



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงต่อการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบตัวกลางกรองลอยใไร้อากาศ

Effect of Photosynthetic Bacteria on Hydrogen Sulfide Removal in Anaerobic Floating Filter Media System

นามผู้วิจัย นายกฤษณะ จิรสารสวัสดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วิไล เกียมไชยศรี, D.Tech.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ชาติ เกียมไชยศรี, D. Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบตัวกลางกรองลอย
ใไรอากาศ

Effect of Photosynthetic Bacteria on Hydrogen Sulfide Removal in Anaerobic Floating
Filter Media System

โดย

นายกฤษณะ จิรสารสวัสดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

กฤษณะ จิรสารสวัสดิ์ 2553: ผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงต่อการกำจัด
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบตัวกลางกรองลอยไร้อากาศ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ไฉไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc. 117 หน้า

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองหาผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียว
ต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อาศัยอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางกรองลอยไร้
อากาศแบบโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเฉลี่ยในช่วง 151 – 431 มิลลิกรัมต่อ
ลิตรหรือคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 7:1 ถึง 0.4:1 โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ
ซัลเฟตในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น โดยในระบบที่มีแสงมี
ปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยกว่าในระบบที่ไม่มีแสง (ชุดควบคุม) ในทุกอัตราส่วน
ของซีโอดีต่อซัลเฟต โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบที่มีแสงอยู่ในช่วง
0.3 – 2.67 % และ 0.7 – 3.51 % ในระบบที่ไม่มีแสงทั้งนี้ระบบที่มีแสงสามารถกำจัด
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีแสงโดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 1,000 – 10,000 ppmv
นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นของซีโอดีต่อซัลเฟตที่เหมาะสมเป็น 4:1 โดยให้
ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเป็น 59 และ 43 % ในระบบที่มีแสงและไม่มีแสงตามลำดับ
นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตดังกล่าวไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี
(> 90%) แต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด ซัลเฟตลดลงทั้งในระบบที่มีแสงและไม่มีแสง

Kridsana Jirasansawat 2010: Effect of Photosynthetic Bacteria on Sulfide Removal in Anaerobic Floating Filter Media System. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Wilai Chiemchisri, D.Tech.Sc. 117 pages.

The objective of this study was to investigate potential in hydrogen sulfide removal by photosynthetic bacteria, green bacteria, in anaerobic floating filter media. The synthetic wastewater with average sulfate concentration in ranges of 151 – 431 mg/L or with COD/SO₄²⁻ ratio of 7:1 to 0.4:1 were fed into the systems. The results show that the concentrations of hydrogen sulfide in effluent had increased as increase in influent sulfate concentrations. However, those in the system with light were lower than those in the system without light (control) at every COD/SO₄²⁻ ratio. It was found that concentrations of hydrogen sulfide were in ranges of 0.3 – 2.67 % and 0.7 – 3.51% in the system with and without light, respectively. The differences of hydrogen sulfide concentrations of both were 1,000 – 10,000 ppmv. Ratio of influent sCOD:SO₄²⁻ (4:1) was recommended, for COD removal higher than 90% in both system with efficiency of sulfate removals of 59% and 43% in with and without light system respectively. In conclusion increased sulfate concentrations in influent did not affect to COD removal efficiency, however decreased in sulfate removal efficiency in both systems.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิไล เจียมไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่คอยให้ความกรุณาอย่างดียิ่งในการช่วยเหลือวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์
ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมราช วันทวินและรองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยาที่
กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่านในภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่และน้อง รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้
กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

กฤษณะ จิรสารสวัสดิ์

เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์การศึกษา	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ของน้ำเสียเข้า - ออกตลอดระยะเวลาการเดินระบบ	80
ภาคผนวก ข องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	100
ภาคผนวก ค รายการคำนวณ	105
ภาคผนวก ง สมการที่เกี่ยวข้องในการกำจัดซัลเฟต	112
ภาคผนวก จ การสกัดเม็ดสี (pigment) ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง	115
ประวัติและการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแอนไรรู้อากาศแบบต่างๆ	10
2	ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งไอออนประจุบวกของโลหะเบา	15
3	ผลของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบรู้อากาศ	16
4	ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I – SRB และ C – SRB	20
5	ความชอบซัลเฟต (Sulfate Affinity, KS) ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต	35
6	สัดส่วนการใช้ซีโอไซด์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน	36
7	เปรียบเทียบวิธีกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทางเคมีและทางชีวภาพ	41
8	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	49
9	สภาวะทดลอง	50
10	พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์	51
11	พารามิเตอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ	54
12	อัตราส่วนสารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ของ(กลูโคส)ต่อสารอินทรีย์ในรูปของซีโอไซด์ (อะซีติก)	64
13	ลักษณะของน้ำเข้า-ออกเฉลี่ยของระบบที่แปรผันอัตราส่วนของซีโอไซด์ต่อซัลเฟต	65
ตารางผนวกที่		
ก1	พารามิเตอร์ของน้ำเสียเข้า - ออก	81
ข1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในระบบ	105
ข2	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่มีการแปรผันความเข้มข้นซัลเฟต (ระบบที่มีแสง)	107
ข3	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่มีการแปรผันความเข้มข้นซัลเฟต (ระบบที่ไม่มีแสง)	108

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก	6
2	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบแอนแอโรบิกและการไหลของพลังงาน	8
3	ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์	11
4	วัฏจักรซัลเฟอร์	18
5	ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบ Syntrophy	25
6	ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ	27
7	ความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีผลต่อการเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน	34
8	บทบาทของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในธรรมชาติ	42
9	แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ <i>chlorobiaceae</i>	43
10	แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ (a) <i>Chromatiaceae</i> (b) <i>Rhodospiriliaceae</i>	44
11	รายละเอียดของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง	47
12	ลักษณะของแบคทีเรียสีเขียวที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 400x และ 1000x	54
13	กราฟการดูดกลืนแสงของ แบคทีเรียสีเขียวในระบบ	55
14	ถึงปฏิกิริยา (a) และลักษณะของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีเขียวในถึงปฏิกิริยา (b)	56
15	พีเอชของน้ำเสียที่เข้า - ออกจากระบบ	57
16	ความเป็นด่าง (Alkalinity) เข้า - ออกจากระบบ	59
17	กรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid)	59
18	อัตราส่วนของ VFA/Alk	60
19	สารอินทรีย์ (sCOD) เข้า - ออกจากระบบ	61
20	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของทั้งสองระบบที่แปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต	62
21	ความเข้มข้นของซัลเฟตเข้า – ออกจากระบบ	63
22	ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตของทั้งสองระบบ	66

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ปริมาณของกำมะถัน	67
24	ปริมาณของกำมะถันของทั้งสองระบบเมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต	68
25	ปริมาณของกำมะถันคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต	69
26	ปริมาณของกำมะถันไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต	69
27	การดูดกลืนแสงของแบคทีเรียสีเขียวที่แปรผันค่า CN	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

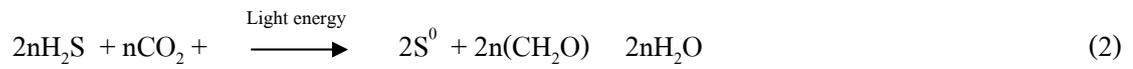
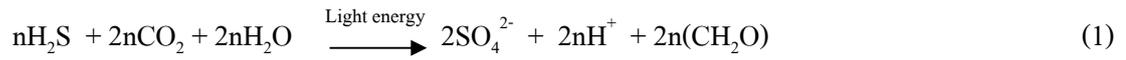
Alk	=	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)
Eff.	=	Effluent
Inf.	=	Influent
kg/m ³	=	kilogram per cubic metre
kgCOD/m ² .d	=	kilogram Chemical Oxygen Demand per surface media per day
kW/m ²	=	kilowatt per square meter
mg/L	=	milligram per liter
MPB	=	Methane Producing Bacteria
sCOD	=	Soluble chemical oxygen demand
SRB	=	Sulfate Reducing Bacteria
VFA	=	Volatile fatty acid
w/o	=	without light

ผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบตัวกลาง กรองลอยใไร้อากาศ

Effect of Photosynthetic Bacteria on Hydrogen Sulfide Removal in Anaerobic Floating Filter Media System

คำนำ

โรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากที่ใช้ซัลเฟต ซัลไฟด์ ไฮโอซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์อยู่ในรูปกระบวนการผลิต (Phan, 2007) หากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยานิคใไร้อากาศรับน้ำเสียที่มีสารดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งจะต้องใช้สารอินทรีย์คาร์บอนมีผลทำให้แหล่งคาร์บอนสำหรับการสร้างก๊าซมีเทนลดน้อยลงและมีการสร้างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น (Salata, 2005) ระดับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำตั้งแต่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน (Simkhada, 1997) สำหรับในกรณีที่ต้องการนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจำเป็นต้องกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเสียก่อนเนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เมื่อออกสู่บรรยากาศแล้วมีอันตรายมากกว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และยังทำให้เกิดควันพิษและฝนกรดอีกด้วย (Saifullah, 2009) ในการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่มีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หลายวิธีเช่นการกรองก๊าซแบบชีวภาพ (biofilter) โดยการพ่นอากาศผสมกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกิริยาที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางและมีแบคทีเรียซัลเฟอร์ออกซิไดซ์ซิง (sulfur oxidizing bacteria) อาศัยอยู่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 98 % (Rattanapan *et al.*, 2009) นอกจากนี้ยังมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวโดยเลือกใช้คลื่นแสงที่แบคทีเรียสีเขียวสามารถดูดกลืนได้ดีที่สุดพบว่าแบคทีเรียดังกล่าวสามารถเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปเป็นซัลเฟอร์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.1 kW/m² ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ (1) ถ้าความเข้มข้นมีมากกว่า 0.1 kW/m² ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ (2) (Kim, 1996) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการนำแบคทีเรียสีเขียวมาใช้โดยตรงในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใไรอากาศซึ่งมีความเป็นไปได้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใไรอากาศได้ในคราวเดียวกัน



ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงทำการศึกษาผลของแบคทีเรียสังเคราะห์ชนิดแบคทีเรียสีเขียวในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบตัวกลางกรองลอยใรร้อากาศ



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงในระบบตัวกลางกรองลอยใรอากาศแบบไหลขึ้น
2. ศึกษาหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางกรองลอยใรอากาศแบบไหลขึ้นที่มีแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวอาศัยอยู่ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาในระบบตัวกลางกรองลอยใรอากาศแบบไหลขึ้นขนาดห้องปฏิบัติการ แปรผันอัตราส่วนความเข้มข้นของซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 7:1 ; 6:1 ; 4:1 ; และ 3:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m² และ 0.4:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.1 kW/m²
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กลูโคส (C₆H₁₂O₆) เป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) เป็นแหล่งซัลเฟตที่ทำการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 ชั่วโมงโดยมีอัตราการป้อนน้ำเสียเป็น 0.02 เมตรต่อชั่วโมง
3. ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช (pH) , ซีโอดีละลายน้ำ (Soluble COD ; sCOD) , อัลคาไลน์ตี (Alkalinity) , กรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid ; VFA) , ซัลเฟต (Sulfate ; SO₄²⁻) และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ มีเทน (CH₄) , คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S)

การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic Biological Treatment Processes)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศหรือแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic Process) เป็นระบบที่จุลชีพ (Microorganisms) ย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงจึงเหมาะสมแก่การใช้ในประเทศเขตร้อน ส่วนในประเทศที่มีอากาศหนาวการใช้ระบบนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำเสีย (สุเทพ, 2549)

1.1 แบคทีเรียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศมี 2 ชนิดได้แก่

1.1.1 แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

แบคทีเรียชนิดนี้ประกอบด้วย 2 พวกคือ แบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate anaerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนบ้าง (Facultative anaerobic bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะสร้างไฮโดรเจนจากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่ และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดา

1.1.2 แบคทีเรียที่สร้างมีเทน

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะเจริญเติบโตได้ช้าและยังเป็นเซลล์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมากโดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยนำคาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานจากไฮโดรเจน หลายชนิดใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวเพราะว่าแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการที่ 3



โดยแบคทีเรียชนิดนี้จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) มากโดยช่วงพีเอช (pH) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคือ 6.6 – 7.4 (McCarty, 1964) ซึ่งจะสร้างมีเทนดังสมการต่อไปนี้



โดยเรียกชื่อแบคทีเรียชนิดนี้ว่า Hydrogenotrophic methanogen

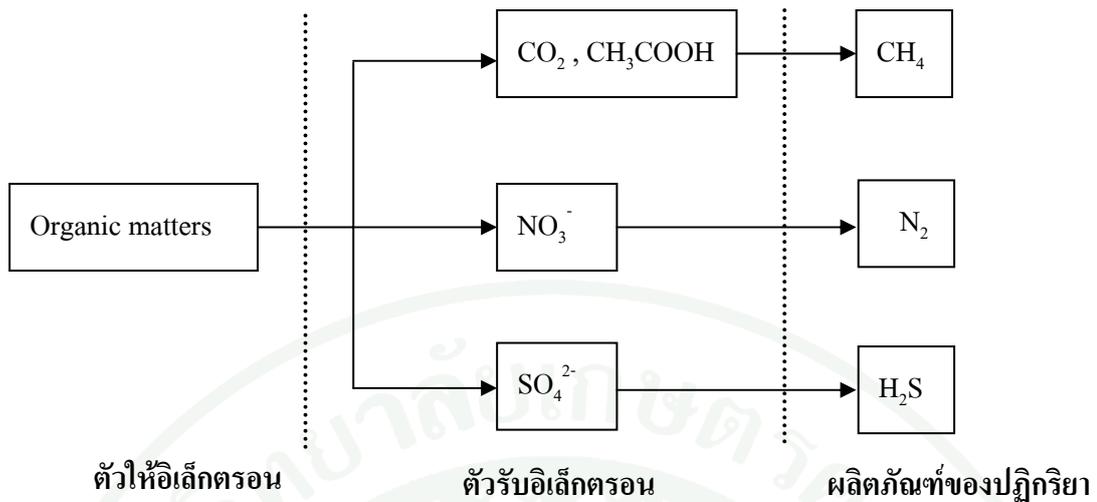
ข. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกโดยใช้อะเซเตตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายและใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานซึ่งจะใช้พลังงานพอเพียงสำหรับการดำรงชีพโดยการสร้างมีเทนเป็นดังสมการที่ 5



พบว่าแบบนี้จะให้พลังงานน้อยกว่าแบบที่ใช้ออกซิเดชันไฮโดรเจนในปัจจุบันยังไม่มีกรณีชี้ชัดว่าส่วนไหนสำคัญกว่ากัน แต่พอสรุปได้ว่ากลไกการสร้างมีเทนจะมีอะเซเตตเป็นตัวสำคัญโดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนที่เรียกว่า Acetoclastic methanogen (McCarty, 1964)

1.2 กลไกพื้นฐานของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

กลไกพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพไม่ว่าจะเป็นการใช้ ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนจะมีลักษณะที่เหมือนกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบ ออกซิเดชัน – รีดักชัน (รีดอกซ์) ปฏิกิริยารีดอกซ์ หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็น สารอินทรีย์ ส่วนสารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมักเป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์เช่น ออกซิเจน ไนเตรท หรือซัลเฟต เป็นต้น การถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะได้พลังงานเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง พลังงานที่เกิดขึ้นในส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน อีกส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตและการสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นสารอินทรีย์จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ แต่สารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมีหลายชนิด ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันไปตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอน เช่น ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่าแอโรบิกออกซิเดชัน (aerobic oxidation) ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นไนเตรทก็จะเกิดปฏิกิริยาคีโนรีเฟอเรนซ์เป็นต้น (สุเทพ, 2549) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก

ที่มา: (ดัดแปลงจากสุเทพ, 2549)

1.2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

McCarty (1964) ได้กล่าวว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการหมัก (fermentation) จะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงด้วยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (extracellular enzyme) ของแบคทีเรียจำพวก hydrolytic bacteria เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นนี้เป็นเพียงแค่การเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำได้เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกรีเซอร์ลอล โดยในขั้นตอนนี้แบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน การนำเอาสารอินทรีย์ไปใช้ของแบคทีเรียจะต้องขนส่งสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์เสียก่อนจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นในเซลล์และได้พลังงานในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต แต่เนื่องจากการขนส่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดเข้าสู่เซลล์นั้นมีความยากง่ายต่างกัน โดยสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ไม่สามารถขนส่งเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงก่อน (สุเทพ, 2549)

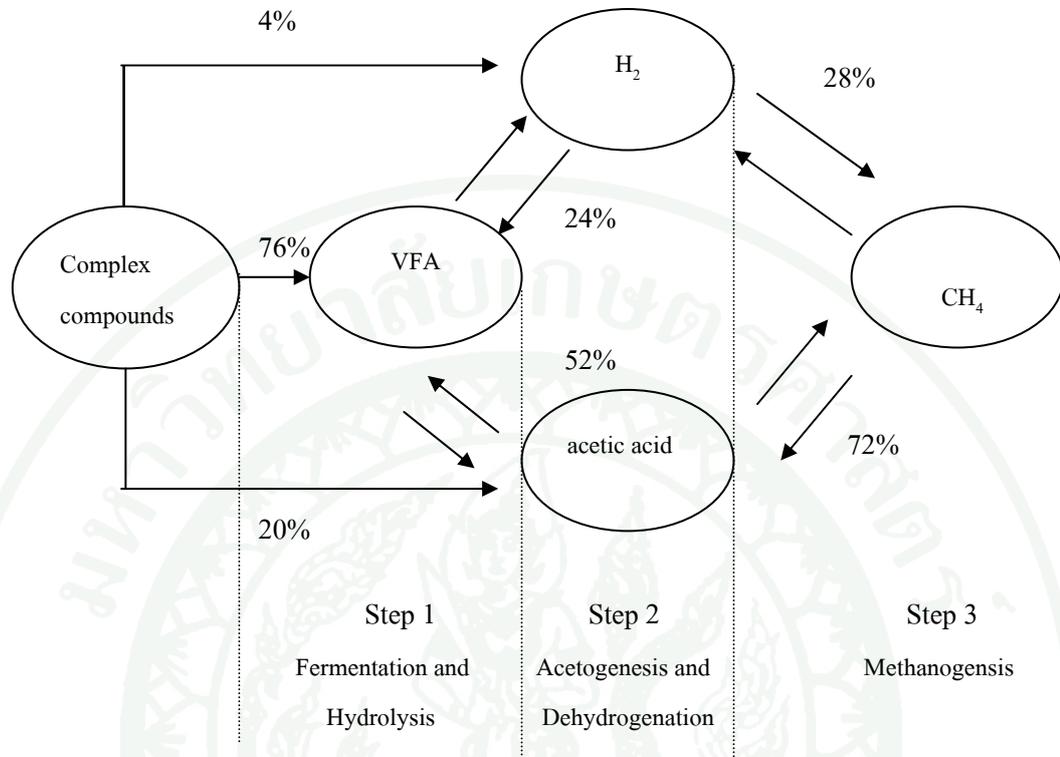
ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ (acidogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียสร้างกรด (acidogenic bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของแบคทีเรียในกลุ่มแรกให้เป็นกรดอินทรีย์และสารอื่นๆ

ขั้นที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียสร้างสารอะซิติกจำพวกอะซิโตน (acetone) จะเปลี่ยนสารจำพวกกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นสารอะซิเตด, ฟอร์มेट, ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารอาหารตั้งต้นของแบคทีเรียขั้นต่อไป

ขั้นที่ 4 การสร้างมีเทน (methanogenesis) กรดอะซิติกที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3 จะถูกแบคทีเรียในกลุ่ม methanogenic bacteria ย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



โดยในขั้นตอนสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบแอนแอโรบิกและการไหลของพลังงาน

ที่มา: (ดัดแปลงจาก Metcalf & Eddy .,2003)

เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนหรือแอโรบิก (aerobic process) ข้อดีของระบบนี้ได้แก่

1) ปริมาณของตะกอนสลัดจ์ในระบบไร้อากาศน้อยกว่าการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน ทำให้ปัญหาในการกำจัดตะกอนมีน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ประมาณ 80 – 90% จะเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นส่วนที่นำไปสังเคราะห์สร้างเซลล์ใหม่จึงมีน้อยมาก ต่างจากปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน เช่น ระบบเอเอส ซึ่งสารอินทรีย์ประมาณ 50% จะถูกนำไปทำการสร้างเซลล์ใหม่

2) ต้องการปริมาณอาหารเสริม (nutrient) น้อยกว่าการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน เพราะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีอัตราที่ต่ำ

3) ช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการที่ไม่ต้องเติมออกซิเจน

4) ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน ข้อดีของระบบนี้ได้แก่

- 1) แบคทีเรียที่ใช้บำบัดจะเจริญเติบโตได้ช้า ทำให้ใช้เวลานานในการเริ่มระบบ (Start Up)
- 2) ระบบบำบัดแบบนี้สามารถปรับตัวได้ไม่คืนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำเสีย ปริมาณบีโอดี อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมอื่นๆ
- 3) ในการบำบัดอาจเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็นอีกทั้งน้ำเสียอาจมีสีดำได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับสารประกอบโลหะต่างๆ ในน้ำเสียเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ที่มีสีดำ

กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ เช่นเดียวกับกระบวนการที่ใช้อากาศ คือ

- 1) ระบบบำบัดแอนแอโรบิกแบบเติบโตแขวนลอย (anaerobic suspended-growth treatment processes) เช่น ระบบการย่อยแบบแอนแอโรบิก (anaerobic digestion) กระบวนการสัมผัสแอนแอโรบิก (anaerobic contact processes) และระบบชั้นสลัดจ์แอนแอโรบิกแบบไหลขึ้น (upflow anaerobic sludge blanket ; UASB) เป็นต้น
- 2) ระบบบำบัดแอนแอโรบิกแบบมีตัวกลางยึดเกาะ (anaerobic attached-growth treatment processes) เช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter) ระบบชั้นขยายตัว (expanded – bed) ประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบไร้อากาศแบบต่างๆ

ระบบ	ซีโอดี (น้ำเข้า) mg/L	ระยะเวลา เก็บกักน้ำ (d)	ภาระบรรทุก สารอินทรีย์ (kgCOD/m ³ .d)	การกำจัด COD (%)
สั้มผัสแเอโรบิก	1,500 – 5,000	2-10	0.5-2.43	75 – 90
ชั้นสั้มผัสแเอโรบิกแบบไหลขึ้น	5,000 – 15,000	4-12	4.04 – 12.1	75 – 85
ถังกรองไร้อากาศ	10,000 – 20,000	24-48	0.97-4.85	75 – 85
ชั้นขยายตัว	5,000 – 10,000	5-10	4.85-9.71	80- 85

ที่มา: สุเทพ (2549)

2. สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนต้องมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังต่อไปนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมี 2 ลักษณะคือ

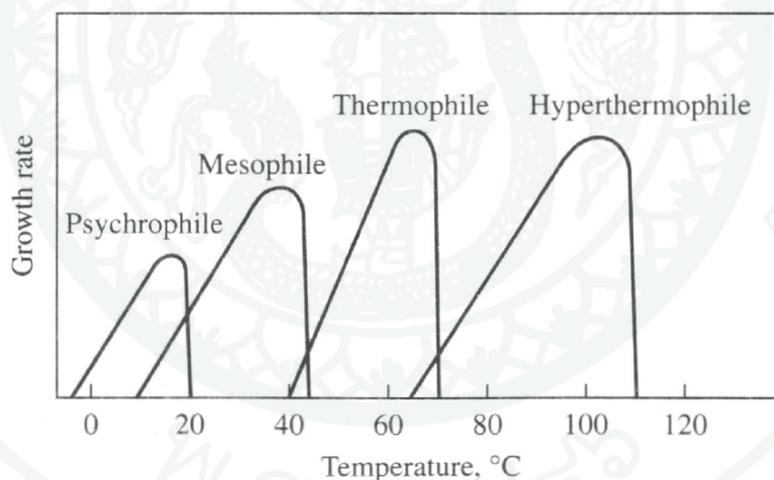
1. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้ง ปฏิกริยา และลักษณะของของเสีย
2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และเวลาเก็บกัก

