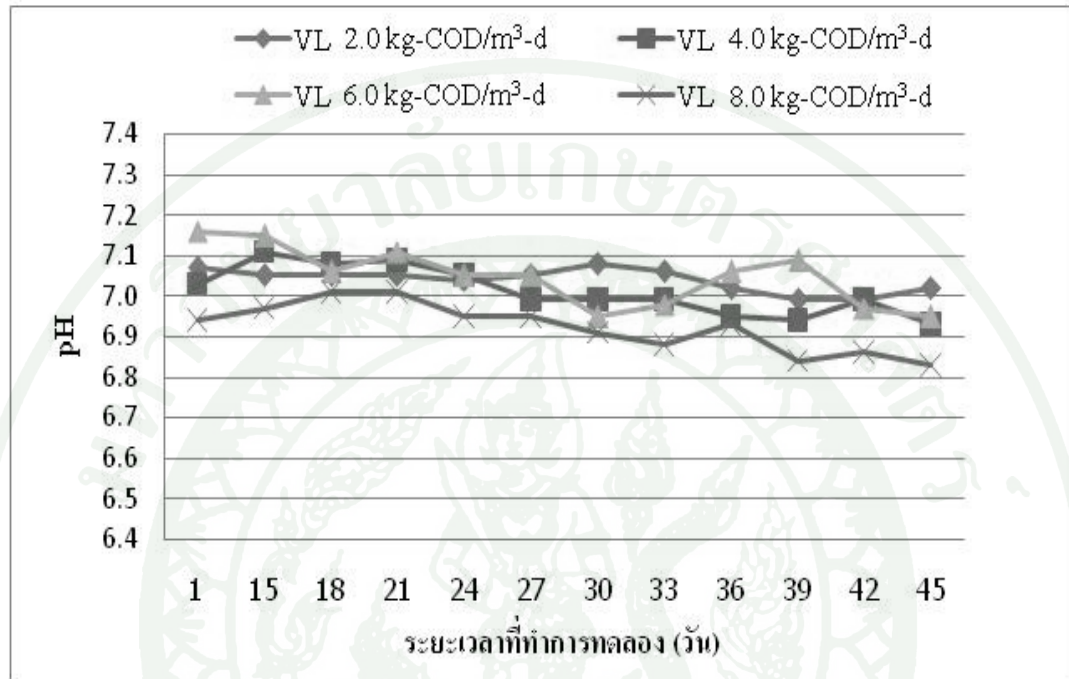
ทดลองบำบัดตะกอนตะกอนอินทรีย์จากโรงงานแปรงมันสำปะหลังจากโรงงานสยาม มอติฟายด์ สตาร์ จำกัด ด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในถัง ปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch) พีเอชของตะกอน AS ตะกอน โคนอกกุลเลชั่น และตะกอนแป้ง ก่อนเข้า ระบบจะถูกปรับพีเอชให้มีพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 (สุเทพ, 2552; เกรียงศักดิ์, 2543; Tchobanoglous *et al.*, 2004) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์ และแบคทีเรียที่สร้างมีเทน จากการทดลองพบว่าน้ำเสียในถังหมักอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 6.89 - 7.1, 6.76 – 7.01 และ 6.19 – 6.42 ตามลำดับ น้ำเสียในถังหมักไร้อากาศของตะกอนแป้งมีค่าต่ำกว่าช่วง ค่าที่เหมาะสม จึงส่งผลกระทบต่อกรสร้างมีเทน ทำให้ค่ามีเทนที่เกิดขึ้นต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัดจากการ ทดลองมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎี



ภาพที่ 29 ค่าพีเอชของตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)

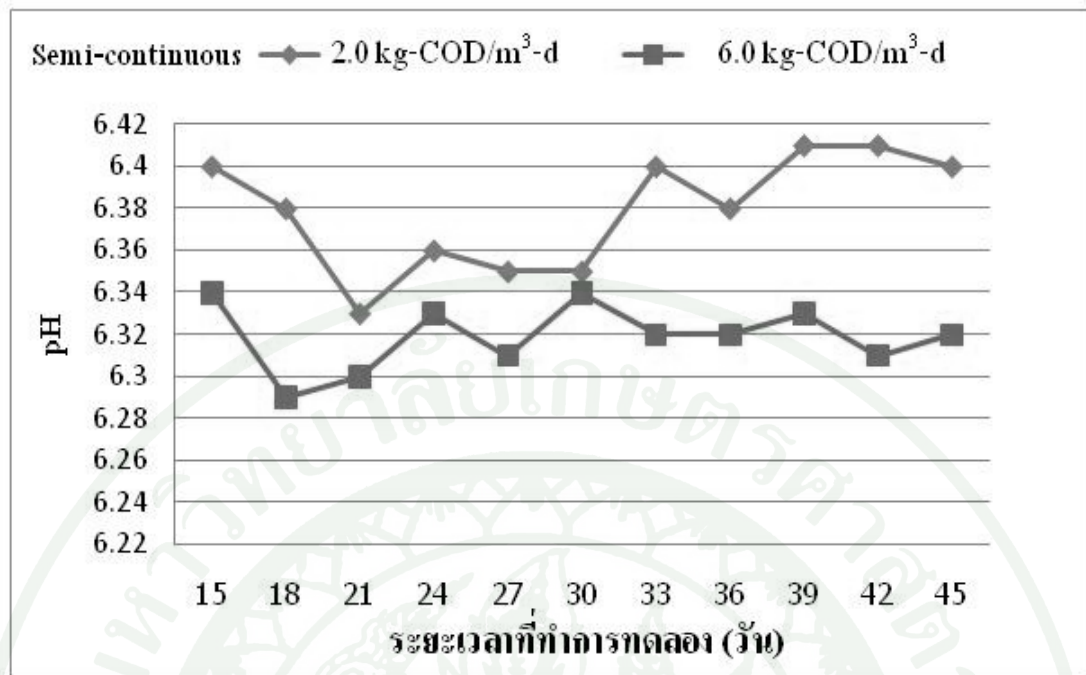
พีเอชของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตรา ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d ก่อนเข้าสู่ระบบมีค่าพีเอชทั้ง 4 ระบบ

อยู่ในช่วง 6.75 – 7.12 และพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ในช่วง 6.99 – 7.10, 6.94 – 7.13, 6.86 – 7.13 และ 6.93 – 7.03 ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d ตามลำดับ



ภาพที่ 30 ค่าพีเอชของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

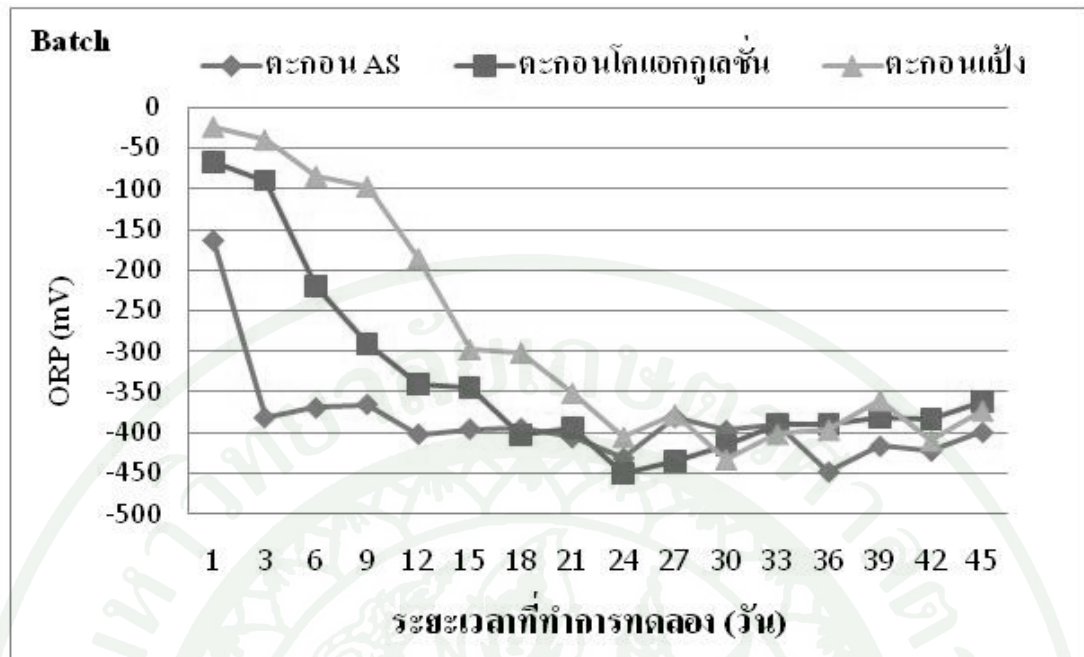
พีเอชระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d ก่อนเข้าสู่ระบบจะปรับพีเอชด้วย NaOH ให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.88 - 7.27 ทั้ง 2 ระบบ เพื่อให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนสามารถดำรงชีพอยู่ได้และเมื่อเดินระบบจะพบว่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 6.33 – 6.41 และ 6.29 – 6.34 ตามลำดับซึ่งค่า pH ของทั้งสองระบบมีค่าต่ำกว่าในช่วงที่เหมาะสมในการดำรงชีพของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogens) ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณการสร้างก๊าซมีเทน



