



วิทยานิพนธ์

การเลือกดัชนีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีที่เหมาะสม
สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา

**DESIGN CRITERIA SELECTION FOR DISTILLERY
WASTEWATER TREATMENT BY UPFLOW
ANAEROBIC SLUDGE BLANKET**

นางสาวบุษวรรณ สุตรชาติดา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

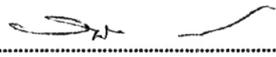
เรื่อง การเลือกคชณีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสีย
จากโรงงานสุรา

Design Criteria Selection for Distillery Wastewater Treatment by Upflow Anaerobic
Sludge Blanket

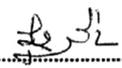
นามผู้วิจัย นางสาวนุชวรรณ สุทธธาดา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

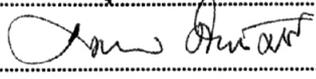
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์วินัย เลียงเจริญสิทธิ์, D. Eng)

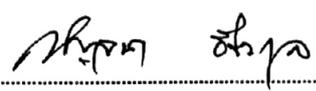
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr. Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 28 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเลือกดัชนีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีที่เหมาะสม
สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา

Design Criteria Selection for Distillery Wastewater Treatment
by Upflow Anaerobic Sludge Blanket

โดย

นางสาวนุชวรรณ สุตรธาดา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

บุญวรรณ สุตรธาดา 2551: การเลือกคั้งนี้การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์วินัย เลียงเจริญสิทธิ์, Dr.Eng. 80 หน้า

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ในรูปของซีโอดี น้ำเสียจะผ่านระบบสร้างกรดเป็นระยะเวลา 22 วัน ซึ่งเริ่มศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 8-22 วัน โดยการใช้ถังสร้างกรด 4 ชุด แต่ละชุดมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 3.5 วัน หลังจากนั้นน้ำเสียจะผ่านเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d ซึ่งแต่ละชุดมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 1.42 วัน และขนาดของถังปฏิกริยายูเอเอสบีเท่ากับ 204 ลิตร

ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่เหมาะสมของระบบสร้างกรดคือ 18.5 วัน เนื่องจากกรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นด่าง และค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มคงที่ และระบบยูเอเอสบีอัตราภาระบรรทุกที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียคือ 3.32 kg COD/m³.d เนื่องจากประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูง รองลงมาคือ ที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d ตามลำดับ

บุญวรรณ สุตรธาดา

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

23 / 5 / 51

Bouzavarn Sutratthada 2008: Design Criteria Selection for Distillery Wastewater Treatment by Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Winai Liengcharernsit, Dr.Eng. 80 pages.

The purpose of this research was to study the efficiency of wastewater treatment for distillery in different COD loadings. First, the wastewater was treated in fermentation reactors (acid tanks) for 22 days. In fermentation, hydraulic retention time (HRT) 8-22 days was observed. Each acid tank had HRT 3.5 days. After that the wastewater was treated by Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) which had 3 different COD loadings at 3.32, 6.63 and 9.95 kg COD/m³.d. Each UASB reactor had HRT 1.42 days and volume of the reactor was 204 L.

The result showed that the suitable HRT for fermentation reactor was 18.5 days because Volatile fatty acids, Alkalinity and pH had just started to stability. For UASB system, the suitable COD loading was 3.32 kg COD/m³.d as the high efficiency of COD removal and high volume of biogas. The other alternatives were 6.63 and 9.95 kg COD/m³.d, respectively.

Bouzavarn Sutratthada

Student's signature

Winai Liengcharernsit

Thesis Advisor's signature

23 / 5 / 08

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผน แนะนำ ให้คำปรึกษา สนับสนุนด้านอุปกรณ์และเครื่องมือ และตรวจสอบการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณถาวร ปันตระกูล รองผู้อำนวยการฝ่ายโรงงานสุรา องค์การสุรา กรมสรรพสามิต ที่ได้โอกาสเข้ามาทำวิทยานิพนธ์ คุณสุนันท์ พูลชนกจิ หัวหน้าแผนกกำจัดน้ำเสีย และเจ้าหน้าที่แผนกกำจัดน้ำเสียทุกท่าน คุณเกรียงศักดิ์ ธรรมสุวรรณ คุณสมนึก ไหมสุวรรณ คุณบุญศักดิ์ นิรมลิตระกูล คุณชุมพล จิตรจางค์ คุณประสงค์ สุขมาก และคุณปราโมทย์ พวงมณี รวมถึงเจ้าหน้าที่แผนกซ่อมบำรุงและเจ้าหน้าที่แผนกไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ได้เป็นกำลังใจและสนับสนุน อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

บุญวรรณ สุตรธาดา

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	51
สรุป	51
ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	53
ภาคผนวก	56
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความเข้มข้นของไอออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา	14
2	คุณสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา	28
3	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และความถี่ในการศึกษาน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ	32
4	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา	39
5	ค่าเฉลี่ยผลการทดลองระบบสร้างกรดตามพารามิเตอร์ต่างๆ	40
6	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CH ₃ COOH)	41
7	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่าย	41
8	ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CaCO ₃)	42
9	ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4	42
10	ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)	44
11	ร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี	44
12	อัตราส่วนสภาพความเป็นด่างต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4	45
13	ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)	45
14	ผลการศึกษาระบบยูเอเอสบี	46
15	ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ออัตราภาระบรรทุกต่างๆ (L/kg COD)	47
16	สภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ (mg/L as CaCO ₃)	48
17	อัตราส่วนสภาพความเป็นด่างต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	กรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ (mg/L as CH ₃ COOH)	49
19	ค่า pH ของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ	49
20	อุณหภูมิของน้ำเสียเฉลี่ยที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ เวลา 9:00 และ 16:00 น. (°C)	50
21	ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ (g)	50
ตารางผนวกที่		
1	ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CH ₃ COOH)	57
2	ผลการวิเคราะห์สภาพต่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CaCO ₃)	58
3	ผลการวิเคราะห์ค่า pH ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4	59
4	ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)	61
5	ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)	62
6	ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m ³ .d (mg/L as CH ₃ COOH)	63
7	ผลการวิเคราะห์สภาพความเป็นด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m ³ .d (mg/L as CaCO ₃)	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
8	ผลการวิเคราะห์ค่า pH ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราการบำบัดทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m ³ .d	65
9	ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราการบำบัดทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m ³ .d (mg/L)	67
10	ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และตะกอนจุลินทรีย์ที่อัตราการบำบัดทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m ³ .d (mg/L)	68
11	ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบีที่อัตราการบำบัดทุก 3.32 kg COD/m ³ .d (mg/L)	69
12	ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบีที่อัตราการบำบัดทุก 6.63 kg COD/m ³ (mg/L)	70
13	ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบีที่อัตราการบำบัดทุก 9.95 kg COD/m ³ .d (mg/L)	71
14	อุณหภูมิของน้ำเสียที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ เวลา 9:00 น. (°C)	72
15	อุณหภูมิของน้ำเสียที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ เวลา 16:00 น. (°C)	74
16	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบยูเอเอสบี (L)	76
17	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเทียบกับอัตราการบำบัดทุกของระบบในรูปของซีโอดี	78
18	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเทียบกับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี	79

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะ โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	22
2	แบบจำลองการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย	34
3	ถังปฏิกริยาสร้างกรด	35
4	ถังปฏิกริยาระบบยูเอเอสบี	36
5	การติดตั้งท่อจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีทางด้านล่าง	37
6	การติดตั้งปั้มและกล่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ	37
7	แผนผังการศึกษาระบบสร้างกรดและระบบยูเอเอสบี	38
8	ความสัมพันธ์ระหว่างกรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นต่าง และค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสร้างกรด	43
9	เปรียบเทียบปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ออัตราภาระบรทุกและอัตราภาระบรทุกทั้งหมดไป	47

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

VFA	=	Volatile Fatty Acid
COD	=	Chemical Oxygen Demand
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
CO ₂	=	Carbondioxide
CH ₄	=	Methane
HRT	=	Hydraulic Retention Time
SRT	=	Solid Retention Time
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
SS	=	Suspended Solids หรือสารแขวนลอย
MLSS	=	Mixed Liquor Suspended Solids หรือตะกอนจุลินทรีย์
UASB	=	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
Q	=	อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ
Q _r	=	อัตราการไหลย้อนกลับ
mL/min	=	มิลลิลิตรต่อนาที
cm/h	=	เซนติเมตรต่อชั่วโมง

**การเลือกดัชนีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีที่เหมาะสม
สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา**

**Design Criteria Selection for Distillery Wastewater Treatment
by Upflow Anaerobic Sludge Blanket**

คำนำ

การนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมาใช้ในช่วงแรก มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนจะต้องมีการเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน แต่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีข้อเสียที่สำคัญคือ กลิ่นเหม็นรบกวนและการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการสร้างบ่อหมัก รวมทั้งก๊าซชีวภาพที่ได้จะปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันด้วย จึงมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อการบำบัดน้ำเสีย และการนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์

โรงงานกลุ่มสุรา เป็นอุตสาหกรรมกลุ่มแรกๆ ที่มีการนำเทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพเข้ามาใช้ โดยน้ำเสียของโรงงานสุรา ซึ่งเรียกว่า น้ำกากส่ามีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงมาก โดยวัดในรูปของบีโอดี (BOD) เท่ากับ 30,000–50,000 mg/L และซีโอดี (COD) เท่ากับ 90,000–120,000 mg/L นอกจากนี้ยังมีสีน้ำตาลเข้ม ในอดีตที่ผ่านมาโรงงานสุราไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย จึงก่อปัญหาอย่างมากต่อชุมชนที่อาศัยอยู่ใกล้เคียง ทางโรงงานจึงถูกบังคับให้แก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยเร่งด่วน เริ่มแรกคือ การนำเทคโนโลยีการเผามาใช้ ถึงแม้ว่าวิธีการเผาจะสามารถกำจัดน้ำเสียได้หมดสิ้น แต่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ต่อมาโรงงานสุราจึงหันมาใช้เทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพแทน น้ำเสียส่วนใหญ่ของโรงงานสุรามาน้ำกากส่าในกระบวนการกลั่นสุราและน้ำล้างขวด ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าแปรผันอยู่ในช่วง 55,000 – 150,000 mg/L ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติกากน้ำตาลที่ใช้ในการผลิต

ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการรับมลสารที่มีปริมาณสูง เวลาเก็บกักน้ำเสียสั้น และความต้องการพลังงานในการเดินระบบค่อนข้างต่ำ (Metcalf and Eddy, 2004) การทำงานของระบบคือ การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของถังปฏิกิริยาเพื่อให้น้ำเสียผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่อัดตัวกันแน่น จนมีลักษณะเป็นเม็ด หรือ granule

จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไร้อากาศ ผลผลิตที่ได้คือการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ก๊าซชีวภาพนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยทั่วไปมีการนำก๊าซชีวภาพไปเผาให้ความร้อนแก่หม้อต้มไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำไว้ใช้ภายในโรงงาน ผลิตกระแสไฟฟ้า และขับเคลื่อนเครื่องจักรกล น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง จะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูง ซึ่งจะยิ่งทำให้น้ำเสียนั้นมีความเหมาะสมนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ควรพิจารณาว่า โรงงานมีความต้องการพลังงานในกระบวนการผลิตเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ทดแทนภายในโรงงาน

การวิจัยนี้จะส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อม และช่วยอนุรักษ์พลังงานโดยการนำน้ำเสียจากโรงงานสุราไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานที่สามารถนำมาใช้ภายในโรงงาน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานสุราด้วยระบบสร้างกรดและระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา เมื่ออัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน
3. เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา เมื่ออัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. การศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสียจากบ่อน้ำกากส่าขององค์การสุราซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 8 วัน เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยตรง ซึ่งจะนำน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบสัปดาห์ละสองครั้ง ที่ถังเติมน้ำเสีย (Feed Tank) และปรับสภาพให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 หรือใกล้เคียง แต่ไม่มีการเติมอาหารให้กับน้ำเสียดังกล่าว
2. การทดลองนี้เป็นการศึกษาระดับ Pilot Scale หรือระดับต้นแบบ โดยการใช้แบบจำลองระบบสร้างกรดและระบบยูเอเอสบี
3. การดำเนินระบบเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) ทั้งระบบสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่างๆ และระบบยูเอเอสบี ซึ่งควบคุมอัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์โดยอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบและอัตราการไหลย้อนกลับแตกต่างกัน เพื่อควบคุมความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสียในระบบยูเอเอสบี
4. การประเมินประสิทธิภาพของระบบสร้างกรดจากปริมาณกรดไขมันที่เพิ่มขึ้นเป็นหลัก และระบบยูเอเอสบีจากการลดลงของค่าซีโอดีและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายใต้ภาวะสิ่งแวดล้อมจริงขององค์การสุรา อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา

การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์

คือ การหมักส่ำเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1.1 การเลี้ยงเชื้อ (starter)

- ก) การเตรียมเชื้อบริสุทธิ์ (Pure Culture) ลงใน slant อาหารเลี้ยงเชื้อ
- ข) การขยายกล้าเชื้อยีสต์ลงในอาหารเหลว ขนาด 150 และ 1500 mL
- ค) การขยายกล้าเชื้อลงใน Starter A และ Starter B

1.2 ขั้นตอนการกลั่น

นำส่ำที่หมักได้มาสู่ออกกลั่นแรกคือ ออกกลั่นสุราขาว เมื่อผ่านกระบวนการกลั่นจะได้แอลกอฮอล์ ซึ่งแยกตัวออกมาจากน้ำส่ำ ทำให้ได้สุราที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ประมาณ 60-65 % หลังจากนั้นสุราขาวจะถูกส่งไปยังออกกลั่นแอลกอฮอล์ เพื่อแยกแอลกอฮอล์ให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นคือ แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% และแอลกอฮอล์ 90% ผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ที่ได้จะเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมในหลายๆ ประเภท เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมอาหาร และวัตถุระเบิด เป็นต้น

1.3 น้ำกากส่ำ

น้ำกากส่ำ (Slops Waste) เป็นน้ำทิ้งจากกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์ (Liquor Distillation) ลักษณะมีสีน้ำตาลเข้ม อุณหภูมิสูง ความเป็นกรดสูง มีค่าซีไอดีสูงสุดประมาณ 150,000 mg/L ไม่มีสารพิษและโลหะหนักปนเปื้อน ในน้ำกากส่ำนี้มีสารอินทรีย์ที่เพียงพอให้จุลินทรีย์ในน้ำเสียสร้างก๊าซชีวภาพขึ้น เพื่อใช้เป็นพลังงานแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักคือ มีเทน

2. กระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายแบบ คูดซ์บ เปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง ปฏิกิริยาเหล่านี้จะต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดมาช่วยกันย่อยสลายสารปนเปื้อน มลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.1 แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Acidogenic Bacteria)

แบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างกรดไขมันระเหยง่าย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียประเภทไร้อากาศชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) ซึ่งจะผลิตกรดได้มากกว่าแบคทีเรียประเภทที่อยู่ในสภาพมีและไม่มีออกซิเจนอิสระหรือ (Facultative Anaerobes) เนื่องจากมีจำนวนมากกว่า โดยแบคทีเรียไร้อากาศชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายคือ *Clostridium sp.* ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบจึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งและโปรตีนได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ได้แก่ กรดบิวทิริก (Buteric acid), กรดอะซิติก (Acetic acid), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไฮโดรเจน, เอทานอล (Ethanol), บิวทานอล (Buthanol) และอะซีโตน (Acetone) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม *Propionibacterium sp.* ที่ผลิตกรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก (Lactic acid)

2.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

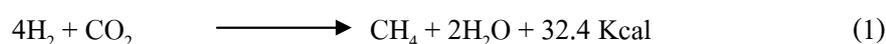
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดสร้างกรดไขมันระเหย ซึ่งบางชนิดมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างกรดไขมันระเหยให้อยู่ในรูปของโมเลกุลอย่างง่ายที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยกลุ่มแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติกซึ่งเป็นโมเลกุลอย่างง่ายและใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน รวมทั้งยังได้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย

2.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenesis Bacteria)

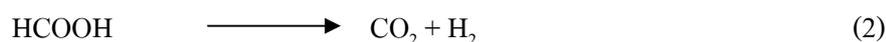
แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตช้าและไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (50-80% เป็นก๊าซมีเทน, 20-50% เป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไฮโดรเจน เป็นต้น) แบคทีเรียสร้างมีเทนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของสารตั้งต้น (สุब्ณชาติ, 2548) คือ