2.1 อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน อยู่ 2 ช่วง คือ

- ช่วง 8 – 45°C เรียกว่า เมโซฟิล (mesophilie)
- ช่วง 40 – 70°C เรียกว่า เทอร์โมฟิล (thermophilie)

ตามปกติแล้ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้น อัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วมาก (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์

ที่มา: Rittmann and McCarty (2001)

2.2 พีเอช

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่ง ค่าพีเอชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดก็จะอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5–10 เพราะสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ในช่วง 5–10 จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 เรียกว่า acidophiles เช่น ราและแบคทีเรียบางชนิด ส่วนพวกที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 10–11 เรียกว่า alkaliphiles พีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการไม่ใช้อากาศควรอยู่ระหว่าง 6.8–7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.3 กรดไขมันระเหยและสภาพค่า

โดยปกติ กรดไขมันระเหย (volatile fatty acid ; VFA) ในถังบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีควรมีค่าประมาณ 20-200 mg/L as CH_3COOH กรดไขมันระเหยที่สะสมจนมีความเข้มข้นสูงกว่าระดับที่กล่าวแสดงว่าระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนน้อยเกินไปหรือแสดงว่าแบคทีเรียสร้างกรดผลิตกรดไขมันระเหยง่ายได้เร็วเกินไป กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม สังเกตได้จากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้นสภาพค่าจึงแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบซึ่งจะรักษาระบบให้มีพีเอชค่อนข้างคงที่และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไปกระบวนการไร้อากาศควรมีสภาพค่า (Alkalinity) ประมาณ 1,500 – 2,000 mg/L (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) สำหรับย่อยสลายหรือบำบัดน้ำเสียเข้มข้นปริมาณสภาพค่าที่พอเพียงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซีโอดีที่ย่อยสลายได้นอกจากจะดูสภาพค่าแล้ว ยังต้องพิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อสภาพค่าด้วย โดยค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่าน้อยกว่า 0.4 ถือได้ว่าระบบยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่าสูงกว่า 0.8 แล้ว แสดงว่าระบบมีบัฟเฟอร์ต่ำ ควรหาสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนสูงขึ้นและแก้ไข เพราะพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนระบบอาจล้มเหลวได้

2.4 ธาตุอาหาร (nutrient)

ถึงแม้ว่าเซลล์ของแบคทีเรียที่สร้างขึ้นมากับกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน แต่จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) จึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่ให้มีน้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริม นอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสอย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (McCarty, 1964) สำหรับกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนนอกจากนี้ยังมีธาตุบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงความต้องการธาตุอีก 3 ชนิด คือ โมลิบดินัม, ทังสเตน และเซลีนียม แต่ยังไม่มีการยืนยันอย่างแน่นอนเหมือนอีก 4 ธาตุข้างต้น (McCarty, 1964)

1) เหล็กและโคบอลต์

เหล็กเป็นธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้น้อยและสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบแยกตัวออกจากน้ำ ตกตะกอนผลึกในรูปของเหล็กซัลไฟด์ ทำให้อาจเกิดปัญหาการจำกัดของเหล็กได้ ส่วนโคบอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่า แต่ก็อาจเกิดปัญหาเดียวกันได้

2) นิกเกิล

นิกเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญของโคเอนไซม์ F430 ซึ่งเป็นหนึ่งในโคเอนไซม์สำคัญต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งได้แก่ โคเอนไซม์ F420, F430 และ 2-mercaptoethane sulfonic acid โดยปกติแล้วนิกเกิลเป็นมลทินที่ติดอยู่ใน yeast extract และในเกลือแร่อื่นๆ ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนได้รับนิกเกิลโดยไม่ได้ตั้งใจ อย่างไรก็ตามนิกเกิลอาจรวมกับซัลไฟด์และตกผลึกได้เช่นเดียวกับผลึกเหล็ก จึงอาจมีความจำเป็นต้องเติมนิกเกิลบ้างในกรณีที่ไม่มีหรือมีนิกเกิลไม่เพียงพอ (McCarty, 1964)

3) ซัลไฟด์

บทบาทของซัลไฟด์ที่มีต่อระบบไมโครอวกาศมีทั้งเชิงบวกและเชิงลบ ซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนเนื่องจากสามารถตกผลึกเหล็ก นิกเกิลและโลหะหนักที่จำเป็นต่างๆ นอกจากนี้ซัลไฟด์ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100–150 mg/L เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่อย่างไรก็ดี ซัลไฟด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เป็นสารที่จำเป็นและขาดไม่ได้สำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อวิเคราะห์เซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนปรากฏว่าพบซัลไฟด์สูงถึง 2.6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด ในขณะที่โคเอนไซม์ 2-mercaptoethane sulfonic acid มีซัลไฟด์เพียง 4 เปอร์เซ็นต์ของที่พบทั้งหมด ดังนั้นซัลไฟด์ 2.6 เปอร์เซ็นต์นี้ต้องเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของแบคทีเรีย ความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 1–25 มก./ล. ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่แบคทีเรียนำไปใช้ได้จะถูกกำหนดโดยพีเอชและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบรรยากาศเหนือน้ำของถังปฏิกรณ์ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.5 สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไมโครอวกาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีอยู่หลายชนิด ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้นสารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้

1) พิษของอ็อกซิเจน

อ็อกซิเจนในน้ำเสียที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ได้แก่ โซเดียม ไฮโปคลอไรต์ แมกนีเซียมและแคลเซียมอ็อกไซด์เหล่านี้ถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะเริ่มเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยอ็อกซิเจนที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอ็อกซิเจนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ซึ่งพิษจากอ็อกซิเจนของแมกนีเซียมและแคลเซียมมีมากกว่าโซเดียมและไฮโปคลอไรต์ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอ็อกซิเจนจึงเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซ์สูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนยังไม่เป็นที่แน่นอนว่าเกิดขึ้น ณ ความเข้มข้นเท่าใด มีรายงานถึงความเข้มข้นของโซเดียมที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ต่ออยู่เป็นจำนวนมาก (McCarty, 1964) โดยค่าความเข้มข้นในงานเหล่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 6 – 40 g/L

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

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

ที่มา: McCarty (1964)

2) โลหะหนัก

โลหะหนักที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคลเซียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปไอออนพบว่าลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือ ทองแดง, เหล็ก, แคลเซียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้

3) พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากการย่อยสลายสารพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ดังสมการที่ 8



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นที่พีเอชสูงขึ้นก็จะมีแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้นแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดย NH_3 จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 mg/L แต่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้น 7,000 – 9,000 mg/L (McCarty, 1964)

ตารางที่ 3 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

แอมโมเนีย (mg N/L)	ผลต่อระบบ
50 – 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 – 1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500 – 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
มากกว่า 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา: McCarty (1964)

4) พิษของซัลไฟด์

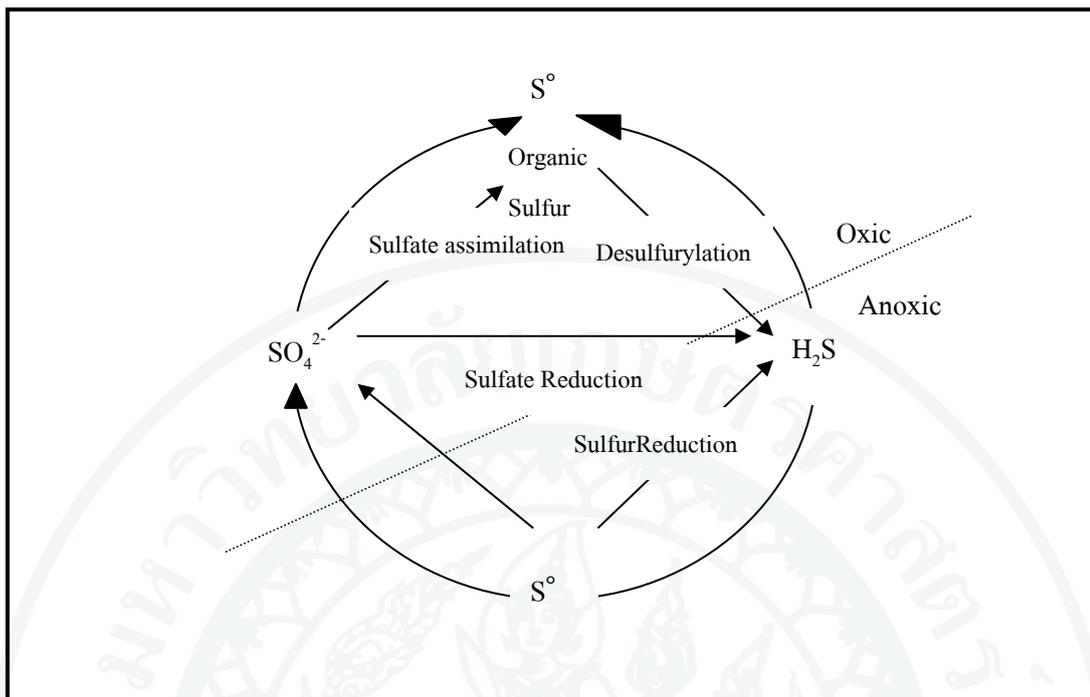
ถ้าปริมาณของซัลไฟด์ที่ละลายน้ำในระบบมีความเข้มข้นสูงกว่า 100 – 150 mg/L ซัลไฟด์จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ไม่ว่าซัลไฟด์นั้นจะมาจากน้ำเสียที่เข้าระบบหรือการย่อยสลายของซัลเฟตก็ตาม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอิออนบวกในระบบด้วย (มันลิน, 2536) เพราะถ้าในระบบมีโลหะหนัก ซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักแล้วตกตะกอนผลึกลงมาทำให้ความเข้มข้นของซัลไฟด์ลดลงได้ ระดับความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน (Syed *et al.*, 2006)

5) พิษจากสารอื่น ๆ

สารพิษอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำและอาจทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทน ได้แก่ ออกซิเจน - เป็นพิษอย่างมากแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เพราะจะทำการแตกของโมเลกุลของเอนไซม์ F420 dehydrogenase สารรับอิเล็กตรอนอื่น เช่น ไนเตรท หรือซัลเฟต ถ้ามีอยู่ในปริมาณมาก จะทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้ลดลง เนื่องจากเส้นทางการไหลของอิเล็กตรอนก็จะเปลี่ยนไป ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียที่ใช้ไนเตรทหรือซัลเฟตได้พลังงานมากกว่าจากการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่า ทำให้สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มอื่น แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงใช้สารอินทรีย์ได้ลดลง

3. วัฏจักรของซัลเฟอร์

ธาตุซัลเฟอร์มีหลายรูปตั้งแต่ -2 ถึง +6 ส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติจะพบเพียงแค่ 3 รูปเท่านั้น ได้แก่ ซัลไฟด์ (S^{2-}) ธาตุซัลเฟอร์ (S^0) และซัลเฟต (S^{+6}) ส่วนใหญ่เรามักจะพบซัลเฟตในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ในทางชีวภาพซัลเฟอร์เป็นธาตุที่มีความสำคัญกับสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากซัลเฟอร์เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เอนไซม์ และโปรตีนต่างๆ สารประกอบซัลเฟอร์ในรูปออกไซด์หลายชนิดทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระของจุลินทรีย์บางกลุ่ม และในทางกลับกันสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์บางรูปก็จะถูกใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนสำหรับการดำรงชีพของจุลินทรีย์บางกลุ่มได้เช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงไปมาโดยจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ระหว่างสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปออกไซด์จากปฏิกิริยาซัลเฟตหรือซัลเฟตรีดักชันกับสารประกอบของซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์จากปฏิกิริยาซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์ออกซิเดชัน เรียกว่า วัฏจักรซัลเฟอร์ทางชีวภาพ (biological sulfur cycle)



ภาพที่ 4 วัฏจักรซัลเฟอร์

ที่มา: Madigan *et al* (2003)

4. จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน

4.1 จุลชีววิทยาของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดในธรรมชาติทั่วไปไม่ว่าจะเป็นพืชชั้นสูง สาหร่าย รา และเซลล์ของพวกโปรคาริโอตหลายชนิดสามารถใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์ แต่ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนจำกัดอยู่แต่ในแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศชนิดเค็ดขาด (ยกเว้น *Desulfovibrio spp.*) ก่อนข้างจะทนต่อออกซิเจนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนสามารถรีดิวซ์ไนเตรทเป็นแอมโมเนียได้ด้วย) จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรฟ (chemoheterotroph) ดำรงชีพและเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการรีดิวซ์ซัลเฟตทำให้ซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดส์

ไฮโดรเจนโมเลกุลหรือสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ในกรณีที่สารให้อิเล็กตรอนคือโมเลกุลไฮโดรเจนหรืออะซิเตท ขั้นตอนดังกล่าวนี้จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างมีเทนตามปกติ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงมักจะพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ระเหยและแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่เสมอในการแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอย่างกว้างๆ ตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและเจริญเติบโต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (Widdel, 1988)

- 1) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (incompletely oxidizing sulfate reducing bacteria; I-SRB) โดยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายก็คือ อะซิเตท
- 2) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (completely oxidizing sulfate reducing Bacteria; C-SRB) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้สารอาหารได้หลายชนิด ซึ่งจะต่างกับแบคทีเรียสร้างมีเทนตรงที่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 1 อะตอมได้แต่ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์กลุ่มเมทิลได้ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เป็นสารอาหารและปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแสดงดังตารางที่ 4 เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม I-SRB ใช้อะซิเตทเป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์และไม่สามารถนำอะซิเตทไปใช้ได้แม้จะเป็นสารอาหารที่มีอยู่เพียงประเภทเดียวก็ตาม มีสาเหตุเนื่องมาจาก I-SRB ขาดกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอนไซม์บางชนิดที่มีบทบาทต่อการย่อยอะซิเตทนั่นเอง อย่างไรก็ตาม I-SRB อาจใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนได้เมื่อสารให้อิเล็กตรอนคือไฮโดรเจนหรือฟอร์มเมท ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตทั้งสองกลุ่มนี้คือ แบคทีเรียกลุ่ม I-SRB มีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่ม C-SRB เมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม (Widdel, 1988)

ตารางที่ 4 ปฏิบัติการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB

ลำดับ ที่	สารให้ อิเล็กตรอน	ประเภท แบคทีเรีย	ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน
1	ไฮโดรเจน	I-SRB และ C-SRB	$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$
2	ฟอร์มเมท	C-SRB	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^-$
3	พรอพิโอนเนท	C-SRB I-SRB	$4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 7\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 122\text{HCO}_3^- + 7\text{HS}^- + \text{H}^+$ $4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + 42\text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$
4	บิวทิเรต	C-SRB I-SRB	$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COO}^- + 5\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 82\text{HCO}_3^- + 5\text{HS}^- + \text{H}^+$ $2\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$
5	แลกเตท	C-SRB I-SRB	$2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 62\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$ $2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 22\text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$
6	เบนโซเอต	C-SRB I-SRB	$4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 15\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \rightarrow 282\text{HCO}_3^- + 15\text{HS}^- + 9\text{H}^+$ $4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12\text{CH}_3\text{COO}^- + 42\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + 9\text{H}^+$

หมายเหตุ C-SRB = SRBชนิดย่อยได้อย่างสมบูรณ์ I-SRB = SRBชนิดย่อยได้ไม่สมบูรณ์

ที่มา: Widdel (1988)

4.2 ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

1) อุณหภูมิ

โดยทั่วไป แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วง 30–40°C การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตค่อนข้างมาก โดยมีรายงานการวิจัยที่พบว่า การเกิดซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในดินตะกอนน้ำเค็มลดลงระหว่าง 2–3.9 เท่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม 10 องศาเซลเซียส (Widdel, 1988)

2) ความต้องการเกลือและความทนต่อเกลือ

ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแบคทีเรีย ซึ่งแยกเป็นพวกที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยกับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด แบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยมักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่งจึงจะเจริญเติบโตได้ดี และในทางตรงข้าม ถ้านำแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตกลุ่มนี้มาเลี้ยงในสภาพที่มีความเค็มต่ำก็จะได้ผลในทางลบต่อการเจริญเติบโต ชนิดและปริมาณของเกลือสำหรับแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มที่เหมาะสมคือ โซเดียมคลอไรด์ 20 g/L และแมกนีเซียมคลอไรด์ 1.5 g/L นอกเหนือจากเกลือทั้งสองชนิดนี้แล้ว บางสายพันธุ์ยังต้องการแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นขั้นต่ำ 0.5 g/L ปริมาณความต้องการเกลือจะลดลงสำหรับกลุ่มที่มาจากน้ำกร่อย ส่วนแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตที่มาจากน้ำจืดอาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ถ้ามีโซเดียมคลอไรด์ในระดับที่เข้มข้นเท่ากับที่มีอยู่ในน้ำทะเล (ประมาณ 27 g/L) อย่างไรก็ตาม มีรายงานถึงความสามารถในการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตจากแหล่งน้ำจืดบางสายพันธุ์ ซึ่งสามารถทนอยู่ได้ในตัวกลางที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเท่ากับในระดับความเข้มข้นในน้ำทะเลและบางพวกสามารถปรับสารให้อยู่ได้ทั้งในระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 60 g/L หรือแม้แต่ในสภาวะที่ไม่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่เลยก็ตาม (Widdel, 1988)

3) พีเอช

ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง คือ ประมาณ 7 และมักถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่า พีเอชในแหล่งน้ำประมาณ 3-4 แต่เมื่อนำแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตจากแหล่งน้ำนี้มาเพาะเชื้อและทดสอบกลับพบว่าถูกยับยั้งการเจริญเติบโตเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6 ทำให้เกิดข้อสันนิษฐานว่า แบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตที่อยู่ในแหล่งน้ำของเหมืองแร่อาจมีสภาพแวดล้อมเล็กๆ เช่น โพรง หรือซอกหินขนาดเล็กมากๆ (microniches) หรือสภาพแวดล้อมโดยรอบๆตัวของแบคทีเรีย (microenvironment) มีค่าพีเอชที่สูงกว่าพีเอชของทั้งระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาที่ใช้โปรตอนหรือ อีออนไฮโดรเจน การใช้สารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตจึงสร้างสภาพด่างให้กับระบบ (ยกเว้นกรณีการเกิดซัลเฟตรีดักชันของสารอาหารที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากซึ่งจะสร้างสภาพกรด แต่จำนวนแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตประเภทนี้ก็มีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่ามาก) จึงทำให้แบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตสามารถดำรงชีวิตได้แม้พีเอชโดยรวมของระบบจะมีค่าต่ำก็ตาม (Widdel, 1988)

4) ความมีชีวิตรอดในสภาวะที่มีออกซิเจน

แม้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียชนิดทนออกซิเจนไม่ได้แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ก็พบว่ายังสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เมื่ออยู่ในสภาพที่มีออกซิเจนอิสระอยู่ชั่วคราวได้ และสามารถฟื้นตัวได้เมื่อกลับเข้าสู่สภาพไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้พบว่ามีเซลล์ไฟต์ที่อยู่ในตัวกลางมีบทบาทต่อผลกระทบของออกซิเจนที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ ในลักษณะที่ต่างกัน ในกรณีที่มีซัลไฟด์พร้อมกับออกซิเจนมีผลกระทบทางลบมากกว่ากรณีที่มีออกซิเจนเพียงอย่างเดียว (Widdel, 1988)

5) การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะหรือการจับกลุ่มของเซลล์และเซลล์ชนิดเส้นใย

การรวมกลุ่มของเซลล์แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอาจเกิดจากการปรับตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต เช่น พีเอช อนุหภูมิ การมีสารให้อิเล็กตรอนหรือเกลือที่อยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม หรือการมีออกซิเจนในตัวกลาง ในสภาวะดังกล่าวแบคทีเรียจะแสดงลักษณะผิดปกติ (morbid) เช่น เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการบวมหรือหยุดการเคลื่อนที่จากเดิมที่เคลื่อนที่ได้ นอกจากสาเหตุจากการปรับตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมแล้วอาจเป็นลักษณะปกติที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามพบว่าข้อดีของการรวมกลุ่มหรือการเกาะติดผนังก็คือ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงสารอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง (Widdel, 1988)

5. ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในระบบไม่ใช้ออกาศ

จุลินทรีย์ไม่ใช้ออกาศที่มีบทบาทสำคัญในการบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์เป็นแบคทีเรียประเภทต่างๆ ดังนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

- 1) แบคทีเรียเฟอร์เมนติง (Fermenting Bacteria)
- 2) แบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenic Bacteria)
- 3) แบคทีเรียดีไนตริฟายเออร์ (Denitrifying Bacteria)
- 4) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria)
- 5) แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria)
- 6) แบคทีเรียสร้างอะซิเตท (Acetogenic Bacteria)

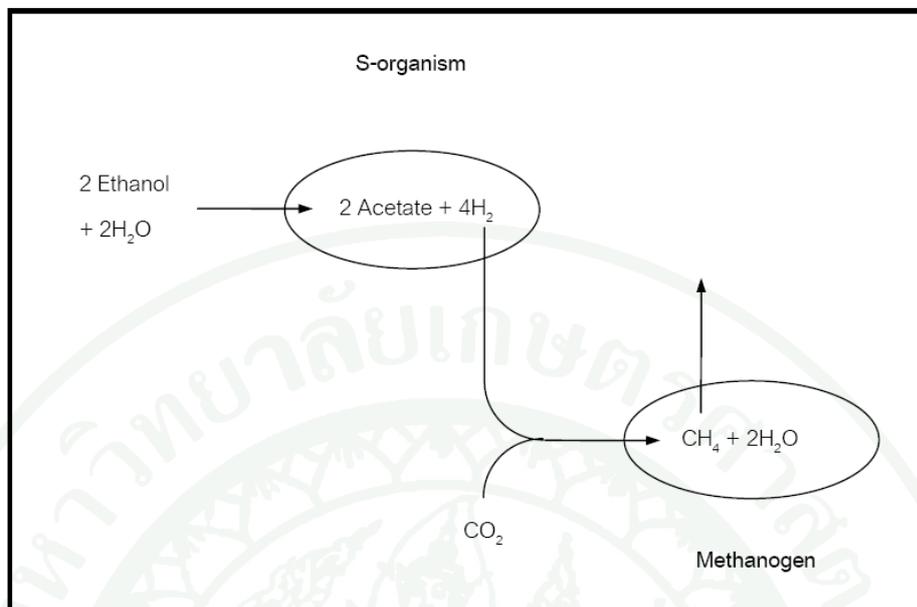
ภายใต้สภาวะที่มีออกาศ แบคทีเรียส่วนใหญ่ข้างต้นจะไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ ถ้าไม่มีออกาศ แต่มีไนเตรท แบคทีเรียดีไนตริฟายเออร์จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีและไม่มีแบคทีเรียอื่นสามารถเติบโตแข่งขันได้ แต่ถ้าไม่มีออกาศและไม่มีไนเตรท แบคทีเรียทั้งหมดข้างต้นยกเว้นดีไนตริฟายเออร์จะเจริญเติบโตอยู่ได้บางชนิดอยู่ร่วมกันโดยมีชีวิตอยู่ร่วมกันอย่างเป็นมิตร (Syntrophy) ซึ่งหมายความว่าเติบโตไปด้วยกัน แต่ถ้ามีแบคทีเรียชนิดใดชนิดหนึ่งในกลุ่มไปอยู่ตามลำพังจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ การอยู่ร่วมกันอย่างเป็นมิตรเป็นปฏิสัมพันธ์ที่เด่นชัดและเป็นปัจจัยที่ขาดไม่ได้ของปฏิกิริยาสร้างมีเทนจากการบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์อย่างไรก็ตามบางครั้งแบคทีเรียคนละพันธุ์จะแย่งชิงอาหารกันหรือแม้แต่แบคทีเรียคนละชนิดที่อยู่ในกลุ่มพันธุ์เดียวกันก็อาจแย่งชิงอาหารตัวเดียวกันได้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)