ภาพที่ 31 ค่าพีเอชของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

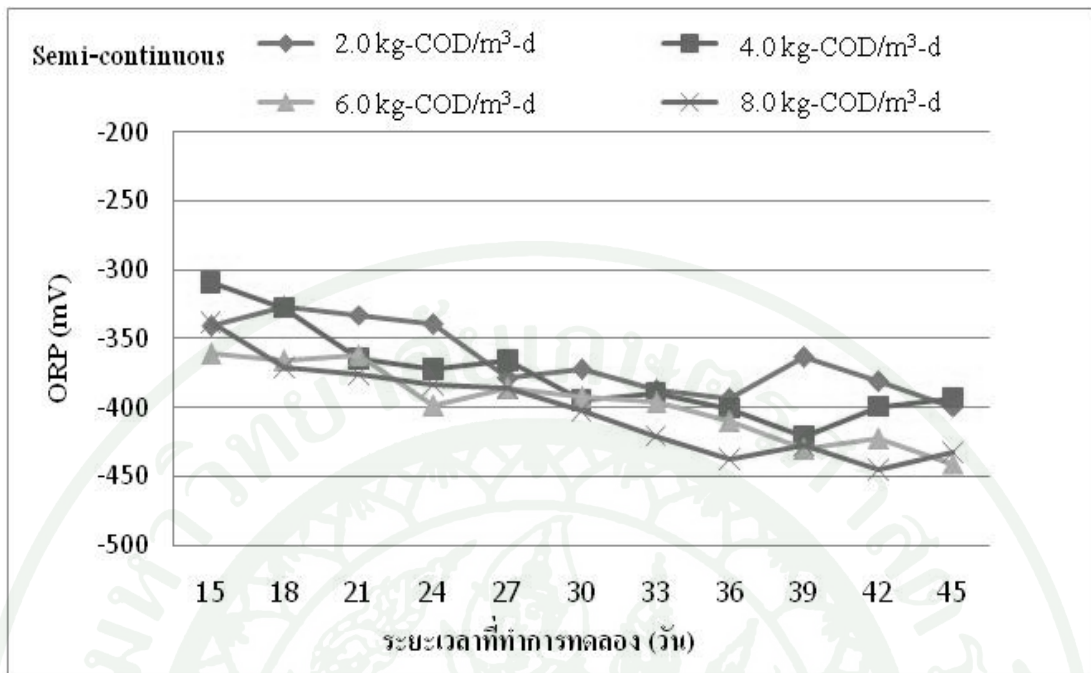
4.2 ค่า ORP (Oxidation Reduction Potential)

ค่า ORP ในถังหมักไร้อากาศจะต้องมีค่าเป็นลบ และช่วงที่เหมาะสมอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 mV จากการศึกษาในระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง เมื่อเริ่มเดินระบบ ORP มีค่า -163.8, -67.4 และ -23.7 mV จากนั้นพบว่าค่า ORP จะลดลงเรื่อยๆ และที่ระยะเวลาการทดลองที่ 45 วัน ค่า ORP ของทั้ง 3 ถัง มีค่า -399.6, -361.9 และ -373.9 mV ตามลำดับ



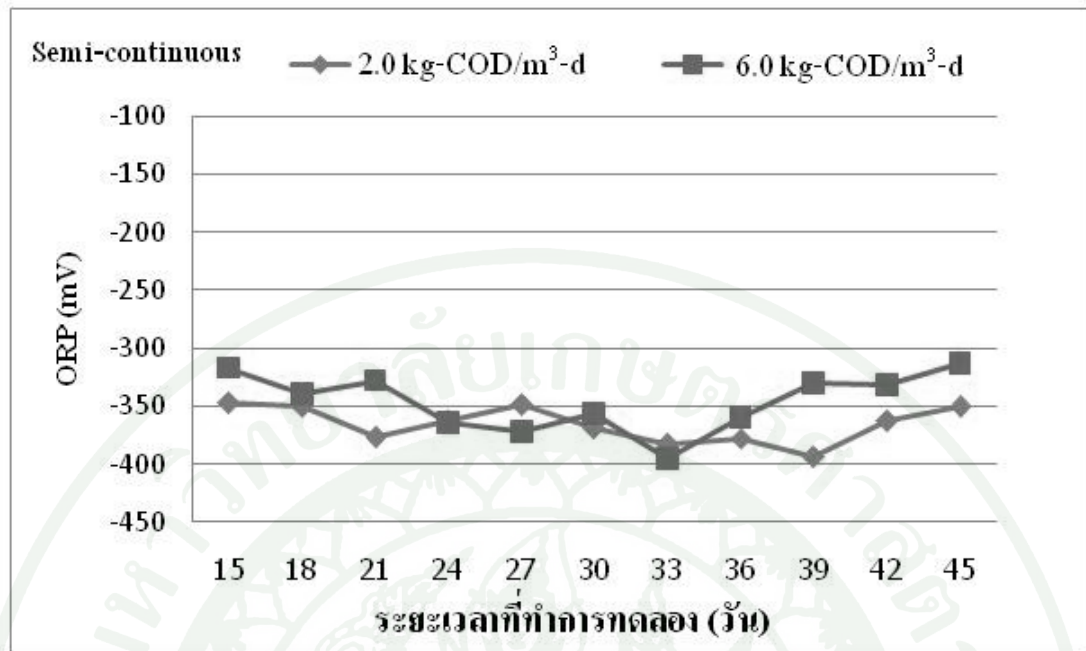
ภาพที่ 32 ค่า ORP ตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)

การทดลองระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d น้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่า ORP ทั้ง 4 ระบบ อยู่ในช่วง -26.6 – 8.0 mV น้ำที่ออกจากระบบที่สภาวะคงที่ ค่า ORP มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -347.87, -313.27, -355.48 และ -373.70 mV ตามลำดับ



ภาพที่ 33 ค่า ORP ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

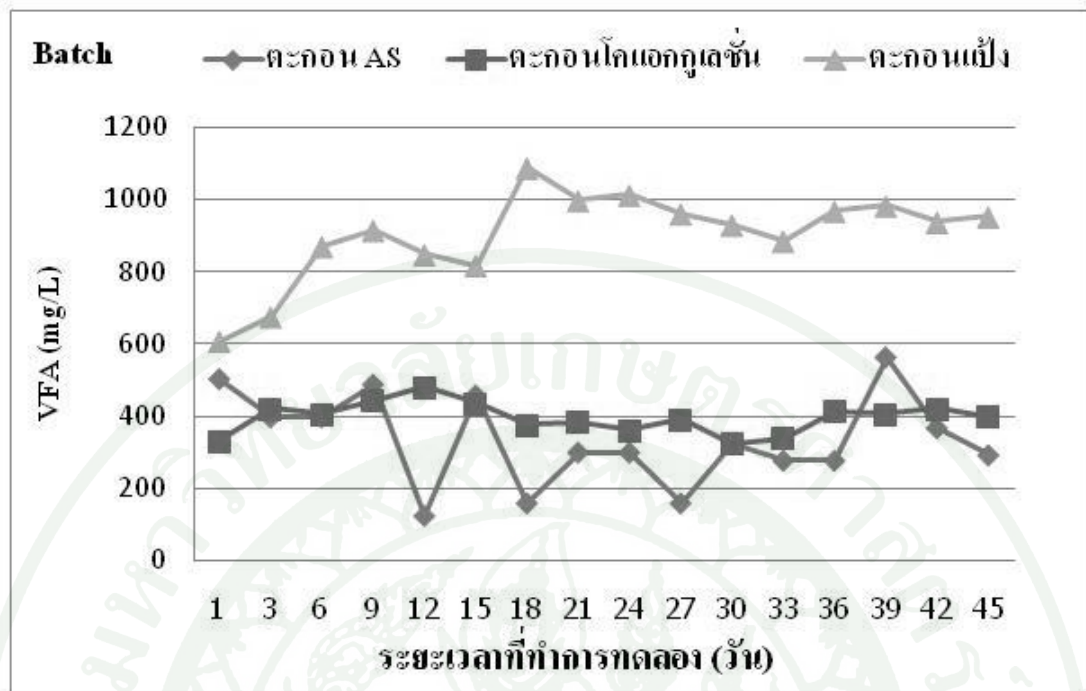
ตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d ค่า ORP ก่อนเข้าสู่ระบบมีค่า ORP ทั้ง 2 ระบบอยู่ในช่วง -22.6 – 7.5 mV น้ำที่ออกจากระบบที่สภาวะคงที่ ค่า ORP เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -347.87 และ -313.27 mV ตามลำดับ จากการทดลองการที่ค่า ORP เป็นลบ แสดงถึงระบบเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ซึ่งระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพดี ควรมีค่า ORP อยู่ในช่วง -300 ถึง -500 mV (มันสิน, 2546)



ภาพที่ 34 ค่า ORP ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

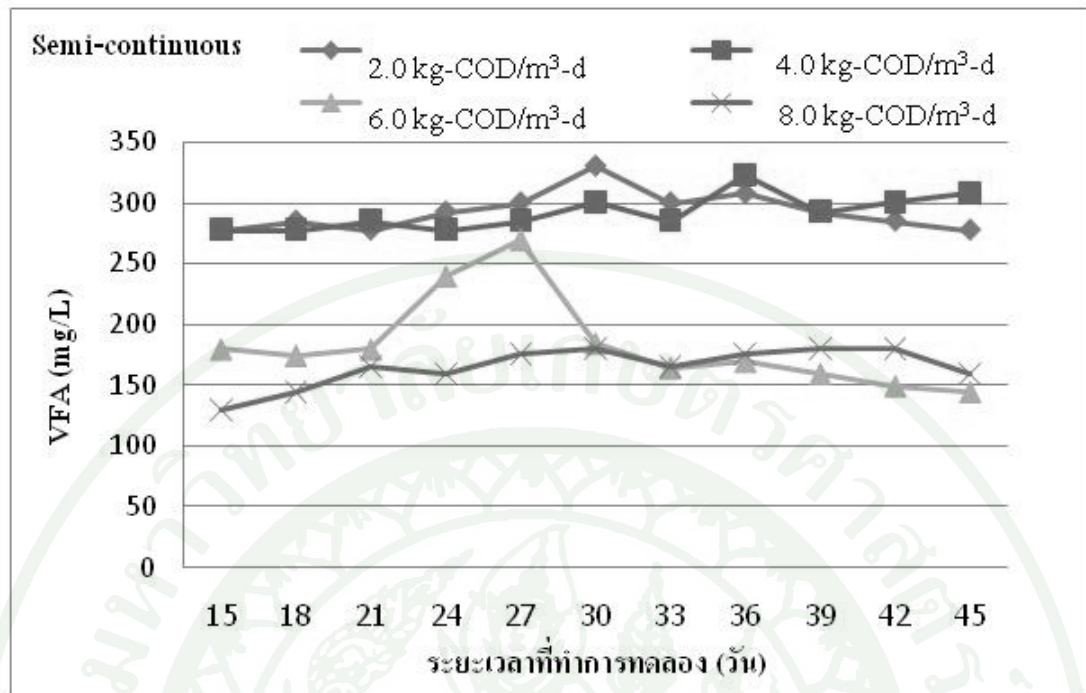
4.3 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) และความเป็นด่าง (Alkalinity)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) มีความสำคัญในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากค่า VFA ที่อยู่ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ จะบ่งชี้ถึงสภาพการทำงาน of ระบบ ว่าสามารถทำงานได้ดีหรือไม่ จากการศึกษาระบบแบบแบทช์ (Batch) พบว่าค่า VFA ที่เข้าระบบของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง มีค่า 503, 330 และ 608 mg/L as CH₃COOH และที่สภาวะคงที่ ค่า VFA เฉลี่ยของตะกอน AS ตะกอน โคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง มีค่าเท่ากับ 350, 383 และ 943 mg/L as CH₃COOH ตามลำดับ จากการทดลองของตะกอนทั้ง 3 ชนิด มีค่า VFA สูงกว่าค่าที่เหมาะสม คือ 200 mg/L as CH₃COOH (Marchaim and Krause, 1993) ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซมีเทน ทำให้มีปริมาณก๊าซมีเทนน้อย