2.3.1 แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic Bacteria)

คือแบคทีเรียที่สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน ดังสมการ

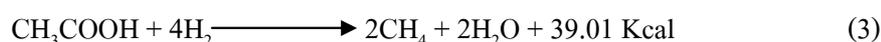


แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารตั้งต้นได้ เนื่องจากกรดฟอร์มิกจะเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ

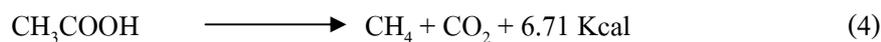


2.3.2 แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate Acetoclastic Methanogen)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งของคาร์บอนและแหล่งของพลังงานได้เพียงสารเดียว โดยการสร้างมีเทนเป็นดังสมการ



นอกจากการสร้างมีเทนจากการออกซิเดชันไฮโดรเจน ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่ยังสร้างจากการแตกตัวของอะซิติก ดังสมการ



2.3.3 แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติก (Hydrogenotrophic/ Acetoclastic Methanogen)

คือแบคทีเรียที่สามารถใช้ทั้งกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตก๊าซมีเทน แต่แบคทีเรียกลุ่มนี้ชอบใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นมากกว่ากรดอะซิติก

2.4 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ

2.4.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิส เป็นกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่แบคทีเรียดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส, กรดอะมิโน และกรดไขมัน โดยการผลิตและปล่อยเอนไซม์ของแบคทีเรียออกสู่ภายนอกเซลล์ แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า ไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย ในขั้นตอนนี้ยังไม่มี การลดค่าซีไอดี

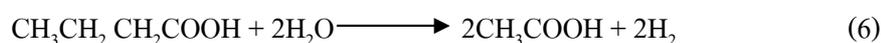
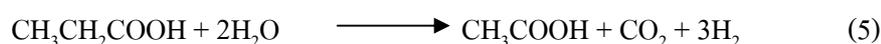
2.4.2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Acidogenic Bacteria) นำไปใช้เพื่อผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid หรือ VFA) เช่น กรดอะซิติก, กรดโพรไพโอนิก และ กรดบิวไทริก เป็นต้น ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ อีกปะปนออกมาโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิกิริยา เช่น ก๊าซไฮโดรเจน กรดอะซิติก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

Ahn et al. (2001) กล่าวว่า ผลของบ่อสร้างกรดก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด ไร้อากาศแบบยูเอสบีของโรงงานผลิตสุราจะสามารถลดค่าซีโอดีละลายน้ำได้ 20.74% และเกิด ก๊าซมีเทน 0.08 ± 0.003 ลิตรต่อกรัมซีโอดีละลายน้ำที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0.75-4 ชั่วโมง

2.4.3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยที่ได้จากกระบวนการสร้างกรดหรือ Acidogenesis จะถูก แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) เปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เมทานอล เมทิลามีน คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคาร์บอนจำนวน 1-2 อะตอมเท่านั้น โดยต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น แบคทีเรียอะเซโตจีนิคที่ผลิตไฮโดรเจนต้องการสภาวะที่มีความดันพาร์เซียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และที่ย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความดัน พาร์เซียลต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญมาก เพราะจะช่วยลดการสะสมของกรดไขมันระเหย ง่ายที่มีปริมาณมากและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ทำให้สภาวะไม่เหมาะสมต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenesis Bacteria)

2.4.4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนคือ การเปลี่ยนกรดอะซิติก ไฮโดรเจน กรดฟอร์มิก และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างกรด ให้เป็นก๊าซมีเทน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenesis Bacteria) แบคทีเรียที่ สร้างก๊าซมีเทนเป็นแบคทีเรียกลุ่มอาร์เคียที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามากและยังเป็นแบคทีเรียที่ใช้ สารตั้งต้นเพียงบางชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1-2 อะตอม เท่านั้น และก๊าซไฮโดรเจน ส่วน กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียไม่สามารถที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในการ

เปลี่ยนแปลงให้เป็นก๊าซมีเทนได้ ดังนั้น แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงต้องอาศัยแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์ต่างๆ ให้เป็นกรดอะซีติกหรือก๊าซไฮโดรเจนก่อนที่แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจะสามารถย่อยสลายต่อไปได้

นอกจากนี้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนยังเป็นแบคทีเรียที่ไวต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมาก เช่น ไม่สามารถทนก๊าซออกซิเจนแม้จะมีปริมาณของก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญได้ดีเมื่ออยู่ในช่วงความเป็นกรด-ด่างนอกเหนือจาก 6.8-9.2 เป็นต้น

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ

2.5.1 อุณหภูมิ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสม มีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesophilic bacteria) จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 25-45 °C และช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50-65 °C โดยอุณหภูมินั้นมีผลต่อการผลิตก๊าซของแบคทีเรีย การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2-3 °C จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก ควรจะระมัดระวังอุณหภูมิของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบให้มีความแปรผันไม่เกิน $\pm 5\%$ (สุเมธ, 2529)

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงของมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงเทอร์โมฟิลิกได้สูงกว่า โดยทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงกว่า 20-50%

2.5.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH เป็นตัวที่บ่งชี้ถึงสภาพภายในของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศได้ เมื่อค่าของกรดไขมันระเหยง่ายมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงค่า pH จะเกิดขึ้นซ้ำ ดังนั้น ค่า pH จึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ซ้ำ สำหรับการแก้ไขสภาวะในระบบบำบัดแบบไร้อากาศเมื่อเปรียบเทียบค่าของกรดไขมันระเหยง่าย แต่ค่า pH ยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบการบำบัดแบบไร้อากาศ โดย pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.7-7.4 ซึ่งเหมาะแก่การทำงานของแบคทีเรียที่

สร้างมีเทน ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 7.0 ระบบจะลดประสิทธิภาพลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า pH ต่ำกว่า 6.2 การควบคุมระบบจึงต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ เช่น ปูนขาว โซดาไฟ และ โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นต้น แต่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acidogens) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพ pH ระหว่าง 5.0-8.0 นอกจากนี้ ค่า pH ยังส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นหรือออสโมนของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน ในบางครั้งจึงทำการแยกขั้นตอนการสร้างกรดและการสร้างมีเทนออกจากกัน (Two Stage Anaerobic Reactor) เพื่อที่จะทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสหรือที่มีองค์ประกอบของไฟเบอร์บางส่วนก่อน

2.5.3 เวลาเก็บกักน้ำ (HRT) และอายุตะกอนจุลินทรีย์ (SRT)

เวลาเก็บกักน้ำหรือ Hydraulic Retention Time (HRT) ของระบบเป็นระยะเวลาที่แบคทีเรียสัมผัสกับน้ำเสีย การลดเวลาเก็บกักน้ำจะช่วยลดขนาดของถังปฏิกริยาลง แต่ถ้าเวลาเก็บกักน้ำน้อยเกินไปตะกอนแบคทีเรียจะหลุดออกจากระบบมากขึ้น ทำให้อายุตะกอนจุลินทรีย์หรือ Solid Retention Time (SRT) ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดซีโอไซด์ลดลง การควบคุมเวลาเก็บกักที่เหมาะสมจะช่วยให้แบคทีเรียที่อยู่ในระบบมีปริมาณคงที่หรือมีปริมาณเพิ่มขึ้น ระยะเวลาเก็บกักเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในระบบและลักษณะของเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ รวมถึงชนิดของแบคทีเรียในระบบเป็นสำคัญ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ดังนั้นอายุตะกอนจุลินทรีย์ที่มาก จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น

2.5.4 สภาพความเป็นกรด (Acidity) และความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นกรดและความเป็นด่างเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ความเป็นกรดในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศจะมาจากกรดคาร์บอนิกและกรดไขมันระเหยง่าย โดยกรดไขมันระเหยง่ายจะมีผลต่อระบบบำบัดมากกว่ากรดคาร์บอนิก

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50-500 mg/L หากปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติกมากกว่า 2,000 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบก๊าซชีวภาพลดลง และถ้าระบบมีปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติก ตั้งแต่ 8,000-10,000 mg/L จะมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาสมดุลของระบบให้มีปริมาณการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายให้เท่ากับหรือต่ำกว่าอัตราการใช้ไปเพื่อสร้างก๊าซมีเทน แต่ถ้ามีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายมากเกินไปจะส่งผลให้ pH ของระบบลดต่ำลง เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน การป้องกันจะทำได้โดยการปรับให้ระบบมีบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ เพื่อป้องกันการลดลงอย่างรวดเร็วของ pH ในระบบ การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบจนมากกว่า 2,500 mg/L as CH_3COOH จะก่อให้เกิดการหลุดของตะกอนเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มอัตราการระบายรทุกให้แก่ระบบยูเอเอสบี สามารถลดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากกรดไขมันระเหยง่ายเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (สุเมธ, 2540)

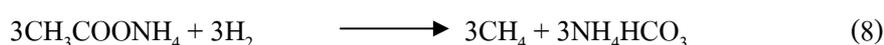
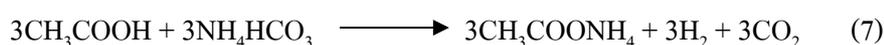
Grady et al. (1999) การลดความสามารถของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ช่วงที่เหมาะสมที่สุดคือ 6.8-7.4 และสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงที่ 6.4-7.8 การลดลงของ pH เกิดจากการเพิ่มมากขึ้นของ VFAs โดยเฉพาะกรดโพรไพโอนิก และกรดบิวเทอริก ซึ่งมักกล่าวรวมในรูปของกรดอะซิติก

สภาพความเป็นด่างทั้งหมดในระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย สภาพต่างจากไบคาร์บอเนตมีความสำคัญมากในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากไบคาร์บอเนตจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้นในระบบ รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกสะเทินโดยด่างในรูปของไบคาร์บอเนต เพื่อให้ระบบมี pH เป็นกลางสำหรับสภาพความเป็นด่างน้อยที่สุดในการป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH อย่างรวดเร็ว ต้องมีค่าเท่ากับปริมาณด่างไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนิครวมกับปริมาณด่างไบคาร์บอเนตเพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยง่าย สำหรับปริมาณด่างที่ต้องการเพื่อใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนิคขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งความสามารถในการละลายจะสอดคล้องกับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หากถึงปฏิกิริยามีการระบายก๊าซที่ดี การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบไม่มาก ทำให้ความต้องการด่างเพื่อการสะเทินกรดคาร์บอนิคมีค่าต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนปริมาณด่าง

เพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายจะมีค่าเท่ากับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้น เนื่องจากจำนวน โมลที่เข้าทำปฏิกิริยาของกรดไขมันระเหยง่ายต่อด่างไบคาร์บอเนตเป็นแบบ 1 ต่อ 1

ปัจจัยที่สำคัญกว่าสภาพความเป็นด่างคือ อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อระดับสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (VFA: HCO₃⁻) ที่อัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในขั้นที่ pH จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การควบคุม ปริมาณบัฟเฟอร์ในระบบอาจใช้ในรูปแบบของความเป็นด่างเทียบกับซีโอดี โดยสัดส่วนระหว่างความเป็นด่างกับซีโอดีของน้ำเข้าไม่ควรสูงกว่า 0.4 แต่การวัดในวิธีนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมเท่ากับ สัดส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อระดับสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต

สภาพความเป็นด่างในระบบไร้อากาศมาได้จากหลายแหล่ง เช่น กลีของ แอมโมเนีย (แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และแอมโมเนียอะซิเตท) ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง ถ้ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นไปอย่างสมบูรณ์ แอมโมเนียไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ pH โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์ ซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดจากกรดไขมันระเหยง่ายดังสมการ



2.5.5 ความเป็นพิษ (Toxic)

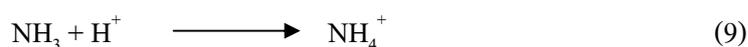
ก) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid)

กรดไขมันระเหยง่ายมีผลต่อพฤติกรรมแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากความเป็นกรดสูงขึ้นหรือ pH ลดลง จึงทำให้ต้องมีการควบคุมการย่อยสลาย สารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยง่าย และการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนให้สมดุลกัน โดยทั่วไประบบไร้ออกซิเจนควรมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายประมาณ 50-500 mg/L (วัดในรูปแบบของกรดอะซิติก)

มันดินและมันร็อกซ์ (2547) พืชจากกรดไขมันระเหยง่ายที่มีต่อถ้ำหมักไร้อากาศ เมื่อรักษาระดับ pH คงที่และใกล้ 7 ทั้งกรดอะซิติกและบิวเทอริกที่มีความเข้มข้นสูงถึง 10,000 mg/L ไม่แสดงความเป็นพิษอย่างเด่นชัดต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนหรือต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังหมักสแต็ค แต่กรดโพธิโอไนคที่ระดับ 1,000 mg/L แสดงความเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเมื่อ pH เป็นกลาง

ข) แอมโมเนีย

เกิดจากการสลายตัวของโปรตีน หรือไนโตรเจนในสารอินทรีย์สลายตัว ไนโตรเจนจะถูกปล่อยในรูปแบบของแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ขึ้นกับความแตกต่าง หรือ pH ของระบบ ถ้า pH เท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนียเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีความเป็นพิษน้อย



ค) แคทไอออนของโลหะเบา

แคทไอออนของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น เกี่ยวข้องกับการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากการรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลาง จึงต้องมีการเติมด่างเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับกรดที่เกิดขึ้น ดังนั้น แคทไอออนของโลหะเบาในระบบจึงเพิ่มมากขึ้น สารที่ใช้เติมให้กับระบบบำบัดเพื่อเพิ่ม pH ให้ระบบ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้หากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปจะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ปกติแคทไอออนที่มีวาเลนซ์สูง (ประจุบวกสูง) จะมีความเป็นพิษมากกว่า แคทไอออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ ระดับความเป็นพิษของไอออนบวกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา

ชนิดของไอออนบวก	ความเข้มข้น (mg/L)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100-200	3,500-5,500	>8,000
K ⁺	200-400	2,500-4,500	>12,000
Ca ²⁺	100-200	2,500-4,500	>8,000
Mg ²⁺	75-150	1,000-1,500	>3,000

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549) อ้างจาก McCarty (1964)

ง) ซัลไฟด์

ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศซัลไฟด์เกิดจากการรีดักชันของซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำเสียที่เข้าระบบ และในการสลายตัวของโปรตีน ซัลไฟด์เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนในปริมาณเล็กน้อย โดยแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า sulfate reducing bacteria ขณะเดียวกันซัลไฟด์มีความสามารถในการตกตะกอนโลหะหนัก เช่น เหล็ก นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีความจำเป็นต่อแบคทีเรีย เมื่อซัลไฟด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 mg/L จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน และถ้าความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายมากกว่า 200 mg/L ปฏิกิริยาของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะถูกยับยั้ง ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพบได้ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีปัญหาทางกายภาพต่อการกักกรอง กลิ่นเหม็น และสามารถเพิ่มสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ รวมถึงการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน การลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ที่ละลายในระบบบำบัดสามารถทำได้โดยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) เพื่อตกตะกอนซัลไฟด์ออกจากระบบ (Nasr and Wahaab, 1996)

จ) โลหะหนัก

ในแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนต้องการโลหะหนักที่จำเป็น 4 ชนิด คือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำมาก แต่ก็ไม่สามารถขาดได้ เนื่องจากเป็นหนึ่งในการถ่ายเทอิเล็กตรอนในกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์แบคทีเรีย ถ้าในระบบมี

โลหะหนักที่มากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยที่โลหะหนักที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียคือ ส่วนของโลหะหนักที่ละลายน้ำเท่านั้น สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียโดยการควบคุมความเป็นกรด-ด่างและการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์

2.5.6 ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ความแตกต่างด้านความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โปเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆ ว่า โออาร์พี (ORP) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำส่วนใหญ่มักจะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ถ้าค่าโออาร์พีเป็นบวกแสดงว่ามีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน แต่ค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบแสดงว่ามีความสามารถเป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ซึ่งในระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่ทำงานได้ดีจะมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 mV ถ้าค่าโออาร์พีเป็นลบน้อยๆ หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะเกิดขึ้นได้น้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย

ประโยชน์ของโออาร์พีในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อควบคุมปัญหาด้านกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสียและการเติมอากาศในกระบวนการย่อยตะกอน ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน และควบคุมปัญหาที่เกิดจากการออกซิเดนท์ หรือรีดักแทนท์ในโรงงานอุตสาหกรรม

3. รูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยา

3.1 ถังปฏิกิริยาแบบเท (Batch Reactor)

เป็นถังปฏิกิริยาแบบที่ไม่มีกรไหลเข้าและออกของน้ำอย่างต่อเนื่อง แต่จะมีการกวนผสมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

3.2 ถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug-flow reactor)

เป็นถังปฏิกริยาแบบถังยาวหรือท่อยาว น้ำเสียจะไหลต่อเนื่องกันตามความยาวของถังปฏิกริยา หรือมองเป็นแบบถังปฏิกริยาแบบแท่งที่มีการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของถังปฏิกริยา การไหลของถังปฏิกริยาไม่ค่อยเกิดการลัดวงจรขึ้น ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกริยาจะลดลงตามความยาวของถังปฏิกริยา แต่ไม่สามารถรองรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงหรือสารพิษไหลเข้ามาปะปนทันที เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดตามขวางมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตามยาว ระบบบำบัดที่มีการรูปแบบการไหลแบบท่อ เช่น ถังเติมอากาศ และถังฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน เป็นต้น

3.3 ถังปฏิกริยาที่กวนผสมแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor; CSTR)

ถังปฏิกริยาแบบนี้มักติดตั้งเครื่องกวนของเหลวไว้ในถังปฏิกริยา เพื่อทำให้เกิดการกวนผสมทั่วทั้งถังปฏิกริยา การไหลของของเหลวจะมีการเคลื่อนที่เข้าและออกตลอดเวลาของเหลวต่างๆ ที่ไหลเข้ามาจะถูกกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ทำให้ถังปฏิกริยาแบบนี้สามารถรับ Shock Loadings ได้ดีกว่าถังปฏิกริยาแบบท่อ ระบบบำบัดที่มีการรูปแบบการไหลแบบไหลต่อเนื่อง ได้แก่ Activated Sludge และ Anaerobic Contact

3.4 ถังปฏิกริยาแบบ Arbitrary-flow

เป็นถังปฏิกริยาที่อยู่ระหว่างแบบกวนผสมและแบบท่อ เนื่องการไหลภายในถังปฏิกริยาจะเกิดการลัดวงจรขึ้น เกิดบริเวณที่น้ำนิ่ง เกิดการตกตะกอนภายใน เกิดการรวบรวมน้ำที่ทางเข้าและทางออกของของเหลว และเกิดการกระจายของของไหล ทำให้ภายในถังปฏิกริยาแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของตัวทำปฏิกริยาและผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน ระบบบำบัดที่มีการรูปแบบการไหลแบบ Arbitrary flow ได้แก่ Aerated Lagoon และ Oxidation Pond

3.5 ถังปฏิกริยาแบบ Packed bed

ภายในถังปฏิกริยาแบบนี้จะมีวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนบรรจุเต็มภายในถังปฏิกริยา เช่น ก้อนหิน พลาสติก เป็นต้น เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะอยู่บนพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง

ลักษณะของถังปฏิกริยาแบบนี้มักเป็นแบบหอสูง ระบบบำบัดที่มีการรูปแบบการไหลแบบ Packed bed ได้แก่ Anaerobic Filter, Trickling Filter, Rotating Biological Contactor และ Ion Exchange

3.6 ถังปฏิกริยาแบบ Fluidized-bed

ถังปฏิกริยาแบบนี้จะมีตัวกลางที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อยู่ภายใน โดยการใช้วิธีพ่นอากาศขึ้นมาจากก้นถัง หรือการสูบน้ำเข้าสู่ก้นถังด้วยปริมาณและความเร็วที่มากพอ เป็นต้น เพื่อให้ตัวกลางสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในของเหลวจึงเลือกใช้ตัวกลางที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ลักษณะของถังปฏิกริยาแบบนี้มักเป็นแบบหอสูง ระบบบำบัดที่มีการรูปแบบการไหลแบบ Fluidized-bed ได้แก่ Upflow Anaerobic Sludge Blanket และ Expanded Granule Sludge Blanket เป็นต้น

4. ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB)

เป็นกลุ่มบ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบเร็ว (High Rate Anaerobic Digester) เป็นบ่อที่เหมาะสมสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียประเภทที่มีปริมาณสารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ บ่อหมักแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายค่อนข้างเร็ว ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ประมาณ 0.5-3 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 80-90 (สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน, 2547) ซึ่งจากประสิทธิภาพของบ่อหมักจึงทำให้บ่อหมักมีขนาดเล็ก แต่สามารถรับปริมาณของเสียได้มากกว่า

ระบบยูเอเอสบี อาศัยการพัฒนาโครงสร้างของกลุ่มแบคทีเรียในบ่อหมัก โดยน้ำเสียจะถูกสูบเข้าที่ก้นถัง ตะกอนแบคทีเรียจะเป็นตะกอนเม็ด (Granulated Sludge) ความเข้มข้นของตะกอนด้านล่างของถังหมักจะอยู่ระหว่าง 50-100 g/L และด้านบนอยู่ระหว่าง 5-40 g/L ขนาดของตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 1-3 มิลลิเมตร ค่า SVI (Sludge Volume Index) ของระบบที่ดีจะมีค่าน้อยกว่า 20 mL/g (Metcalf and Eddy, 2004) ส่วนบนของถังหมักแบบ UASB นี้จะมีอุปกรณ์แยกก๊าซชีวภาพและตะกอนแบคทีเรีย หรือเรียกว่า Gas-Solid Separator (GSS) ทำหน้าที่แยกก๊าซและป้องกันมิให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกไปกับน้ำเสีย

หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบี เป็นระบบบำบัดที่มีการฉีดพ่นน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกริยาขึ้นสู่ด้านบน (upflow feeding) โดยไม่มีตัวกลางหรือวัสดุใดๆ ในการพยุงมวลชีวภาพในระบบ น้ำเสียจะไหลขึ้นมาผสมกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในรูปของตะกอนที่ถูกเลี้ยงให้จับตัวเป็นเม็ด

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-3 มิลลิเมตร การฉีดพ่นของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยามี 2 แบบ 2 คือ การฉีดเป็นช่วงๆ (Intermittent pulse feeding) และแบบต่อเนื่อง (Continuous feeding) จากการไหลของน้ำเสียจากด้านล่างจะทำให้เม็ดตะกอนลอยตัวปะปนกับน้ำเสียโดยไม่จมลงก้นถัง ซึ่งองค์ประกอบหลักของถังปฏิกริยาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ส่วนของตะกอนชั้นล่าง (sludge bed)

เป็นชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ เม็ดตะกอนขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในส่วนล่างของถังจะมีลักษณะเป็นเม็ดที่เกิดจากแบคทีเรียเกาะติดกันแน่น ปริมาณความหนาแน่นของเซลล์แบคทีเรียต่อปริมาตรของชั้นเม็ดตะกอนขนาดใหญ่สูงกว่าชั้นเม็ดตะกอนขนาดเล็ก ทำให้มีความสามารถในการตกตะกอนสูง และเป็นปริมาณที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่

4.2 ส่วนของชั้นตะกอนลอย (sludge blanket)

หรือชั้นเม็ดตะกอนขนาดเล็ก เป็นชั้นที่ตะกอนจุลินทรีย์ลอยฟุ้งกระจายอยู่ด้านบน เนื่องจากมีขนาดเล็กและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยา จึงทำให้ตะกอนในชั้นนี้สะสมอยู่ที่ด้านบน

4.3 ส่วนของอุปกรณ์แยกตะกอนชีวภาพและก๊าซชีวภาพ (gas-solids separator; GSS)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกก๊าซชีวภาพออกจากของผสมระหว่าง ก๊าซชีวภาพ น้ำ และตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกแยกจะไหลเข้าสู่ส่วนแยกตะกอน และก๊าซชีวภาพจะถูกรวบรวมเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน หรือกล่าวได้ว่า เป็นการควบคุมและลดปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่หลุดออกไปกับน้ำเสียและรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ลักษณะการทำงานของ GSS สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ก) ตะกอนแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพ และอนุภาคของน้ำ เกาะไหลขึ้นมาพร้อมกัน

ข) เมื่อกระทบแผ่น GSS ทำให้เกิดการแยกออกจากกัน

- ค) อนุภาคน้ำไหลไปตามแผ่น GSS ออกไปยังทางน้ำออกด้านบน
- ง) ตะกอนแบคทีเรียขนาดใหญ่ที่ไม่มีก๊าซสะสมอยู่จะตกกลับลงมา
- จ) ก๊าซชีวภาพซึ่งไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ จะไหลขึ้นไปสะสมยังส่วนรวบรวมก๊าซด้านบน
- ฉ) กรณีที่กลุ่มของตะกอนแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพ และอนุภาคของน้ำ ไม่ไปชนกับแผ่น GSS จะเกิดการแยกตัวเมื่อถึงผิวน้ำ
- ช) สำหรับตะกอนที่มีขนาดเบาที่สามารถไหลตามกระแสออกมาได้จะเกิดการตกตะกอนในส่วนบนของแผ่น GSS เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเร็วในการไหลของน้ำต่ำและน้ำค่อนข้างนิ่ง

4.4 ส่วนของอุปกรณ์ในการตกตะกอน (settlement compartment)

ในส่วนของอุปกรณ์นี้จะสร้างสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว และแยกก๊าซชีวภาพออกไปจะเป็นของผสมระหว่างน้ำเสียที่มีสารมลพิษต่ำ เมื่อน้ำเสียส่วนนี้ไหลมาถึงอุปกรณ์นี้ ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะแยกตัวและตกตะกอนลงสู่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ ส่วนตะกอนชีวภาพที่มีน้ำหนักเบาจะไหลปะปนไปกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ดังนั้น จากรูปแบบการทำงานที่ง่ายของระบบยูเอเอสบี เมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักในระบบอื่นๆ แล้ว ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และค่าก่อสร้างระบบต่ำ เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวกลาง (support medium) เพื่อให้แบคทีเรียเกาะจับ ไม่ต้องมีอุปกรณ์ในการกวน (mixer) และไม่ต้องมีถังตกตะกอนรวมถึงผลการใช้เครื่องสูบน้ำซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานลงได้ นอกจากนี้ระบบดังกล่าว ยังไม่มีปัญหาการอุดตันในระบบ ดังเช่นเกิดกับระบบถังกรองไร้อากาศ

Wolmarans and Villiers (2002) ศึกษา น้ำเสียจาก โรงงานกลั่นสุราที่มีค่าซีโอดีประมาณ 30,000 mg/L และค่า pH ประมาณ 3-4 เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดยูเอเอสบีโดยให้อัตราการระบรทุกอยู่ระหว่าง 4 ถึง 8 kg COD/m³.d ในช่วงเริ่มเดินระบบ หลังจากช่วงเริ่มเดินระบบอัตรา

ภาระบรรทุกเพิ่มมากขึ้นในช่วงระหว่าง 4 ถึง 18 kg COD/m³.d โดยที่ระบบยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้มากกว่า 90% รวมทั้งการเริ่มและหยุดเดินระบบไม่ได้ส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสีย

Blonskaja et al. (2003) ได้ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศของโรงกลั่นสุราโดยการศึกษาระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ระบบตัวกลางแบบไร้อากาศ (Anaerobic Filter) เป็นช่วงแรกก่อนผ่านเข้าสู่ระบบยูเอเอสบี ระยะเวลาที่เก็บ 10-19 วัน อัตราภาระบรรทุก 2.5-5.1 kg COD/m³.d ประสิทธิภาพการบำบัดในรูปของซีโอดี 54% และช่วงที่สองเป็นระบบยูเอเอสบีซึ่งมีระยะเวลาเก็บ 20-39 วัน อัตราภาระบรรทุก 0.6-2.5 kg COD/m³.d ประสิทธิภาพการบำบัดในรูปของซีโอดี 93% นอกจากนี้พบว่า ที่ระยะการสร้างกรด ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 6 เมื่ออัตราภาระบรรทุกอยู่ที่ 2-4 kg COD/m³.d และระยะการสร้างก๊าซมีเทนคือ 7.6 เมื่ออัตราภาระบรรทุกอยู่ที่ 1-2 kg COD/m³.d

Parawira et al. (2005) ได้ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศยูเอเอสบีของโรงงานผลิตเบียร์ซึ่งมีขนาดของถังปฏิกรณ์ 500 ลูกบาศก์เมตร อัตราภาระบรรทุกประมาณ 6 kg COD/m³.d และระยะเวลาที่เก็บน้ำประมาณ 24 ชั่วโมง ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบอยู่ระหว่าง 8,240-20,000 mg/L พบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 57% ในรูปของซีโอดี

Akarsubasi et al. (2006) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียไร้อากาศยูเอเอสบี โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกมีปริมาตร 143 ลูกบาศก์เมตร ค่าซีโอดีที่เข้าสู่ระบบอยู่ระหว่าง 25,00-33,000 mg/L ระบบนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย 90% ในรูปของซีโอดี เมื่ออัตราภาระบรรทุกอยู่ที่ 6-11 kg COD/m³.d และให้ก๊าซชีวภาพ 350 mL/g VSS.d และชุดที่ 2 มีปริมาตร 476 ลูกบาศก์เมตร ค่าซีโอดีที่เข้าสู่ระบบอยู่ระหว่าง 27,000-32,000 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ระหว่าง 60-80% เมื่ออัตราภาระบรรทุกอยู่ที่ 2.5-8.5 kg COD/m³.d และให้ก๊าซชีวภาพ 376 mL/g VSS.d

5. กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบี

ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพ ขึ้นอยู่กับปริมาณแบคทีเรียในระบบ เมื่อมีปริมาณแบคทีเรียสูงประสิทธิภาพก็สูงตามไปด้วย ในการทำให้ระบบยูเอเอสบีมีปริมาณแบคทีเรียสูงขึ้น ต้องทำให้เกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรียสูงขึ้นมา เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดมีความถ่วงจำเพาะสูงจะจมตัวได้ดี และสามารถอยู่ในถังหมักได้นาน การเริ่มต้นเดิน

ระบบส่วนใหญ่จะใช้ตะกอนแบคทีเรียจากระบบที่อื่น ซึ่งมีลักษณะตะกอนเบา ดังนั้นกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากตะกอนเบาเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

5.1 Wash-out Stage

เป็นช่วงแรกของกระบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแบคทีเรีย ควรจะป้อนสารอินทรีย์น้อยกว่า $2 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ แบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบาซึ่งมีน้ำหนักเบาจะไหลออกไปพร้อมกับน้ำที่ล้นจากระบบตลอดเวลา แต่ยังคงมีการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในระบบอย่างช้าๆ

5.2 Transition Stage

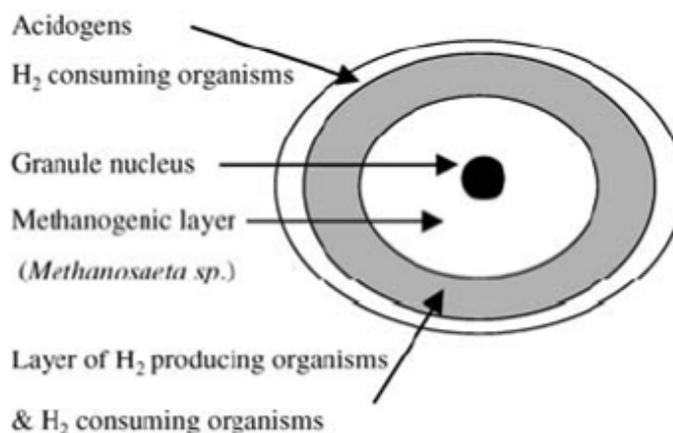
เป็นช่วงที่เริ่มเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ด แต่ยังมีจำนวนน้อยและขนาดเล็ก อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นกว่าในช่วงแรกหรือประมาณ $5 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ ช่วงนี้จะเกิดฟองก๊าซชีวภาพมาก และเป็นตัวพาตะกอนแบคทีเรียที่เบาออกจากระบบเพิ่มขึ้น จึงควรระวังไม่ให้เกิดการสูญเสียตะกอนมากกว่าการเพิ่มปริมาณตะกอนชนิดเม็ด และต้องไม่ให้อัตราการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียที่มีน้ำหนักเบาสูงกว่าอัตราการผลิตเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักสูง เพราะจะทำให้ระบบล้มเหลวได้