5.1 แบคทีเรียสร้างมีเทนกับแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก

ถึงแม้ว่าก๊าซมีเทนจะเป็นสารประกอบคาร์บอนที่เป็นส่วนน้อยของวัฏจักรคาร์บอนในธรรมชาติ แต่เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตสุดท้ายจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในระบบไม่ใช้ออกาศ ทำให้การผลิตก๊าซมีเทนด้วยแบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสำคัญของระบบไม่ใช้ออกาศ จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในการผลิตกาซมีเทนนั้น แบคทีเรียสร้างมีเทนจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและมีสารให้อิเล็กตรอนเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนอะตอมน้อย เช่น ไฮโดรเจน หรือกรดอะซิติก ฯลฯ สารประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่มักจะเป็นผลผลิตของการหมักโดยแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ดังนั้น

การผลิตก๊าซมีเทนด้วยแบคทีเรียสร้างมีเทนในระบบไม่ใช้ออกซิเจน จึงขึ้นอยู่กับขั้นตอนการย่อยสลายอาหารที่ซับซ้อนให้กลายเป็นสารประกอบที่มีอะตอมคาร์บอนน้อยโดยแบคทีเรียชนิดอื่น การย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น สารพอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน และไขมัน จนกลายเป็นก๊าซมีเทนต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายชนิดโดยสารประกอบสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนคือ ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ กลุ่มแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจน (H_2 -consuming bacteria) ซึ่งได้แก่แบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ล้วนสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร

แบคทีเรียที่เป็นกุญแจสำคัญของการย่อยสลายสารอินทรีย์ซับซ้อน คือ แบคทีเรียเฟอร์เมนดิงที่ผลิตไฮโดรเจน (H_2 -producing bacteria) ซึ่งสามารถใช้สารอาหารพวกกรดไขมันหรือแอลกอฮอล์เป็นแหล่งพลังงาน แบคทีเรียประเภทนี้ผลิตคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติกพร้อมกับไฮโดรเจนซึ่งล้วนเป็นสารอาหารสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน นักวิจัยพบมานานแล้วว่าแบคทีเรียชนิดนี้จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อทำการเพาะเป็นเชื้อบริสุทธิ์ แต่เมื่ออยู่ร่วมกับแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารอาหารแล้ว แบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การอยู่ร่วมกันแบบ syntrophy ซึ่งมีความหมายว่า“กินด้วยกัน” ซึ่งเป็นที่มาของชื่อแบคทีเรียชนิดนี้เช่น syntrophomonas และ syntrophobacter ที่ย่อยกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์บางชนิดให้เป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตัวอย่างของการกินอยู่ร่วมกันแบบส่งเสริมกันหรือเป็นมิตรกัน (Syntrophy) ที่โง้งขานกันจนเป็นตำนานคือ เรื่องของแบคทีเรียที่มีชื่อว่า *Methanobacillus somelienskii* ซึ่งเคยเชื่อกันว่าเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่สามารถบริโภคเอทานอลได้ แต่ในทุกวันนี้รู้กันแล้วว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถบริโภคเอทานอลได้ (Fenchel *et al.*, 1995) ได้พบว่า จริงแล้ว *M. somelienskii* ไม่มีตัวตน หากแต่ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ชนิดอาศัยอยู่ร่วมกันแบบส่งเสริมกัน กล่าวคือประกอบด้วยจุลินทรีย์แบบคิโมโทรฟิกชื่อว่าจุลินทรีย์ S (S-organism) และแบคทีเรียสร้างมีเทนชื่อ *Methanobacterium bryantii* และยังสามารถพบว่ามีชีวิตเคมีของการย่อยเอทานอลให้กลายเป็นมีเทนเริ่มต้นจาก S-organism ย่อยเอทานอลด้วยกลไกที่ไร้อากาศให้กลายเป็นอะซิเตทและไฮโดรเจน แบคทีเรียสร้างมีเทน (ที่อาศัยอยู่ด้วยกัน) บริโภคไฮโดรเจนได้ และผลิตมีเทน ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบ Syntrophy

ที่มา: Fenchel and Finlay (1995)

กรณีดังกล่าวข้างต้นนี้ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเป็นอันตรายต่อ S-organism จุลินทรีย์-S ต้องอาศัยแบคทีเรียสร้างมีเทนในการกำจัดกาซไฮโดรเจนมิให้สะสมอยู่ในระบบจนเป็นอันตรายต่อผู้สร้างเอง ในขณะที่เดียวกันแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ได้ไฮโดรเจนเป็นสับสเตรตในการเจริญเติบโต ถ้าไม่มีแบคทีเรียสร้างมีเทนจุลินทรีย์ก็เติบโตไม่ได้ การขาดแบคทีเรียตัวใดตัวหนึ่ง แบคทีเรียอีกตัวหนึ่งอาจไม่สามารถเจริญเติบโตได้ การอาศัยอยู่ร่วมกันแบบส่งเสริมกันเรียกว่า Syntrophy

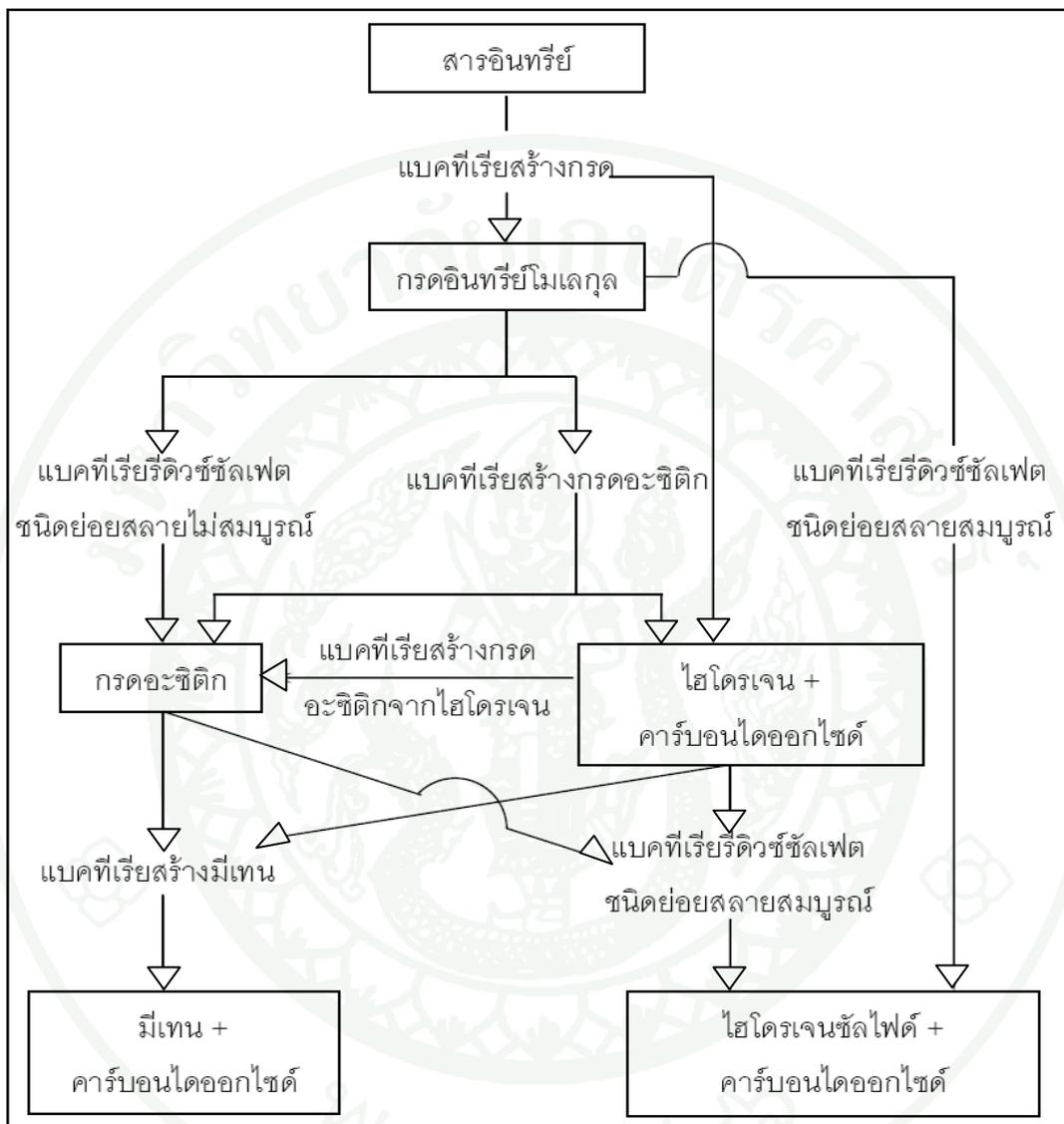
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต

ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบไม่ใช้ออกาศ ขึ้นอยู่กับสารรับอิเล็กตรอนและประเภทของแบคทีเรียในระบบ ในกรณีที่มีซัลเฟตอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศ กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบจะเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรีย

สร้างกรด แบคทีเรียสร้างอะซิเตท แบคทีเรียรีดิคิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่แบคทีเรียหลายกลุ่มในระบบใช้สารอาหารประเภทเดียวกัน ในขณะที่แบคทีเรียบางกลุ่มก็ใช้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งเป็นสารอาหาร ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังแสดงรายละเอียดโดยสังเขปในภาพที่ 6 แต่พอที่จะแบ่งความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่างๆได้ดังนี้

1) การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิคิวซ์ซัลเฟต แบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่บริโภคไฮโดรเจน ในการแย่งใช้ไฮโดรเจนและการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิคิวซ์ซัลเฟตในการแย่งใช้อะซิเตท ซึ่งผลของการแข่งขันจะเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนว่ามีเทนหรือซัลไฟด์

2) การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิคิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างอะซิเตท ในการแย่งใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

ที่มา: อนุตร (2542)

5.3 การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างอะซิเตทและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

ถึงแม้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความสามารถในการใช้สารอาหารที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูงได้ (*Desulfoarculus* และ *Thermodesulforhabdus* ใช้กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมได้สูงถึง 18 อะตอม) แต่ความสามารถดังกล่าวก็จำกัดอยู่เฉพาะบางชนิด สารอาหารที่ใช้ได้โดยทั่วไปมีเพียง ไฮโดรเจน, แล็กเตท และไพรูเวต เท่านั้น ส่วนสารอาหารอื่นนอกเหนือจากนี้จะมีข้อจำกัดในการใช้มากขึ้นการแข่งขันเพื่อแย่งใช้สารอาหารกับแบคทีเรียสร้างอะซิเตทจึงน่าจะเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรงในสารอาหารทั้งสามชนิดนี้ แต่ไพรูเวตเป็นสารอินทรีย์มีเคียมที่สำคัญมากในกระบวนการหมัก ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ใช้ออกซิเจนมีวิถีทางที่หลากหลายมากขึ้นหากมีซัลเฟตอยู่ในระบบด้วย โดยวิถีทางการย่อยสลายอาจแยกออกได้เป็น 2 วิถีทางผ่านแบคทีเรียสร้างกรดหรือแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Widdel, 1988) ได้แก่

- 1) สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรด และถูกย่อยสลายต่อกลายเป็นอะซิเตทและไฮโดรเจนผ่านแบคทีเรียสร้างอะซิเตท แล้วจึงถูกแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนย่อยสลายต่อ
- 2) สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรดและถูกย่อยสลายต่อโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตโดยตรง ถ้าเป็นพวกที่ย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และซัลไฟด์ แต่ถ้าเป็นพวกที่ย่อยสลายได้ไม่สมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะซิเตทกับซัลไฟด์ อะซิเตทที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ต่อโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่สามารถใช้อะซิเตทได้และแบคทีเรียสร้างมีเทน

5.3.1 กรณีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตสูง

ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตสูง ความเข้มข้นของซัลเฟตจะเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบ ทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ใช้ไฮโดรเจนได้เปรียบในการแย่งใช้ซัลเฟต เป็นเหตุให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ออกซิโดส์กรดอินทรีย์โดยตรงไม่อาจแข่งขันกับแบคทีเรียสร้างอะซิเตทได้เส้นทางการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นผ่านการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียสร้างอะซิเตท และแบคทีเรียสร้างมีเทน ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Widdel, 1988)

5.3.2 กรณีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่ำ

ในกรณีนี้ซัลเฟตในระบบมีอยู่อย่างไม่จำกัด แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแต่ละกลุ่มไม่ต้องแย่งใช้ซัลเฟตกันเอง จึงคาดว่าสารอินทรีย์ในระบบน่าจะถูกย่อยสลายผ่านทางแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ผลผลิตที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตว่าเป็นชนิดย่อยสลายสมบูรณ์หรือไม่ แต่จากปัจจัยทางจลนศาสตร์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต พบว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายไม่สมบูรณ์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่า เส้นทางการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงน่าจะเกิดผ่านแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายไม่สมบูรณ์ และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่บริเวณอะซิเตท ได้คาร์บอนไดออกไซด์และซัลไฟด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก (Widdel, 1988)

จากเหตุผลดังกล่าวว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดเส้นทางการย่อยสลายสารอินทรีย์และเป็นตัวกำหนดว่าแบคทีเรียชนิดใดจะแย่งใช้สารอินทรีย์ได้มากกว่ากัน (Choi *et al.*, 1991) ทำการศึกษาอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีผลในการแย่งแย่งและการยับยั้งของซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียกับแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยศึกษาที่อัตราส่วนตั้งแต่ 1.7 ถึง 2.7 พบว่าในขณะที่อัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตเพิ่มขึ้นแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในทางตรงกันข้ามเมื่ออัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตมีค่าลดลงพบว่าแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวซ์สามารถเอาชนะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนได้และพบว่าความเข้มข้นของซัลเฟต 1,200 mg/L จะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนโดยสมบูรณ์ในขณะเดียวกันการศึกษาของ Pradhan (2005) พบว่าผลของอัตราส่วน $\text{COD}:\text{SO}_4^{2-}$ ในกระบวนการกำจัดซัลเฟตในระบบ packed biofilm ในระบบไร้อากาศแบบไหลขึ้น โดยแปรผันความเข้มข้นของซีโอดี (COD) ตั้งแต่ 500 – 1,500 mg/L และความเข้มข้นของซัลเฟต (Sulfate) คงที่ 500 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 3:1 – 1:1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตลดลงจาก 52 % เหลือ 47 %

5.3.3 การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนในการแย่งใช้ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นสารอินเทอร์มีเดียที่สำคัญในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยทั่วไปแล้ว ประมาณ 20–30 เปอร์เซ็นต์ของซีโอดีจะถูกย่อยสลายผ่านทางไฮโดรเจน ซึ่งทั้งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนต่างก็สามารถใช้เป็นสารอาหารได้

5.3.4 การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนในการแย่งใช้อะซิเตท

อะซิเตทเป็นสารอินเทอร์มีเดียที่สำคัญที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะถูกย่อยสลายผ่านอะซิเตท ซึ่งในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟต แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนต่างก็แข่งขันกันเพื่อใช้อะซิเตทที่มีอยู่ในระบบ แต่แบคทีเรียประเภทใดจะเป็นฝ่ายชนะและสามารถกลายเป็นกลุ่มที่โดดเด่น

5.4 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน

ในประเด็นเรื่องการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน ความรู้ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นแล้วว่า แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตควรจะชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนในการแย่งใช้สับสเตรท อย่างไรก็ตาม การทดลองวิจัยในห้องปฏิบัติการได้ผลที่ขัดแย้งกัน บางชิ้นก็สนับสนุนข้อมูลจลนศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ แต่หลายชิ้นก็ขัดแย้งดังที่ได้จากการทดลองบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง (Visser., 1994) การทดลองนี้มีการเลี้ยงแบคทีเรียในสภาพที่เป็นเม็ดและที่เป็นฟิล์มด้วยสับสเตรท 2 ชนิดคืออะซิเตทและกรดอินทรีย์ระเหยอื่นปรากฏว่าบางการทดลองมีเฉพาะก๊าซมีเทนแต่ก็มีการทดลองที่ไม่เกิดก๊าซมีเทนเลย (Visser., 1994) อธิบายว่าในสภาพแวดล้อมบางอย่างที่เหมาะสม แบคทีเรียสร้างมีเทนยังมีโอกาสที่จะเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ นั่นก็คือ นอกเหนือจากปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์และจลนศาสตร์ที่จะต้องนำมาพิจารณาแล้ว ยังคงมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบเพื่อที่ว่าแบคทีเรียประเภทใดจะเป็นฝ่ายชนะในการแย่งใช้อะซิเตทปัจจัยที่อาจมีผลต่อการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน ปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่

1) อุณหภูมิ

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้อะซิเตทในช่วงอุณหภูมิที่สามารถเจริญเติบโตได้และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิก ซึ่งจากผลการทดลองของ (Visser., 1994) พบว่ากิจกรรมของสัลคิจ์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและของแบคทีเรียสร้างมีเทนมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งค่ากิจกรรมนี้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังนั้นเมื่อพิจารณาในช่วงเวลาสั้นๆ จึงคาดว่าจะไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิในช่วงเมโซฟิลิก (Visser., 1994) ศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันที่มีต่อกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน และกระบวนการสร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเข้าสู่ช่วง 55–65 องศาเซลเซียสอย่างกระทันหัน ทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้เปรียบแบคทีเรียสร้างมีเทนในการแย่งใช้อะซิเตทและหลังจากการเพิ่มอุณหภูมินี้ก็พบว่าการใช้สารอาหารเนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าสถานะในช่วงเทอร์โมฟิลิกเอื้ออำนวยให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ทั้งในการแย่งใช้ไฮโดรเจนและอะซิเตท

2) ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนของเหล็ก (Fe^{2+})

กระบวนการไม่ใช้ออกซิกเจนที่มีซัลเฟตอยู่ด้วยมักได้ผลิตภัณฑ์เป็นซัลไฟด์เกิดขึ้นเสมอ และก็เป็นที่ยูกันมานานแล้วว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความต้องการเหล็กในปริมาณที่สูง ดังนั้นการตกตะกอนของเหล็กซัลไฟด์สามารถทำให้เกิดการจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเนื่องจากการขาดเหล็กได้และอาจทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนมีข้อได้เปรียบและสามารถเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้

3) การเกาะติดของแบคทีเรีย

นอกจากลักษณะสมบัติเฉพาะตัว (ทางจลนศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์) แล้วความสามารถในการเกาะติดหรือสร้างเม็ดตะกอนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กำหนดผลการแข่งขัน สิ่งที่ทำให้ถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบฟิล์มชีวภาพสามารถทำงานได้ที่อัตราบำบัดสูงอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ขึ้นอยู่กับการเกาะติดของมวลชีวภาพและเวลากักเซลล์ แบคทีเรียที่ไม่มีความสามารถในการเกาะตัวเป็นเม็ดสัลคิจ์หรือฟิล์มชีวภาพจะถูกพัดพาออกไป ในขณะที่แบคทีเรียที่มีความสามารถในการเกาะติดจะยังคงอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Isa *et al.*, 1986) ทำการทดลองหาบทบาท

ของความสามารถในการเกาะติดของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนในถังกรองไม่ใช้อากาศที่ป้อนด้วย อะซิเตท, เอทานอลและซัลเฟตมากเกินไป พบว่าอะซิเตทและเอทานอลจำนวนมากถูกย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนของแบคทีเรียสร้างมีเทนที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์ต่อจำนวนที่มีอยู่ในน้ำทิ้งมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมาก ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่ากิจกรรมที่วัดได้ในถังปฏิกรณ์จะสัมพันธ์กับแบคทีเรียสร้างมีเทนมากกว่า ส่วนในน้ำทิ้งจะสัมพันธ์กับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมากกว่า ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกาะติดที่เหนือกว่าของแบคทีเรียสร้างมีเทน ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถแข่งขันกับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Visser (1994) ได้ศึกษาถึงกระบวนการเกิดเป็นเม็ดสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ยูเอสบีที่บำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต พบว่ากระบวนการซัลเฟตรีดักชันจะกลายเป็นกระบวนการหลักในการกำจัดสารอินทรีย์ถ้าหากมีเวลามากพอ เม็ดสลัดจ์เกิดขึ้นได้ดีและเป็นเม็ดสลัดจ์ที่ทำให้เกิดการรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองเดียวกันนี้พบว่า แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตไม่สามารถสร้างเม็ดสลัดจ์ขึ้นมาได้เองโดยไม่มีแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเพียงฟล็อกเท่านั้น ซึ่งสันนิษฐานว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอาจใช้แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแกนในการเกิดเม็ดสลัดจ์ แสดงว่าในระบบผสมที่มีทั้งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความสามารถในการเกาะติดเพียงพอที่จะแข่งขันกับแบคทีเรียสร้างมีเทนในการใช้สารอาหารทั้งไฮโดรเจนและอะซิเตท ดังนั้น จึงน่าจะตั้งสมมติฐานได้ว่าความสามารถในการเกาะติดของแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าที่จะแตกต่างกันอย่างมาก

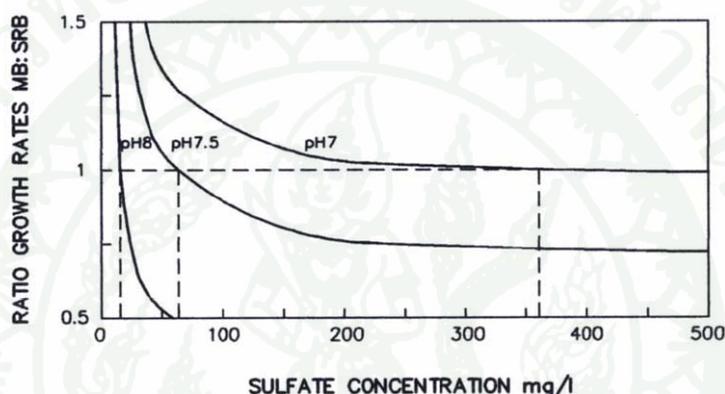
4) อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต

จากปัจจัยทางจลนศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้เปรียบแบคทีเรียสร้างมีเทนในการแข่งขันใช้สารอาหารและมีแนวโน้มว่าจะชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วแบคทีเรียชนิดใดจะเป็นผู้ชนะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะนั้นเป็นอย่างมากเช่น ในกรณีที่ซัลเฟตเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแบคทีเรียสร้างมีเทนก็มีโอกาสที่จะเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ หรือในกรณีที่สารอินทรีย์ในระบบมีอยู่อย่างจำกัดในขณะที่มีซัลเฟตอยู่อย่างเหลือเฟือเพื่อซีไอดีเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองประเภท แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็มีโอกาสเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้เช่นกัน (Visser., 1994) ดังนั้น ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่สำคัญมากในการตัดสินใจ