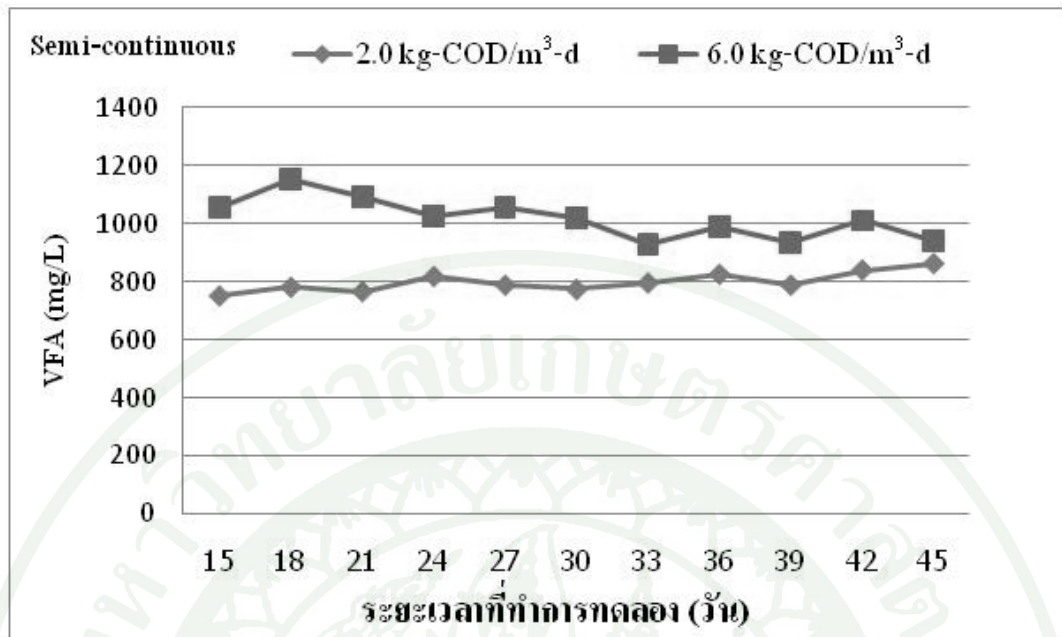
ภาพที่ 35 ค่า VFA ของตะกอนชนิดต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch)

ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d พบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่า VFA 300, 125, 110 และ 130 mg/L as CH₃COOH และเมื่อเดินระบบน้ำเสียที่ออกจากระบบที่สภาวะคงที่มีค่า VFA เฉลี่ยเท่ากับ 299, 301, 163 และ 173 mg/L as CH₃COOH ตามลำดับ จากการทดลอง ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 4.0 kg-COD/m³-d พบว่ามีค่า VFA สูงกว่าค่าที่เหมาะสมเล็กน้อย และสามารถเดินระบบต่อไปได้โดยระบบไม่ล้มเหลว แต่หากมีค่า VFA มากกว่า 2,000 mg/L as CH₃COOH จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลง (มันสิน, 2546)



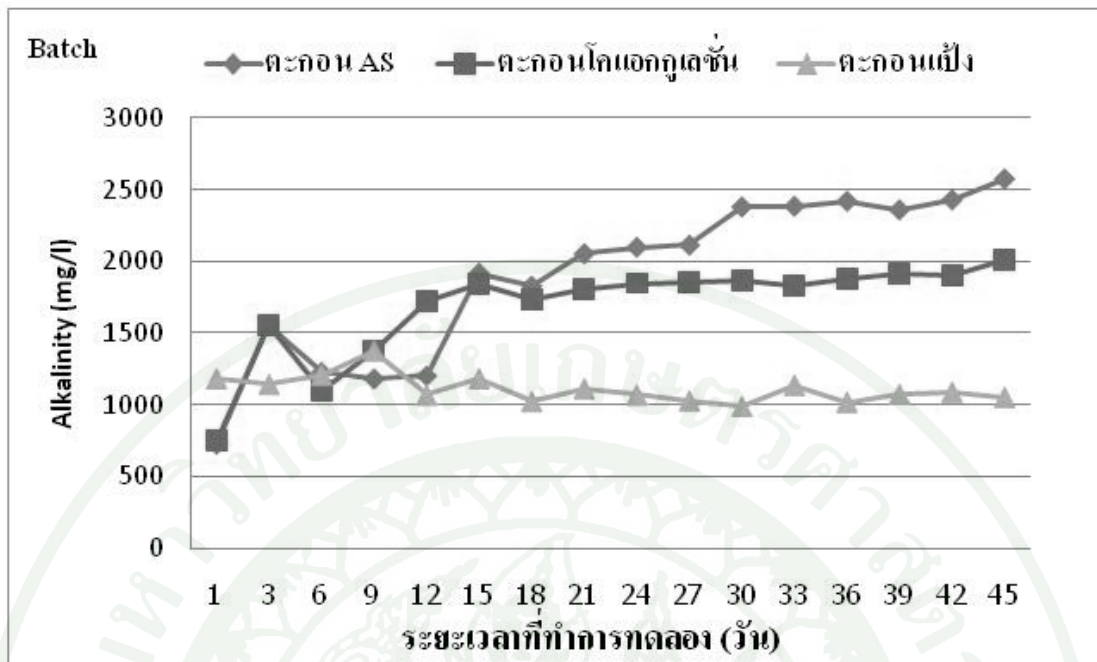
ภาพที่ 36 ค่า VFA ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d พบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่า VFA 1,028 และ 938 mg/L as CH₃COOH และน้ำเสียที่ออกจากระบบที่สภาวะคงที่มีค่า VFA เฉลี่ยเท่ากับ 814 และ 973 mg/L as CH₃COOH ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ค่า VFA ของทั้ง 2 ระบบมีค่าสูงกว่าค่า VFA ที่เหมาะสม โดยการสะสมของ VFA ในระบบเป็นผลมาจากแบคทีเรียสร้างกรดผลิตกรดมากกว่าความต้องการใช้ของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ทำให้กรดที่ผลิตเกินความต้องการ หากค่า VFA ในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และถ้าระบบมีปริมาณ VFA ในรูปของกรดอะซิติกมีค่าตั้งแต่ 8,000 – 10,000 mg/L ขึ้นไป จะมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง



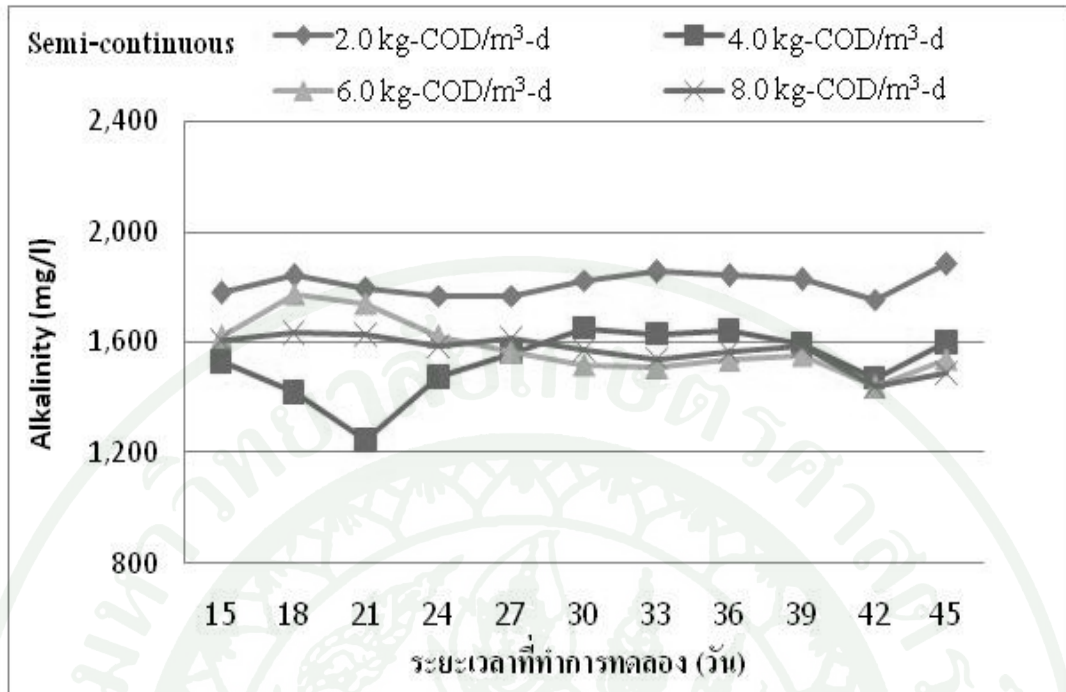
ภาพที่ 37 ค่า VFA ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง

ค่า Alkalinity เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสีย ในถึงปฏิกรณ์ ระบบการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยทั่วไปค่า Alkalinity อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตโดยทั่วไปจะทำงานได้ดีเมื่อค่าอยู่ในช่วง 2,000 – 3,000 mg/L (Metcalf & Eddy, 2004) ในการทดลอง ค่า Alkalinity ของระบบมาจากการเติมสารละลาย NaOH เพื่อปรับ pH ของน้ำเสียก่อนที่จะเข้าระบบให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์และแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (สุเทพ, 2552; เกรียงศักดิ์, 2543; Tchobanoglous *et al.*, 2004) จากการทดลองพบว่า ค่า Alkalinity เมื่อเริ่มต้นการทดลองในการทดลองระบบแบบเบทซ์ของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง มีค่า 725, 750 และ 1,185 mg/L as CaCO₃ และที่สภาวะคงที่ ค่า Alkalinity เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2,420, 1,975 และ 1,062 mg/L as CaCO₃



ภาพที่ 38 ค่า Alkalinity ของตะกอนชนิดต่างๆของระบบแบบแบทช์ (Batch)