5.3 Progressive Granulation Stage

เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมัก โดยตะกอนที่เกิดในระยะแรกประกอบด้วยกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่จับตัวกันหลวมๆ และค่อยๆ อัดตัวแน่นเข้า เนื่องจากการเจริญเติบโตผิวนอกและภายในของกลุ่มตะกอน (Lettinga and Hulshoff, 1991) ในช่วงนี้ระบบจะมีความสามารถในการเพิ่มอัตราการรับสารอินทรีย์ได้สูงและรวดเร็วกว่าระยะอื่นๆ

sludge granule มีความสำคัญเนื่องจาก granule เป็นที่รวมของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ จุลินทรีย์จะเกาะซึ่งกันและกัน (Autoimmobilization) อนุภาคของฟิล์มจุลินทรีย์ (Biofilms) ที่รวมตัวกันตามธรรมชาติโดยไม่มีวัสดุตัวกลาง อนุภาคที่อัดแน่นนี้ประกอบด้วยกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งทำงานแบบให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เพื่อการหมักให้เกิดก๊าซมีเทน ทำให้ไม่ต้องสูญเสียพื้นที่สำหรับวัสดุจากภายนอกที่นำมาใช้เป็นที่เกาะของจุลินทรีย์ โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ชั้นนอกสุดคือแบคทีเรียกลุ่ม acidogenic คือใช้ก๊าซไฮโดรเจน ถัดเข้าไปเป็นชั้น

ของจุลินทรีย์ที่ผลิตและใช้ก๊าซไฮโดรเจน จากนั้นเป็นชั้นของแบคทีเรียที่เรียกลุ่ม methanogenic (*Methanosaeta sp.*) และด้านในสุดเป็นนิวเคลียสของตะกอนจุลินทรีย์ (McHugh et al., 2003)



ภาพที่ 1 ลักษณะ โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ที่มา: McHugh et al., 2003

โดยทั่วไปแล้ว Granule มีรูปร่างรีหรือกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2-5 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติในการตกตะกอนได้ดี และทำให้สามารถสะสมอยู่ในบ่อหมักได้ในปริมาณมาก ในลักษณะเช่นนี้ทำให้บ่อหมักสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้ในปริมาณครั้งละมากๆ (High Volumetric Organic Loading Rate) โดยที่ Sludge ไม่ถูกชะล้างออกจากบ่อ ด้วยเหตุนี้ Granular Sludge สามารถอยู่ในบ่อหมักได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน จึงทำให้เกิดการสะสมของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) เป็นผลให้ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ดี คุณสมบัติที่ดียิ่งอย่างหนึ่งของ Granular Sludge คือ สามารถป้องกันการสูญเสียพวก Methanogenic Bacteria เมื่ออยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสมได้ในระยะสั้น เช่น pH ต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ที่นำเข้าสู่บ่อหมัก เป็นต้น ดังนั้น granular sludge จึงมีความสำคัญต่อระบบการกำจัดสารอินทรีย์ในของเสียในบ่อแบบ UASB นอกเหนือจากมีคุณสมบัติในการสะสมอยู่ในบ่อหมักได้ในปริมาณมาก และทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

Hulshoff et al. (1983) ศึกษากระบวนการเกิดเม็ดจุลินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการ ที่อัตราการรับสารอินทรีย์ที่ 2-5 kg COD/m³d จะเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น และการเพิ่มของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังหมักเพียงเล็กน้อยก็จะกระตุ้นให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดเพิ่มมากขึ้น

Wiegant and Lettinga (1985) ทดลองใช้วัสดุตัวกลางสำหรับจุลินทรีย์ พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์สามารถตกตะกอนได้ดี และเป็นการรักษาตะกอนไว้ในถังหมัก ซึ่งความสามารถในการตกตะกอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตในรูปของ Spherical Floccs กับมีวัสดุตัวกลางในโครงสร้างของตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ด การเกิดตะกอนจุลินทรีย์ลักษณะเม็ดที่มีทั้งจุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างมีเทนผสมกัน ซึ่งจะเกิดได้ในสภาพที่เหมาะสมของถังปฏิกริยาแบบ UASB ในสถานะที่อุณหภูมิปานกลาง

Callender (1987) พบว่า ถังปฏิกริยาระบบยูเอเอสบี จุลินทรีย์จะจับกับอนุภาคสารอินทรีย์เป็นกลุ่มก้อน เพื่อพัฒนาเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-5 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติตกตะกอนได้ดีมาก จึงมีส่วนช่วยให้จุลินทรีย์ถูกกักให้อยู่เป็นชั้นตะกอน (Sludge bed) การตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าไม่ถูกรบกวน อัตราการตกตะกอนอยู่ที่ประมาณ 50 เมตรต่อชั่วโมง

Shin et al. (1992) ทดลองใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงจากโรงกลั่นสุรา เพื่อศึกษาชนิดของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังสร้างกรดจะมีรูปร่างและสีแตกต่างกัน หลังจากเริ่มต้นระบบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากถังสร้างกรดประกอบด้วยแบคทีเรียรูปร่างกลมต่อกันเป็นโซ่ยาว และถังสร้างมีเทนแบคทีเรียลักษณะเส้นใยพบกระจายอยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

6. ข้อดีและข้อจำกัดของระบบยูเอเอสบี (อนุตร, 2542 และกลุ่มงานวิจัยศึกษาพลังงาน (ก๊าซชีวภาพ), 2549)

6.1 ข้อดีของระบบยูเอเอสบี

ก) การก่อสร้างและควบคุมระบบสามารถทำได้ง่ายและมีราคาไม่แพงนัก

- ข) ความต้องการพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศในระบบ
- ค) ไม่ต้องใช้ตัวกลาง เก็บเชื้อไว้ในระบบได้มากทำให้ระบบมีขนาดเล็กกลง
- ง) ประยุกต์ใช้ได้ทั้งในระบบบำบัดขนาดเล็กมากไปจนถึงขนาดใหญ่มาก จึงไม่จำเป็นต้องใช้ระบบขนาดใหญ่เพียงแห่งเดียว จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนจากระบบเก็บรวบรวมและขนส่งน้ำเสียได้
- จ) เกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินในปริมาณน้อย โดยในระบบไม่ใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นเซลล์จุลินทรีย์เพียง 10% ในขณะที่ระบบใช้ออกซิเจนสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ 50-60%
- ฉ) ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีความคงตัวสูง สามารถ Dewatering ได้ง่าย
- ช) ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์จากระบบซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้
- ซ) ระบบไม่ใช้อากาศต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบใช้ออกซิเจน
- ฌ) การหยุดระบบสามารถทำได้ทันที และพร้อมจะทำงานต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเดิมในเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ซึ่งระบบสามารถฟื้นตัวได้รวดเร็ว จึงเหมาะกับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู
- ญ) ระบบสามารถรับภาระบรทุกสารอินทรีย์และภาระบรทุกที่เพิ่มขึ้นกระทันหัน ได้สูง โดยทั่วไปประมาณ 2-10 kg COD/m³.d
- ฎ) สามารถบำบัดน้ำเสียมีพิษบางอย่างได้ เช่น พวกสารละลายฮาโลเจน เป็นต้น

6.2 ข้อจำกัดของระบบยูเอเอสบี

ก) ไม่สามารถใช้เป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้ เนื่องจากยังมีสารอินทรีย์อินเตอมีเดียท (Intermediates) ต่างๆ หลงเหลืออยู่ ทำให้น้ำทิ้งมักมีบีโอดีสูง

ข) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน มักมีปัญหาที่อุณหภูมิต่ำ

ค) ความรู้และประสบการณ์ในการทำงานจริงยังมีอยู่ไม่มากนัก

ง) ต้องเลี้ยงตะกอนให้จับตัวกันเป็นเม็ด มิฉะนั้นประสิทธิภาพของระบบจะลดลง

จ) ต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบค่อนข้างนาน โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 3-6 เดือน ในกรณีที่ไม่มีตะกอนเม็ดเป็นตะกอนหัวเชื้อ

ฉ) แบคทีเรียโดยเฉพาะพวกสร้างก๊าซมีเทน มีความสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะเหมาะสมที่แคบ เช่น pH 6.8-7.2 จึงจะเป็นต้องมีการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ

ช) น้ำเสียควรมีของแข็งแขวนลอยและไขมันที่เข้าสู่ระบบไม่ต่ำกว่า 500 mg/L

ซ) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง ต้องทำการบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือ

1.1 ถังปฏิกริยาจำลอง ได้แก่

ก) ถังสร้างกรด

ทำจากถังพลาสติก 200 ลิตร ซึ่งเจาะระดับน้ำทางเข้าและออกของถังที่ 150 ลิตร โดยควบคุมอัตราการไหลน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 30 mL/min ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 3.5 วัน ต่อเรียงกันเป็นอนุกรม และลดระดับต่ำลงมาตั้งแต่ถังสร้างกรดที่ 1 ถึง 4 (ดังภาพที่ 2 และ 3)

ข) ถังปฏิกริยาระบบยูเอเอสบี

ทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ความสูง 6.5 เมตร ติดตั้งจุดเก็บตัวอย่างที่ระดับ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เมตร ภายในบรรจุ GSS (Gas Solids Separator) ที่ระดับความสูง 6.0-6.5 เมตร และปลายด้านบนสุดของ GSS ต่อเชื่อมกับท่อเก็บก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่ได้จะผ่านเข้าสู่กล่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพทางด้านล่าง

ท่อจ่ายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (ท่อ Influent) ทางด้านล่างของถังปฏิกริยา ใช้ระบบท่อน้ำเข้าแบบกระจาย โดยการใช้ท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ต่อเชื่อมกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเจาะรูขนาดเล็กกว่าด้านที่เจาะรูลงด้านล่าง และมีการจ่ายน้ำเสียเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง (Continuous) สำหรับท่อน้ำออก (ท่อ Effluent) ติดตั้งที่ระดับ 6.3 เมตร ปริมาณน้ำเสียที่เก็บกักอยู่ในถังปฏิกริยา ยูเอเอสบีเท่ากับ 204 ลิตร ท่อน้ำออกที่ไหลออกจากถังปฏิกริยาเชื่อมต่อเข้าสู่ถัง recirculate หรือถังเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งควบคุมปริมาตรที่ 25 ลิตร และที่ปริมาตรถึง 15 ลิตร ติดตั้งจุดต่อเชื่อมถังปรับสภาพน้ำเสีย (Equalization Tank) ซึ่งควบคุมปริมาตรที่ 60 ลิตร ดังนั้น น้ำเสียที่ไหลออก

จากระบบจะมีอัตราการไหลเท่ากับอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นถัง 200 ลิตรวางในระดับที่ต่ำกว่าเป็นบ่อรับน้ำเสียหรือ Pond) (ดังภาพที่ 2, 4, 5 และ 6)

1.2 กล้องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ

กล้องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพใช้หลักการแทนที่น้ำในอุปกรณ์เก็บก๊าซ เพื่อวัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น และใช้แรงดันของก๊าซที่เกิดขึ้น การยกอุปกรณ์เก็บก๊าซให้ลอยขึ้นสำหรับพลิกไปอีกด้านหนึ่ง แผ่นเหล็กที่ติดอยู่ที่มุมจะเคลื่อนที่ผ่าน Sensor ทางด้านบน และ Sensor จะส่งสัญญาณไปที่เครื่องนับตัวเลขหรือ Counter ซึ่งทำการนับจำนวนการพลิกของกล้องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ดังภาพที่ 6)

1.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

1.4 ตู้อบ (oven)

1.5 เดสิคเคเตอร์ (desiccator)

1.6 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

1.7 เครื่องชั่งละเอียด (analytical balance)

1.8 เครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)

1.9 เตาไฟฟ้า (hot plate)

1.10 เครื่องดูดสุญญากาศ

1.11 หลอดย่อยสลาย (digestion vessels)

1.12 กรวยบุคเนอร์ (buchner funnel)

1.13 ชักชั้นพลาสติก (suction flask)

1.14 อุปกรณ์และเครื่องแก้วพื้นฐาน

2. สารเคมี

2.1 Conc. HNO_3

2.2 Conc. H_2SO_4

2.3 NaOH

2.4 Na_2CO_3

- 2.5 $K_2Cr_2O_7$
 2.6 1,10-phenanthroline monohydrate
 2.7 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$
 2.8 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (FAS)
 2.9 $HgSO_4$
 2.10 $AgSO_4$

วิธีการ

1. การศึกษาองค์ประกอบเคมีและลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสุรา

สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่ไหลลงสู่บ่อพักน้ำเสีย เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ pH, BOD₅, COD, ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids), กรดไขมันระเหยง่าย, สภาพความเป็นด่าง และเจดาคัลท์ไนโตรเจน (TKN)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
ฟอสฟอรัส	mg/L	150
ซัลเฟต (SO ₄)	mg/L	4,500
โพแทสเซียม (K)	mg/L	5,500
แคลเซียม (Ca)	mg/L	1,650

ที่มา: สุนันท์, 2547

2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบสร้างกรด

2.1 ขั้นตอนการศึกษา

เริ่มจากการปรับสภาพน้ำเสียซึ่งนำมาจากบ่อกักน้ำกากส่าของโรงงานสุรา ระยะเวลาเก็บกักในบ่อดังกล่าวเท่ากับ 8 วัน ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 หรือใกล้เคียง เก็บในถังป้อนน้ำเสียหรือ Feed Tank จากนั้นปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ถังสร้างกรด (Acid Tank) ทางด้านล่างของถัง ซึ่งมีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียในถังสร้างกรดแต่ละถังนาน 3.5 วัน จำนวน 4 ชุด เมื่อคำนวณระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียรวมที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 11.5, 15, 18.5 และ 22 วัน ตามลำดับ น้ำเสียที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียของระบบสร้างกรดรวมทั้งสิ้น 14 วัน

ตัวแปรต้นคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย, กรดไขมันระเหยง่าย และของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ถังสร้างกรดแต่ละถัง

ตัวแปรควบคุมคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย และสภาพความเป็นต่าง

ตัวแปรตามคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์, กรดไขมันระเหยง่าย และของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังสร้างกรด

2.2 การเก็บข้อมูลดังนี้

ก) สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าสู่ถังสร้างกรด นำมาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ pH, COD, กรดไขมันระเหยง่าย, สภาพความเป็นต่าง อุณหภูมิ และของแข็งแขวนลอย

ข) สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากทางน้ำออกของถังป้อนน้ำเสีย ถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 นำมาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ pH, COD, กรดไขมันระเหยง่าย, สภาพความเป็นต่าง อุณหภูมิ และของแข็งแขวนลอย

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักแตกต่างกัน และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปของซีไอดี

3. การศึกษาอัตราการบำบัดของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

น้ำเสียจากถังสร้างกรด (Acid Tank) ที่ 4 ซึ่งระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียตั้งแต่บ่อกักน้ำอากาศผ่านระบบสร้างกรดรวมทั้งสิ้น 22 วัน น้ำเสียจะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ซึ่งทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนจุลินทรีย์เป็นเม็ดกลม (Granule Sludge) เริ่มต้นการเดินระบบโดยการใส่ตะกอนจุลินทรีย์จากบ่อบำบัดน้ำอากาศเก่าเดิมของโรงงาน นำไปผสมน้ำและเติมเข้าสู่ระบบในปริมาตรที่เท่ากัน การควบคุมระบบโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ยูเอสบีที่ 100 mL/min ความเร็วของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 18.50 cm/h และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบเท่ากับ 1.5 วัน ซึ่งถังปฏิกรณ์ยูเอสบีทั้ง 3 ชุด จะรับอัตราการบำบัดของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน โดยการควบคุมอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบดังนี้

ก) อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 5 mL/min และอัตราการไหลย้อนกลับ 95 mL/min
หรือ $Q:Q_r = 1:19$

ข) อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 10 mL/min และอัตราการไหลย้อนกลับ 90 mL/min
หรือ $Q:Q_r = 1:9$

ค) อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 15 mL/min และอัตราการไหลย้อนกลับ 85 mL/min
หรือ $Q:Q_r = 1:5.7$