แบคทีเรียประเภทใดจะเป็นฝ่ายชนะในระบบหนึ่งๆ จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟต โดยที่ศักยภาพของแบคทีเรียสร้างมีเทนในการเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนนี้มีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็มีโอกาสเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้มากขึ้นเมื่ออัตราส่วนนี้ลดลงและความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นไม่สะสมจนทำให้เกิดการยับยั้งการใช้สารอาหาร แต่ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราส่วนนี้ยังไม่เป็นที่แน่นอนเช่นเดียวกับความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนของ $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ เท่ากับ 2 หรือมากกว่า เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำงานของแบคทีเรีย SRB ในการกำจัดซัลเฟต (Lens *et al.*, 1998) ในขณะที่การศึกษาของ (Pakin *et al.*, 1991) ได้ทำการศึกษากำจัดซัลเฟตในน้ำเสียในระบบตัวกรองไร้อากาศโดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนของ $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ ตั้งแต่ 20:1 ถึง 8:1 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มภาระบรรทุกซัลเฟตและสารอินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง

5) ความเข้มข้นของซัลเฟต

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถถูกจำกัดได้เนื่องจากความเข้มข้นในระบบของสารให้อิเล็กตรอน (อะซิเตท) และสารรับอิเล็กตรอน (ซัลเฟต) ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีต่อพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ที่วัดได้จากเม็ดสลัดจ์ ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตต่างๆ นั้น แบคทีเรียสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต



ภาพที่ 7 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีผลต่อการเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียสร้างมีเทน

ที่มา: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2545)

นอกเหนือจากการจำกัดอัตราการเจริญเติบโตเนื่องจากซัลเฟตโดยตรงแล้วที่ระดับความเข้มข้นของซัลเฟตต่างๆ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ย่อยสลายอะซิเตทจะต้องแข่งขันกับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดอื่นๆ เพื่อแย่งซัลเฟตที่มีอยู่ด้วย ซึ่งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการนำซัลเฟตมาใช้ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า *Desulfobacter postgei* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่บรีโกลอะซิเตทมีความชอบซัลเฟต (Sulfate Affinity, K_s) น้อยกว่า *Desulfovibrio* ซึ่งเป็นพวกบรีโกลไฮโดรเจน (Visser, 1994) แสดงให้เห็นว่าความชอบซัลเฟตจะลดลงตามลำดับต่อไปนี้ คือ *Desulfovibrio*, *Desulfobulbus* และ *Desulfobacter* ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายไฮโดรเจน, โพรพิโอเนตและอะซิเตทตามลำดับ

ตารางที่ 5 ความชอบซัลเฟต (Sulfate Affinity, K_s) ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

Species	K_s (mg/l SO_4)
<i>Desulfovibrio vulgaris</i> (Marburg)	0.5
<i>Desulfovibrio vulgaris</i> (Hildenborough)	3
<i>Desulfovibrio sapovorans</i>	0.7
<i>Desulfovibrio salexigens</i>	7
<i>Desulfobacter postagei</i>	19
ฟิล์มชีวภาพ, อะซิเตทเป็นตัวให้อิเล็กตรอน	45
สลัดจ์แขวนลอย, อะซิเตทเป็นตัวให้อิเล็กตรอน	30

ที่มา: Visser (1994)

ดังนั้นภายใต้สภาวะที่มีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด จึงเป็นที่คาดกันว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่บริโภคะซิเตทจะถูกแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตประเภทอื่นๆ เอาชนะได้ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถแข่งขันกับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ในการแย่งใช้อะซิเตท แต่สำหรับน้ำเสียที่มีซัลเฟตมากเกินไป การแข่งขันเพื่อแย่งซัลเฟตดูเหมือนว่าจะมีความสำคัญลดลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีข้อจำกัดในการแพร่ของซัลเฟตเข้าไปในฟิล์มชีวภาพหรือเม็ดสลัดจ์ อาจทำให้การจำกัดเนื่องจากซัลเฟตในมวลชีวภาพยังคงมีอยู่ นักวิจัยยังพบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่น้อยกว่า 50 mg/L ทำให้เกิดการจำกัดเนื่องจากซัลเฟตในฟิล์มชีวภาพและสำหรับการเติบโตเป็นสลัดจ์ ระดับความเข้มข้นซัลเฟตที่ต่ำกว่า 300 mg/L ทำให้เกิดการจำกัดเนื่องจากซัลเฟต

6) ฟิเอช

เช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำทั่วไป การเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นอยู่กับฟิเอชในน้ำที่อาศัยอยู่ (Visser, 1994) ศึกษาถึงผลกระทบของฟิเอชที่มีต่อกระบวนการซัลเฟตรีดักชันและกระบวนการสร้างมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก (55°C) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าที่ฟิเอชสูง กระบวนการซัลเฟตรีดักชันจะกลายเป็นกระบวนการที่โดดเด่น ในขณะที่ค่าฟิเอชเข้าใกล้ค่าฟิเอชที่เป็นกลางมาก

แบคทีเรียสร้างมีเทนก็สามารถแข่งขันกับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้มากขึ้น ส่วนผลการทดลองในช่วงเมโซฟิลิกก็ได้ผลที่คล้ายคลึงกัน (Visser, 1994)

ตารางที่ 6 สัดส่วนการใช้ชีโอติของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน

ระดับพีเอชที่ใช้	% สัดส่วนที่ขยับโดย SRB และ MPB*			
	ชีโอติทั้งหมด*		อะซิเตท	
	SRB	MPB	SRB	MPB
6.5 – 7.5 เฉื่อย	48	52	33	67
8.0-8.5 เฉื่อย	85	15	79	21

หมายเหตุ * การทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

** ใช้อะซิเตท, พรอพิโอเนท และบิวทิเรท ร่วมกับซัลเฟต

ที่มา: Visser (1994)

6) สารประกอบที่เป็นพิษ

แบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็เหมือนกับแบคทีเรียอื่นที่ถูกยับยั้งเนื่องจากสารประกอบที่เป็นพิษชนิดต่างๆ กัน ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากระบวนการซัลเฟตรีดักชันก็เป็นสารประกอบที่เป็นพิษชนิดหนึ่งด้วย ความเป็นพิษที่เกิดจากซัลไฟด์มีผลต่อการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบมาจากซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำทิ้งหรือเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/L ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Visser, 1994)

6. ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซผสมที่ประกอบไปด้วยแก๊สมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซอื่นๆ เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีหรือทางฟิสิกส์ เช่น การย่อยสลายและการใช้เป็นแหล่งคาร์บอนอื่นๆ จากอินทรีย์สารโมเลกุลใหญ่โดยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเกิดจากการกลั่นโดยใช้ความร้อนของอินทรีย์สาร เป็นต้น ก๊าซที่ได้นี้สามารถใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ ต้องมีก๊าซที่เทนเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 55 – 65% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 35 – 45 % ก๊าซไนโตรเจน 0 – 3 % ก๊าซไฮโดรเจน 0 – 1 % และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0 – 1 % (Polprasert, 1996)

ภายหลังขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องผ่านขั้นตอนการบำบัดของเสียที่ปนอยู่ในน้ำและบำบัดก๊าซที่ได้ให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

การบำบัดของเสียในรูปของเหลวจะทำการแยกของเสียออกเป็นสองอย่างกล่าวคือ การแยกของเสียในรูปของแข็งออกจากน้ำแล้วนำไปตากแห้งแล้วอัดเป็นก้อนเพื่อนำไปฝังกลบหรือไปทำเป็นปุ๋ยหมัก ส่วนของเสียในรูปของเหลวจะนำไปสู่ขั้นตอนการบำบัดแบบให้อากาศ

ก๊าซชีวภาพที่ได้ยังเป็นแก๊สที่มีสารปนเปื้อนเจือปนอยู่ เมื่อนำไปใช้จะเกิดปัญหาความเป็นพิษของสารปนเปื้อน ค่าความร้อนของก๊าซต่ำ และการกัดกร่อนของภาชนะรองรับ ดังนั้นจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการบำบัดก๊าซที่ได้ให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

6.1 สารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ถึงแม้ว่าก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานที่มีประโยชน์ แต่กว่าจะได้มาซึ่งก๊าซชีวภาพที่บริสุทธิ์จะต้องนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนเพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อนมาในขั้นตอนการผลิต ตั้งแต่การกรองแยกละอองฝุ่น สนิม ความชื้น ตลอดจนก๊าซที่อาจปะปนในขั้นตอนการผลิตทำให้คุณภาพของก๊าซชีวภาพลดลง โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (เสาวลักษณ์, 2535)

ผลเสียของก๊าซปนเปื้อนที่ผสมอยู่ในก๊าซชีวภาพเป็นอันตรายและสร้างมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อม คือ เมื่อมีปริมาณไอน้ำเป็นสารที่ลดค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพและยังเป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาการกักตร้อนของอุปรกรณ์ และมีคุณสมบัติในการรวมตัวกับก๊าซมีเทนให้เกิดผลึกของแข็ง เป็นอุปสรรคต่อการใช้ก๊าซ (ปรีดา, 2529)

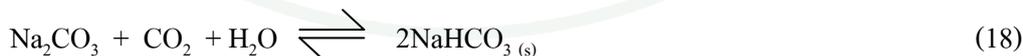
ก๊าซกรดที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เมื่อมีในก๊าซชีวภาพจะทำให้ค่าความร้อนของก๊าซลดลง และก๊าซบางชนิดยังก่อให้เกิดการกักตร้อน เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ที่ระดับความเข้มข้น 1.1 ppm ขึ้นไปมีคุณสมบัติในการกักตร้อนสูง ดังนั้นควรที่จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพจะช่วยลดปัญหาการกักตร้อนและเป็นการเพิ่มค่าพลังงานความร้อนให้กับเชื้อเพลิง (Obiss *et al.*, 1997)

Engel (1977) รายงานระดับความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเห็นว่า แม้ว่ามีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยแต่ก็มีอันตรายสูง กล่าวคือ สภาพตัวมันเองเป็นพิษและก่อให้เกิดการกักตร้อนแล้วยังเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดก๊าซอันตรายในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ถ้าหากไม่ผ่านกระบวนการบำบัดก่อนนำมาใช้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

6.2 การกำจัดสารปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพ

1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย ดังนั้นในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซกรดนั้นทำได้โดยดูดซับ (absorbed) โดยสารละลายต่าง (Alkalie solution) สารละลายที่นิยมโดยทั่วไปมี 3 ชนิดได้แก่ สารละลาย NaOH , Ca(OH)₂ และ KOH รูปแบบของสมการในการกำจัดแสดงดังสมการที่ 17 – 19 (Polprasert, 1996)



2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีวิธีการกำจัดหลายวิธีตั้งแต่การกำจัดก่อนเผาไหม้ จนถึงการจัดหลังเผาไหม้ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการเผาไหม้เพราะสามารถลดความเสียหายของเครื่องยนต์ในเรื่องการกัดกร่อนและลดปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกันแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

2.1 การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยกระบวนการทางเคมี

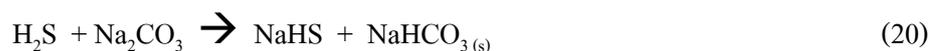
การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยกระบวนการทางเคมีนั้นอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปอื่นเพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดแบ่งออกเป็น 2 แนวทางใหญ่ๆ

2.1.1) การใช้วัสดุดูดซับ (adsorption material)

เป็นการแยกแก๊สมลพิษออกจากกระแสก๊าซด้วยวัสดุที่สามารถให้การดูดซับสูงก๊าซมลพิษหรือสารระเหยจะถูกดูดติดอยู่บนผิวของวัสดุแข็งที่เรียกว่าวัสดุดูดซับ (adsorbent) ก๊าซหรือสารระเหยที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (adsorbate) กระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) คือการที่โมเลกุลของก๊าซเกาะติดอยู่ที่ผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ กับการดูดซับเชิงเคมี คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุดูดซับกับโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับด้วยแรงพันธะระหว่างโมเลกุล เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้เพราะเมื่อโมเลกุลหลุดจากการถูกดูดซับ โครงสร้างทางเคมีจะเปลี่ยนแปลงไป (Joseph *et al.*, 1981)

2.1.2) การใช้ของเหลวดูดซึม (liquid absorption)

การใช้ของเหลวดูดซึมนั้นอาศัยความเข้มข้นที่ความแตกต่างกันระหว่างก๊าซและของเหลวเป็นตัวผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงไปยังของเหลว การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมจะใช้สารเคมีเติมลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ละลายในของเหลว (Joseph *et al.*, 1981) สารเคมีที่นิยมใช้เช่น สารละลาย Na_2CO_3 และ Fe_2O_3 สมการแสดงการกำจัดแสดงดังสมการที่ 20 – 21 (Polprasert, 1996)



วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นส่วนใหญ่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งแก๊สที่ผ่านจากหอกลั่นมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง บางวิธีสารที่ได้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือบางวิธีก็มีขั้นตอนการแปรสภาพค่อนข้างยุ่งยากและต้นทุนสูง ในขณะที่ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศนั้นมีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับไม่สูงมากเท่าอุตสาหกรรมปิโตรเลียมการนำเอาวิธีที่มีคุณภาพสูงและราคาแพงมาใช้อาจไม่เหมาะสม ดังนั้นวิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทางชีวภาพจึงน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในก๊าซชีวภาพซึ่งมีค่าใช้จ่ายและสารเคมีตกค้างปริมาณน้อยกว่าการกำจัดแบบวิธีทางเคมีแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบวิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทางเคมีและทางชีวภาพ

หัวข้อเปรียบเทียบ	เคมี	ชีวภาพ
อัตราของปฏิกิริยา	สูง	ต่ำ
ความดันและอุณหภูมิ	สูง	ต่ำ
ค่าใช้จ่าย (สารเร่งปฏิกิริยา)	มาก	น้อย
ราคาสารเคมี (เฉพาะกระบวนการบำบัด)	สูง	ต่ำ
สารมลพิษตกค้าง	มาก	น้อย

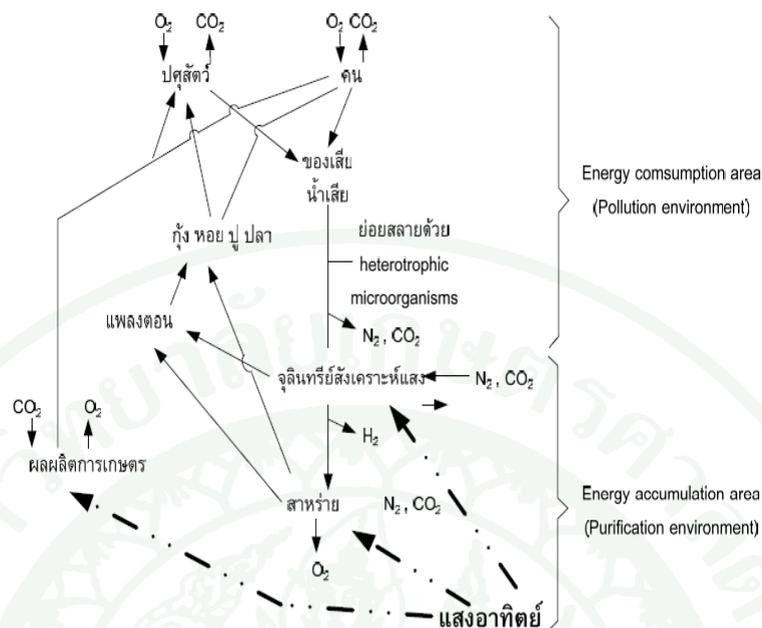
ที่มา: Guoqiang *et al* (1994)

2.2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีการทางชีวภาพ

เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เปลี่ยนก๊าซให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษต่ำ เชื้อที่มีประสิทธิภาพในเชิงพาณิชย์ที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (Gadre *et al.*, 1988)

2.2.1 กลุ่มพวกแบคทีเรียสังเคราะห์แสง (Photosynthetic bacteria)

แบคทีเรียสังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria; PSB) พบกระจายทั่วไปในธรรมชาติ ตามแหล่งน้ำจืดน้ำเค็ม ทะเลสาบน้ำเค็ม น้ำทะเลสาบที่มีความเป็นด่าง น้ำที่มีความเป็นกรด น้ำพุร้อน น้ำทะเลบริเวณขั้วโลกเหนือนอกจากนี้ยังพบตามแหล่งน้ำเสีย บ่อบำบัดน้ำเสีย (Imhoff, 1993) บทบาทของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีความสำคัญในกระบวนการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ (CO₂ - assimilation) และการตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในห่วงโซ่อาหารซึ่งสัตว์ขนาดเล็ก ปลา กุ้ง หอย และปู สามารถนำแบคทีเรียสังเคราะห์แสงมาใช้เป็นอาหารได้ นอกจากนี้ในน้ำเสียจากบ้านเรือนและน้ำเสียจากการทำปศุสัตว์สามารถบำบัดด้วยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kobayashi, 2000) ดังแสดงตามภาพที่ 9



ภาพที่ 8 บทบาทของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในธรรมชาติ

ที่มา: Kobayachi (2000)

การทำงานของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีกลไกหลักอยู่ 2 กลไก Kluver *et al* (1956)

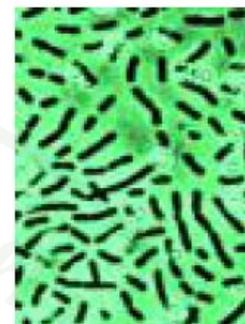
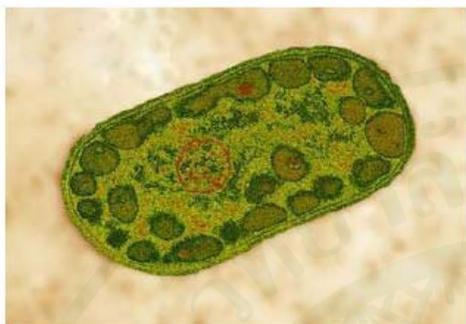
ขั้นที่ 1 เป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสง (light reaction) ทำให้เกิดพลังงานในรูปแบบ ATP และโคเอนไซม์ในรูปรีดิวซ์

ขั้นที่ 2 เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องใช้แสง (dark reaction) นำเอา ATP และโคเอนไซม์ในรูปรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นมาใช้ในการสังเคราะห์แสงสารต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มของแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถัน (*Chlorobiaceae*) ภาพที่ 9 เป็นพวก anaerobic และ photoautotroph คือ ไม่สามารถเจริญในที่ที่มีออกซิเจนและได้รับพลังงานการเจริญจากแสงเท่านั้น ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและสารประกอบอนินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเช่น *Chlorobium thiosulfatophilum* ใช้ซัลไฟด์หรือซัลไฟต์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนทำให้

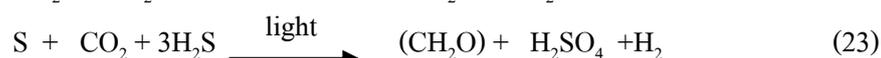
กลายเป็นซัลเฟตในสภาพที่มีแสงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และสามารถเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปธาตุกำมะถันร้อยละ 67.1 และซัลเฟตร้อยละ 32.8 หรือ *Chlorobium limicola* ใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ซัลไฟด์กลายเป็นกำมะถันแล้วสะสมอยู่ในผนังเซลล์ (พวงพร, 2533)



ภาพที่ 9 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ *Chlorobiaceae*

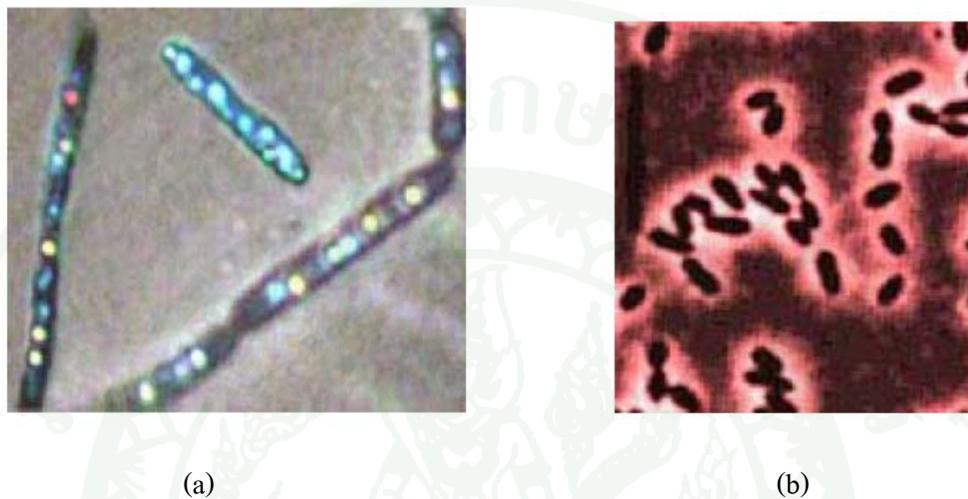
ที่มา: พวงพร (2533)

2) กลุ่มของแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน (*Chromatiaceae*) เป็นแบคทีเรียพวก obligate anaerobe และ obligate photoautotroph ใช้พลังงานแสงในการเจริญเติบโต และใช้สารประกอบอนินทรีย์กำมะถันและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้กำมะถันกลายเป็นซัลเฟต และมีกำมะถันบางส่วนกระจายอยู่ภายในเซลล์ เช่น *Chromatium vinosum* สามารถเจริญได้ดีในสภาพโฟโตออโตโทรฟ (photoautotroph) ซึ่งสามารถใช้สารประกอบซัลเฟอร์ซัลไฟด์ และไทโอซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารอาหารภายในเซลล์ได้ (Imhoff, 1993) แสดงสมการดังนี้ และแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ *Chromatiaceae* จะสะสมกำมะถันไว้ในเซลล์



แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ *Rhodospirillaceae* (ภาพที่ 11) เป็นแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สามารถใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารอาหารภายในเซลล์ได้ และมีการสันดาป (metabolism) ดีกว่าแบคทีเรียสีม่วงที่ใช้ซัลเฟอร์ เนื่องจากสามารถเจริญได้

ทั้งแบบโฟโตเฮเทอโรโทรฟ และโฟโตออโตโทรฟ โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งส่วนใหญ่แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทนต่อสภาพที่มีออกซิเจน จึงสามารถเจริญได้ภายใต้สภาวะแบบเฮเทอโรโทรฟที่มีอากาศ-ไม่มีแสง มีแบคทีเรียโอคโคลโรฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์ หลายชนิดในการสังเคราะห์แสง

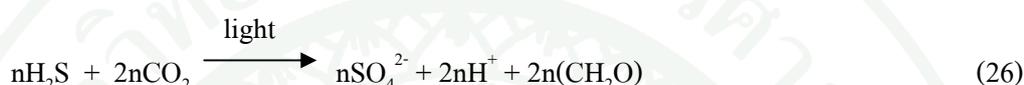
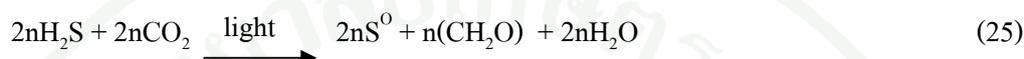


ภาพที่ 10 a คือ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ *Chromatiaceae*
b คือ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ *Rhodospirillaceae*

ที่มา: VanNiel (1944)