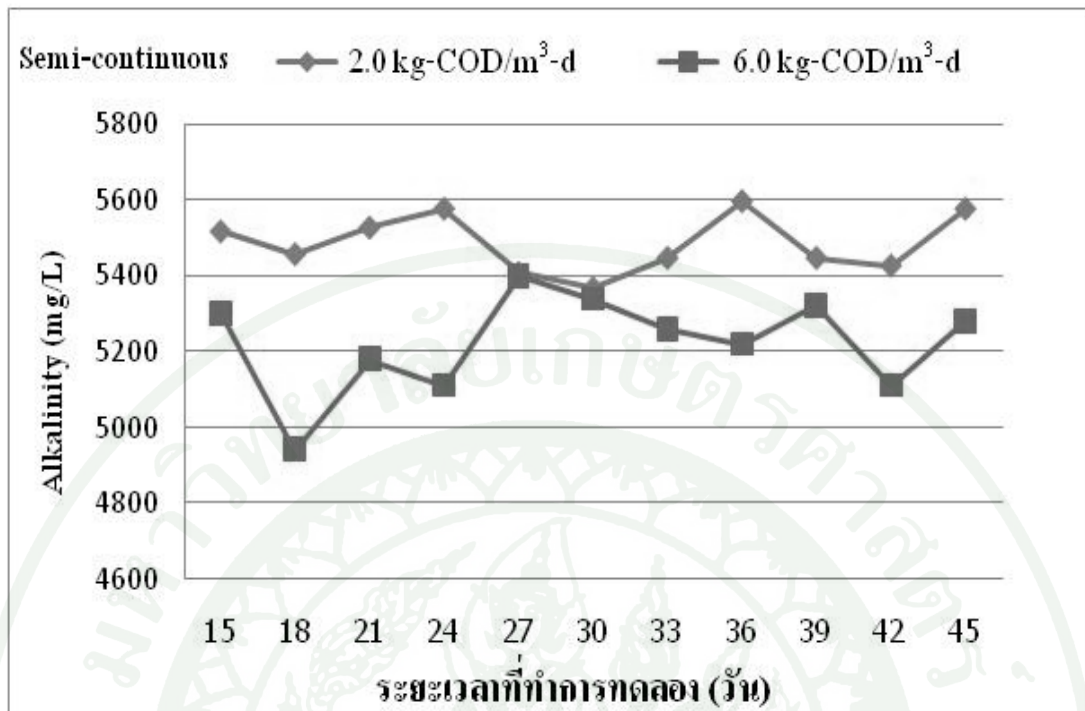
ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่า Alkalinity เท่ากับ 1,960, 725, 590 และ 895 mg/L as CaCO₃ ที่สภาวะคงที่น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่า Alkalinity เฉลี่ยเท่ากับ 1,832, 1,597, 1,517 และ 1,532 mg/L as CaCO₃ ตามลำดับ จากผลการทดลองดังภาพที่ 38 จะเห็นได้ ค่า Alkalinity มีค่าอยู่ในช่วงตามคำแนะนำสำหรับการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ 1,500 – 2,000 mg/L as CaCO₃ (มันสิน, 2546)



ภาพที่ 39 ค่า Alkalinity ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ๆ

ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่า Alkalinity เท่ากับ 3,040 และ 4,015 mg/L as CaCO₃ และที่สภาวะคงที่น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่า Alkalinity เฉลี่ยเท่ากับ 5,480 และ 5,255 mg/L as CaCO₃ จากภาพที่ 39 จะเห็นได้ว่า ค่า Alkalinity จากการทดลองมีค่าสูงกว่าคำแนะนำสำหรับการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ 1,500 – 2,000 mg/L as CaCO₃ (มันสิน, 2546)

โดย Alkalinity ในระบบจะมาจากการเติมสารละลาย NaOH เพื่อปรับพีเอชน้ำเสียให้มีค่าใกล้เคียงกับ 7.00 ก่อนที่จะป้อนเข้าระบบ ทำให้ Alkalinity มีปริมาณค่อนข้างจำกัด เมื่อเทียบกับปริมาณ VFA ที่ระบบสามารถผลิตได้เองจากแบคทีเรียสร้างกรด และปริมาณ alkalinity ที่จะถูกใช้ในการสะเทิน VFA นั้น จะเท่ากับปริมาณ VFA ที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากจำนวนโมลที่เข้าทำปฏิกิริยาของ VFA และ Alkalinity เป็นแบบ 1 ต่อ 1

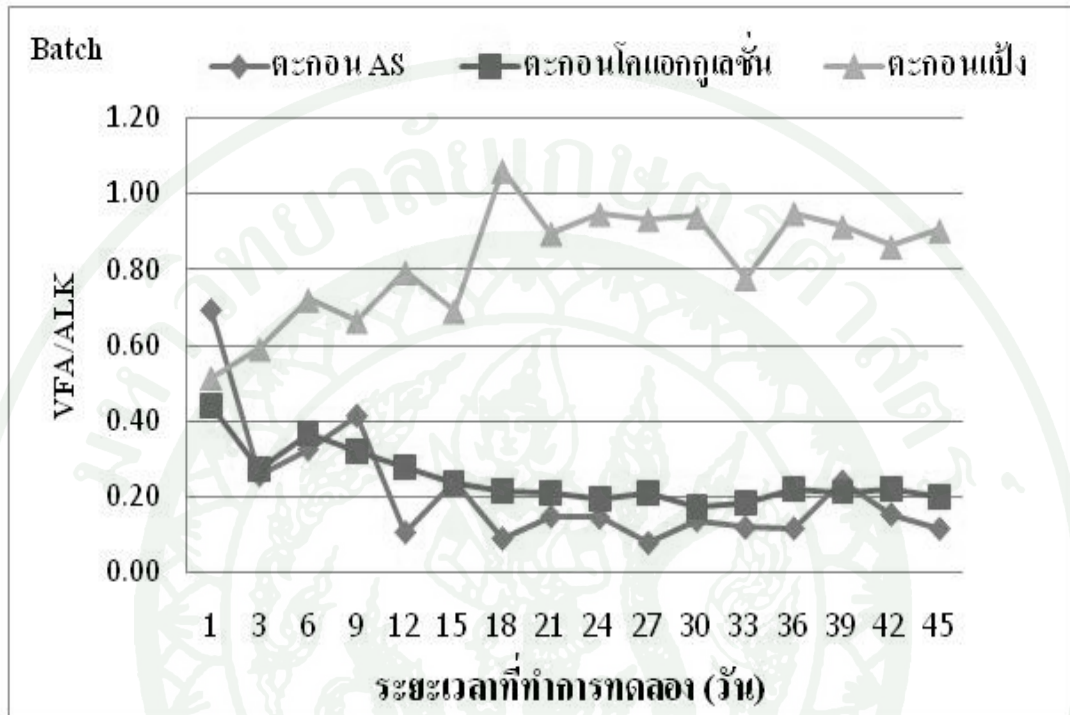


ภาพที่ 40 ค่า Alkalinity ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

ถ้าเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) เพิ่มขึ้น (อัตราน้ำเข้ามากขึ้น) แบคทีเรียสร้างกรดก็จะสร้างกรดเกินความต้องการของแบคทีเรียสร้างมีเทนปริมาณมาก ทำให้ Alkalinity ที่เติมให้ระบบไม่เพียงพอ ระบบจึงต้องดึง Alkalinity ที่ถูกสะสมไว้มาสะเทินกับกรด จำนวนนี้ จนในที่สุดปริมาณ Alkalinity จะลดลงเรื่อยๆ ดังนั้น ในการควบคุมระบบบำบัดแบบไร้อากาศจึงจำเป็นต้องหาค่า อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสีย เพื่อให้แบคทีเรียสร้างกรด ผลิตกรดในปริมาณที่น้อยกว่าหรือเท่ากับความต้องการใช้แบคทีเรียสร้างมีเทน เพื่อป้องกันการเกิดกรดสะสมขึ้นในระบบ

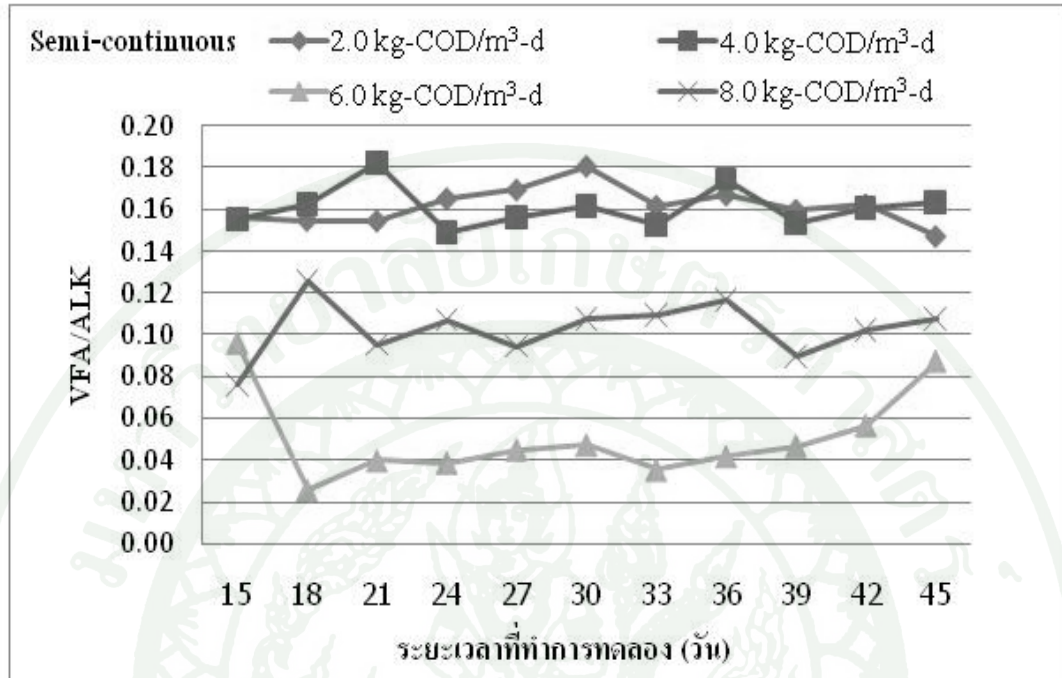
ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชขึ้นอยู่กับอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity) ในระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่า VFA/Alkalinity ทั้ง 3 มีระบบ มีค่า 0.7, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ และที่สภาวะคงที่ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.9 ตามลำดับ จากภาพที่ 40 ที่สภาวะคงที่ อัตราส่วน VFA/Alkalinity ของตะกอน AS และตะกอนโคแอกกูเลชัน มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีสภาพต่างอยู่ในระดับที่

ระบบสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ดี (McCarty, 1986) และตะกอนแป้ง มีค่า VFA/Alkalinity มากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีบัฟเฟอร์ต่ำ และค่า pH อาจลดลงอย่างรวดเร็ว (มันสิน, 2546) จึงต้องเติม NaOH เพื่อปรับ pH



ภาพที่ 41 ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอนชนิดต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch)

การทดลองระบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 kg-COD/m³-d เมื่อเริ่มต้นการทดลอง ค่า VFA/Alkalinity ของทั้ง 4 ระบบ มีค่า 0.1, 0.3, 0.2 และ 0.3 ตามลำดับ และที่สภาวะคงที่น้ำเสียที่ออกจากระบบหลังการบำบัดค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยของแต่ละระบบมีค่าเท่ากับ 0.2, 0.1, 0.1 และ 0.1 ซึ่งทั้ง 4 ระบบ มีอัตราส่วน VFA/Alkalinity มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพในการทำงานและมีบัฟเฟอร์สูง และไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ ในการปรับสภาพต่าง ถึงแม้ว่าสภาพต่างของระบบจะสูงกว่าคำแนะนำ คือ 1,500 – 2,000 mg/L as CaCO₃ (มันสิน, 2546) ก็ตาม

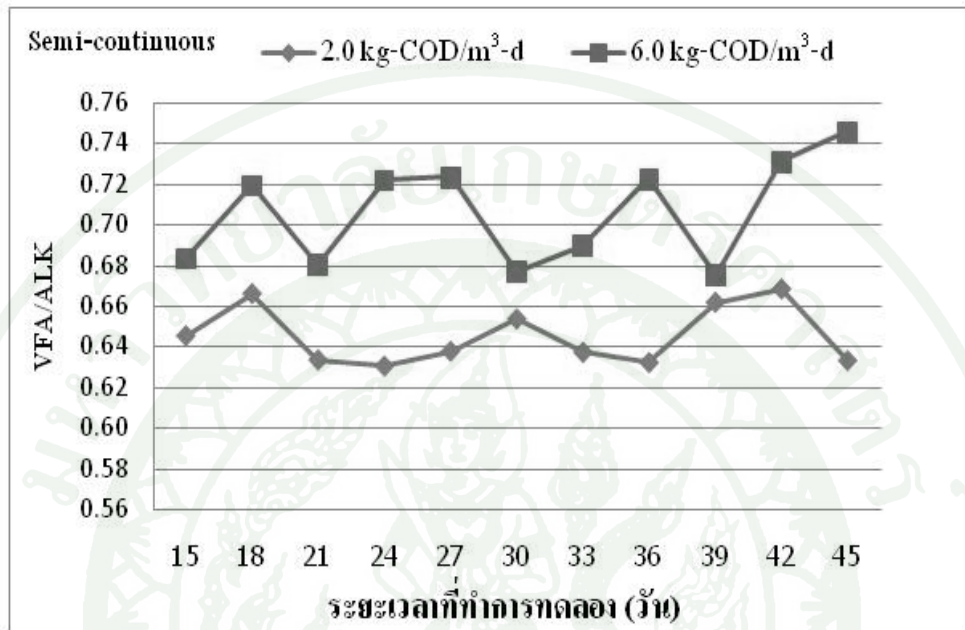


ภาพที่ 42 ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ฯ

ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่า VFA/Alkalinity ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.2 และที่สภาวะคงที่ น้ำเสียที่ออกจากระบบหลังการบำบัดค่า VFA/Alkalinity ของแต่ละระบบ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.65 และ 0.71 ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้ง 2 ระบบ มีอัตราส่วน VFA/Alkalinity มีค่ามากกว่า 0.4 ถือว่าระบบมีบัฟเฟอร์สูง ซึ่งมีปริมาณ Alkalinity ไม่เพียงพอที่จะใช้ในการสะเทิน VFA ที่เกิดขึ้น ค่าพีเอชอาจลดลงอย่างรวดเร็ว จึงต้องเติมสารละลาย NaOH เพื่อปรับ pH ของน้ำเสียก่อนที่จะเข้าระบบ

การพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่าของ VFA/Alkalinity ในการพิจารณาควรมีอัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.4 (มันสิน, 2546) จึงจะจัดว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงและไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดกรดในปริมาณที่สูงจนทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Borja et al., 2001) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่าง VFA/Alkalinity จะแสดงให้เห็นว่าระบบกำลังจะเสถียรสมดุล กำลังบัฟเฟอร์ของระบบที่มีอยู่เริ่มลดลงและอาจไม่เพียงพอ จากการศึกษาระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของตะกอนแป้ง

พบว่าค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity สูงกว่าค่าที่เหมาะสม จึงส่งผลต่อการผลิตก๊าซมีเทน ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี คือ ร้อยละ 50 – 68 (สมชัย, 2548)



ภาพที่ 43 ค่า VFA/Alkalinity ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของโรงงานแปรงมันสำปะหลัง สยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด ด้วยการระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ ระบบแบบแบทช์ (Batch) ซึ่งใช้ตะกอน AS ตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอน แป้งและระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Flow) ซึ่งใช้ตะกอน AS และตะกอนแป้ง ใน ระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) วิเคราะห์ตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพจากการย่อย สลายตะกอนอินทรีย์ของระบบแบบแบทช์ (Batch) ตะกอนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตะกอน AS ตะกอนโค แอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง พบว่า ตะกอน AS มีการสะสมก๊าซมีเทนสูงสุด 60.81 % ปริมาณก๊าซ ชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.361 L/g-COD_{re} ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนัก ตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.220 L/g-COD_{re} และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Flow) ของตะกอน AS ที่ค่าการะบรทุกสารอินทรีย์ทั้ง 4 ระบบ ที่สภาวะคงที่ของแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.035, 0.031, 0.039 และ 0.040 L/g-COD_{re} ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดมี ค่าเท่ากับ 0.012, 0.012, 0.015 และ 0.018 L/g-COD_{re} ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการะบรทุก สารอินทรีย์ 2 kg-COD/m³-d เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ ถูกกำจัดมีค่าต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการะบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Flow) ของตะกอนแป้ง พบว่ามีปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ที่อัตรา การะบรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 6.0 kg-COD/m³-d มีค่าเท่ากับ 15.63 และ 23.05 % ปริมาณก๊าซ ชีวภาพต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของแต่ละระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 0.160 และ 0.086 L/g-COD_{re} ปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่สภาวะคงที่ของแต่ละ ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.025 และ 0.020 L/g-COD_{re} ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน และปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักตะกอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ 2.0 kg-COD/m³-d ต่ำกว่าที่อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ 6.0 kg-COD/m³-d

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาและตรวจสอบชนิดของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ
2. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Operation) เพื่อเปรียบเทียบ กับการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Operation)
3. ควรศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยมีตัวกลางในการยึดเกาะ เพื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดแบบไม่มีตัวกลางในการยึดเกาะ
4. ควรศึกษาความเหมาะสมของตะกอน Excess Sludge จากกระบวนการ AS หลังผ่านเครื่องรีด ตะกอนตะกอนโคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง และความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อพัฒนา และนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2554. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่
ที่ 2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2546. วิชาการระบบบำบัดน้ำเสีย
แบบไม่ใช้อากาศ. (คู่มือ). เล่มที่ 1. กรมควบคุมมลพิษฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและ
ห้องปฏิบัติการ, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2545. น้ำเสียชุมชนและ ระบบ
บำบัดน้ำเสีย. แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html, 10 ตุลาคม
2555.

นิลวรรณ ไชยทนต์. 2552. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักไร้อากาศ
แบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มงคล คำรงค์ศรี. ม.ป.ป. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน. เอกสารประกอบการเรียน.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

มันสิน ต้นทุลเทศม์. 2534. การกำจัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน, น. 311-319. ในเอกสาร
ประกอบการฝึกอบรมผู้ควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสียครั้งที่3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพฯ.

มันสิน ต้นทุลเทศม์. 2546ก. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเล่มที่ 1. เลขทะเบียนคพ.
08-020 เล่มที่ 3/4. กรมควบคุมมลพิษ.

มันสิน ต้นทุลเทศม์ และ มันรัชต์ ต้นทุลเทศม์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. ครั้งที่ 2.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ. 2552. เทคโนโลยีน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. ม.ป.ป. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: กรมโรงงาน
อุตสาหกรรม

ชั้นวานี จิใจ. 2549. การบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์แบบยัดเกาะตัวกลางชนิดเส้นใยในลอนโดย
ระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรทัย ชวาลภาฤทธิ. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. ครั้งที่ 1 สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่ง
ประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

อดิศักดิ์ ไกล่ผล และเพ็ญพร จริงรินวบุตร. 2546. แนวทางการบำบัดน้ำเสียของฟาร์มสุกรด้วย
ระบบก๊าซชีวภาพ กรณีศึกษา ฟาร์มสุกร อำเภอศรีมหาโพธิ์จังหวัดปราจีนบุรี. วิทยานิพนธ์,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สินีนุช ศศิยศชาติ. 2544. บทบาทของสภาพต่างต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุมและการ
แก้ปัญหา. สำนักพิมพ์ที่อุป, กรุงเทพฯ. 417 น.

สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. 2550. อนุรักษ์พลังงาน. แหล่งที่มา:
<http://www.eppo.go.th/index-T.html>, 2 มกราคม 2551

ชิตชนก คงแดง. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับหมุ่สุกรสำหรับใช้
ในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จิรวัดน์ ชาลีวรรณ. 2546. ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้อากาศ
อัตราการย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อริยา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะ
ไร้อากาศแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2546ข. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเล่มที่ 1. เลขทะเบียน คพ. 08-020
เล่มที่ 3/4. กรมควบคุมมลพิษ

สุริยะ สะวานนท์. 2539. การศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายมูลสุกรด้วยแบคทีเรียอีเอ็มกับ
แบคทีเรียผลิตมีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรพจน์ รัตนพันธ์. 2549. สถานะการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเส้นขนนมจืดโดยระบบแอนแอโรบิก
คอนแทค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารประกอบ โครงการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ.
2549. คู่มือปฏิบัติงานที่ดีของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรม. โครงการ
พัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ สำนักวิจัยค้นคว้า
พัฒนา กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

อวิศา ฉลาณวัฒน์. 2545. อิทธิพลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการ
ผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิต
ก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552.