เพื่อหาดัชนีการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย UASB ที่เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังนี้

ตัวแปรต้นคือ อัตราการบรรทุกของสารอินทรีย์ และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ

ตัวแปรควบคุมคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา, ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย และสภาพความเป็นต่าง

ตัวแปรตามคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ออกจากระบบ, ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอสบี, กรดไขมันระเหยง่าย และปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

3.2 การเก็บข้อมูลดังนี้

สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านถังปฏิกิริยายูเอสบีนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ pH, COD, กรดไขมันระเหยง่าย, สภาพความเป็นต่าง, MLSS (ตะกอนจุลินทรีย์) และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสีย และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการไหลของน้ำเสีย และอัตราการไหลกลับที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ

พารามิเตอร์	น้ำเข้า	น้ำออก
COD	ทุก 2 วัน	ทุก 2 วัน
pH	ทุกวัน	ทุกวัน
อุณหภูมิ	ทุกวัน	ทุกวัน
กรดไขมันระเหยง่าย	ทุก 2 วัน	ทุก 2 วัน
สภาพความเป็นด่าง	ทุก 2 วัน	ทุก 2 วัน
ของแข็งแขวนลอย (ระบบสร้างกรด)	ทุก 7 วัน	ทุก 7 วัน
MLSS (ระบบยูเอเอสบี)	ทุก 7 วัน	ทุก 7 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ระบบยูเอเอสบี)		ทุกวัน

4. วิธีการวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง

- 4.1 COD โดยวิธี Close Reflux Method ด้วย Dichromate
- 4.2 pH โดย pH meter
- 4.3 อุณหภูมิ โดย Thermometer
- 4.4 กรดไขมันระเหยง่าย โดยวิธี Titration Method
- 4.5 สภาพความเป็นด่าง โดยวิธี Titration Method
- 4.6 ของแข็งแขวนลอยและ MLSS โดยการหาน้ำหนักแห้ง MLSS

การวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างทั้งหมด ดำเนินการตามวิธีมาตรฐานของ Standard Method for Examination of Water and Wastewater (18th ed., 1992) โดย American Water Work Association

5. วิธีการเก็บรักษาตัวอย่าง

- 5.1 การตรวจวัดที่จุดเก็บตัวอย่าง

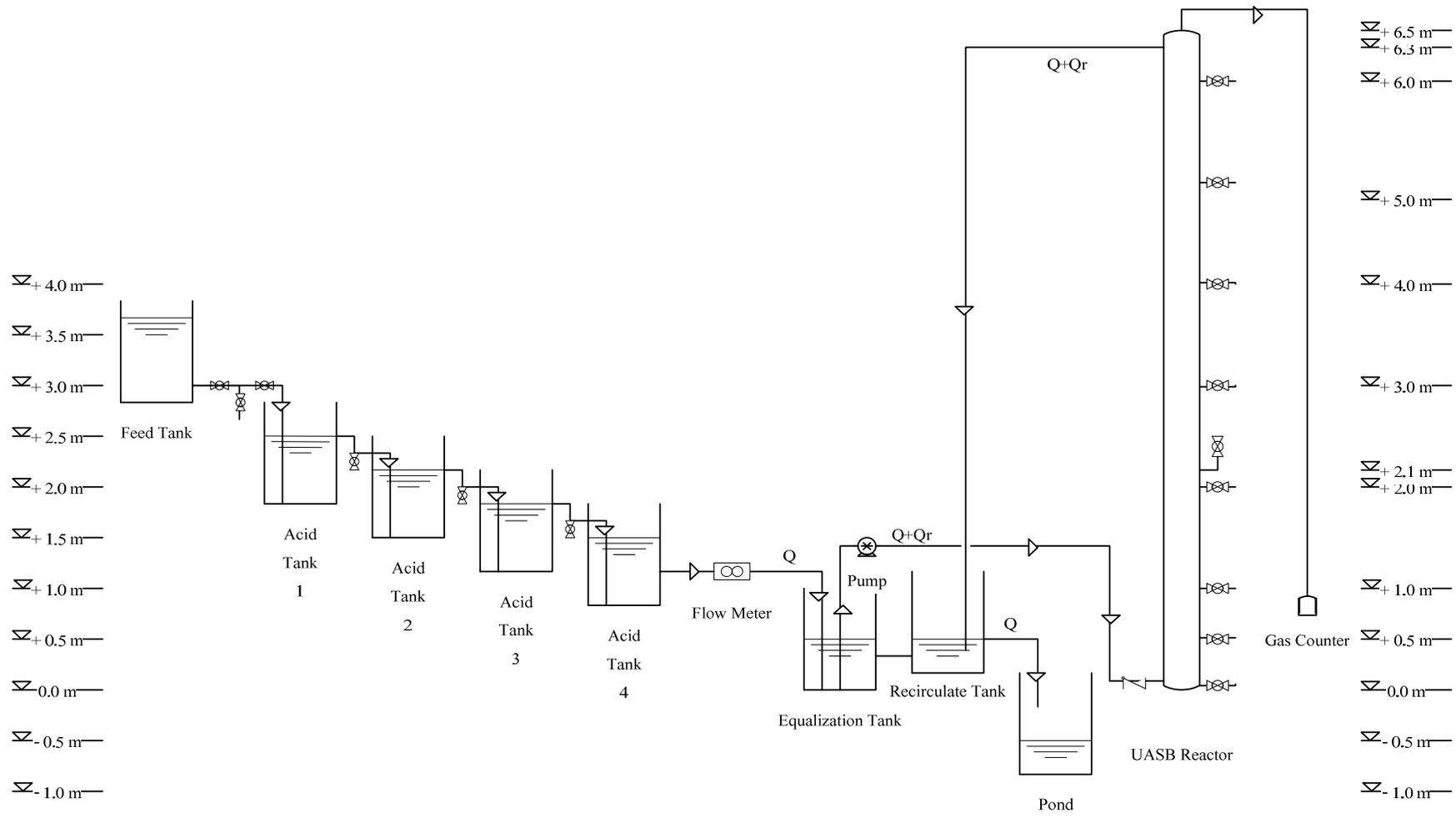
ได้แก่ pH และอุณหภูมิ

5.2 แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C

ได้แก่ COD, กรดไขมันระเหยง่าย, สภาพความเป็นด่าง, ของแข็งแขวนลอย และ MLSS

6. สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

ทำการทดลอง ณ องค์การสุรา อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา และวิเคราะห์ผลการทดลองที่ห้องปฏิบัติการทางสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำการวิจัยระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2550 ถึงเดือนเมษายน 2551



ภาพที่ 2 แบบจำลองการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย



ภาพที่ 3 ถังสร้างกรด (Acid Tank)



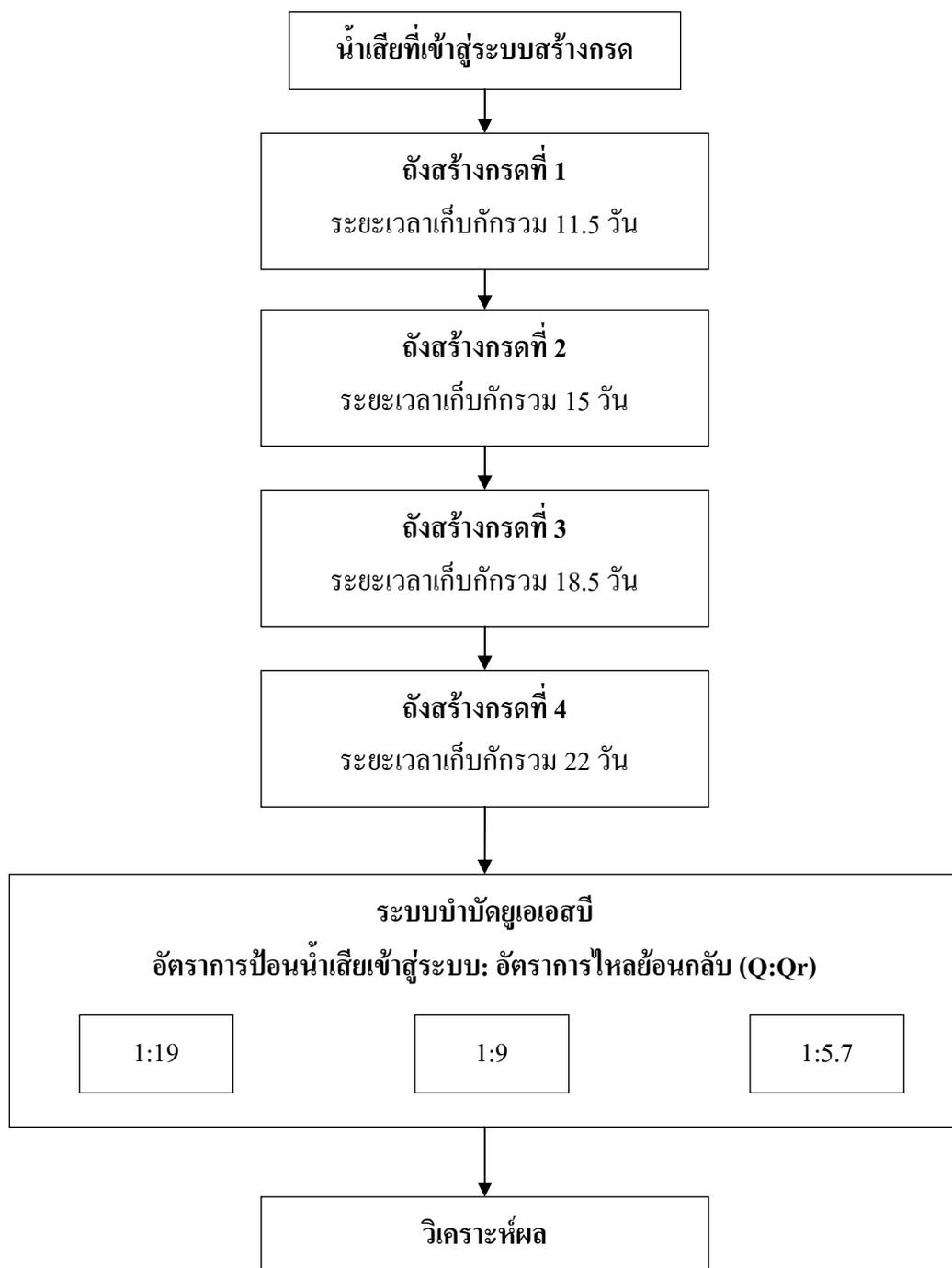
ภาพที่ 4 ถังปฏิบัติการระบบยูเอเอสบี



ภาพที่ 5 การติดตั้งท่อจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีทางด้านล่าง



ภาพที่ 6 การติดตั้งปั๊มและกล่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 7 แผนผังการศึกษากระบวนการสร้างกรดและระบบยูเอเอสบี

ผลและวิจารณ์

การศึกษาแบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศแบบยูเอสบี โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการกลั่น แอลกอฮอล์หรือน้ำกากส่า ซึ่งมีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงมากและมีสีน้ำตาลเข้ม โดยน้ำเสียจะผ่านเข้าสู่ระบบสร้างกรดก่อนเป็นระยะเวลา 14 วัน จึงจะเข้าสู่ระบบยูเอสบีซึ่งให้อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบและอัตราการไหลย้อนกลับ หรือ Q:Qr ที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
pH		3.50-4.60
BOD ₅	mg/L	60,000
COD	mg/L	90,000-150,000
ของแข็งแขวนลอย (SS)	mg/L	13,750-33,500
กรดไขมันระเหยง่าย	mg/L	19,950-25,650
สภาพความเป็นด่าง	mg/L	1,510-3,370
เจดาคาร์บอนไนโตรเจน	mg/L	2,400
ฟอสฟอรัส ¹	mg/L	150

ที่มา: ¹สุนันท์, 2547

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ปริมาณสารอาหารของแบคทีเรียแบบไร้อากาศซึ่งมีอัตราส่วน COD:N:P สูงกว่าที่แบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศต้องการใช้ในย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD:N:P เท่ากับ 500:5.5:1) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2547) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องเติมสารอาหารเพิ่มเติมให้แก่ระบบ

1. ระบบสร้างกรด

การศึกษากระบวนการสร้างกรดโดยการจำลองระบบระดับน้ำร่อง แบ่งระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบออกเป็นถังสร้างกรด 4 ชุด แต่ละชุดมีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 3.5 วัน ซึ่งดำเนินระบบแบบต่อเนื่อง และทำการวิเคราะห์น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดทั้ง 4 ชุด โดยน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียเท่ากับ 8 วัน และถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียเท่ากับ 11.5, 15, 18.5 และ 22 วัน ตามลำดับ ผลการศึกษาระหว่างวันที่ 3 มีนาคม ถึง 4 เมษายน 2551 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองระบบสร้างกรดตามพารามิเตอร์ต่างๆ

จุดเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์	น้ำเสียที่เข้าสู่ถัง สร้างกรดที่ 1	ถังสร้าง กรดที่ 1	ถังสร้าง กรดที่ 2	ถังสร้าง กรดที่ 3	ถังสร้าง กรดที่ 4
pH	6.69	6.22	6.10	6.05	6.03
COD (mg/L)	104,243	104,057	99,456	98,029	95,679
VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	22,371	27,368	29,465	30,604	32,608
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	17,340	19,019	19,371	19,789	20,121
SS (mg/L)	30,310	23,900	21,330	12,060	8,733
อุณหภูมิ 9:00 น. (°C)	29.2	28.8	28.7	28.8	28.9
อุณหภูมิ 16:00 น. (°C)	33.6	33.2	33.1	33.2	33.4

การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 11.5 วัน แต่การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระยะเวลาดังกล่าวมีความแปรปรวนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียที่เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบสร้างกรดสามารถเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายได้ แต่ในอัตราที่ลดลง ดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4
(mg/L as CH₃COOH)

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	22,371	1,532	25,650	19,950
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	27,368	2,386	31,800	22,575
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	29,465	1,830	32,700	26,280
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	30,604	1,993	33,600	27,525
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	32,608	1,742	35,220	29,025

ตารางที่ 7 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่าย

การเปรียบเทียบระหว่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	17.96	5.65
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	7.20	3.86
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	3.65	3.33
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	4.55	3.83

สภาพความเป็นด่างที่เติมให้กับน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ โดยการใช้โซดาไฟ (NaOH) มีประโยชน์มากในการรักษาความเป็นกรด-ด่างในระบบสร้าง เมื่อกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 8) เมื่อให้ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียที่มากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นด่างในน้ำเสียเพิ่มขึ้นน้อยกว่ากรดไขมันระเหยง่าย รวมถึงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นด้วยในถังสร้างกรดแต่ละชุด

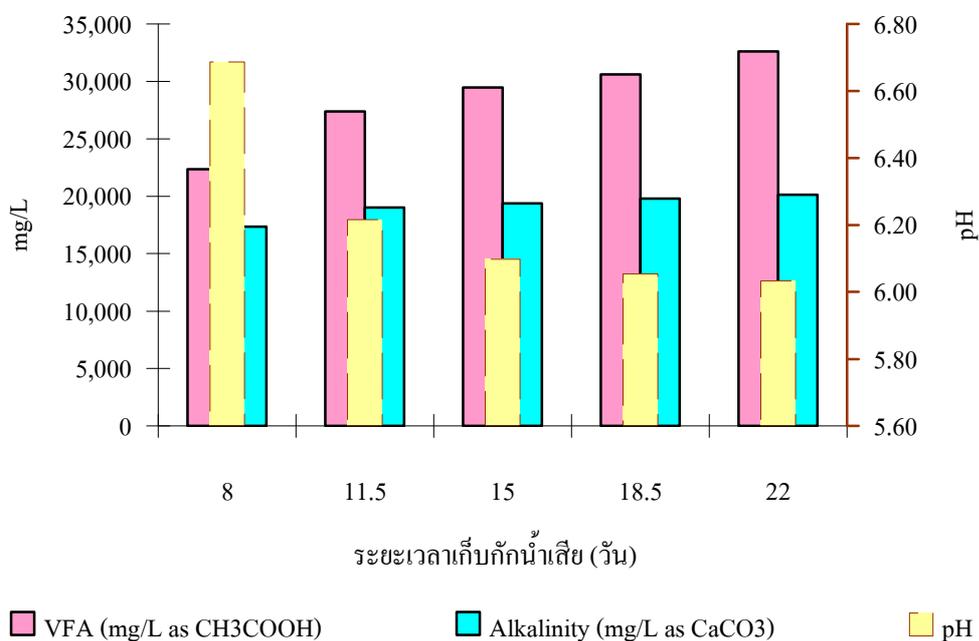
ตารางที่ 8 ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CaCO₃)