(Conde *et al.*, 1993) ใช้เชื้อ *Chlorella vulgaris* กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพในระบบถังหมักไร้อากาศเป็นการเลี้ยงแบบกะในบ่อบำบัดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสความกว้าง 0.23 เมตร และความสูง 0.30 เมตร สามารถจุน้ำได้ 15 ลิตร วัดความเข้มข้นของก๊าซขาเข้าและขาออกที่เอชของระบบเป็น 6.8 – 6.9 ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 15 วัน เก็บผลการทดลองทุก ๆ 2 วัน พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเริ่มต้นประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 55 – 71 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 44 – 48 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 0.9 – 1 และความเข้มข้นของก๊าซขาออกประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 88 – 97 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 2.5 – 11.5 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 0.3 – 0.4

Van Niel (1931) ได้ทำการศึกษากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เชื้อ *Cholorobium limicola* และให้แหล่งพลังงานแสงที่มีความเข้มของแสงมากกว่า 0.1 kw/m^2 พบว่าความสัมพันธ์อัตราส่วนจำนวน โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงดังสมการที่ 25 ในขณะที่ (Larsen, 1952) ได้ทำการศึกษาเช่นเดียวกันแต่ให้แหล่งพลังงานแสงที่มีความเข้มของแสงต่ำกว่า 0.1 kw/m^2 พบว่าความสัมพันธ์อัตราส่วนจำนวน โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงดังสมการที่ 26



จากรูรณ (2532) ได้นำแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไปใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานมันสำปะหลัง พบว่าสามารถลดค่าซีโอดี(ค่าความสกปรกของน้ำเสีย)ได้มากถึง 94.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แบคทีเรียเป็นหัวเชื้อในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์และเมื่อเพิ่มเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความสามารถในการกำจัดความสกปรกในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นเป็น 96.45 เปอร์เซ็นต์

2.2.2 กลุ่มแบคทีเรียไม่สังเคราะห์แสง (nonphotosynthetic bacteria) ได้แก่แบคทีเรียในตระกูล *Thiobacillus sp.* จัดเป็นประเภท chemoautotropic bacteria เพียงชนิดจิ้นัสเดียวซึ่งออกซิไดซ์กำมะถันได้ จะขนถ่ายสารประกอบอนินทรีย์กำมะถันเช่นธาตุกำมะถัน โลหะซัลไฟด์ ไทโอซัลเฟต และซัลไฟด์ จากสภาวะแวดล้อมเข้าสู่ภายในเซลล์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต โดยขนส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจนในสภาวะมีอากาศหรือไปยังไนเตรตในสภาวะไร้อากาศ ผลจากการส่งอิเล็กตรอนนี้ได้พลังงานอิสระเก็บไว้ในรูป ATP และอิเล็กตรอนบางส่วนที่ถูกส่งผ่านลูกโซ่ของการขนส่งอิเล็กตรอนส่งย้อนกลับโดยใช้ ATP แล้วทำให้ได้ $\text{NADH} + \text{H}^+$ ที่เกิดขึ้นสำหรับการสังเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน

อุปกรณ์และวิธีการ

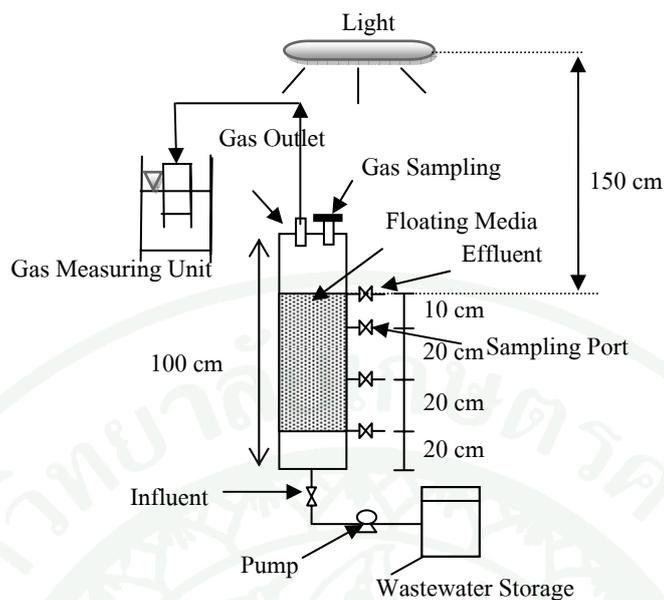
อุปกรณ์

1. แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph) รุ่น GC 6890 Agilent Technologies Model : G1530A

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ติดตั้งดีเทคเตอร์ (detector) แบบทีซีดี (Thermal Conductivity detector : TCD) ใช้ คอลัมน์ (column) แบบ HAYESEP Q80/100 ตั้งค่าอุณหภูมิอินเจคเตอร์ (injector) คอลัมน์และดีเทคเตอร์เท่ากับ 120 35 และ 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ ตัวพา (carrier gas) เป็นก๊าซฮีเลียม (He) บริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งมีอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที และมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์ 15 นาที

2. เข็มฉีดตัวอย่างก๊าซ (gas tight syringe) ขนาด 0.5 มิลลิลิตร
3. ถังแบบจำลองระบบตัวกลางกรองลอยไร้อากาศแบบไหลขึ้นทำด้วยอะคริลิกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตรจำนวน 2 ใบ โดยในใบที่สองเป็นตัวควบคุม (control) ไม่มีแสงทำการหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ตลอดทั้งคอลัมน์รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 12
4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH รุ่น DR/4000U
5. ตู้ทำความเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและ -20 องศาเซลเซียส
6. เครื่องแก้วต่างๆ ได้แก่ ปิเปต กรวยแก้ว แท่งแก้วคนสาร บีกเกอร์ขนาดต่างๆ ฯลฯ



ภาพที่ 11 รายละเอียดของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

ฟองน้ำที่ใช้ในระบบมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปลูกบาศก์ขนาด 1.5 x 1.5 x 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นตัวกลางลอย (floating media) ในระบบ โดยฟองน้ำที่ใช้ทำการบรรจุมีขนาดพื้นที่ผิว $1.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (ภาคผนวก ก)

วิธีการ

1. การเตรียมหัวเชื้อที่ใช้ในระบบ

นำดินเหนียวในบริเวณที่ออกซิเจนไม่สามารถถ่ายเทเข้าไปในเนื้อดิน 200 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ป้อนเข้าระบบปริมาตร 500 มิลลิลิตรคนสารละลายนาน 10 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจากนั้นรินส่วนใสเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อของระบบ โดยทำการป้อนหัวเชื้อเข้าสู่ระบบปริมาตรคิดเป็น 30% ของถังปฏิกรณ์

2. การเตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ (synthetic wastewater) โดยใช้กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) เป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นแหล่งซัลเฟต มีค่าซีโอดีเฉลี่ยประมาณ 927 – 1,449 mg/L หลังจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตั้งทิ้งไว้ 1 คืนก่อนป้อนน้ำเสียที่เตรียมไว้เข้าสู่ระบบจึงเป็นผลทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เตรียมไว้บางส่วนอยู่ในรูปของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) โดยส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ส่วนประกอบของน้ำเสียดังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ความเข้มข้น
$C_6H_{12}O_6$	1.4 g/L
Na_2SO_4	Variable
KH_2PO_4	3 g/L
K_2HPO_4	1 g/L
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.3 g/L
NH_4Cl	1 g/L
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	0.1 g/L
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	0.1 g/L
C/N	2/1

หมายเหตุ Trace element solution (mg/L) : $NiSO_4 \cdot 4H_2O$, 500 ; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, 500 ; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 500 ; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 100 ; H_3BO_3 , 100 ; $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, 50 ; $CoCl_2 \cdot 5H_2O$, 50 และ $CuSO_4 \cdot 5H_2O$,

ที่มา : คัดแปลงจาก Suktrakoolvait (2000)

3. การเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และประสิทธิภาพของระบบตัวกลางกรองลอยไร้อากาศแบบไหลขึ้น โดยการป้อนน้ำเสียดังเคราะห์ทางด้านล่างของทั้งสองคอลัมน์ เมื่อระบบเสถียรทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยเป็น 122, 211, 316 และ 447 mg/L ตามลำดับหรือคิดเป็นอัตราส่วนความเข้มข้นของซีโอดีต่อซัลเฟต เป็น 7:1 ; 6:1 ; 4:1 และ 3:1 ที่ความเข้มแสง 0.003 kW/m² หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยเป็น 1,354 mg/L ที่ความเข้มแสงเป็น 0.1 kW/m² ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ได้แก่ pH , COD , VFA , Alkalinity , SO_4^{2-} และสัดส่วนของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบได้แก่ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 ชั่วโมง และมี อัตราการไหลเป็น 0.02 เมตรต่อชั่วโมง ทำการทดลองทั้งหมด 2 คอลัมน์โดยในคอลัมน์แรกทำการทดลองโดยให้แสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มแสง 0.003

kW/m^2 และ 0.1 kW/m^2 ตลอด 24 ชั่วโมง คอลัมน์ที่สองเป็นตัวควบคุมไม่มีแสงโดยการหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ตลอดทั้งคอลัมน์ขึ้นตอนการทดลอง

3.1 เริ่มต้นเดินระบบ (Start Up)

ทำการทดลองโดยการเริ่มต้นเดินระบบโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดีเฉลี่ยประมาณ 927 mg/L หรือ $2.09 \text{ kgCOD/m}^2 \cdot \text{d}$ (ภาคผนวก ก) ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเป็น 0.02 m/h ทั้งสองคอลัมน์แต่ใน 100 วันแรกทำการตรวจวัดพารามิเตอร์เฉพาะในคอลัมน์ที่ให้แสง หลังจากนั้นเริ่มทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 9 จึงเริ่มทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ของคอลัมน์ควบคุมควบคู่กันโดยทำการเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 346 วัน พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 สภาวะทดลอง

Operating Condition	Experiment No.	Average Concentration \pm S.D (mg/L)			Day
		COD	SO_4^{2-}	COD: SO_4^{2-}	
		Condition 1			
HRT 48 hrs	E1	947 ± 136	-	-	1-100
Up flow velocity = 0.02 m/h	E2	$1,124 \pm 151$	151 ± 21	7:1	100-150
Average light Intensity = 0.003 kW/m^2	E3	$1,449 \pm 175$	233 ± 42	6:1	213-233
	E4	$1,235 \pm 170$	340 ± 21	4:1	234-253
	E5	$1,377 \pm 141$	431 ± 52	3:1	254-273
Condition 2					
HRT 48 hrs	E6	512 ± 193	$1,377 \pm 32$	0.4:1	293-346
Up flow velocity = 0.02 m/h					
Average light Intensity = 0.1 kW/m^2					

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
sCOD (mg/L)	2-3 ครั้ง/สัปดาห์	Close dichromate Reflux
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	2-3 ครั้ง/สัปดาห์	Titrimetric method
VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	2-3 ครั้ง/สัปดาห์	Titrimetric method
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2-3 ครั้ง/สัปดาห์	Turbidimetric method
pH	3 ครั้ง/สัปดาห์	pH meter
Gas composition (CO ₂ , CH ₄ , H ₂ S)	1 ครั้ง/สัปดาห์	Gas Chromatography

3.2 ศึกษาหาประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบที่มีแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวที่อาศัยอยู่โดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง

หลังจากที่ระบบเสถียรแล้วทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์โดยแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบเฉลี่ยเป็น 122, 211, 316 และ 447 mg/L ตามลำดับหรือคิดเป็นอัตราส่วนความเข้มข้นของซีโอดีต่อซัลเฟต 7:1 ; 6:1 ; 4:1 และ 3:1 เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบโดยใช้ความเข้มแสง 0.003 kW/m² หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยเป็น 1,354 mg/L หรือที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 0.4:1 ที่ความเข้มแสงเป็น 0.1 kW/m² โดยมีอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบเป็น 0.02 m³/h ที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 ชั่วโมงทั้ง 2 คอลัมน์โดยในคอลัมน์ที่ 2 เป็นตัวควบคุม (ไม่มีแสง)

4. การทดลองแบบกะ (Batch Experiment)

การทดลองนี้เป็นการหา C/N ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสีเขียว (Green Bacteria) โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ทำการศึกษาที่ C/N เป็น 0.02:1 ; 0.2:1 ; 2:1 และ 20:1 โดยให้ความเข้มข้นของคาร์บอน (C) ในรูปของสารอินทรีย์ (glucose) ไนโตรเจน (N) ในรูปของแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ให้ซัลไฟด์ (S^{2-}) ในรูปของโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) กำหนดความเข้มข้นเป็น 1,500 และ 60 mg/L ตามลำดับ ทำการทดลองเป็นเวลาทั้งหมด 20 วัน โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 668 nm. ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่แบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด (Henshaw *et al.*, 2001)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในระบบตัวกลางกรองลอยไร้อากาศ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) เป็นแหล่งคาร์บอน ทำการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 ชั่วโมงที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.02 m/h พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียที่เข้าระบบแสดงดังตารางที่ 10 หลังจากจากระบบมีเสถียรภาพทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ย 122 – 447 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 7:1 ถึง 3:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m² หลังจากนั้นเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยเป็น 1,354 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 0.4:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.1 kW/m² โดยใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นแหล่งซัลเฟต ทำการเดินระบบถึงปฏิกิริยาควบคุม (ไม่มีแสง) ควบคุมไปด้วย ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพตามตารางที่ 10

1) เริ่มต้นเดินระบบ

ในการเริ่มต้นเดินระบบโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (sCOD) มีค่าเฉลี่ย 959 mg/L หรือเท่ากับอัตราภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวของตัวกลางเท่ากับ 2.09 kgCOD/m².d ผสมกับหัวเชื้อ (seed) ปริมาตร 30% ของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการเดินระบบที่เตรียมไว้ข้างต้น ซึ่งตามรายงานของ Salkinoja-Salonen *et al.*, (1983) กล่าวว่าในการเริ่มต้นเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ควรมีปริมาตร 30 – 50% ของถังปฏิกิริยาในการเริ่มต้นเดินระบบ ทำการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกิริยาโดยมีลักษณะการป้อนน้ำเสียแบบไหลขึ้นด้วยอัตราการไหลเป็น 0.02 m/h ทำการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 ชั่วโมงพร้อมกันทั้งสองคอลัมน์โดยทำการเริ่มตรวจวัดพารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ออกจากระบบในคอลัมน์ควบคุม (ไม่มีแสง) เมื่อทำการเดินระบบไปแล้วเป็นระยะเวลา 100 วันโดยพารามิเตอร์ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบใน 100 วันแรกแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่เข้าระบบ

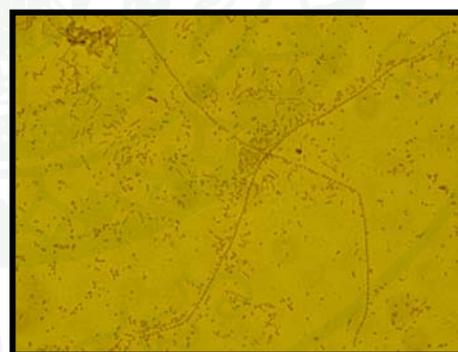
พารามิเตอร์	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
pH	6.60 – 7.34	6.96
sCOD (mg/L)	772 – 1,232	958.79
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	310 – 1,620	676
VFA (mg/L as CH ₃ COOH)	175 – 983	500.52

2. การตรวจสอบแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียว

ในการตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงพบว่าหลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 60 วัน โดยมีการให้แสงสว่างที่มีความเข้มของแสงโดยเฉลี่ย 2,000 ลักซ์หรือ 0.003 kW/m² ซึ่งเป็นความเข้มแสงที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสีเขียว (Henshaw *et al.*, 1998) เมื่อนำเอาตะกอนจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายขนาด 400x และ 1000x ซึ่งพบว่าที่กล้องขยาย 1000x สามารถมองเห็นลักษณะของเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นสาย แสดงดังภาพที่ 12



กำลังขยาย 400X

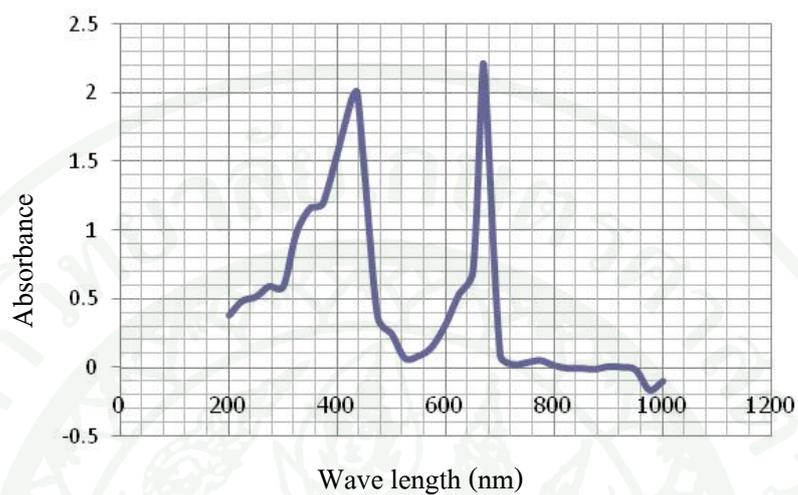


กำลังขยาย 1000X

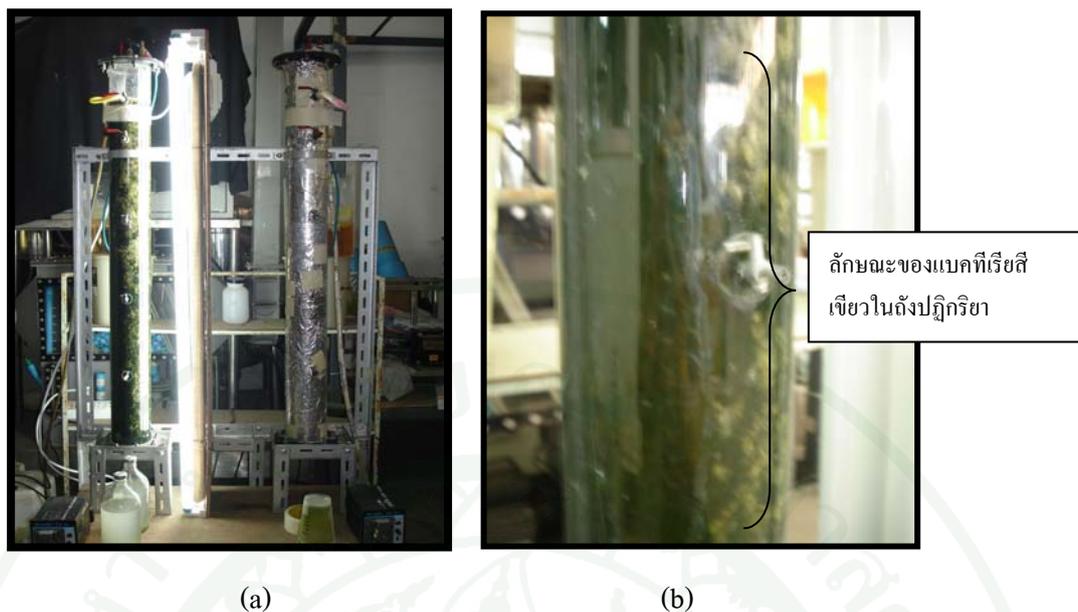
ภาพที่ 12 ลักษณะของแบคทีเรียสีเขียวที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 40x และ 100x

และจากการตรวจสอบแบคทีเรียโอฟิลล์โดยการสกัดเม็ดสีด้วยเมทานอลแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่ารูปแบบการดูดกลืนแสงสูงสุดเป็น 436 และ 668 นาโนเมตรดังภาพที่ 13 ซึ่งตามรายงานของ (Henshaw *et al.*, 2001) เม็ดสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่ทำการสกัดด้วยเมทานอล เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่าให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นในช่วง

660 – 669 นาโนเมตรจะมีแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ C พบว่าเป็นแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ชนิด C ซึ่งเป็นของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียว ลักษณะของแบคทีเรียสีเขียวที่อยู่ในถังปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 กราฟการดูดกลืนแสงของ แบคทีเรียสีเขียวในระบบ



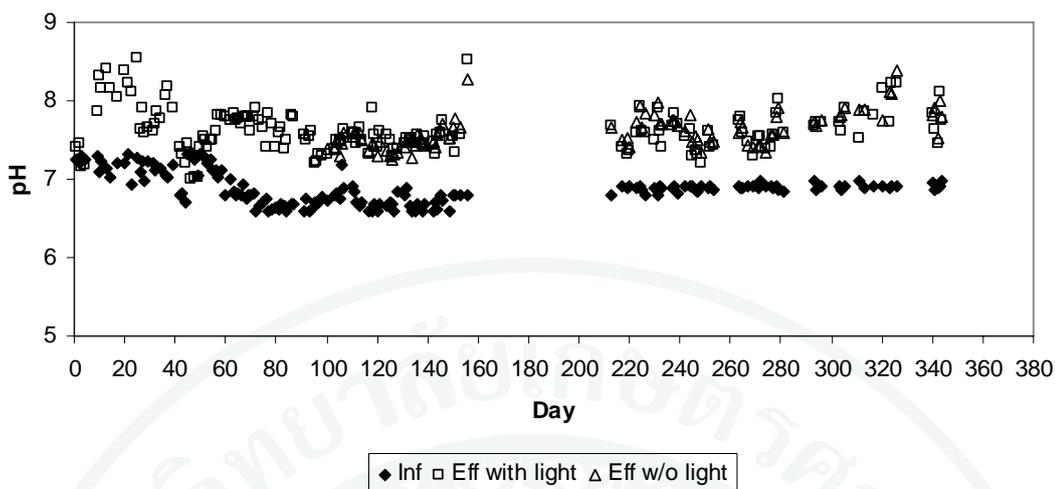
ภาพที่ 14 ถังปฏิกริยา (a) และลักษณะของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีเขียวในถังปฏิกริยา (b)

3. ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ

3.1 ค่าความเป็นกรด – ด่างของระบบ

ตลอดระยะเวลา 346 วันในการเดินระบบควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าระบบให้อยู่ในช่วง 6.60 – 7.34 ทั้งสองระบบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 N และสารละลายกรดไนตริก (HNO₃) เข้มข้น 1 N แสดงดังภาพที่ 15 ในช่วง 100 วันแรกทำการตรวจวัดพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบที่มีแสงพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.6

หลังจากนั้นวันที่ 100 จึงเริ่มทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าสู่ระบบทำการตรวจวัดค่าพีเอชที่ออกจากระบบในคอลัมน์ควบคุมไปพร้อมกับระบบที่มีแสงพบว่ามีค่าเฉลี่ยเป็น 7.6 ทั้งสองระบบซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งตามรายงานของ Chitapompan (2003) กล่าวว่าพีเอชของน้ำเสียมีค่าต่ำกว่า 5 และสูงกว่า 8 จะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนภาพที่ 15 ในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบทั้งสองระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.6 แสดงว่าค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปฏิกริยาอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในระบบไร้อากาศสามารถดำรงชีพอยู่ได้



ภาพที่ 15 พีเอชของน้ำเสียที่เข้า – ออกจากระบบ (วันที่ 1 – 100)