วัดสา ใจแน่น. การเพิ่มอุณหภูมิของบ่อหมักโดยการใช้ความร้อนทั้งจากเครื่องยนต์ และจากการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพโดยตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.

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

Banik, S, Magbanua, Jr., Thomas, T., Adams., Johnston, Phillip : **Anaerobic Codigestion of hog and poultry waste.** Bioresource Technology, 76: 165-168, 2001.

Fernandez, A., Sanchez, A., Font, X : **Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin.** Biochemical Engineering Journal, 26: 22-28, 2005.

Gerardi, M.H. 2003. **The microbiology of anaerobic digesters.** John Wiley & Son, New Jersey.

Chiu-Yue Lina, Chao-Chi Chang, Chun-Hsiung Hung. 2008. **Fermentative hydrogen production from starch using natural mixed cultures.** International Journal of Hydrogen Energy 33 : 2445-2453

Lei Sun, Shungang Wan, Zebin Yu, Yinghui Wang, Shuangfei Wang. 2012. **Anaerobic biological treatment of high strength cassava starch wastewater in a new type up-flow multistage anaerobic reactor.** Bioresource Technology 104:280-288

Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Christopoulou, N. and Goumenaki, M : Optimization of biogas production from olive-oil mill wastewater, by codigesting with diluted poultry-manure. Applied Energy, 84: 646-663, 2007.

McCarty, 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals: Part Three, Public Workers, pp. 91-94.

Metcalf and Eddy. 2003. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 4 rd.

McGraw – Hill

Mignone, A.N. 2005. **Biological Inhibition/ Toxicity Control In Municipal Anaerobic Digestion Facilities**, [http://www.awpca.net/Biological Inhibition.pdf](http://www.awpca.net/Biological%20Inhibition.pdf), July, 2005

USEPA. **Data Base for Influent Heavy Metals In Publicly Owned Treatment Works**, MERL, Cincinnati OH. 45258.

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

Sosnowski, P., Wieczorek, A. and Ledakowicz, S., 2003. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Adv. Environ. Res.* 7, 609–616.

Rene, A. and Gunnar, L. 2007. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, 33(4), 726-734.

Price, E.C. and P.N. Cheremisinoff. 1981. **Biogas Production and Utilization**. Ann. Arbor. Sci. Inc., Michigan.

Kaparaju, P., Rintala, J. 2005. **Anaerobic codigestion of potato tuber and its industrially products with pig manure**. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2): 175-188.

Lehtomaki, A. 2006. **Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues**. Jyvaskyla: Univesity of Jyvaskyla, 91 p.

Pagilla, K.R., Kim, H. and Cheunbarn, T. 2000. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste. **Water Research**. 34(10), 2747-2753.





ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch)
ของตะกอน AS

Day	INFLUENT		EFFLUENT	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
1	42,666	85,100	-	-
3	-	-	40,574	45,525
6	-	-	38,725	41,670
9	-	-	36,272	37,375
12	-	-	34,729	38,190
15	-	-	32,873	38,610
18	-	-	29,702	36,450
21	-	-	26,736	35,930
24	-	-	24,622	35,210
27	-	-	22,341	34,530
30	-	-	18,910	34,530
33	-	-	15,787	34,890
36	-	-	11,264	35,520
39	-	-	9,790	35,030
42	-	-	8,774	34,900
45	-	-	8,398	35,660
average	-	-	12,154	35,088

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch)
ของตะกอนโคแอกกูเลชั่น

Day	INFLUENT		EFFLUENT	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
1	17,436	85,100	17,436	-
3	-	-	15,279	45,525
6	-	-	14,321	41,670
9	-	-	12,784	37,375
12	-	-	10,990	38,190
15	-	-	9,961	38,610
18	-	-	8,533	36,450
21	-	-	7,357	35,930
24	-	-	6,205	35,210
27	-	-	4,934	34,530
30	-	-	3,253	34,530
33	-	-	2,369	34,890
36	-	-	1,570	35,520
39	-	-	1,550	35,030
42	-	-	1,427	34,900
45	-	-	1,422	35,660
average	-	-	1,932	35,088

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบแบทช์ (Batch)
ของตะกอนแป้ง

Day	INFLUENT		EFFLUENT	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)
1	176,666	85,100	176,666	-
3	-	-	149,333	45,525
6	-	-	140,768	41,670
9	-	-	130,856	37,375
12	-	-	123,267	38,190
15	-	-	116,586	38,610
18	-	-	111,974	36,450
21	-	-	98,888	35,930
24	-	-	93,521	35,210
27	-	-	78,069	34,530
30	-	-	69,649	34,530
33	-	-	58,543	34,890
36	-	-	56,839	35,520
39	-	-	55,188	35,030
42	-	-	54,198	34,900
45	-	-	53,198	35,660
average	-	-	57,936	35,088

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
2 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	29,026	45,774	5,585	5,140	80.76	88.77
18	29,026	45,774	3,746	5,400	87.09	88.20
21	29,026	45,774	4,163	5,970	85.66	86.96
24	29,026	39,450	3,466	4,050	88.06	89.73
27	29,026	39,450	3,567	4,290	87.71	89.13
30	29,026	39,945	3,357	5,110	88.43	87.21
33	32,676	39,945	2,598	5,360	92.05	86.58
36	32,676	39,945	2,903	5,570	91.12	86.06
39	32,676	39,655	3,007	5,740	90.80	85.53
42	32,676	39,655	3,245	5,530	90.07	86.05
45	32,676	39,655	3,245	5,170	90.07	86.96
average	30,685	41,366	3,059	5,413	90.42	86.40

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
4 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	31,143	45,774	7,244	5,140	77	89
18	31,143	45,774	6,083	5,400	80	88
21	31,143	45,774	3,513	5,970	89	87
24	31,143	39,450	3,938	4,050	87	90
27	29,025	39,450	3,279	4,290	89	89
30	29,025	39,945	2,499	5,110	91	87
33	28,976	39,945	3,018	5,360	90	87
36	28,976	39,945	2,853	5,570	90	86
39	28,976	39,655	2,918	5,740	90	86
42	28,976	39,655	3,031	5,530	90	86
45	28,976	39,655	3,218	5,170	89	87
average	29,773	41,366	2,923	5,413	89.91	86.40

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	31,143	45,774	4,423	5,140	86	89
18	31,143	45,774	4,449	5,400	86	88
21	31,143	45,774	4,215	5,970	86	87
24	31,143	39,450	4,096	4,050	87	90
27	29,025	39,450	3,987	4,290	86	89
30	29,025	39,945	4,697	5,110	84	87
33	28,976	39,945	4,625	5,360	84	87
36	28,976	39,945	4,599	5,570	84	86
39	28,976	39,655	4,692	5,740	84	86
42	28,976	39,655	5,637	5,530	81	86
45	28,976	39,655	4,784	5,170	83	87
average	29,773	41,366	4,839	5,413	83.30	86.40

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	31,143	45,774	8,321	5,140	73	89
18	31,143	45,774	8,133	5,400	74	88
21	31,143	45,774	8,211	5,970	74	87
24	31,143	39,450	8,395	4,050	73	90
27	29,025	39,450	5,986	4,290	79	89
30	29,025	39,945	5,666	5,110	80	87
33	28,976	39,945	5,457	5,360	81	87
36	28,976	39,945	5,599	5,570	81	86
39	28,976	39,655	5,443	5,740	81	86
42	28,976	39,655	5,578	5,530	81	86
45	28,976	39,655	4,564	5,170	84	87
average	29,773	41,366	5,384	5,413	81.42	86.40

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
 $2 \text{ kg-COD/m}^3\text{-d}$

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	72,535	45,774	28,224	5,140	61	89
18	72,536	45,774	21,333	5,400	71	88
21	72,537	45,774	21,331	5,970	71	87
24	72,538	39,450	22,184	4,050	69	90
27	72,539	39,450	21,853	4,290	70	89
30	72,540	39,945	21,504	5,110	70	87
33	72,541	39,945	21,853	5,360	70	87
36	72,542	39,945	22,055	5,570	70	86
39	72,543	39,655	21,246	5,740	71	86
42	72,544	39,655	21,246	5,530	71	86
45	72,545	39,655	21,827	5,170	70	87
average	72,540	41,366	21,622	5,413	70.19	86.40

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์
6 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT		EFFLUENT		% Removal	
	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	COD	SS
15	84,553	45,774	50,807	5,140	40	89
18	84,554	45,774	49,872	5,400	41	88
21	84,555	45,774	43,822	5,970	48	87
24	84,556	39,450	43,559	4,050	48	90
27	84,557	39,450	44,039	4,290	48	89
30	84,558	39,945	43,920	5,110	48	87
33	84,559	39,945	41,463	5,360	51	87
36	84,560	39,945	40,596	5,570	52	86
39	84,561	39,655	43,022	5,740	49	86
42	84,562	39,655	40,557	5,530	52	86
45	84,563	39,655	41,617	5,170	51	87
average	84,558	41,366	41,863	5,413	50.49	86.40

ตารางผนวกที่ ก10 การผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน AS ของระบบแบบแบทช์
(Batch)

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
1	-	0	0	0	0	0
3	60.81	8.70	5.29	24.07	0.361	0.220
6	31.97	6.52	2.08	21.26	0.307	0.098
9	42.76	5.32	2.28	28.21	0.189	0.081
12	44.61	1.71	0.76	17.74	0.096	0.043
15	51.57	2.02	1.04	21.35	0.095	0.049
18	52.81	1.60	0.85	36.47	0.044	0.023
21	46.38	1.26	0.59	34.10	0.037	0.017
24	48.71	0.86	0.42	24.31	0.035	0.017
27	41.78	0.80	0.34	26.24	0.031	0.013
30	45.66	0.90	0.41	39.46	0.023	0.010
33	45.19	0.47	0.21	35.91	0.013	0.006
36	41.02	0.22	0.09	52.01	0.004	0.002
39	40.00	0.12	0.05	16.95	0.007	0.003
42	38.31	0.19	0.07	11.68	0.017	0.006
45	38.48	0.02	0.01	4.33	0.005	0.002

หมายเหตุ 0 หมายถึง ปริมาณก๊าซเป็นศูนย์
- หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวัด

ตารางผนวกที่ ก11 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอน โคแอกกูเลชันของระบบ
แบบแบทช์ (Batch)