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	17,340	1,333	19,350	15,000
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	19,019	567	19,750	17,700
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	19,371	558	20,200	18,200
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	19,789	554	20,900	18,900
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	20,121	563	21,350	19,200

ค่า pH หรือค่าความเป็นกรด-ด่างจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบสร้างกรด เนื่องจากระบบสร้างกรดมีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อแยกชนิดของแบคทีเรีย การศึกษาในครั้งนี้พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียที่นานขึ้นค่า pH จะลดต่ำลง และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบต่ำกว่า ตารางที่ 9 แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดหรือ Acidogenesis Bacteria สามารถทนต่อค่า pH ที่ลดต่ำลงได้ถึง 5 แต่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทนค่า pH ดังกล่าวได้ ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 6.8-9.2 (สุบันจิต, 2548) การควบคุมระบบสร้างกรดพบว่า การลดลงของค่า pH สัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่าย ดังภาพที่ 8

ตารางที่ 9 ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	6.69	0.38	7.78	6.14
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	6.22	0.20	6.54	5.84
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	6.10	0.17	6.37	5.74
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	6.05	0.12	6.20	5.75
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	6.03	0.10	6.16	5.79



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นด่าง และค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสร้างกรด

ส่วนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำซึ่งวัดในรูปของซีโอดีลดลงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสร้างกรดมาก ดังตารางที่ 10 ประสิทธิภาพของถังสร้างกรดในการกำจัดสารอินทรีย์เฉลี่ยที่ระยะเวลาเก็บกัก 11.5, 15, 18.5 และ 22 วัน เท่ากับ 0.40%, 4.30%, 1.26% และ 2.45% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 15 วัน จะเกิดการลดลงของสารอินทรีย์มากที่สุด ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	104,243	8,906	120,400	92,400
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	104,057	9,078	119,800	93,800
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	99,456	9,264	114,500	89,600
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	98,029	8,923	114,200	86,800
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	95,679	9,732	114,300	81,400

ตารางที่ 11 ร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

การเปรียบเทียบระหว่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	0.17	7.26
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	4.28	3.38
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	1.20	2.99
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3 กับน้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	2.41	4.83

ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สามารถใช้อัตราส่วนสภาพความเป็นด่างต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี ซึ่งระบบที่ดีควรจะมีค่าต่ำกว่า 0.4 ตลอดช่วงระยะเวลาที่ดำเนินการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่า 0.4 สำหรับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 อัตราส่วนสภาพความเป็นด่างต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีไอคิของ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	0.17	0.02	0.20	0.13
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	0.18	0.02	0.20	0.15
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	0.20	0.02	0.22	0.16
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	0.20	0.02	0.23	0.17
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	0.21	0.02	0.24	0.17

สำหรับปริมาณของแฉ่งแขวนลอยในน้ำเสียมีการลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งรวมไปถึงความแปรปรวนของของแฉ่งแขวนลอยในน้ำเสียด้วย โดยจะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย 15-18.5 วัน ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าของแฉ่งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
น้ำเสียที่เข้าสู่ถังสร้างกรดที่ 1	30,130	6,102	22,367	37,800
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 1	23,900	5,193	20,200	33,000
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 2	21,330	5,351	14,350	29,400
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 3	12,060	2,582	10,150	16,550
น้ำเสียที่ออกจากถังสร้างกรดที่ 4	8,733	778	8,100	9,900

2. ระบบยูเอเอสบี

การศึกษาระบบบำบัดยูเอเอสบีที่อัตราการบรรทุกต่างๆ โดยการควบคุมจากอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เพื่อให้ระบบมีความเร็วเท่ากัน จึงต้องควบคุมด้วยอัตราการไหลย้อนกลับ ผลการทดลองระหว่างวันที่ 17 มีนาคม ถึง 4 เมษายน 2551 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 14

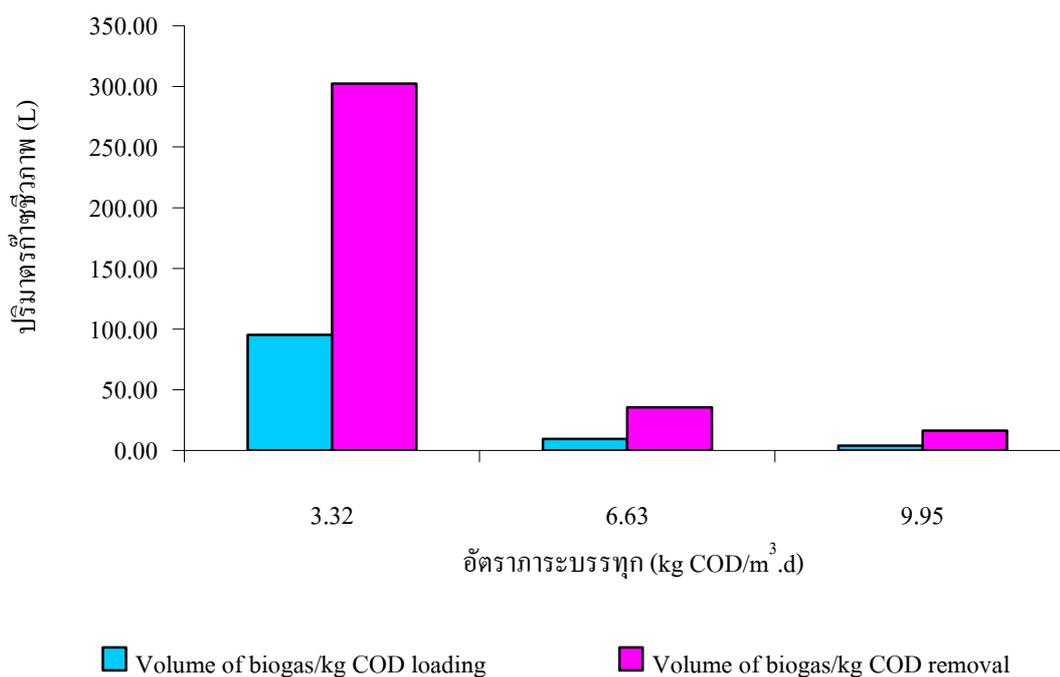
ตารางที่ 14 ผลการศึกษาระบบยูเอเอสบี

อัตราการบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	อัตราการป้อนน้ำ เสียเข้าสู่ระบบ (mL/min)	อัตราการไหล ย้อนกลับ (mL/min)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้น (L/d)
3.32	5	95	45.67	64.43
6.63	10	90	38.20	12.74
9.95	15	85	34.92	8.05

ผลจากการเดินระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศยูเอเอสบี พบว่า ที่อัตราการบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงสุด (45.67%) เมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกให้แก่ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียลดลงอย่างมาก (อัตราการบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d มีประสิทธิภาพการบำบัด 38.20% และ 34.92% ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ให้แก่ระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศยูเอเอสบีเป็น 2 เท่า หรือ 6.63 kg COD/m³.d ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกเป็น 3 เท่า หรือ 9.95 kg COD/m³.d ประสิทธิภาพการบำบัดยังคงลดลง แต่ความแตกต่างระหว่างอัตราการบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d (7.47%) น้อยกว่า อัตราการบรรทุก 3.32 และ 6.63 kg COD/m³.d (3.28%)

ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากอัตราการบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d มีปริมาณสูงสุด และแตกต่างจากอัตราการบรรทุกที่ 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d อย่างมาก (ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อกิโลกรัมชีโอดี เมื่ออัตราการบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d เท่ากับ 95.19, 9.45 และ 4.00 L) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ออัตราการบรรทุกทั้งหมดไป หรือ COD removal (ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อกิโลกรัมชีโอดี เมื่ออัตราการบรรทุก

3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d เท่ากับ 302.21, 35.53 และ 16.39 L) ดังภาพที่ 9 สำหรับความแปรปรวนของปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน โดยการเปรียบเทียบกับปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวัน พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d มีความแตกต่างระหว่างวันน้อยกว่าที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d แสดงถึงความเสถียรของระบบในการรับอัตราภาระบรรทุกที่เหมาะสม ดังตารางที่ 15



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ออัตราภาระบรรทุกและอัตราภาระบรรทุกทั้งหมดไป

ตารางที่ 13 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ออัตราภาระบรรทุกต่างๆ (L/kg COD)

อัตราภาระบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	95.19	9.46	110.68	80.82
6.63	9.45	2.50	13.75	5.77
9.95	4.00	1.78	6.18	1.52

สภาพความเป็นค่าของน้ำเสียในระบบยูเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m³.d มีสภาพความเป็นค่าสูงสุด รองลงมาคือ ที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 และ 3.32 kg COD/m³ ตามลำดับ ดังตารางที่ 16 การควบคุมระบบยูเอสบีโดยการใช้อัตราส่วนสภาพความเป็นค่าต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ มีอัตราส่วนใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 17 และมีค่าต่ำกว่า 0.4 ตามที่กำหนดเพื่อการเดินระบบที่ดี

ตารางที่ 16 สภาพความเป็นค่าของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ (mg/L as CaCO₃)

อัตราภาระบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	18,769	1,179	20,700	17,200
6.63	21,174	1,072	23,050	19,750
9.95	21,594	1,232	23,000	19,800

ตารางที่ 17 อัตราส่วนสภาพความเป็นค่าต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ

อัตราภาระบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	อัตราส่วนระหว่างสภาพความเป็นค่าต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	0.37	0.03	0.41	0.33
6.63	0.35	0.02	0.42	0.34
9.95	0.35	0.03	0.42	0.32

หากมองถึงค่ากรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ เมื่อให้อัตราภาระบรรทุกสูงขึ้น กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอสบีจะมีปริมาณลดลงน้อยกว่า และในบางครั้งมีปริมาณสูงกว่าน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบด้วย เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดมีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน แม้ว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป

ของซีโอไซด์ลดลง แต่การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยง่ายนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน รวมถึงค่า pH ในระบบพบว่า มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายระบบ โดยอัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d ค่า pH มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่าที่อัตราภาระบรรทุกอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า pH ดังตารางที่ 18 และ 19

ตารางที่ 18 กรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ (mg/L as CH₃COOH)

อัตราภาระบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	20,838	1,070	22,320	19,200
6.63	28,548	1,749	32,100	25,425
9.95	30,658	2,175	34,050	27,525

ตารางที่ 19 ค่า pH ของน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุกต่างๆ

อัตราภาระบรรทุก (kg COD/m ³ .d)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	7.40	0.18	7.67	7.14
6.63	6.89	0.02	6.94	6.87
9.95	6.95	0.04	7.04	6.86

การเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบระหว่างเวลา 9:00 และ 16:00 น. ระหว่างช่วงที่ทำการศึกษาแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 4 °C ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 20 อุณหภูมิของน้ำเสียเฉลี่ยที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราการบำบัดต่างๆ เวลา 9:00 และ 16:00 น. ($^{\circ}\text{C}$)

อัตราการบำบัด (kg COD/m ³ .d)	เวลา 9:00 น.	เวลา 16:00 น.
3.32	30.2	33.9
6.63	30.3	33.7
9.95	30.4	33.7

ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์หรือ MLSS ในระบบยูเอเอสบีตั้งแต่ระดับ 0-6 เมตร พบว่า ที่อัตราการบำบัด 3.32 kg COD/m³.d มีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ต่ำที่สุด การเพิ่มอัตราการบำบัดจะทำให้ระบบมีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์สะสมได้มากกว่า (ระหว่างวันที่ 14 มีนาคม ถึง 4 เมษายน 2551) เมื่อเริ่มต้นการทดลองทำการเติมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีที่อัตราการบำบัดต่างๆ (g)

อัตราการบำบัด (kg COD/m ³ .d)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
3.32	7,179	1,301	8,256	5,594
6.63	8,307	828	8,950	7,091
9.95	9,458	583	10,172	8,845

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การนำระบบสร้างกรดมาใช้ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 11.5 วัน หลังจากนั้นอัตราการผลิตของกรดไขมันระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นแต่ในอัตราที่ลดลง
2. การรักษาระดับสภาพความเป็นด่างในถังสร้างกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสร้างกรดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่ระยะเวลาต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นด่างในถังสร้างกรด
3. ระบบสร้างกรดเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะลดสารอินทรีย์ในน้ำในรูปแบบของซีไอดีเพียงเล็กน้อยโดยเฉพาะช่วงระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 11.5 วัน (0.18%) ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 15 วัน จะมีการลดสารอินทรีย์สูงสุดคือ 4.42% และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 18.5 วัน และ 22 วัน ลดลง 1.43% และ 2.40% ตามลำดับ
4. การใช้ระบบสร้างกรดสามารถลดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีสามารถลดสารแขวนลอยในน้ำเสียได้ โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 18.5 วัน
5. การนำระบบสร้างกรดมาใช้สำหรับน้ำเสียจากโรงงานสุรา ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียที่เหมาะสมคือ 18.5 วัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นด่าง และค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นสำคัญ
6. ระบบยูเอเอสบีมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d (45.16%) รองลงมาคือ ที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d เท่ากับ 38.20% และ 34.92% ตามลำดับ
7. ระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m³.d สามารถให้ปริมาณก๊าซชีวภาพได้สูงสุดคิดเป็น 95.19 L/kg COD และเมื่อคิดต่อสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพ

เกิดขึ้น 302.21 L/kg COD แต่ที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d ระบบยูเอเอสบีให้ ปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำกว่ามากคือ 9.45 และ 4.00 L/kg COD ตามลำดับ เมื่อคิดต่อสารอินทรีย์ที่ถูก จำกัดเท่ากับ 35.53 และ 16.39 L/kg COD

8. การออกแบบระบบยูเอเอสบีที่เหมาะสมควรเลือกใช้อัตราภาระบรรทุกที่ 3.32 kg COD/m³.d เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูง

ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อน้ำเสียที่มีความความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง
2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการเกิดก๊าซชีวภาพของระบบ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมถึงอัตราภาระบรรทุกที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน
3. ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีความแตกต่างกัน เมื่อมีอัตราภาระบรรทุกที่แตกต่างกัน รวมถึงกรดไขมันระเหยง่ายที่ออกจากระบบยูเอเอสบีด้วย จึงควรศึกษาเพิ่มเติมถึงสัดส่วนชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการให้ก๊าซชีวภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

กลุ่มงานวิจัยศึกษาพลังงาน (ก๊าซชีวภาพ) สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2547. ก๊าซชีวภาพ. แหล่งที่มา: <http://renew.dede.go.th/Knowledge/>, 31 พฤษภาคม 2550.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสียเล่ม 4. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2547. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สุพันธ์ นิมรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทแอคทีฟ พรินท์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

สุเมธ ชวเดช. 2529. การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน, น.1-12 ใน เอกสารประกอบการฝึกอบรมทางวิชาการเรื่องการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของโรงงานประกอบกิจการอาหารและเครื่องดื่ม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สุเมธ ชวเดช. 2540. ระบบยูเอเอสบี-ตัวกลางกรองแบบอนุภูมิภาคสูงและสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากส่าและผลิตก๊าซชีวภาพ. รายงานผลการวิจัยทุนรัชดาภิเษกสมโภช.

สุนันท์ พูลชนกกิจ. 2547. การบำบัดน้ำกากส่าของโรงงานสุรา องค์การสุรา โดยกระบวนการยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุตร เปียงแก้ว. 2542. การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของ แหล่งคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรทัย ชวาลภาฤทธิ. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรรม สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

Alper T. Akarsubasi, Orhan Ince, Nilgun A. Oz, Betul Kirdar, Bahar K. Ince. 2006. Evaluation of performance, acetoclastic methanogenic activity and archaeal composition of full-scale UASB reactors treating alcohol distillery wastewaters. **Process Biochemistry** 41: 28–35.

Bileen Wolmarans and Gideon H de Villiers. 2002. Start-up of a UASB effluent treatment plant on distillery wastewater. **Water SA** 28 (1): 63-68.

Callender, I.J., T.A. Clark and P.N. McFarlane. 1987. Anaerobic digestion of wood ethanol stillage using upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Biotechnology and Bioengineering** 30: 896-908.