3.2 ความเป็นด่างและกรดไขมันระเหยง่าย

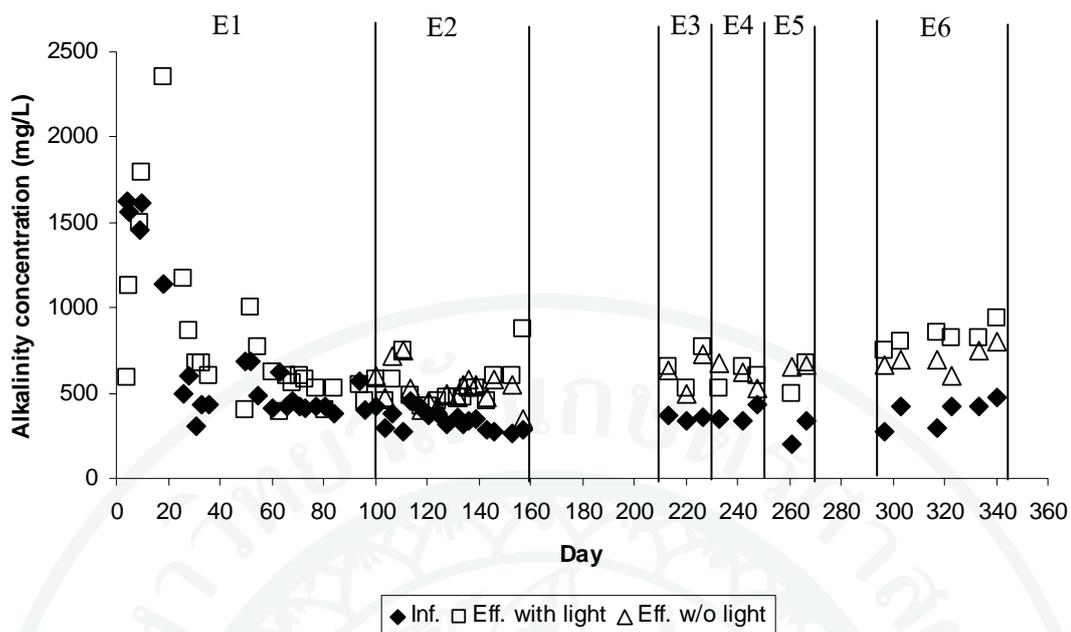
ตรวจวัดค่าความเป็นด่างของน้ำเสียในรูปของแคลเซียมไบคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยตลอดระยะเวลา 100 วัน โดยใน 20 วันแรกทำการตรวจวัดค่าความเป็นด่างและกรดไขมันระเหยง่ายของระบบที่มีแสงที่ออกจากระบบยังมีค่าไม่คงที่แสดงให้เห็นว่าระบบยังไม่มีเสถียรภาพโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 1,472 และ 354 mg/L ตามลำดับแสดงดังภาพที่ 16 และ ภาพที่ 17 หรือคิดเป็นอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างเป็น 0.24

ในระหว่างวันที่ 100 – 273 มีการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยตั้งแต่ 151 – 431 mg/L ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เฉลี่ย 1,296 mgCOD/L หรือคิดเป็นอัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ ตั้งแต่ 7:1 ถึง 3:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m² โดยมีสภาวะการเดินระบบดังตารางที่ 8 จึงเริ่มทำการตรวจวัดกรดไขมันระเหยง่ายและความเป็นด่างในคอลัมน์ควบคู่ (ไม่มีแสง) ไปพร้อมๆ กับระบบที่ให้แสงพบว่าปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปในระบบที่ไม่มีแสงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 158 – 220 mg/L (วันที่ 100 – 273) พบว่าที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ เป็น 3:1 มีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายสูงสุด ในขณะที่เดียวกันความเป็นด่างที่ออกจากระบบที่ไม่มีแสงมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 551 – 741 mg/L และที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ เป็น 3:1 มีความค่าความเป็นด่างสูงสุด คิดเป็นอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างอยู่ในช่วง 0.28 – 0.3 แสดงว่าระบบมีสภาพด่างเพียงพอหรือมีกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอในระบบหลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบเฉลี่ยเป็น 1,354 mg/L และเพิ่มความเข้มเฉลี่ยของแสงเป็น 0.1 kW/m² ที่ความเข้มข้นของ

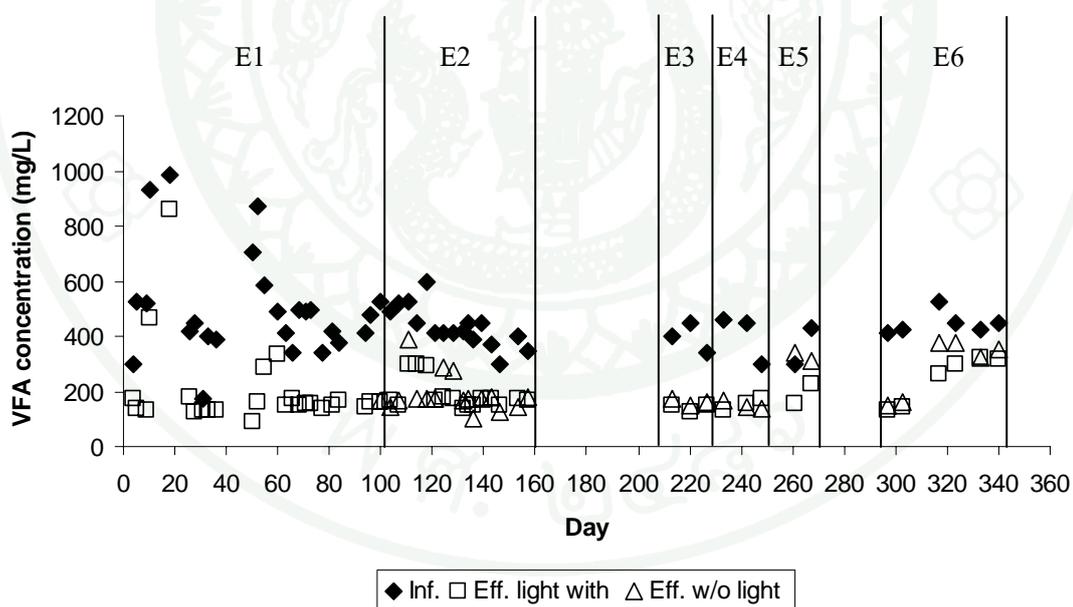
สารอินทรีย์เฉลี่ยเป็น 512 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ 0.4:1 พบว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเฉลี่ยเป็น 301 mg/L และมีค่าความเป็นด่างเฉลี่ยเป็น 732 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วน 0.41 แสดงว่าการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าไปในระบบทำให้ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากจุลินทรีย์ที่ต้องใช้กรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารอาหารมีประสิทธิภาพลดลง

ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่มีแสงอยู่ในช่วง 143 – 220 mg/L และที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ เป็น 3:1 มีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายสูงที่สุดในขณะเดียวกันทำการตรวจวัดค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 551 – 741 mg/L โดยที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ เป็น 3:1 มีค่าความเป็นด่างสูงที่สุด อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างจะอยู่ในช่วง 0.26 – 0.29 หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบเฉลี่ยเป็น 1,354 mg/L ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เฉลี่ยเป็น 512 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ 0.4:1 พบว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเฉลี่ยเป็น 264 mg/L และมีค่าความเป็นด่างเฉลี่ยเป็น 822 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วน 0.32

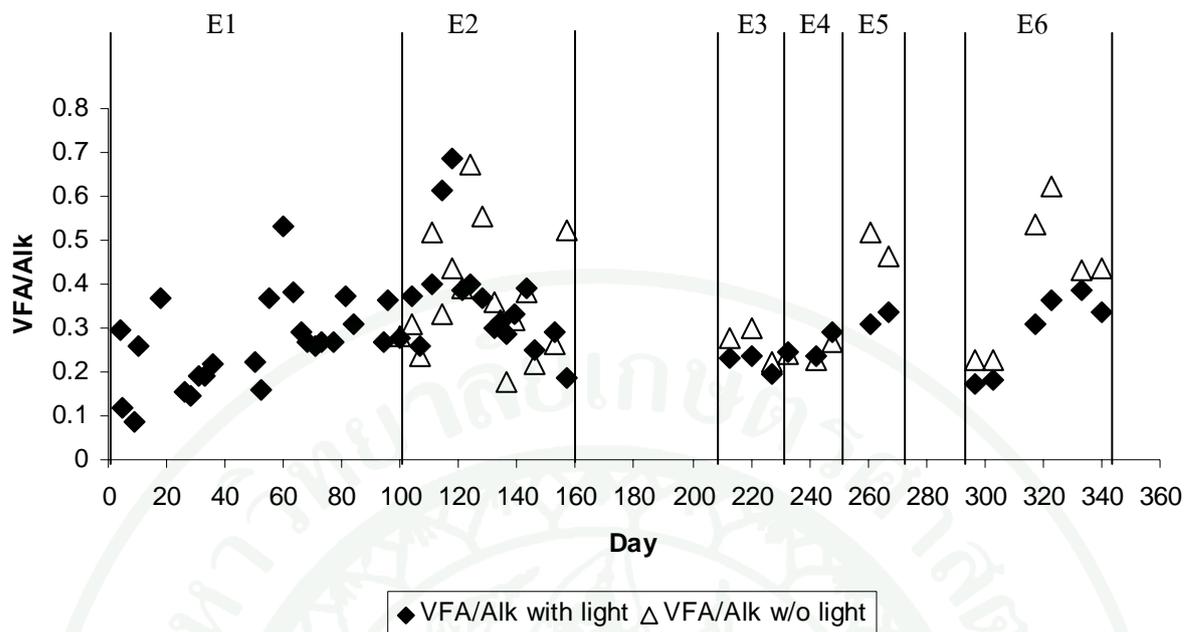
จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยที่เข้าระบบสูงถึง 1,354 mg/L เนื่องจากอาจส่งผลทำให้เกิดความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำที่อาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ต้องใช้กรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารอาหารในทั้งสองระบบ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) โดยความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/L จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (Suktrakoolvait, 2000) ในขณะเดียวกันว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติกอยู่ในช่วง 50 – 500 mg/L และยังพบว่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบทั้งสองระบบมีค่าไม่เกิน 0.8 แสดงว่าในระบบมีกำลังบำบัดเพียงพอ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545)



ภาพที่ 16 ความเป็นด่าง (Alkalinity) เข้า – ออกจากระบบ



ภาพที่ 17 กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) เข้า – ออกจากระบบ



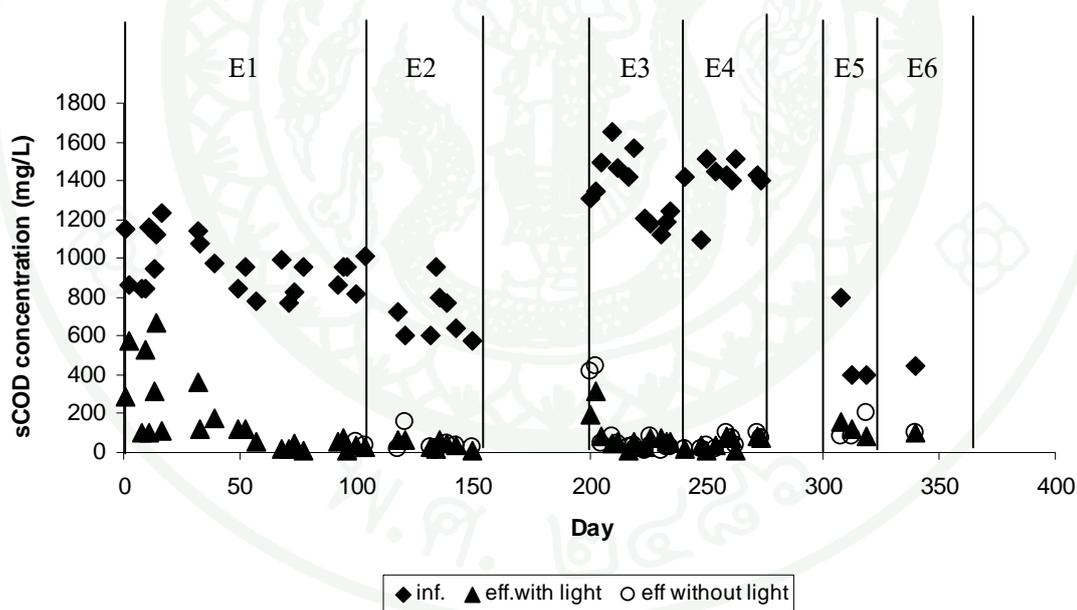
ภาพที่ 18 อัตราส่วนของ VFA/Alk

3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (sCOD) ของระบบ

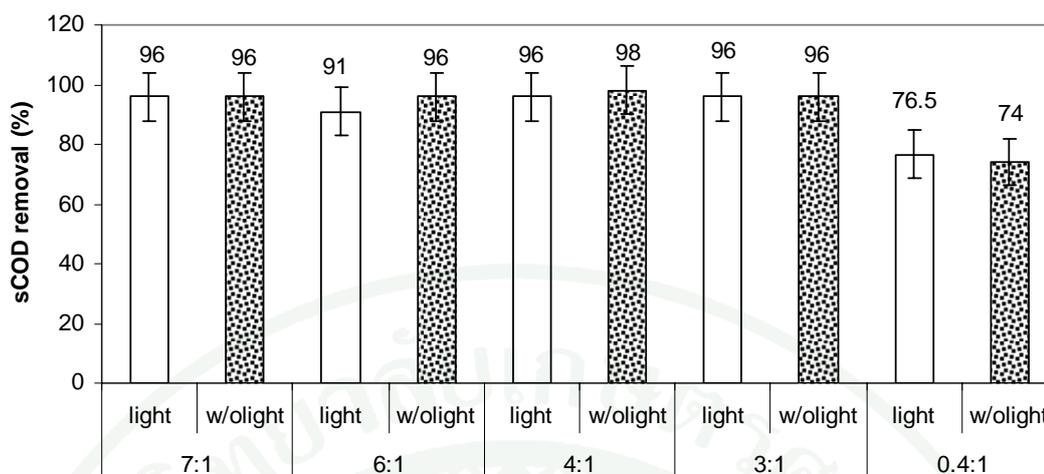
เริ่มต้นเดินระบบโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีความเข้มข้นของซีโอดีเฉลี่ยประมาณ 927 mg/L คิดเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวตัวกลาง $2.05 \text{ kgCOD/m}^2 \cdot \text{d}$ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเป็น 0.02 m/h ทั้งสองคอลัมน์ทำการเดินระบบทั้งหมดเป็นระยะเวลา 346 วัน โดยเริ่มทำการตรวจวัดซีโอดีในคอลัมน์ที่มีแสงตั้งแต่วันที่เริ่มต้นเดินระบบในขณะที่เริ่มทำการตรวจวัดซีโอดีในคอลัมน์ควบคุมหลังจากเดินระบบผ่านไปแล้วเป็นระยะเวลา 100 วัน

จากภาพที่ 19 จะเห็นได้ว่าในช่วง 30 วันแรกที่เริ่มเดินระบบค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากระบบในคอลัมน์ที่มีแสงมีค่าไม่คงที่โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง $106 - 672 \text{ mg/L}$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 63 ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในระบบยังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเพราะอาจอยู่ในช่วงกำลังปรับตัวเข้ากับสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสีย โดยหลังจากวันที่ 30 - 100 ระบบมีเสถียรภาพจะเห็นได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 92 แสดงว่าแบคทีเรียที่อยู่ในระบบสามารถปรับตัวเข้ากับน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบและเนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากกลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) ซึ่งง่ายแก่การย่อยสลายของแบคทีเรียหลังจากวันที่ 100 ได้ทำการแปรผันปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบจึงได้เริ่มทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ออกจากระบบในคอลัมน์ที่ไม่มีแสง

ควบคู่กันไปกับคอลัมน์ที่มีแสงพบว่าในว่าที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ ตั้งแต่ 7:1 ถึง 3:1 หรือคิดเป็นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (sCOD) ที่เข้าระบบทั้งสองระบบเฉลี่ย 1,296 mg/L แสดงดังภาพที่ 20 โดยมีความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยตั้งแต่ 151 – 431 mg/L ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m² พบว่าทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ไม่แตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบที่มีแสงมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 94.75 ในขณะที่ระบบที่ไม่มีแสงมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 96.5 หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าระบบเป็น 1,345 mg/L โดยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์เฉลี่ย 512 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนของ $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ 0.4:1 ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.1 kW/m² พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลงโดยมีค่าเฉลี่ยของคอลัมน์ที่มีแสงร้อยละ 76.50 และไม่มีแสงร้อยละ 74 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตมากเกินไปซัลเฟตบางส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นซัลไฟด์ที่ละลายน้ำถ้ามีความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/L จะเกิดความเป็นพิษต่อระบบไร้อากาศ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) และ *Choi et al.*, (1991) ยังพบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่ 1,200 mg/L จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้อากาศเช่นเดียวกัน



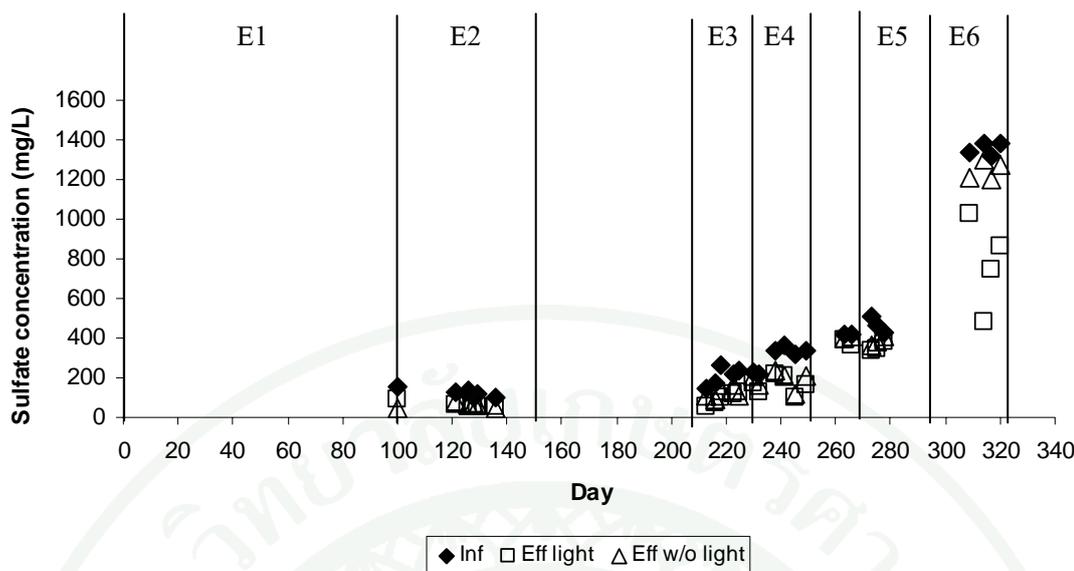
ภาพที่ 19 สารอินทรีย์ (sCOD) เข้า – ออกจากระบบ



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของทั้งสองระบบที่แปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต

3.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตของระบบ

ทำการป้อนซัลเฟตเข้าไปในระบบทั้งสองระบบเพื่อให้ซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียเจริญเติบโต โดยเริ่มทำการตรวจวัดค่าซัลเฟตหลังจากวันที่ 100 ซึ่งเริ่มแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต ทำการทดลองโดยการเพิ่มเฉพาะความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียที่เข้าระบบจาก 151 - 448 mg/L ในขณะที่ความเข้มข้นของซีโอดีคงที่ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,124 - 1,449 mg/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 7 : 1 ; 6 : 1 ; 4 : 1 และ 3 : 1 ตามลำดับที่ความเข้มแสง 0.003 kW/m² หลังจากนั้นจึงเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยที่เข้าระบบเป็น 1,354 mg/L ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 512 mg/L ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.1 kW/m² แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความเข้มข้นของซัลเฟตเข้า – ออกของระบบ

จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วน 7:1 ถึง 3:1 หรือที่ความเข้มข้นของซัลเฟตตั้งแต่ 151 – 431 mg/L ในระบบที่มีแสงโดยมีความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m^2 พบว่าที่อัตราส่วน 7:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 54% ที่อัตราส่วน 6:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 40% ที่อัตราส่วน 4:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 59% และที่อัตราส่วน 3:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 43% หลังจากนั้นเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบเฉลี่ย $1,354 \text{ mg/L}$ และความเข้มแสงเป็น 0.1 kW/m^2 พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเป็น 36% จะเห็นว่าที่อัตราส่วน $\text{sCOD}:\text{SO}_4^{2-}$ 4:1 (ความเข้มข้นของซัลเฟต 340 mg/L และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ $1,235 \text{ mg/L}$ ที่อยู่ในรูปของกรดอะซิติก 373 mg/L และในรูปของกลูโคส 862 mg/L (ภาคผนวก ค) สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตได้ดีที่สุด

ในขณะที่เดียวกันระบบที่ไม่มีแสงพบว่าที่อัตราส่วน 7:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต 57% ที่อัตราส่วน 6:1 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต 32% ที่อัตราส่วน 4:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 43% ที่อัตราส่วน 3:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 6% และที่อัตราส่วน 0.4:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพียง 8% จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตดีที่สุดเช่นเดียวกับระบบที่มีแสงแสดงดังภาพที่ 22

Polprasert and Haas (1995) ทำการศึกษาการกำจัดซัลเฟตในระบบไร้อากาศโดยใช้ชนิดของสารอินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ กลูโคสและอะซิติกโดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนในรูปซีไอของกลูโคสต่ออะซิติกเป็น 0, 0.41 และ 1.50 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของกลูโคสต่ออะซิติกเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจะเห็นว่าอัตราส่วนของสารอินทรีย์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบในรูปกลูโคสต่ออะซิติก (ตารางที่ 12) มีค่าลดลงจึงเป็นผลที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตลดลงทั้งสองระบบแสดงดังภาพที่ 22

พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่เข้า - ออกของทั้งสองระบบที่มีการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟตแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 อัตราส่วนสารอินทรีย์ในรูปซีไอของ (กลูโคส)ต่อสารอินทรีย์ในรูปซีไอของ (อะซิติก)

sCOD : SO ₄ ²⁻	Glu/Ac (as COD ratio)
7:1	1.4
6:1	2.5
4:1	2.3
3:1	2.2
0.4:1	0.08

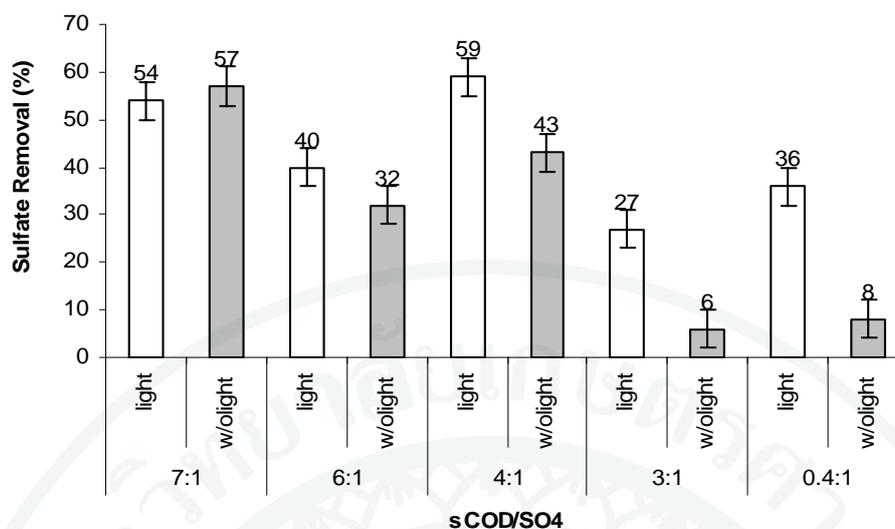
หมายเหตุ Glu : สารอินทรีย์ในรูปซีไอของกลูโคส

Ac : สารอินทรีย์ในรูปซีไอของอะซิติก

ตารางที่ 13 ลักษณะของน้ำเข้า – ออกเฉลี่ยของระบบที่แปรผันอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟต

พารามิเตอร์ (มก./ลิตร)	sCOD:SO ₄ ²⁻														
	7:1 (วันที่ 100 – 150)			6:1 (วันที่ 213-233)			4:1 (วันที่ 234-253)			3:1 (วันที่ 254-273)			0.4:1 (วันที่ 293-346)		
	Inf.	Eff (light)	Eff w/o light	Inf.	Eff (light)	Eff w/o light	Inf.	Eff (light)	Eff w/o light	Inf.	Eff (light)	Eff w/o light	Inf.	Eff (light)	Eff w/o light
pH*	6.88	7.6	7.5	6.86	7.59	7.69	6.88	7.52	7.65	6.89	7.6	7.88	6.90	7.83	7.86
Alkalinity	340	551	462	351	642	621	323	583	598	345	741	675	398	822	732
VFA	439	186	192	386	143	158	350	162	220	398	174	213	441	264	301
SO ₄ ²⁻	151	69	64	233	139	158	340	139	193	431	314	403	1,354	866.78	1,245
sCOD	1,124	40	44	1,449	125	52	1,235	56	31	1,377	49	49	512	116.40	116.40

หมายเหตุ * ไม่มีหน่วย

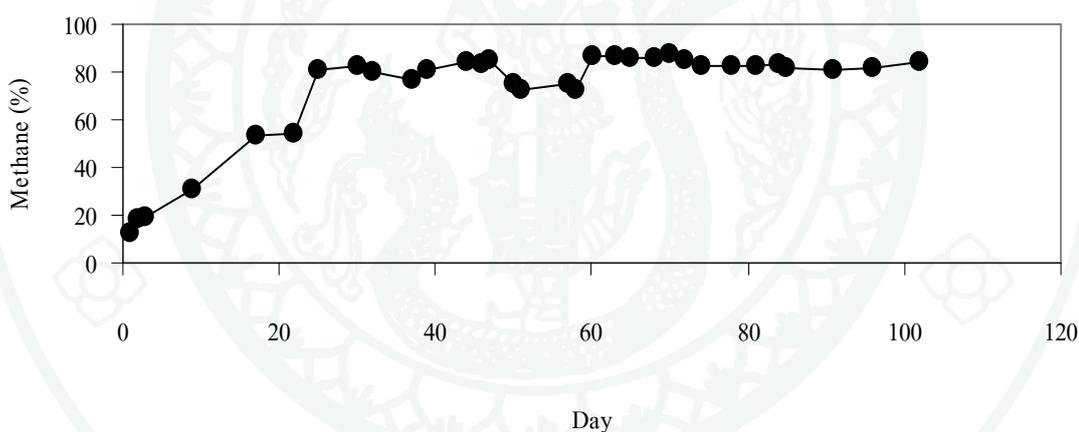


ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตของทั้งสองระบบ

นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่ให้แสงหรือการมีแบคทีเรียสีเขียวให้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตดีกว่าระบบที่ไม่มีแสงเมื่ออัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตอยู่ในช่วง 3:1 ถึง 6:1 และยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าระบบทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซัลเฟตรีดิคัลซึ่งแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตลดลงเนื่องจากเกิดภาวะแข่งขันการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในระบบไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต โดยอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตที่ดีที่สุดทั้งในระบบที่มีแสงและไม่มีแสงเป็น 4:1 และ 7:1 ตามลำดับโดยระบบที่มีแสงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตคิดเป็นร้อยละ 59 ระบบที่ไม่มีแสงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตคิดเป็นร้อยละ 57 แสดงดังภาพที่ 25 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ (Suktrakoolvait, 2001) พบว่าอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยระบบ UASB เป็น 3.5:1 หรือที่ความเข้มข้นของซีโอดีและซัลเฟตเป็น 520 และ 150 mg/L ตามลำดับหลังจากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเฉลี่ยที่เข้าระบบเป็น 1,354 mg/L และทำการเพิ่มความเข้มแสงจาก 0.003 เป็น 0.1 kW/m² พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 36 ในระบบที่มีแสงและร้อยละ 6 เป็นร้อยละ 8 ในระบบที่ไม่มีแสง ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มของแสงอาจเป็นปัจจัยที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย

3.5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

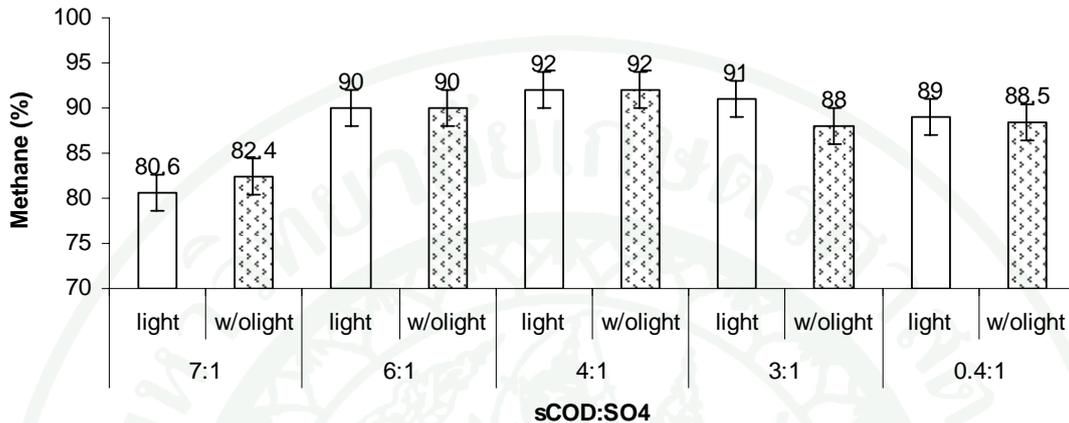
ใน 30 วันแรกของการเดินระบบพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 44 โดยปริมาตรของก๊าซมีเทนในระบบแสดงดังภาพที่ 24 โดยในช่วง 30 วันแรกเป็นช่วงที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนกำลังปรับตัวเข้ากับสารอาหารในน้ำเสียจึงเป็นสาเหตุทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนยังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพมากนัก หลังจากวันที่ 30 แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับตัวเข้ากับสารอาหารได้จึงส่งผลทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบหลังจากวันที่ 30 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 82 ดังภาพที่ 23 โดยปริมาตรของก๊าซชีวภาพทั้งหมดอีกเหตุผลหนึ่งก็คือในการทดลองครั้งนี้ น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมโดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนเป็นผลทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยส่วนใหญ่ให้อยู่ในรูปกรดอินทรีย์ระเหยง่ายโดยมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนจึงสามารถนำไปใช้ได้ทันที



ภาพที่ 23 ปริมาตรของก๊าซมีเทน

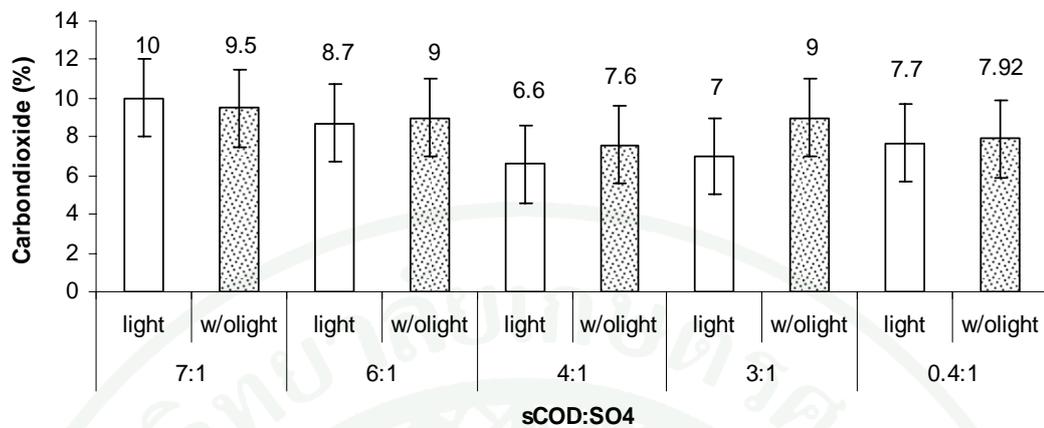
หลังจากวันที่ 100 ไม่ได้ทำการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเป็นเวลาทั้งหมด 50 วันจากนั้นจึงเริ่มทำการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในเมื่อเริ่มทำการแปรผันเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าระบบจาก 151 mg/L ถึง 1,354 mg/ โดยทั่วไปแล้วในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบไม่เกิน 65 % (Kluyser *et al.*, 1956) ในขณะที่ความเข้มข้นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของทั้งสองระบบเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 80 – 92 % (ภาพที่ 24) อาจเป็นเพราะว่าน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์เป็นผลทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ง่ายโดยที่อัตราส่วนความ

เข้มข้นซีโอดีต่อซัลเฟต 4:1 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุด (92%) ของทั้งสองระบบแสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวสามารถดำรงชีวิตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนโดยไม่ส่งผลกับการเกิดก๊าซมีเทนในระบบแต่อย่างใด



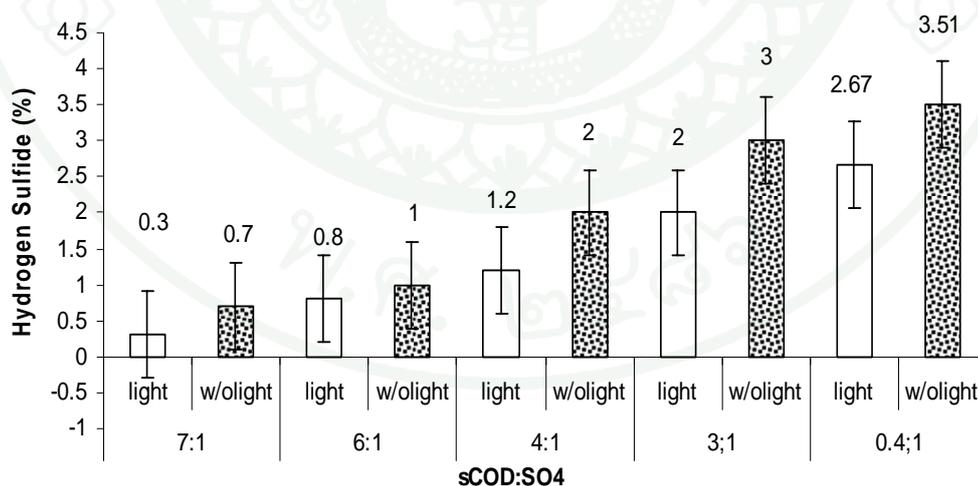
ภาพที่ 24 ปริมาณของก๊าซมีเทนของทั้งสองระบบเมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นซัลเฟต

ทั้งนี้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวสามารถใช้ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นโดยมีแสงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าร่วมทำปฏิกิริยา Syed *et al.*, (2006) ซึ่งตรวจพบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีแสงน้อยกว่าในระบบที่ไม่มีแสง (ภาพที่ 25) ที่อัตราส่วนของ COD/SO₄²⁻ ตั้งแต่ 6:1 ถึง 0.4:1 (ช่วง 1,000 – 20,000 ppmv) โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นควรมีก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 55 – 65 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 35 – 45 % และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0 – 1 % (Polprasert, 1996)



ภาพที่ 25 ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต

ในขณะเดียวกันทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าสู่ระบบจาก 151 – 1,354 mg/L ทำให้สัดส่วนความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าสูงขึ้นทั้งสองระบบจาก 0.3 – 0.7 % เป็น 2.0 – 3.5 % ตามลำดับ โดยพบว่าระบบที่มีแสงมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่าในระบบที่ไม่มีแสงทุกตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ (ช่วง 1,000 – 10,000 ppmv) (ภาพที่ 26)

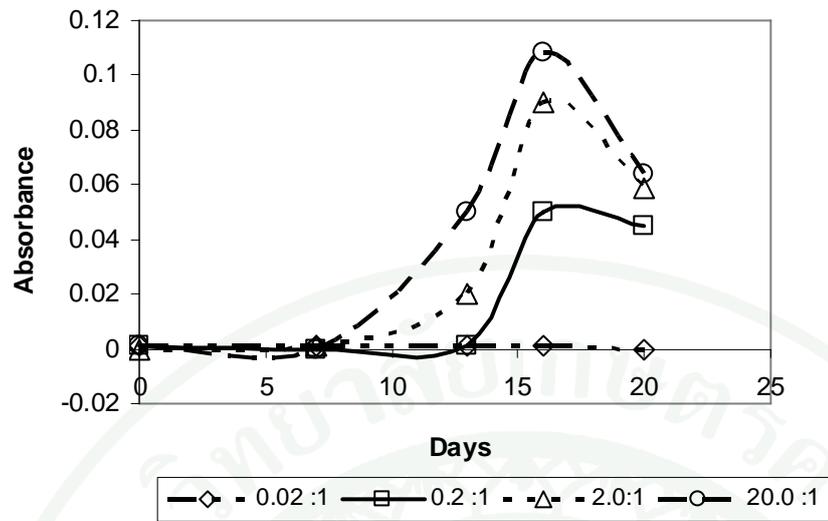


ภาพที่ 26 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อทำการแปรผันความเข้มข้นของซัลเฟต

จากการคำนวณหาปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยสมการของ Henry's law (ภาคผนวก ค) พบว่าปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำในระบบที่ไม่มีแสงมีค่า 6 – 110 mg/L และที่ระบบที่มีแสงมีค่า 6–84 mg/L โดยปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำมีค่ามากกว่า 40 mg/L จะไปยับยั้งการทำงานของซัลเฟตรีดิวซิ่งแบคทีเรีย (Reis, 2005) อย่างไรก็ตามพบว่าระบบที่มีแสงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตสูงกว่าในระบบที่ไม่มีแสง (ภาพที่ 22) เนื่องจากปริมาณของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกใช้โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงทำให้เกิดความเป็นพิษต่อซัลเฟตรีดิวซิ่งแบคทีเรียน้อยกว่าในระบบที่ไม่มีแสง

3. การทดลองแบบกะ (Batch Experiment) ในการหา C/N ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสีเขียว

จากการทดลองหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวพบโดยทำการทดลองที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.003 kW/m² ผลการทดลองพบว่าในวันที่ 0 ถึงวันที่ 7 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวใช้เวลาในการปรับสภาพให้เข้ากับสารอาหารและมีการเจริญเติบโตสูงสุดในวันที่ 16 ในทุกอัตราส่วนของ C/N 0.2 - 20 และพบว่าที่อัตราส่วน C/N (20:1) มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 660 nm ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสารอินทรีย์ที่สูง (C/N 20:1) เป็นช่วงที่จุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรปสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งคาดว่าจะส่งเสริมให้ระบบมี CO₂ มากกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งช่วยกระตุ้นให้แบคทีเรียสีเขียวสามารถเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงของ C/N (0.02:1) ไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวเลยอาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของไนโตรเจน 28 g/L ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (McCarty, 1964) โดยในการวัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสีเขียวนั้นสามารถทำได้โดยการสกัดเม็ดสีจากตะกอนจุลินทรีย์ (ภาคผนวก จ) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 nm แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การดูดกลืนแสงของแบคทีเรียลิวทิวที่แปรผันค่า C/N

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

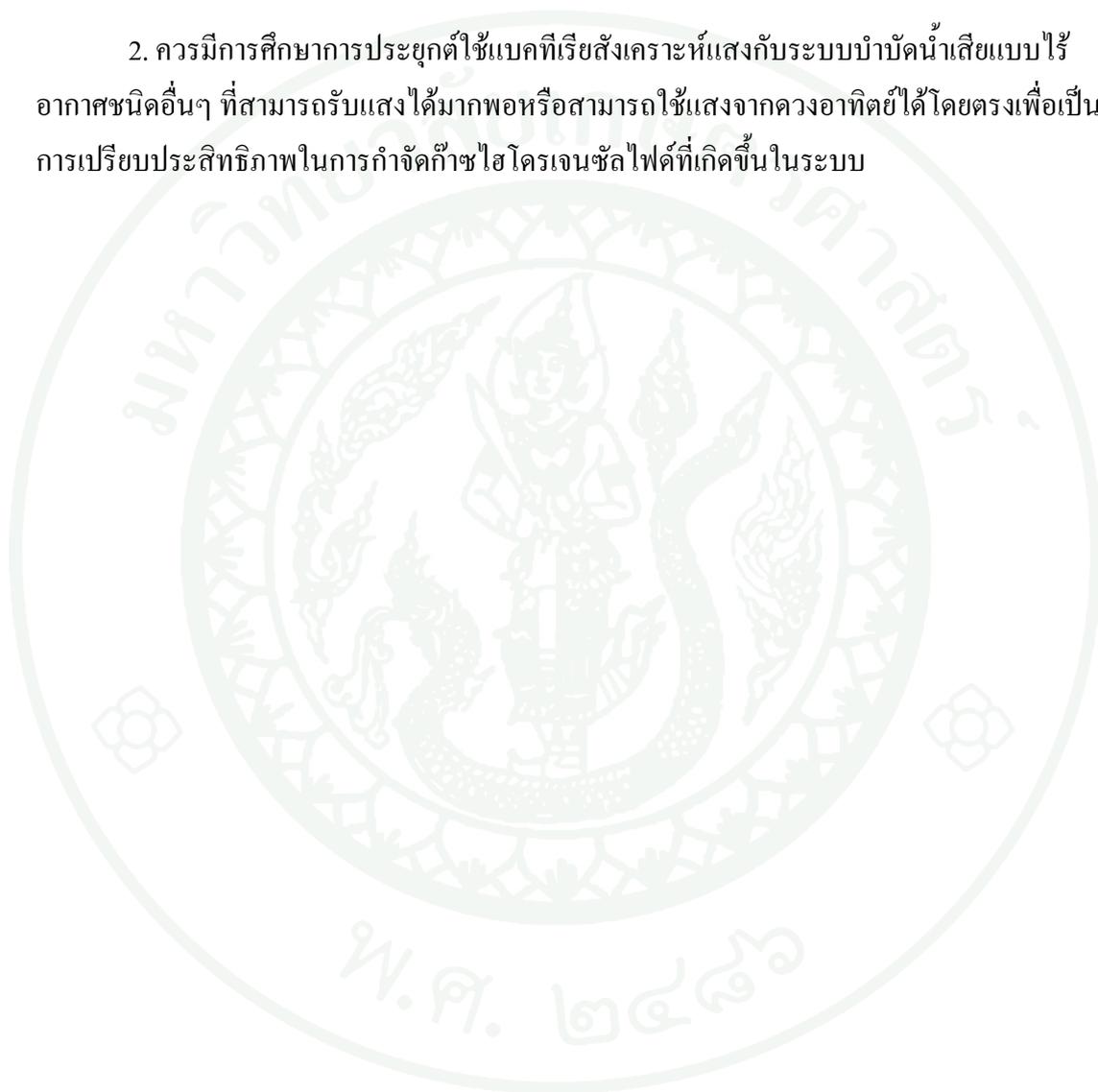
การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดแบคทีเรียสีเขียวในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางกรองลอยใรร้ออากาศ สรุปผลการทดลองดังนี้

1. แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถอาศัยอยู่ได้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกลางกรองลอยใรร้ออากาศโดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแต่อย่างใดและยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นปกติในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใรร้ออากาศ
2. อัตราส่วนความเข้มข้นซีโอดีต่อซัลเฟตที่เหมาะสมคือ 4:1 โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 ทั้งในระบบที่มีแสงและไม่มีแสง ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตร้อยละ 59 และ 43 ในระบบที่มีแสงและไม่มีแสงและที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 7:1 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 96% ของทั้งสองระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต 54% และ 57% ในระบบที่มีแสงและไม่มีแสงตามลำดับ
3. การเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเสียมากขึ้นจะทำให้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีแสงและไม่มีแสงมีค่าเฉลี่ยเป็น 0.3 – 0.7 % และ 2.67 – 3.51% ตามลำดับ
4. แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในระบบบำบัดน้ำเสียตัวกลางกรองลอยใรร้ออากาศสามารถช่วยลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำบริสุทธิ์ก๊าซในกรณีที่ต้องการนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยเปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความเข้มข้นของซัลเฟตในปริมาณที่สูง

2. ควรมีการศึกษาการประยุกต์ใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศชนิดอื่นๆ ที่สามารถรับแสงได้มากพอหรือสามารถใช้แสงจากดวงอาทิตย์ได้โดยตรงเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จารุวรรณ หวะสุวรรณ . 2532. การกำจัดและการใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งโรงงานแปรงมันสำปะหลัง โดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงร่วมกับ heterotrophic bacteria. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์, 2529. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 96 หน้า
- พวงพร โชติโกไร, 2533. สรีรวิทยาของแบคทีเรีย. มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 616 หน้า
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์. 2549. เทคโนโลยีน้ำเสีย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ .
- เสาวลักษณ์ ภูมิวิสนะ, 2535. แนวคิดในการวางแผนการวิจัยด้านพลังงานทดแทน: ก๊าซชีวภาพ ,สำนักงานสภาวิจัยแห่งชาติ 383 หน้า
- อนุตร เปียงแก้ว., 2542. การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542.
- APHA, AWWA, WEF. 2005. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.** 21st ed. American Public Health Association., Washington, DC., USA.
- Chitapornpan S. 2003. **Application of Up flow Anaerobic Floating Media Reactor to Piggery Wastewater Treatment and Biogas Recovery.** M.S Thesis, Kasetsart University.

- Choi, E., and Rim, J.M. 1991. Competition and Inhibition of Sulfate Reducers and Methane Producers in Anaerobic Treatment. **Wat. Sci. Tech.** 23: 1259 – 1264
- Engel, J. 1997. Methane Generation from Human, Animal and Agricultural Wastes, Washington D.C., National Academy of Science, p. 131.
- Fenchel T. and Finlay J.B. 1995. **Ecology and Evolution in Anoxic Worlds**. New York: Oxford University Press.
- Gadre, R.V. 1988. Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas by Chemoautotrophic Fixed – Film Bioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**. 34(3): 410 – 414.
- Guoqiang, Z., Jie, P., Yi, Y. and Shimin, Z. 1994. Bacteria Desulfurization of the H₂S Containing Biogas. **Biotechnology Letter**. 16(10): 1087 – 1090.
- Henshaw, P.F., and Zhu, W. 2001. Biological Conversion of Hydrogen Sulfide to Elemental Sulphur in A fixed – film Continuous Flow Photo-Reactor. **Wat. Res.** 35(15): 3605- 3610.
- Henshaw P., Medlar D., Mcewen J. 1998. Selection of a Support Medium for a Fixed – Film Greensulphur Bacteria Reactor. **Wat. Res.** 33(14): 3107 – 3110.
- Imhoff, J. F. 1992. Taxonomy, phylogeny, and general ecology of anoxygenic phototrophic bacteria, pp. 53 – 92. *In* N. H. Mann, and N. G. Carr (ed.). **Photosynthetic Prokaryotes**. Vol.6. Plnum Press, Now York and. London.
- Isa, Z., Grusenmeyer, S., and Verstrate, W. 1986. Sulfate Reduction Relative to Methane Production in High – Rate Anaerobic Digestion. **Applied and Environmental Microbiology**. 51: 572 – 579.

Joseph, G.T. and Beachler, D.S. 1981. Control of Gaseous Emission: **Student Manual**,
New York.

Kobayashi. M. 2000. **Waste Remediation and Treatment Using Anoxygenic Phototropic Bacteria**. Anoxygenic Photosynthetic Bacteria. pp. 1269 – 1282.

Kim Y. J. and Kim B. W. 1996. Desulfurization in a Plate – Type Gas – Lift Photobioreactor using Light Emitting Diodes. **Korean J. Chem. Eng.** 13(6): 606 – 611

Kluyver, A.J, and C. B. van Niel. 1956. **The Microbe's Contribution to Biology**. Cambridge, MA : Harvard University Press

Lens, P.N.L., Visser, A., Janssen, A.J.H., Hulshoff Pol, L.W., and Lettinga, G., 1998. Biotechnological Treatment of Sulfate Rich Wastewaters. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.** 28: 89 – 117.