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
1	-	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	17.12	0.51	0.09	24.81	0.021	0.004
6	31.63	0.66	0.21	11.02	0.060	0.019
9	35.97	1.86	0.67	17.67	0.105	0.038
12	45.58	1.68	0.76	20.64	0.081	0.037
15	49.78	2.31	1.15	11.83	0.196	0.097
18	45.76	1.30	0.59	16.43	0.079	0.036
21	39.52	0.83	0.33	13.53	0.061	0.024
24	36.63	1.05	0.38	13.25	0.079	0.029
27	37.38	0.62	0.23	14.61	0.042	0.016
30	38.36	0.78	0.30	19.33	0.040	0.015
33	37.80	0.27	0.10	10.17	0.027	0.010
36	33.38	0.23	0.08	9.19	0.025	0.008
39	36.17	0.00	0.00	0.22	0.000	0.000
42	37.38	0.00	0.00	1.42	0.000	0.000
45	36.07	0.00	0.00	0.06	0.000	0.000

หมายเหตุ 0 หมายถึง ปริมาณก๊าซเป็นศูนย์
- หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวัด

ตารางผนวกที่ ก12 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของตะกอนแป้งของระบบแบบแบทช์
(Batch)

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
1	-	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	0.0000
3	0.01	0.0000	0.0000	314.33	0.0000	0.0000
6	0.81	0.0000	0.0000	98.50	0.0000	0.0000
9	2.93	0.0004	0.0000	113.98	0.0000	0.0017
12	5.17	0.0009	0.0000	87.27	0.0003	0.0066
15	11.45	0.0014	0.0002	76.83	0.0014	0.0123
18	13.7	0.0015	0.0002	53.04	0.0029	0.0214
21	14.89	0.0015	0.0002	150.49	0.0013	0.0087
24	30.08	0.0018	0.0005	61.72	0.0090	0.0300
27	24.84	0.0010	0.0003	177.70	0.0017	0.0069
30	25.29	0.0009	0.0002	96.83	0.0030	0.0120
33	27.27	0.0007	0.0002	127.72	0.0021	0.0076
36	20.53	0.0003	0.0001	19.60	0.0042	0.0207
39	21.21	0.0002	0.0000	18.99	0.0033	0.0154
42	15.29	0.0001	0.0000	11.39	0.0017	0.0111
45	14.56	0.0000	0.0000	11.50	0.0003	0.0017

หมายเหตุ 0 หมายถึง ปริมาณก๊าซเป็นศูนย์

- หมายถึง ไม่ได้ทำการตรวจวัด

ตารางผนวกที่ ก13 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน ของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
2 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	32.59	0.71	0.23	18.57	0.038	0.012
18	32.80	0.72	0.23	20.03	0.036	0.012
21	39.96	0.72	0.29	19.70	0.036	0.015
24	37.21	0.72	0.27	20.25	0.035	0.013
27	32.17	0.72	0.23	20.17	0.036	0.011
30	34.12	0.72	0.24	20.34	0.035	0.012
33	33.23	0.72	0.24	21.17	0.034	0.011
36	33.30	0.72	0.24	20.96	0.034	0.011
39	31.47	0.72	0.23	20.88	0.034	0.011
42	32.40	0.72	0.23	20.72	0.035	0.011
45	32.70	0.72	0.23	20.72	0.035	0.011
average	32.87	0.72	0.24	20.80	0.034	0.011

ตารางผนวกที่ ก14 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน ของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
4 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	18.59	0.33	0.12	35.30	0.009	0.003
18	35.48	0.31	0.12	37.02	0.008	0.003
21	37.48	0.65	0.24	40.81	0.016	0.006
24	36.34	1.25	0.47	40.18	0.031	0.012
27	37.54	1.51	0.64	40.80	0.037	0.016
30	42.68	1.62	0.76	42.04	0.039	0.018
33	46.83	1.63	0.66	41.21	0.040	0.016
36	40.70	1.63	0.61	41.47	0.039	0.015
39	37.22	1.63	0.54	41.37	0.039	0.013
42	33.30	1.62	0.57	41.19	0.039	0.014
45	35.38	1.60	0.53	40.89	0.039	0.013
average	39.35	1.62	0.61	41.36	0.039	0.015

ตารางผนวกที่ ก15 การผลิตก๊าซและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน ของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
6 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	12.03	1.90	0.23	59.20	0.032	0.004
18	37.93	2.18	0.83	59.14	0.037	0.014
21	38.72	2.23	0.87	59.66	0.037	0.015
24	41.92	2.34	0.98	59.93	0.039	0.016
27	48.49	2.34	1.14	59.52	0.039	0.019
30	41.49	2.35	0.98	57.83	0.041	0.017
33	41.73	2.35	0.98	57.99	0.041	0.017
36	41.92	2.38	1.00	58.05	0.041	0.017
39	41.44	2.37	0.98	57.83	0.041	0.017
42	40.12	2.38	0.96	55.58	0.043	0.017
45	41.48	2.38	0.99	57.61	0.041	0.017
average	41.36	2.37	0.98	57.48	0.041	0.017

ตารางผนวกที่ ก16 การผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
8 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	35.70	2.62	0.94	67.42	0.039	0.014
18	44.73	2.77	1.24	67.97	0.041	0.018
21	45.85	2.82	1.29	67.74	0.042	0.019
24	55.03	2.83	1.56	67.20	0.042	0.023
27	54.39	3.01	1.64	73.03	0.041	0.022
30	44.04	3.11	1.37	74.04	0.042	0.019
33	43.02	3.12	1.34	74.67	0.042	0.018
36	44.28	3.12	1.38	74.22	0.042	0.019
39	43.50	3.12	1.36	74.72	0.042	0.018
42	42.81	3.11	1.33	74.29	0.042	0.018
45	43.51	3.12	1.36	77.51	0.040	0.018
average	43.53	3.12	1.36	74.91	0.042	0.018

ตารางผนวกที่ ก17 การผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
2 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g-CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	11.32	1.96	0.22	14.05	0.140	0.016
18	11.90	2.31	0.27	16.24	0.142	0.017
21	13.43	2.42	0.32	16.24	0.149	0.020
24	17.12	2.46	0.42	15.97	0.154	0.026
27	16.53	2.51	0.42	16.07	0.156	0.026
30	17.25	2.43	0.42	16.18	0.150	0.026
33	17.63	2.38	0.42	16.07	0.148	0.026
36	17.84	2.43	0.43	16.01	0.152	0.027
39	18.29	2.43	0.44	16.26	0.149	0.027
42	18.29	2.34	0.43	16.26	0.144	0.026
45	18.61	2.47	0.46	16.08	0.154	0.029
average	17.99	2.41	0.43	16.14	0.149	0.027

ตารางผนวกที่ ก18 การผลิตก๊าซ และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
(Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
6 kg-COD/m³-d

DAY	CH ₄ (%)	Biogas (L/d)	CH ₄ (L/d)	g- CODre (g/d)	Biogas produced per g CODre (L/d)	CH ₄ produced per g CODre (L/g)
15	17.12	2.82	0.48	27.54	0.102	0.018
18	14.49	2.95	0.43	28.30	0.104	0.015
21	15.27	3.17	0.48	33.24	0.095	0.015
24	15.27	3.24	0.49	33.45	0.097	0.015
27	22.30	3.23	0.72	33.06	0.098	0.022
30	28.27	3.25	0.92	33.16	0.098	0.028
33	27.65	3.25	0.90	35.17	0.092	0.026
36	28.07	3.25	0.91	35.87	0.090	0.025
39	28.07	3.25	0.91	33.90	0.096	0.027
42	28.36	3.25	0.92	35.91	0.090	0.026
45	28.72	3.25	0.93	35.04	0.093	0.027
average	28.19	3.25	0.92	34.84	0.093	0.026

ตารางผนวกที่ ก19 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบแบทช์ (Batch) ของตะกอน AS ตะกอน
โคแอกกูเลชัน และตะกอนแป้ง

Day	Excess Sludge			Coagulation Sludge			Starch Sludge		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
1	6.92	29.10	-163.80	7.0	29.1	-67.4	7.11	29.2	-23.7
3	6.92	28.50	-292.50	6.8	28.4	-92.3	6.73	28.5	-68.1
6	6.95	28.50	-351.40	6.8	28.5	-90.2	6.74	28.4	-39.6
9	7.08	29.10	-394.60	6.9	29.1	-194.9	6.66	29.2	-73.8
12	7.07	29.40	-335.30	6.8	29.6	-230.2	6.63	29.6	-95.3
15	7.10	29.70	-379.50	6.8	29.5	-219.8	6.59	29.5	-84.3
18	6.99	28.90	-352.30	6.8	28.8	-276.7	6.46	28.8	-106.9
21	6.97	29.20	-399.10	6.8	29.2	-283.8	6.61	29.2	-122.7
24	6.94	28.90	-325.30	6.8	28.9	-290.4	6.64	29.0	-97.2
27	6.89	29.00	-398.50	6.8	28.9	-313.9	6.69	29.0	-143.5
30	6.97	29.30	-413.80	6.8	29.3	-304.5	6.68	29.2	-194.7
33	6.91	29.20	-452.90	6.8	29.1	-340.6	6.71	29.3	-186.0
36	7.09	29.20	-377.60	6.8	29.2	-374.5	6.67	29.2	-254.3
39	7.09	27.90	-390.50	6.8	27.9	-370.9	6.67	28.0	-233.7
42	7.02	27.20	-395.50	6.8	27.3	-344.8	6.71	27.3	-297.8
45	7.04	28.90	-349.30	6.8	28.8	-376.5	6.63	28.9	-275.3

ตารางผนวกที่ ก20 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอนAS ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	6.88	28.5	-17.7	7.05	29.8	-340.5
18	6.88	27.9	-2.9	7.08	28.5	-306.9
21	7.04	29.8	-5.3	7.06	29.3	-302.6
24	7.04	29.8	-8.3	7.02	29.1	-339.4
27	7.12	29.6	-20.0	6.99	29.8	-378.8
30	7.10	29.2	-18.9	6.99	27.4	-322.7
33	7.06	29.6	-22.2	7.02	29.5	-387.4
36	7.04	29.5	-26.6	7.09	29.2	-293.6
39	6.99	27.8	-14.2	7.08	29.7	-363.1
42	6.97	28.2	-12.2	7.10	27.6	-320.9
45	6.99	28.6	-15.4	7.08	28.9	-399.5