Clair N. Sawyer, Perry L. McCarty and Gene F. Parkin. 2003. **Chemistry Environmental Engineer and Science**. 5th ed. McGraw-Hill, New York.

C.P. Leslie Grady, Glen T. Daigger and Henry C. Lim. 1999. **Biological Wastewater Treatment**. 2nd ed. Marcel Dekker, New York.

Fayza A. Nasr and Rifaat Abdel Wahaab. 1996. **Applying the UASB reactor to treat sewage sludge containing sulphides**. *Environmental Management and Health* 7 (5): 27-31.

- Hulshoff, L.W.P., W.J. de Zeeuw, C.T.M. Velzeboer and G. Lettinga. 1983. Granulation in UASB reactor. **Water Science and Technology** 15: 291-304.
- Metcalf and Eddy. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reused**. 4th ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Sharon McHugh, Caroline O'Reilly, Therese Mahony, Emer Colleran and Vincent O'Flaherty. 2003. Anaerobic granular sludge bioreactor technology. **Environmental Science and Bio/Technology** 2: 225-245.
- Shin, H.S., B.U. Bae, J.J. Lee and B.C. Paik. 1992. Anaerobic digestion of distillery wastewater in a two-phase UASB system. **Water Science and Technology** 25: 361-371.
- V. Blonskaja, A. Menert and R. Vilu. 2003. Use of two-stage anaerobic treatment for distillery waste. **Advances in Environmental Research** 7: 671-678.
- W. Parawira , I. Kudita , M.G. Nyandoroh and R. Zvauya. 2005. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. **Process Biochemistry** 40: 593-599
- Wiegant, W.M. and G. Lettinga. 1985. Thermophilic anaerobic digestion of sugar in upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Biotechnology and Bioengineering** 27: 1603-1607.
- Wiegant, W.M. and A.W.A. de Man. 1985. Granulation of biomass in thermophilic up-flow anaerobic sludge blanket reactor treating acidified waste-waters. **Biotechnology and Bioengineering** 28: 718-727.
- Young-Ho Ahn, Kyung-Sok Min and Richard E. Speece. 2001. Pre-Acidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater. **Water Resource** 35 (18): 4267-4276.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CH₃COOH)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
8/2/2551	24,750	27,300	27,225	26,175	26,520
15/2/2551	21,270	25,200	27,750	28,125	24,900
22/2/2551	24,300	29,220	30,300	26,700	25,125
29/2/2551	21,150	25,875	29,250	30,300	29,100
3/3/2551	21,150	27,150	29,100	30,300	32,550
5/3/2551	25,650	31,800	32,700	33,600	31,800
7/3/2551	22,500	29,175	30,450	33,450	33,900
10/3/2551	22,230	26,625	30,300	28,725	30,825
12/3/2551	19,950	24,300	26,490	27,525	29,025
14/3/2551	22,050	24,675	26,280	27,600	29,025
17/3/2551	21,435	22,875	27,750	28,530	31,350
19/3/2551	20,700	25,665	28,170	30,300	31,050
21/3/2551	23,025	25,950	27,750	29,325	31,950
24/8/2551	22,050	28,050	30,585	31,905	35,220
26/3/2551	21,225	28,050	30,450	30,150	31,650
28/3/2551	23,625	28,575	31,050	32,595	34,050
31/3/2551	25,050	28,830	30,000	31,680	33,750
2/4/2551	22,875	28,500	29,700	30,975	32,250
4/4/2551	22,050	30,300	31,200	32,400	32,625
8/4/2551	27,900	29,205	29,715	31,230	31,770
9/4/2551	21,300	30,570	31,350	32,550	32,850
11/4/2551	18,900	22,650	28,650	29,625	30,840

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์สภาพต่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L as CaCO₃)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่ เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
8/2/2551	18,500	18,320	18,620	17,650	17,050
15/2/2551	16,850	17,780	18,800	18,070	16,750
22/2/2551	18,880	22,420	20,830	19,330	15,100
29/2/2551	18,300	18,800	20,000	20,350	20,250
3/3/2551	16,800	17,700	18,200	18,900	19,200
5/3/2551	18,350	19,150	20,200	20,900	20,600
7/3/2551	15,100	18,950	19,350	20,350	21,350
10/3/2551	17,350	19,320	19,450	19,600	20,200
12/3/2551	18,750	18,950	18,900	19,100	19,600
14/3/2551	16,020	18,100	18,550	20,200	20,100
17/3/2551	17,200	18,650	19,150	19,200	19,620
19/3/2551	17,920	18,950	19,300	19,400	19,600
21/3/2551	17,320	19,100	19,420	19,650	20,040
24/8/2551	19,100	19,200	19,370	19,800	20,380
26/3/2551	15,000	19,600	19,680	19,650	19,600
28/3/2551	17,400	19,650	20,100	20,400	20,500
31/3/2551	19,350	19,750	19,550	20,000	20,350
2/4/2551	17,100	19,200	19,980	19,900	20,550
4/4/2551	15,510	19,720	19,750	20,200	20,250
8/4/2551	17,950	18,700	19,450	19,750	20,250
9/4/2551	15,600	17,750	18,520	19,100	19,550
11/4/2551	13,700	15,400	18,450	19,000	19,100

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำกากส่าที่ เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
11/2/2551	7.45	6.18	6.22	6.24	6.21
12/2/2551	7.76	6.40	6.31	6.29	6.24
13/2/2551	7.43	6.64	6.33	6.31	6.25
14/2/2551	7.37	6.60	6.32	6.31	6.24
15/2/2551	7.63	6.51	6.31	6.29	6.26
18/2/2551	7.59	6.47	6.29	6.12	6.04
19/2/2551	7.36	6.29	6.26	6.12	6.07
20/2/2551	6.61	6.34	6.15	6.18	6.07
21/2/2551	6.98	6.32	6.20	6.18	6.08
22/2/2551	6.95	6.34	6.22	6.18	6.09
25/2/2551	6.93	6.36	6.28	6.19	6.11
26/2/2551	6.89	6.34	6.24	6.18	6.12
27/2/2551	6.80	6.30	6.21	6.17	6.11
28/2/2551	6.78	6.30	6.19	6.13	6.11
29/2/2551	7.02	6.31	6.17	6.10	6.10
3/3/2551	6.23	5.89	5.76	5.78	5.80
4/3/2551	6.16	5.88	5.74	5.75	5.79
5/3/2551	6.31	5.84	5.89	5.88	5.86
6/3/2551	6.44	5.84	5.88	5.89	5.85
7/3/2551	6.46	6.26	6.15	6.15	6.16
10/3/2551	6.44	6.20	6.14	6.14	6.08
11/3/2551	6.71	6.15	6.12	6.06	6.06
12/3/2551	6.69	6.42	6.14	6.08	6.13
13/3/2551	6.70	6.43	6.20	6.09	6.09
14/3/2551	6.70	6.50	6.35	6.13	6.08
17/3/2551	6.63	6.34	6.13	6.11	6.04
18/3/2551	6.72	6.19	6.08	6.09	6.09
19/3/2551	6.68	6.27	6.09	6.09	6.09

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำากาสที่ เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
20/3/2551	6.67	6.20	6.04	6.05	6.04
21/3/2551	7.14	6.10	6.00	6.00	6.02
24/3/2551	6.24	6.12	6.06	6.03	6.04
25/3/2551	6.14	6.09	6.04	6.04	6.04
26/3/2551	7.78	6.28	6.05	6.03	6.01
27/3/2551	7.20	6.25	6.04	6.03	6.01
28/3/2551	6.83	6.21	6.04	6.04	6.05
31/3/2551	6.71	6.40	6.25	6.08	6.03
1/4/2551	7.30	6.54	6.37	6.20	6.09
2/4/2551	6.70	6.36	6.32	6.19	6.10
3/4/2551	6.56	6.33	6.30	6.20	6.12
4/4/2551	7.03	6.30	6.26	6.20	6.14
8/4/2551	6.29	6.16	6.16	6.15	6.09
9/4/2551	6.07	6.06	6.13	6.15	6.13
10/4/2551	7.45	6.10	6.13	6.13	6.13
11/4/2551	7.08	6.62	6.33	6.12	6.13

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้างกรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่ เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
3/3/2551	120,400	119,800	113,800	114,200	113,613
5/3/2551	117,800	118,400	114,500	113,600	114,300
7/3/2551	115,400	116,600	112,000	108,600	105,200
10/3/2551	92,400	109,800	110,400	102,400	94,800
12/3/2551	99,600	107,400	99,800	97,600	81,400
14/3/2551	112,400	106,000	91,000	87,000	83,600
17/3/2551	102,800	96,400	90,600	91,200	90,000
19/3/2551	101,000	93,800	90,400	92,600	93,400
21/3/2551	102,800	94,800	89,600	86,800	88,800
24/8/2551	99,400	99,000	95,800	92,000	95,600
26/3/2551	106,000	97,000	94,689	98,200	94,000
28/3/2551	96,800	102,800	99,000	100,400	99,400
31/3/2551	98,600	97,400	93,400	93,600	91,600
2/4/2551	94,000	97,600	97,400	94,200	93,800
4/4/2551	106,600	103,000	100,400	101,600	98,400
8/4/2551	99,600	93,600	95,400	83,000	97,200
9/4/2551	110,600	98,400	96,400	100,800	99,800
11/4/2551	88,400	98,800	90,000	98,200	86,000

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและออกจากถังสร้าง
กรดที่ 1, 2, 3 และ 4 (mg/L)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่ เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4
1/2/2551	25,900	22,867	25,640	18,280	18,333
8/2/2551	13,750	25,900	24,350	22,600	20,300
15/2/2551	27,133	15,633	9,267	19,000	16,200
22/2/2551	32,950	28,450	17,550	8,400	13,000
29/2/2551	18,867	25,600	17,100	14,600	20,867
7/3/2551	22,367	22,333	20,733	11,033	8,100
14/3/2551	33,500	33,000	14,350	10,150	9,900
21/3/2551	25,933	22,867	20,767	11,833	9,167
28/3/2551	31,050	21,100	21,400	10,733	8,300
4/4/2551	37,800	20,200	29,400	16,550	8,200
11/4/2551	38,400	32,700	12,000	11,950	9,100

ตารางผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d (mg/L as CH₃COOH)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี	น้ำเสีย	น้ำเสีย	น้ำเสีย
		ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
3/3/2551	32,550	12,300	15,000	14,550
5/3/2551	31,800	16,650	19,200	18,150
7/3/2551	33,900	17,400	22,800	19,200
10/3/2551	30,825	19,200	24,330	23,100
12/3/2551	29,025	17,580	23,475	21,975
14/3/2551	27,600	19,350	23,700	24,900
17/3/2551	31,350	20,475	27,375	28,575
19/3/2551	31,050	19,200	28,530	28,875
21/3/2551	31,950	20,175	28,650	30,150
24/3/2551	35,220	21,150	28,380	30,000
26/3/2551	31,650	19,500	25,425	27,525
28/3/2551	34,050	22,320	29,100	34,050
31/3/2551	33,750	21,750	29,100	31,650
2/4/2551	32,250	21,750	28,275	32,850
4/4/2551	32,625	21,225	32,100	32,250
8/4/2551	31,770	20,670	32,100	33,450
9/4/2551	32,850	20,700	32,400	33,600
11/4/2551	30,840	20,700	30,825	30,600

ตารางผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์สภาพความเป็นด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d (mg/L as CaCO₃)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ยูเอเอสบี	น้ำเสีย	น้ำเสีย	น้ำเสีย
		ที่ออกจาก	ที่ออกจาก	ที่ออกจาก
		ระบบยูเอเอสบี	ระบบยูเอเอสบี	ระบบยูเอเอสบี
		ที่อัตราภาระ	ที่อัตราภาระ	ที่อัตราภาระ
		บรรทุก 3.32	บรรทุก 6.63	บรรทุก 9.95
		kg COD/m ³ .d	kg COD/m ³ .d	kg COD/m ³ .d
3/3/2551	19,200	15,400	14,550	14,000
5/3/2551	20,600	15,000	15,600	15,400
7/3/2551	21,350	16,050	16,900	15,800
10/3/2551	20,200	17,000	18,400	18,300
12/3/2551	19,600	16,450	17,600	17,200
14/3/2551	20,100	18,450	19,200	19,300
17/3/2551	19,620	18,700	19,750	19,800
19/3/2551	19,600	17,400	20,350	20,300
21/3/2551	20,040	17,200	20,400	21,000
24/3/2551	20,380	18,700	20,850	21,650
26/3/2551	19,600	17,630	20,470	20,600
28/3/2551	20,500	19,600	21,550	23,000
31/3/2551	20,350	19,470	23,050	22,100
2/4/2551	20,550	20,700	22,150	23,000
4/4/2551	20,250	19,520	22,000	22,900
8/4/2551	20,250	20,250	21,520	22,000
9/4/2551	19,550	19,880	21,300	22,150
11/4/2551	19,100	18,800	22,000	20,450

ตารางผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ยูเอเอสบี	น้ำเสีย	น้ำเสีย	น้ำเสีย
		ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
11/2/2551	6.21	7.31	7.04	7.20
12/2/2551	6.24	7.43	7.13	7.18
13/2/2551	6.25	7.31	7.21	7.13
14/2/2551	6.24	7.35	7.25	7.15
15/2/2551	6.26	7.44	7.52	7.41
18/2/2551	6.04	7.25	7.07	7.05
19/2/2551	6.07	7.49	7.32	7.72
20/2/2551	6.07	7.45	7.33	7.45
21/2/2551	6.08	7.54	7.36	7.43
22/2/2551	6.09	7.48	7.37	7.41
25/2/2551	6.11	7.50	7.23	7.32
26/2/2551	6.12	7.09	7.12	7.14
27/2/2551	6.11	7.09	7.10	7.15
28/2/2551	6.11	7.09	6.98	7.05
29/2/2551	6.10	7.09	6.93	7.03
3/3/2551	5.80	6.98	6.97	7.01
4/3/2551	5.79	6.98	6.98	6.98
5/3/2551	5.86	6.89	6.90	6.96
6/3/2551	5.85	6.99	6.92	6.95
7/3/2551	6.16	7.00	6.95	6.92
10/3/2551	6.08	7.09	6.97	6.93
11/3/2551	6.06	7.12	7.01	6.96
12/3/2551	6.13	7.11	6.92	7.00
13/3/2551	6.09	7.15	6.91	6.98
14/3/2551	6.08	7.22	6.90	6.92

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ยูเอเอสบี	น้ำเสีย	น้ำเสีย	น้ำเสีย
		ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
17/3/2551	6.04	7.21	6.89	6.87
18/3/2551	6.09	7.14	6.93	6.86
19/3/2551	6.09	7.20	6.87	6.88
20/3/2551	6.04	7.25	6.87	6.88
21/3/2551	6.02	7.35	6.87	6.89
24/3/2551	6.04	7.30	6.87	6.95
25/3/2551	6.04	7.33	6.87	6.94
26/3/2551	6.01	7.32	6.89	6.96
27/3/2551	6.01	7.36	6.92	6.98
28/3/2551	6.05	7.43	6.94	7.04
31/3/2551	6.03	7.51	6.87	6.98
1/4/2551	6.09	7.63	6.89	6.99
2/4/2551	6.10	7.67	6.92	7.03
3/4/2551	6.12	7.64	6.89	7.01
4/4/2551	6.14	7.65	6.90	7.03
8/4/2551	6.09	7.66	6.93	6.96
9/4/2551	6.13	7.66	6.90	6.94
10/4/2551	6.13	7.65	6.92	6.93
11/4/2551	6.13	7.62	6.95	6.96

ตารางผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และที่ออกจากระบบยูเอเอสบี เมื่ออัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d (mg/L)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี	น้ำเสีย	น้ำเสีย	น้ำเสีย
		ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	ที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
3/3/2551	113,613	61,363	61,088	60,238
5/3/2551	114,300	64,500	68,000	62,000
7/3/2551	105,200	55,000	58,600	55,600
10/3/2551	94,800	53,200	54,700	51,800
12/3/2551	81,400	45,000	44,500	43,500
14/3/2551	83,600	46,700	48,400	45,400
17/3/2551	90,000	54,100	52,600	53,700
19/3/2551	93,400	51,300	59,900	64,400
21/3/2551	88,800	42,300	49,400	49,600
24/3/2551	95,600	50,500	59,800	64,600
26/3/2551	94,000	52,800	59,200	62,500
28/3/2551	99,400	53,300	60,100	64,000
31/3/2551	91,600	49,100	58,100	60,200
2/4/2551	93,800	52,800	62,500	64,800
4/4/2551	98,400	53,400	62,300	68,300
8/4/2551	97,200	55,600	62,400	63,000
9/4/2551	99,800	57,100	66,600	72,900
11/4/2551	86,000	52,000	59,800	67,500