ตารางผนวกที่ ก21 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	7.01	28.4	-7.5	6.99	29.7	-349.6
18	6.95	29.1	7.0	6.99	28.9	-327.8
21	6.82	29.9	4.0	6.99	29.0	-364.8
24	6.84	28.6	-11.1	6.95	29.3	-372.1
27	6.76	28.9	-13.2	6.94	29.4	-366.3
30	6.81	27.5	-19.6	6.99	29.6	-295.1
33	6.88	27.8	-16.6	7.05	29.9	-289.5
36	6.75	27.9	-1.0	7.10	29.3	-320.7
39	6.82	28.7	-5.4	7.13	28.9	-331.6
42	6.85	28.9	-16.6	7.08	28.6	-299.4
45	6.91	28.4	-19.3	7.09	28.9	-343.3

ตารางผนวกที่ ก22 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอน AS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	7.01	28.4	-7.5	7.05	29.8	-361.3
18	6.95	29.1	7.0	7.12	28.9	-355.8
21	6.82	29.9	4.0	7.13	29.1	-362.5
24	6.84	28.6	-11.1	7.11	29.4	-399.1
27	6.76	28.9	-13.2	7.09	29.4	-386.3
30	6.81	27.5	-19.6	7.11	29.7	-372.3
33	6.88	27.8	-16.6	7.07	29.8	-366.6
36	6.75	27.9	-1.0	7.07	29.3	-370.2
39	6.82	28.7	-5.4	7.04	29.0	-359.9
42	6.85	28.9	-16.6	6.98	28.7	-322.8
45	6.91	28.4	-19.3	7.02	28.9	-341.1

ตารางผนวกที่ ก23 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอนASที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 8 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	7.01	28.4	-7.5	6.97	29.7	-378.2
18	6.95	29.1	7.0	6.95	28.5	-341.1
21	6.82	29.9	4.0	6.95	28.7	-375.7
24	6.84	28.6	-11.1	6.93	29.4	-333.4
27	6.76	28.9	-13.2	6.94	29.6	-346.4
30	6.81	27.5	-19.6	6.97	29.5	-332.4
33	6.88	27.8	-16.6	6.93	29.8	-370.8
36	6.75	27.9	-1.0	7.01	29.2	-387.8
39	6.82	28.7	-5.4	7.03	29.2	-397.9
42	6.85	28.9	-16.6	6.98	28.9	-375.5
45	6.91	28.4	-19.3	6.95	28.6	-377.5

ตารางผนวกที่ ก24 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	6.91	28.5	-17.7	6.57	29.8	-340.5
18	6.96	27.9	-2.9	6.53	28.5	-306.9
21	6.93	29.8	-5.3	6.57	29.3	-302.6
24	7.21	29.8	-8.3	6.61	29.1	-339.4
27	7.07	29.6	-20.0	6.53	29.8	-378.8
30	7.14	29.2	-18.9	6.54	27.4	-322.7
33	7.19	29.6	-22.2	6.60	29.5	-387.4
36	6.99	29.5	-22.6	6.57	29.2	-293.6
39	6.94	27.8	-14.2	6.52	29.7	-363.1
42	6.94	28.2	-12.2	6.60	27.6	-320.9
45	6.97	28.6	-15.4	6.51	28.9	-399.5

ตารางผนวกที่ ก25 ผลพารามิเตอร์ต่างๆระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow)
ของตะกอนแป้งที่อัตราภาระขบวนการอินทรีย์ 6 kg-COD/m³-d

Day	INFLUENT			EFFLUENT		
	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)	pH	TEMP (°C)	ORP (mV)
15	7.18	28.4	7.5	6.47	29.7	-349.6
18	6.96	29.1	7.0	6.41	28.9	-327.8
21	6.93	29.9	4.0	6.54	29.0	-364.8
24	7.21	28.6	-11.1	6.57	29.3	-372.1
27	7.27	28.9	-13.2	6.47	29.4	-366.3
30	7.14	27.5	-19.6	6.49	29.6	-295.1
33	7.21	27.8	-16.6	6.52	29.9	-289.5
36	6.86	27.9	-1.0	6.56	29.3	-320.7
39	6.89	28.7	-5.4	6.48	28.9	-331.6
42	6.83	28.9	-16.6	6.59	28.6	-299.4
45	6.97	28.4	-19.3	6.55	28.9	-343.3

ตารางผนวกที่ ก26 ผลของ VFA และ Alkalinity ระบบแบบแบทช์ (Batch)

DAY	ตะกอน AS		ตะกอนโคแอกกูเลชัน		ตะกอนแป้ง	
	VFA	Alkalinity	VFA	Alkalinity	VFA	Alkalinity
	(mg/L as CH ₃ COOH)	(mg/L as CaCO ₃)	(mg/L as CH ₃ COOH)	(mg/L as CaCO ₃)	(mg/L as CH ₃ COOH)	(mg/L as CaCO ₃)
1	502.5	725	330	750	607.5	1185
3	397.5	1555	420	1550	675	1145
6	397.5	1225	405	1100	870	1210
9	487.5	1180	442.5	1380	915	1380
12	125	1200	480	1720	847.5	1070
15	457.5	1915	435	1840	817.5	1185
18	160	1825	375	1730	1087.5	1025
21	300	2050	382.5	1805	997.5	1115
24	300	2095	360	1845	1012.5	1070
27	160	2110	390	1850	960	1030
30	322.5	2375	322.5	1865	930	990
33	277.5	2380	337.5	1830	885	1140
36	277.5	2415	412.5	1875	967.5	1020
39	562.5	2355	405	1910	982.5	1075
42	367.5	2425	420	1900	937.5	1090
45	292.5	2570	397.5	2010	952.5	1055

ตารางผนวกที่ ก27 ผลของ VFA และ Alkalinity ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอน AS

Day	2 kg-COD/m ³ -d		4 kg-COD/m ³ -d		6 kg-COD/m ³ -d		8 kg-COD/m ³ -d	
	VFA	Alkalinity	VFA	Alkalinity	VFA	Alkalinity	VFA	Alkalinity
	(mg/L as CH ₃ COOH))	(mg/L as CaCO ₃)	(mg/L as CH ₃ COOH))	(mg/L as CaCO ₃)	(mg/L as CH ₃ COOH))	(mg/L as CaCO ₃)	(mg/L as CH ₃ COOH))	(mg/L as CaCO ₃)
15	277.5	1420	165	1510	125	1620	130	1605
18	285	1245	180	1380	130	1775	145	1635
21	277.5	1375	285	865	135	1740	165	1625
24	292.5	1415	277.5	1490	130	1620	160	1585
27	300	1140	277.5	1505	175	1565	175	1615
30	330	1310	292.5	1525	165	1520	180	1570
33	300	1390	300	1445	170	1510	165	1540
36	307.5	1375	322.5	1430	165	1535	175	1565
39	292.5	1415	277.5	1465	170	1555	180	1585
42	285	1325	180	1370	165	1440	180	1440
45	277.5	1395	175	1490	145	1540	160	1490

ตารางผนวกที่ ก28 ผลของ VFA และ Alkalinity ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Flow) ของตะกอนแป้ง

Day	2 kg-COD/m ³ -d			6 kg-COD/m ³ -d		
	VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	VFA/Alkalinity	VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	VFA/Alkalinity
15	3562.5	5520	0.645	3622.5	5300	0.683
18	3637.5	5460	0.666	3555	4940	0.720
21	3502.5	5530	0.633	3525	5180	0.681
24	3517.5	5580	0.630	3690	5110	0.722
27	3450	5410	0.638	3907.5	5400	0.724
30	3510	5370	0.654	3615	5340	0.677
33	3472.5	5450	0.637	3630	5260	0.690
36	3540	5600	0.632	3772.5	5220	0.723
39	3607.5	5450	0.662	3592.5	5320	0.675
42	3630	5430	0.669	3735	5110	0.731
45	3532.5	5580	0.633	3937.5	5280	0.746



ภาคผนวก ข
รายละเอียดการคำนวณ

รายละเอียดการคำนวณ

1. การคำนวณอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ในรูปของซีโอดี (COD)

อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (Volumetric Loading) ในรูปของซีโอดี (COD)

สูตรคำนวณ

$$\text{Volumetric Loading (kg -COD/m}^3\text{-d)} = \frac{Q \times S_0}{V}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (m^3/d)

S_0 = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของ COD (mg/l)

V = ปริมาตรถังเก็บกักน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (m^3)

2. การคำนวณระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time: HRT)

HRT หมายถึง ระยะเวลาที่น้ำเสียถูกเก็บกักอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ โดยเริ่มตั้งแต่ น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จนกระทั่งออกจากถังปฏิกรณ์ คำนวณได้จากสูตร

$$\text{HRT} = V/Q$$

เมื่อ HRT = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (d)

V = ปริมาตรเก็บกักน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ (m^3)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (m^3/d)

3. การคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัด

ประสิทธิภาพในการบำบัด หมายถึง ความสามารถของถังปฏิกรณ์ในการลดปริมาณ COD, BOD, SS และ VSS โดยวัดจากน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นตัวชี้วัด

สูตรคำนวณ

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{(S_0 - S_e)}{S_0} \times 100$$

เมื่อ S_0 = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD และ SS ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mg/l)
 S_e = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD และ SS ในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (mg/l)

4. ก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อน้ำหนักมลสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

4.1 ก๊าซชีวภาพทั้งหมด (total gas)

ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ $2.0 \text{ kg-COD/m}^3\text{-d}$ มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่
 อุณหภูมิห้อง 1.58 l/d (จากตารางภาคผนวกที่ ก13)
 การเติม COD ถูกกำจัดในหนึ่งวัน (จากตารางภาคผนวกที่ ก1)

$$\begin{aligned} &= Q(S_0 - S) \\ &= 0.71(32676 - 3245) \\ &= 20.72 \text{ g/d} \end{aligned}$$

ดังนั้นก๊าซทั้งหมดที่เกิดต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} &= 1.58/20.72 \\ &= 0.0761 \text{ l/g} \end{aligned}$$

4.2 ก๊าซมีเทน (methane)

ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ $2.0 \text{ kg-COD/m}^3\text{-d}$ มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทน
 ทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 0.52 l/d (จากตารางภาคผนวกที่ ก13)

การเติม COD ถูกกำจัดในหนึ่งวัน = 20.72 g/d

ดังนั้นก๊าซมีเทนที่เกิดต่อกรัม COD ที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned} &= 0.52/20.72 \\ &= 0.0249 \text{ l/g} \end{aligned}$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวพรพิมล พันธุสุนทร
 เกิดวันที่ 7 กรกฎาคม 2531
 สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี
 ประวัติการศึกษา วท.บ. (เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม)
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ตำแหน่งปัจจุบัน -
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
 ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -
 ทู่นการศึกษาที่ได้รับ -