ตารางผนวกที่ 10 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบยูเอเอสบี และ
ตะกอนจุลินทรีย์ที่อัตราภาระบรรทุก 3.32, 6.63 และ 9.95 kg COD/m³.d (mg/L)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ยูเอเอสบี	น้ำเสีย ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสีย ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสีย ที่ออกจาก ระบบยูเอเอสบี ที่อัตราภาระ บรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
1/2/2551	18,333	32,700	33,100	29,600
8/2/2551	20,300	14,750	24,400	31,700
15/2/2551	16,200	14,350	11,700	31,750
22/2/2551	13,000	31,750	35,100	10,850
29/2/2551	20,867	28,100	31,250	27,600
7/3/2551	8,100	29,300	28,900	21,750
14/3/2551	9,900	18,550	12,550	28,450
21/3/2551	9,167	15,750	10,150	23,600
28/3/2551	8,300	21,050	28,600	18,450
4/4/2551	8,200	32,100	31,350	33,850
11/4/2551	9,100	29,350	27,800	31,600

ตารางผนวกที่ 11 ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรทุก 3.32 kg COD/m³.d (mg/L)

ระดับความสูง (m)	29/2/2551	7/3/2551	14/3/2551	21/3/2551	28/3/2551	4/4/2551	11/4/2551
0.0	134,600	160,000	139,600	135,600	140,600	230,833	200,800
0.5	131,667	120,200	106,800	60,700	34,000	35,600	32,500
1.0	89,900	58,100	42,500	24,250	23,500	37,350	32,600
2.0	60,800	29,900	32,500	25,300	20,800	39,950	43,750
3.0	33,350	28,250	26,600	31,150	17,500	32,550	33,950
4.0	26,650	25,650	27,700	19,500	19,800	30,950	34,050
5.0	17,700	30,500	30,100	36,700	32,600	36,500	25,700
6.0	15,850	31,200	34,800	18,700	23,900	20,600	35,150

ตารางผนวกที่ 12 ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกริยาแบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m³.d (mg/L)

ระดับความสูง (m)	29/2/2551	7/3/2551	14/3/2551	21/3/2551	28/3/2551	4/4/2551	11/4/2551
0.0	149,500	161,200	149,000	184,400	153,500	175,000	167,000
0.5	148,000	131,200	112,100	97,850	91,100	89,500	83,950
1.0	104,100	54,100	44,400	56,950	45,200	51,900	48,100
2.0	86,300	29,600	37,100	53,000	35,100	48,900	34,500
3.0	40,450	29,200	25,900	17,450	22,100	19,900	9,350
4.0	22,700	22,300	24,000	26,450	13,700	19,950	16,000
5.0	22,050	30,700	31,450	30,900	20,500	31,850	29,800
6.0	19,300	25,950	38,400	20,700	18,700	34,950	32,400

ตารางผนวกที่ 13 ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกริยาแบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m³.d (mg/L)

ระดับความสูง (m)	29/2/2551	7/3/2551	14/3/2551	21/3/2551	28/3/2551	4/4/2551	11/4/2551
0.0	132,800	165,200	152,600	140,800	140,400	197,000	120,400
0.5	116,600	121,000	132,000	170,600	141,300	119,800	101,000
1.0	81,800	60,500	51,800	40,400	50,300	55,150	51,750
2.0	74,400	28,350	47,200	45,600	58,000	43,350	54,200
3.0	29,600	30,800	37,900	21,700	24,000	36,800	36,500
4.0	22,200	24,000	22,200	27,850	20,800	27,000	16,500
5.0	19,700	31,900	32,600	17,700	22,000	37,800	34,750
6.0	21,900	28,850	29,800	18,000	27,800	36,150	35,900

ตารางผนวกที่ 14 อุณหภูมิของน้ำเสียที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ เวลา 9:00 น. (°C)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
3/3/2551	25.2	25.1	25.3	25.4	25.4	24.5	24.8	25.0
4/3/2551	23.4	23.4	23.5	23.8	23.5	22.5	22.5	22.6
5/3/2551	25.2	24.8	24.3	24.3	24.3	24.1	24.1	24.0
6/3/2551	25.6	25.3	24.8	24.8	24.7	25.3	25.4	25.3
7/3/2551	28.0	27.3	27.5	27.6	27.8	26.8	27.1	27.8
10/3/2551	28.3	28.1	28.0	27.7	27.8	27.1	27.3	27.6
11/3/2551	28.0	28.5	28.4	28.3	27.9	28.1	28.0	28.2
12/3/2551	30.2	29.8	28.9	30.0	30.0	30.0	30.4	30.0
13/3/2551	30.3	30.2	30.0	30.0	29.8	29.9	30.0	29.8
14/3/2551	31.1	29.7	29.5	29.5	29.2	29.4	29.3	29.5
17/3/2551	30.5	30.5	30.5	30.7	32.0	30.7	30.7	30.7
18/3/2551	29.9	29.7	29.7	29.9	30.3	29.7	29.8	30.2
19/3/2551	30.7	29.6	29.7	29.7	29.9	29.4	29.7	29.9
20/3/2551	29.9	29.9	29.8	29.5	29.5	30.1	30.0	30.3
21/3/2551	29.9	29.8	29.6	29.6	29.5	30.2	30.4	30.5

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
24/3/2551	28.7	28.7	28.3	28.4	28.4	28.6	28.7	28.7
25/3/2551	30.3	29.8	29.7	29.7	29.8	29.4	29.6	29.9
26/3/2551	31.3	29.9	29.7	29.5	28.9	30.7	30.8	31.0
27/3/2551	30.9	30.7	30.1	30.2	30.5	31.3	31.2	31.4
28/3/2551	31.3	30.8	30.8	30.8	31.3	31.5	31.4	31.4
31/3/2551	30.6	30.3	30.4	30.3	30.2	30.4	30.4	30.5
1/4/2551	30.3	29.5	29.3	29.8	30.1	30.0	30.3	30.2
2/4/2551	30.5	30.0	30.0	30.1	30.3	30.0	30.1	30.3
3/4/2551	30.4	30.0	30.1	30.0	30.3	30.2	30.3	30.2
4/4/2551	30.3	29.8	29.9	29.9	30.4	30.4	30.5	30.6
8/4/2551	30.0	30.8	30.7	30.5	30.5	30.7	30.9	31.1
9/4/2551	31.9	31.4	31.3	31.7	31.9	32.2	31.9	32.2
10/4/2551	32.0	31.3	31.2	31.5	31.5	31.2	31.2	32.0
11/4/2551	31.8	31.3	31.4	31.4	31.5	31.0	32.0	31.5

ตารางผนวกที่ 15 อุณหภูมิของน้ำเสียที่จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ เวลา 16:00 น. (°C)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
3/3/2551	28.7	29.3	29.7	30.0	30.4	30.9	30.7	30.5
4/3/2551	33.3	29.0	28.8	28.6	27.9	27.0	27.5	29.5
5/3/2551	30.0	31.0	30.7	30.7	30.7	31.2	30.8	31.3
6/3/2551	32.0	31.3	31.2	31.0	31.3	32.0	31.0	31.8
7/3/2551	32.4	31.2	31.4	31.2	31.2	30.2	30.7	30.4
10/3/2551	32.4	32.0	31.6	31.5	31.8	32.0	31.5	32.3
11/3/2551	32.6	33.4	33.4	33.3	33.4	32.5	32.5	32.2
12/3/2551	35.7	34.7	34.3	34.8	34.9	35.9	35.3	35.5
13/3/2551	36.4	34.6	34.5	34.3	34.7	35.7	35.2	35.6
14/3/2551	37.5	34.0	33.7	33.5	33.7	34.2	34.2	33.9
17/3/2551	35.5	35.1	35.0	35.1	35.2	33.7	33.9	34.1
18/3/2551	35.1	35.8	34.1	34.2	34.2	34.9	34.3	34.2
19/3/2551	35.1	34.7	34.9	35.5	35.9	34.9	34.8	34.8
20/3/2551	34.9	34.5	34.2	34.6	34.7	34.8	34.2	34.6
21/3/2551	33.0	33.7	34.7	33.3	33.4	34.7	33.9	33.5

ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	ถังสร้างกรดที่ 1	ถังสร้างกรดที่ 2	ถังสร้างกรดที่ 3	ถังสร้างกรดที่ 4	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอสบีที่อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
24/3/2551	32.8	35.2	34.3	34.0	34.3	33.5	33.2	33.4
25/3/2551	34.9	35.1	35.0	34.9	34.9	33.9	34.0	34.2
26/3/2551	34.3	34.3	34.3	34.7	35.4	34.8	35.0	35.2
27/3/2551	35.1	34.4	34.3	34.8	34.9	34.4	34.0	34.2
28/3/2551	34.4	33.8	34.0	33.3	33.3	33.2	32.8	32.4
31/3/2551	30.8	30.8	30.3	30.8	32.3	31.1	30.9	30.8
1/4/2551	32.3	32.5	32.7	32.5	32.4	33.1	33.1	32.9
2/4/2551	34.8	34.5	34.4	35.1	35.0	34.9	35.1	35.0
3/4/2551	34.2	33.9	34.2	34.8	34.6	34.5	34.6	34.5
4/4/2551	31.9	31.9	32.2	33.2	33.4	31.5	31.5	31.0
8/4/2551	33.4	34.9	34.7	34.6	34.8	33.4	33.2	33.0
9/4/2551	34.6	33.9	34.2	34.4	35.5	34.3	34.2	34.0
10/4/2551	34.7	32.6	33.8	34.0	34.5	33.5	34.0	33.8

ตารางที่ 16 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบยูเอสบี (L)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
3/3/2008	16.11	12.86	10.99
4/3/2008	15.21	13.54	9.01
5/3/2008	20.10	14.18	10.82
6/3/2008	24.21	16.96	14.52
7/3/2008	30.75	15.38	10.85
8/3/2008	34.71	13.42	12.33
9/3/2008	42.30	16.64	18.25
10/3/2008	42.15	14.21	18.30
11/3/2008	43.65	20.07	14.91
12/3/2008	43.50	26.11	12.69
13/3/2008	41.94	24.70	12.99
14/3/2008	44.70	21.33	12.30
15/3/2008	47.10	20.66	11.43
16/3/2008	53.85	18.90	11.97
17/3/2551	65.55	17.79	12.00
18/3/2551	57.90	15.94	10.03
19/3/2551	54.27	15.76	10.58
20/3/2551	55.26	10.93	8.85
21/3/2551	56.64	12.04	9.64
22/3/2551	60.81	15.15	6.96
23/3/2551	62.04	14.86	11.18
24/3/2551	60.93	14.77	12.30
25/3/2551	65.28	13.68	9.81
26/3/2551	68.64	12.72	9.18
27/3/2551	71.82	13.92	7.29
28/3/2551	73.80	14.15	6.96
29/3/2551	75.36	12.42	7.32
30/3/2551	78.12	13.68	7.04
31/3/2551	60.33	10.14	4.27

ตารางที่ 16 (ต่อ)

วันที่เก็บตัวอย่าง	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d	น้ำเสียที่ออกจากระบบ ยูเอเอสบีที่อัตราภาระ บรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d
1/4/2551	72.78	10.93	6.55
2/4/2551	74.64	9.08	3.07
3/4/2551	71.91	9.05	3.84
4/4/2551	65.10	8.17	4.49
5/4/2551	77.13	7.47	6.38
6/4/2551	60.93	5.33	4.58
7/4/2551	91.92	7.06	7.45
8/4/2551	88.47	7.24	6.00
9/4/2551	96.45	7.30	6.08
10/4/2551	88.74	6.45	4.16

ตารางผนวกที่ 17 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเทียบกับอัตราการบำบัดของระบบในรูปแบบของซีโอดี

วันที่ เก็บตัวอย่าง	อัตราการบำบัดทุก 3.32 kg COD/m ³ .d			อัตราการบำบัดทุก 6.63 kg COD/m ³ .d			อัตราการบำบัดทุก 9.95 kg COD/m ³ .d		
	COD loading (kg COD/ m ³ .d)	Volume gas per day (L/d)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)	COD loading (kg COD/ m ³ .d)	Volume gas per day (L/d)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)	COD loading (kg COD/ m ³ .d)	Volume gas per day (L/d)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)
3/3/2551	4.00	18.39	22.51	8.01	14.01	8.58	12.01	10.19	4.16
5/3/2551	4.03	15.21	18.51	8.06	13.54	8.24	12.08	9.01	3.65
7/3/2551	3.71	24.21	32.01	7.41	16.96	11.21	11.12	14.52	6.40
10/3/2551	3.34	42.30	62.07	6.68	16.64	12.21	10.02	18.25	8.93
12/3/2551	2.87	43.65	74.59	5.74	20.07	17.15	8.61	14.91	8.49
14/3/2551	2.95	41.94	69.78	5.89	24.70	20.55	8.84	12.99	7.20
17/3/2551	3.17	65.55	101.31	6.34	17.79	13.75	9.52	12.00	6.18
19/3/2551	3.29	54.27	80.82	6.58	15.76	11.74	9.87	10.58	5.25
21/3/2551	3.13	56.64	88.72	6.26	12.04	9.43	9.39	9.64	5.03
24/3/2551	3.37	60.93	88.65	6.74	14.77	10.75	10.11	12.30	5.97
26/3/2551	3.31	68.64	101.57	6.63	12.72	9.41	9.94	9.18	4.53
28/3/2551	3.50	73.80	103.27	7.01	14.15	9.90	10.51	6.96	3.25
31/3/2551	3.30	60.33	89.65	6.60	10.14	7.53	9.90	4.27	2.12
2/4/2551	3.31	74.64	110.68	6.61	9.08	6.73	9.92	3.07	1.52
4/4/2551	3.47	65.10	92.02	6.94	8.17	5.77	10.40	4.49	2.12

ตารางผนวกที่ 18 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเทียบกับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

วันที่	อัตราภาระบรรทุก 3.32 kg COD/m ³ .d			อัตราภาระบรรทุก 6.63 kg COD/m ³ .d			อัตราภาระบรรทุก 9.95 kg COD/m ³ .d		
	COD loading (kg COD/m ³ .d)	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้น ต่อวัน (L)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)	COD loading (kg COD/m ³ .d)	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้น ต่อวัน (L)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)	COD loading (kg COD/m ³ .d)	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้น ต่อวัน (L)	Volume gas/COD loading (L/kg COD)
3/3/2551	1.28	18.39	70.53	2.57	14.01	26.72	3.92	10.19	12.75
5/3/2551	1.22	15.21	61.20	2.27	13.54	29.30	3.84	9.01	11.51
7/3/2551	1.23	24.21	96.64	2.28	16.96	36.46	3.64	14.52	19.55
10/3/2551	1.02	42.30	203.75	1.96	16.64	41.57	3.16	18.25	28.35
12/3/2551	0.89	43.65	240.29	1.81	20.07	54.49	2.78	14.91	26.28
14/3/2551	0.90	41.94	227.75	1.72	24.70	70.30	2.80	12.99	22.71
17/3/2551	0.88	65.55	365.87	1.83	17.79	47.66	2.66	12.00	22.08
19/3/2551	1.03	54.27	258.30	1.64	15.76	47.13	2.13	10.58	24.37
21/3/2551	1.14	56.64	244.07	1.93	12.04	30.62	2.88	9.64	16.43
24/3/2551	1.10	60.93	270.71	1.75	14.77	41.34	2.28	12.30	26.50
26/3/2551	1.01	68.64	333.84	1.70	12.72	36.62	2.31	9.18	19.47
28/3/2551	1.13	73.80	320.78	1.92	14.15	36.07	2.60	6.96	13.13
31/3/2551	1.09	60.33	271.66	1.74	10.14	28.62	2.45	4.27	8.54
2/4/2551	1.00	74.64	364.79	1.53	9.08	29.06	2.13	3.07	7.07
4/4/2551	1.10	65.10	289.88	1.77	8.17	22.67	2.21	4.49	9.96

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวบุษวรรณ สุทธธาดา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	17 พฤศจิกายน 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-