Madigan, M.T., Martinko, J.M., Paker, J. 2003. **Brock Biology of Microorganisms**. USA: Prentice Hall.

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

McCarty, P.L. 1964 . **Anaerobic Waste Treatment Fundamentals**. Public Works.

Mizuno O., Y.Y.Li. and T. Noike. 1998. The behavior of sulfate – reducing bacteria in Acidogenic phase of anaerobic. **Wat. Res.** 32(5): 1626 – 1634.

Obiss, E.D., Banzon, J., Taganas., C., Alumbro, R.D, and Judan, A.A. 1978. **Biogas and Waste Recycling: The Philippine Experience, Metro manila**. p. 230

- Parkin, G.F., Sneve, M.A., and Loos, H. 1991. Anaerobic Filter Treatment of Sulfate Containing Wastewater. **Water Sci. Technol.** 23: 1283.
- Phan, T. 2007. **Biological Sulfate Reduction in a Pilot – Scale UASB reactor under Thermopiles.** M.S Thesis, Asian Institute of Technology
- Polprasert, C. 1996. **Organic Waste Recycling.** 2 nd ed. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Polprasert, C. and Hass, C.N. 1995. Effect of Sulfate on Anaerobic Processes Fed with Dual Substrates. **Wat. Sci. Tech.** 31: 101-107.
- Pradhan, S. 2006. **Sulfide Production in Sulfate Reduction Processes Operation as Upflow Anaerobic Packed Biofilm Reactor.** M.S Thesis, Asian Institute of Technology.
- Rattanapan C, P. Boonsawang and D.Kantachote. 2009. Removal of H₂S in down – flow GAC Bio Filtration using Sulfide Oxidizing Bacteria from Concentrated Latex Wastewater. **Journal of Bioresearch Technology** .100 : 125 – 130.
- Rittmann, B.E, and McCarty, P.L. 2001. **Environmental Biotechnology: Principles and Applications,** McGraw-Hill International Editions.
- Saifullah Lar, J. and Xiujin, L. 2009, Removal of H₂S during Anaerobic Bioconversion of Dairy Manure. **Journal of Chemical Engineering.** 17(2): 273 – 277.
- Salata, P. 2005. **Sulfide Production in Sulfate Reduction Process Operated as Up Flow Anaerobic Packed Bed Biofilm Reactor.** M.S Thesis, Asian Institute of Technology.
- Simkhada, S. 1997. **Biological Sulfate Removal by Up Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB).** M.S Thesis, Asian Institute of Technology

Suktrakoolvait ,S. 2000. **Biological Sulfate Removal using Molasses as an Electron Donor and Carbon Source**. Dissertation Asian Institute of Technology.

Syed M.A. and G. Soreanu. 2006 , Removal of Hydrogen Sulfide form gas streams using biological processes A review. **Journal of Wastewater Technology Centre**. 48: 2.1 – 2.14.

Syed, M.A. and P.F. Henshaw. 2005. Light Emitting Diodes and an Infrared Bulb as Light Sources of a Fixed – Film Tubular Photo Bioreactor for Conversion of Hydrogen Sulfide to Element Sulfur . **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. 80: 119 – 123.

Van Niel, C.B. 1931. On the morphology and physiology of the purple and green sulfur Bacteria. **Archiv fur Mikrobiologie**. 3: 1-112.

Visser, A. 1994. **Anaerobic Treatment of Sulfate Containing Wastewaters, International Training Course on Anaerobic and Low Cost Treatment of Wastewater and Wastes**, 10 to 21 October, 1994, Asian Institute of Technology, Thailand

Reis, M.A.M, Hydrogen sulfide on Growth of Sulfate Reducing Bacteria. **Biotech Bio engineering**. 27: 1710 – 1716.

Widdel ,F.,1988. **Microbiology and Ecology of Sulfate and Sulfur Reducing Bacteria**. In **Widdel ,F. (ed.)**, Biology of Anaerobic Microorganisms : 469-585.

Yoda M., Kitagawa M., Miraji Y. 2003. Long Term Competition Between Sulfate – Reducing And Methane – Producing Bacteria for Acetate in Anaerobic biofilm. **Wat. Res 21(12)**: 1547 – 1556.





ภาคผนวก ก

พารามิเตอร์ของน้ำเสียเข้า - ออกระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบ

ตารางผนวกที่ ก1 พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่เข้า – ออก

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)	
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light	
1	7.24	7.40	-	1,152	288	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	7.20	7.46	-	864	576	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	7.29	7.15	-	576	144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	1,620	595	-	300	175	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	1,560	1,125	-	525	135	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	422	317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	845	106	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	7.29	7.19	-	844	526	-	1,460	1,500	-	517.50	130	-	-	-	-	
10	7.10	7.87	-	-	-	-	1,610	1,790	-	930	465	-	-	-	-	
11	7.22	8.31	-	1,161	106	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	7.14	8.1	-	950	317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	7.03	8.40	-	672	672	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	-	-	-	112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
17	7.20	8.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	1,140	2,350	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	7.20	8.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	7.32	8.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	6.94	8.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	7.27	8.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	7.08	7.64	-	-	-	-	500	1,170	-	420	180	-	-	-	-
27	7.23	7.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	6.97	7.60	-	-	-	-	600	860	-	450	125	-	-	-	-
29	7.22	7.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	7.20	7.62	-	-	-	-	310	675	-	175	130	-	-	-	-
32	7.11	7.7	-	1,140	360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
33	7.15	7.86	-	1,080	120	-	435	675	-	397.50	130	-	-	-	-
34	7.13	7.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	7.04	8.06	-	-	-	-	435	600	-	390	130	-	-	-	-
37	7.02	8.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	7.18	7.90	-	970	180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	6.80	7.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	6.82	7.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	6.70	7.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	7.32	7.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	7.34	7.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)	
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light	
48	7.24	7.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
49	7.05	7.03	-	840	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
50	7.32	7.40	-	-	-	-	685	400	-	705	90	-	-	-	-	
51	7.30	7.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
52	7.27	7.79	-	960	120	-	685	1,000	-	870	160	-	-	-	-	
53	7.20	7.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
54	7.24	7.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
55	7.12	7.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
56	7.12	7.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
57	7.02	7.81	-	780	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
58	7.12	7.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
60	6.80	7.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
62	7.01	7.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
63	6.84	7.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)	
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light	
63	6.84	7.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
64	6.80	7.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
65	6.82	7.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
66	6.80	7.71	-	-	-	-	425	600	-	337.50	175	-	-	-	-	
67	6.93	7.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
68	6.76	7.80	-	994	22	-	450	560	-	495	150	-	-	-	-	
69	6.80	7.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
70	6.80	7.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
71	6.82	7.80	-	773	22	-	42	600	-	490	155	-	-	-	-	
72	6.60	7.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
73	6.67	7.76	-	828	44	-	410	575	-	495	155	-	-	-	-	
74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
75	6.70	7.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
76	6.74	7.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
77	6.60	7.84	-	960	14	-	425	525	-	338	140	-	-	-	-	
78	6.62	7.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)		VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	6.64	7.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	6.61	7.60	-	-	-	-	425	400	-	420	150	-
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	6.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	6.60	-	-	-	-	-	385	350	-	375	165	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	6.69	7.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	6.68	7.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	6.60	7.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	6.75	7.51	-	864	56	-	-	-	-	-	-	-
93	6.60	7.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	6.62	7.61	-	960	72	-	565	545	-	412.5	145	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)				Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)				VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
95	6.70	7.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
96	6.69	7.22	-	960	8	-	400	450	-	480	164	-	-	-	-
97	6.71	7.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	6.77	7.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	6.73	7.32	7.39	816	40	56	425	600	425	525	160	170	156	89	45
101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
102	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
103	6.80	7.38	7.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	6.82	7.50	7.47	1,008	24	40	300	470	300	487.50	170	145	-	-	-
105	6.75	7.50	7.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	7.19	7.48	7.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
107	6.88	7.63	7.59	-	-	-	375	720	375	517.50	150	170	-	-	-
108	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
109	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	6.90	7.58	7.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
111	6.85	7.45	7.59	-	-	-	275	750	275	525	300	390	-	-	-
112	6.70	7.45	7.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
113	6.65	7.65	7.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
114	6.70	7.50	7.51	-	-	-	450	525	450	450	300	175	-	-	-
115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
117	6.60	7.31	7.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
118	6.60	7.90	7.46	720	64	16	415	400	412	600	292.50	175	-	-	-
119	6.69	7.56	7.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	6.60	7.42	7.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121	6.69	7.61	7.47	600	64	160	370	450	370	412.50	165	175	127	64	83
122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
123	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
124	6.66	7.57	7.36	-	-	-	380	425	380	412.50	180	285	-	-	-
125	6.70	7.49	7.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
126	6.69	7.30	7.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	133	58	68

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
127	6.60	7.39	7.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
128	6.83	7.39	7.35	-	-	-	320	500	325	412.50	175	277.50	101	67	70
129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	117	56.60	65.83
130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	6.80	7.45	7.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
132	6.88	7.52	7.47	-	-	-	360	470	475	420	140	170	-	-	-
133	6.67	7.50	7.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
134	6.60	7.52	7.27	-	-	-	320	475	550	450	150	175	-	-	-
135	6.60	7.46	7.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
136	6.69	7.56	7.57	-	-	-	335	525	575	390	140	150	103	56.66	45.17
137	6.64	7.45	7.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
138	6.60	7.46	7.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
139	6.69	7.54	7.44	-	-	-	350	525	550	450	175	175	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
141	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
142	6.60	7.47	7.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
143	6.70	7.31	7.42	-	-	-	285	450	470	367.50	175	180	-	-	-
144	6.62	7.57	7.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
145	6.80	7.59	7.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
146	6.72	7.76	7.70	-	-	-	275	600	575	300	150	125	115	-	-
147	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
149	6.60	7.50	7.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	6.80	7.54	7.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
151	6.80	7.35	7.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
152	6.72	7.40	7.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
153	6.80	7.57	7.66	-	-	-	260	600	550	397.50-	175	145	-	-	-
154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
156	6.80	8.52	8.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
157	-	-	-	-	-	-	280	875	800	345	165	180	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
213	6.80	7.68	7.65	1,312	192	416	370	650	635	397.50	150	175	142	53.54	112.08
214	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
216	-	-	-	1,344	320	448	-	-	-	-	-	-	171.60	70	94.16
217	6.90	7.40	7.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
218	-	-	-	1,498	87.36	43.68	-	-	-	-	-	-	256.83	104.16	134.88
219	6.89	7.31	7.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
220	6.90	7.36	7.41	-	-	-	340	525	500	450	125	150	-	-	-
221	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
223	6.89	7.58	7.72	1,653	49.92	87.36	-	-	-	-	-	-	215.42	122.50	164.16
224	6.90	7.94	7.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	6.86	7.62	7.67	1,466	56.16	49.92	-	-	-	-	-	-	238.33	131.66	111.25
226	6.79	7.59	7.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
227	6.88	7.66	7.11	-	-	-	360	775	725	725	725	160	-	-	-
228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)		VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light	
229	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	6.89	7.51	7.81	1,421	6.04	30.24	-	-	-	-	-	-	-
231	6.80	7.92	7.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
232	6.90	7.61	7.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
233	6.88	7.41	7.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
234	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
236	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
237	6.89	7.68	7.76	1,209.6	30.24	6.04	-	-	-	-	-	-	-
238	6.90	7.84	7.74	-	-	-	-	-	-	-	336.6	217.92	233.33
239	6.81	7.70	7.68	1,179.4	72.57	84.67	-	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368	207	209
241	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
242	6.90	7.55	7.62	-	-	-	340	650	620	450	155	142	-
243	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)					
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out				
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light			
244	6.90	7.64	7.81	1,124.8	72.96	6.08	-	-	-	-	-	-	-		
245	6.91	7.30	7.47	-	-	-	-	-	-	317.5	103.75	120.25	-		
246	6.83	7.37	7.54	1,185.6	54.72	24.32	-	-	-	-	-	-	-		
247	6.92	7.32	7.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
248	-	7.20	7.35	1,246.4	54.72	30.40	430	600	525	300	175	140	-		
249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	338.75	167.50	208.33
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
252	6.89	7.62	7.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
252	6.90	7.41	7.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
253	6.86	7.44	7.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
254	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
256	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
258	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
259	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
261	-	-	-	1,095	41.44	17.70	200	500	650	300	155	337.50	-	-	-
262	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
263	6.90	7.75	7.59	1,509.6	5.92	41.45	-	-	-	-	-	-	416.25	387.80	404.16
264	6.89	7.80	7.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	6.89	7.58	7.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	419.58	365	412.50
266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
267	6.90	7.47	7.43	1,450	41.44	17.76	340	675	660	427.5-	227.50	307.50	-	-	-
268	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
269	6.90	7.30	7.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
271	6.89	7.61	7.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
272	6.98	7.54	7.44	-	-	-	100.8	-	-	-	-	-	-	-	-
273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	508.75	335.84	360.83

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH			sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
274	6.90	7.39	7.35	-	1,400	72.80	78.40	275	750	665	375	155	-	-	-
275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	463.33	347.75	384.10
276	6.90	7.41	7.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
277	6.89	7.56	7.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
278	6.90	7.84	7.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	429.58	385	410
279	6.86	8.02	7.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
281	6.85	7.60	7.60	-	-	-	420	800	700	390	160	175	-	-	-
282	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
283	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
284	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
285	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
286	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
287	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
288	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)		VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)					
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out			
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		
289	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
291	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
293	6.98	7.69	7.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
294	6.86	7.72	7.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
296	6.90	7.73	7.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
297	-	-	-	-	-	300	750	750	412.5	130	150	-	-	-
298	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
299	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
301	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
302	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
303	6.92	7.72	7.79	-	-	330	720	725	425	145	160	-	-	-
304	6.86	7.62	7.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)			Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
305	6.90	7.90	7.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
306	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
307	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
308	-	-	-	800	160	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
309	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,337.5	1,027	1,205	-
310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
311	6.97	7.53	7.89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
313	6.88	7.86	7.89	400	120	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
314	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,383.3	483.33	1302.33	-
315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
317	6.90	7.81	-	-	-	-	300	850	700	525	262.5	375	-	-	-
318	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,316	750	1,200	-
319	-	-	-	400	80	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)			VFA (mg/L as CH ₃ COOH)			SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out			
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		
320	6.90	8.16	7.75	-	-	-	-	-	-	-	1,379	860	1,273	
321	6.90	8.02	7.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
322	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
323	6.89	7.73	8.12	-	-	-	425	825	600	450	300	375	-	-
324	6.90	8.23	8.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
326	6.90	8.22	8.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
327	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
329	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
331	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
333	-	-	-	-	-	-	425	825	750	425	320	325	-	-
334	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

วันที่	pH		sCOD (mg/L)		Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)		VFA (mg/L as CH ₃ COOH)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
	In	Out		In	Out		In	Out		In	Out	
		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light		light	w/o light
335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
336	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
337	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
338	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
339	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
340	6.96	7.83	7.82	448	105.6	105.6	475	935	800	450	315	350
341	6.86	7.63	7.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	6.89	7.46	7.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
343	6.90	8.11	7.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-
344	6.98	7.75	7.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
345	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ภาคผนวก ข
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ตารางผนวกที่ ข1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในระบบ

วันที่	ร้อยละ			
	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	อื่นๆ
1	17.3519	12.62420	-	70.02390
2	17.253	18.22600	-	64.52100
3	16.418	19.22880	-	64.35320
9	11.1928	30.86070	-	57.94650
17	3.1608	53.16450	-	43.67470
22	3.5847	53.79790	-	42.61740
25	7.7371	80.50020	-	11.76270
30	9.9836	82.52750	-	7.48890
32	13.0901	80.23560	-	6.67430
37	10.8129	76.25800	-	12.92910
39	10.497	80.88750	-	8.61550
44	10.8089	83.81350	-	5.37760
46	9.328	83.52420	-	7.14780
47	9.0855	85.04850	-	5.86600
50	18.0141	75.27650	-	6.70940
51	18.5596	72.79570	-	8.64470
57	20.6661	75.30760	-	4.02630
58	13.6988	72.84470	-	13.45650
60	7.3203	86.66590	-	6.01380
63	8.084	86.77590	-	5.14010
65	8.5343	86.21380	-	5.25190
68	7.6057	85.43690	-	6.95740
70	7.0293	87.54650	-	5.42420
72	9.0581	85.34010	-	5.60180
74	8.6231	82.81230	-	8.56460

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

วันที่	ร้อยละ			
	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	อื่นๆ
78	8.1913	82.31910	-	-
81	9.3146	82.44980	-	-
84	10.1309	83.36680	-	-
85	12.8135	81.69100	-	-
91	12.0373	81.22760	-	-
96	9.3231	82.04240	-	-
102	7.1714	83.97680	-	-
109	10.7202	83.42210	-	-
117	12.6955	82.72520	-	-
120	10.367	85.65770	-	-
127	6.9589	66.56580	-	-
134	12.3578	83.35030	-	-
141	11.1426	85.05900	-	-
148	8.8313	78.85370	-	-

ตารางผนวกที่ ข2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่มีการแปรผันความเข้มข้นซัลเฟต (ระบบที่มีแสง)

วันที่	ร้อยละ			
	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	อื่นๆ
213	10.01	89.33	0.66	-
219	8.43	91.57	-	-
233	7.5	91.64	0.86	-
240	5.92	93.24	0.84	-
247	6.9	91.99	1.1	0.01
252	6.93	91.84	1.22	0.01
259	5.00	94.00	1.00	-
266	8.00	90.00	2.00	-
273	7.46	90.39	1.72	0.43
294	8.13	90.14	1.72	0.01
301	6.17	92.29	1.52	0.02
308	6.25	91.84	1.90	0.01
322	8.73	88.71	2.54	0.02
328	73.08	24.06	2.85	0.01
335	10.57	86.58	2.84	0.01
342	9.37	85.89	4.73	0.01

ตารางผนวกที่ ข3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่มีการแปรผันความเข้มข้นซัลเฟต

(ระบบที่ไม่มีแสง)

วันที่	ร้อยละ			
	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	อื่นๆ
213	10.00	89.25	0.75	-
219	8.69	90.23	-	0.81
233	8.38	89.64	1.57	0.41
240	7.01	91.16	1.52	0.31
247	8.26	90.04	1.67	0.03
252	7.58	90.14	2.26	0.02
259	9.05	88.50	2.40	0.05
266	10.00	87.00	3.00	100
273	7.51	86.75	2.25	3.49
294	7.52	90.22	2.25	0.01
301	6.71	91.44	1.83	0.02
308	9.66	85.64	4.69	0.01
322	8.94	85.44	5.61	0.01
328	6.21	91.60	2.17	0.62
335	23.34	59.47	17.18	0.01
342	9.11	86.97	3.91	0.01



1. ตัวอย่างการคำนวณหาภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวของตัวกลาง

- Average COD_{inf.} = 927 mg/L
- liquid reactor volume (V_L) = 5.72 L
- HRT 48 hrs.
- surface area media/ea. = 1.35 x 10⁻³

$$\text{OLR} = 5.72L \times 927 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1\text{kg}}{10^6 \text{mg}} \times \frac{24\text{hrs}}{1\text{d}} \times \frac{1}{48\text{hrs}} \times \frac{1}{1.35 \times 10^{-3} \text{m}^2} = 2.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

2. การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้สมการของ Henry 's law ในการคำนวณ

จาก
$$P_g = \frac{H}{P_T} x_g$$

เมื่อ P_g = mole fraction of gas in air , mole gas/mole of air

H = Henry 's law constant , atm (mole gas/mole air)
(mole gas/mole water)

P_T = total pressure , usually 1.0 atm

x_g = mole fraction of gas in water , mole gas/mole water

= mole gas (n_g) / (mole gas (n_g) + mole water (n_w))

แทนค่า $P_T = 1.0 \text{ atm}$ จะได้ว่า $x_g = \frac{P_T}{H} P_g$

หาค่าคงที่ (H) Henry's law constant จากสมการของ van 't Hoff – Arrhenius

$$\log_{10} H = -\frac{A}{T} + B$$

เมื่อ H = Henry's law constant at temperature T, atm

A = empirical constant that takes into account the enthalpy change in water due to the dissolution of component in water and the universal gas law constant

T = temperature, K = 273.15 + °C

B = empirical constant

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตารางที่ 2-8 หน้า 67 ของ Metcalf and Eddy (fourth edition) $A = 884.94$, $B = 5.70$
 คำนวณหาค่าคงที่ (H) ที่อุณหภูมิ $30^{\circ}C$ จะได้ว่า

$$\log_{10} H = -\frac{A}{T} + B$$

$$\log_{10} H = -\frac{884.94}{303} + 5.70$$

$$\log H = 2.78$$

$$H = 10^{2.78}$$

$$H = 602.55$$

และจาก $x_g = \frac{P_T}{H} P_g$ (ความเข้มข้นของ H_2S ในระบบที่มีแสงสูงสุดเป็น 3.5%)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } x_g &= \frac{1}{602.55} \cdot 0.035 \\ &= 5.80 \times 10^{-5} \text{ mole gas / mole } H_2O \end{aligned}$$

จาก $\frac{n_g}{n_g + n_w} = 5.80 \times 10^{-5}$ (18 g/mole ของ H_2O) ดังนั้นน้ำ 1 L จะหนัก 1,000g หรือคิดเป็น

55.6 mole และถือว่าจำนวน mole ของก๊าซ (n_g) น้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวน mole ของน้ำ (n_w)

$$\therefore n_g + n_w \approx 55.66$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } n_g &= 5.80 \times 10^{-5} \times 55.6 \\ n_g &= 3.22 \times 10^{-3} \text{ mole } H_2S/L \end{aligned}$$

คิดเป็นความเข้มข้นของ H_2S ละลายน้ำ = 109.48 mg/L

4. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าปรับแก้ (corrected factor) ในการวิเคราะห์ก๊าซ H_2S , CH_4 , CO_2

ในการคำนวณหาค่าปรับแก้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซโดยใช้คอลัมน์ HEYSEP Q80/100 มีรายละเอียดดังนี้

Standard Gas

Standard gas				
AIR	CO_2	H_2S	COS	CH_4
98.4910	0.5088	0.4999	0.5003	99.99

ค่าปรับแก้ (Corrected area) = Area x Corr.F

$$\text{และ Correction Factor (Corr.F)} = \frac{\left(\frac{Area_{std}}{\%vol_{std}} \right)}{\left(\frac{Area_i}{\%vol_i} \right)}$$

Corrected % vol_i = $\frac{\text{corrected area}_i}{\text{Total corrected area}} \times 100$

Total corrected area

ตัวอย่างการคำนวณ

ผลการวิเคราะห์ก๊าซชนิดหนึ่งด้วยเครื่อง GC ได้ area ดังนี้

Gas	% Volume	Area	Area/ % Vol	Correct F
H ₂ S	0.4999	220.21343	440.514963	1
CH ₄	60	46688.29	778.1381667	0.566114068
CO ₂	40	44076.1	1101.9025	0.399776716

คำนวณหาของ Correction Factor (Corr.F) H₂S = $\frac{\left(\frac{Area_{std}}{\%vol_{std}}\right)}{\left(\frac{Area_i}{\%vol_i}\right)}$

$$\left(\frac{\frac{220.21343}{0.4999}}{\frac{220.21343}{0.4999}}\right) = 1$$

คำนวณหาของ Correction Factor (Corr.F) CH₄ = $\frac{\left(\frac{220.21343}{0.4999}\right)}{\left(\frac{46688.29}{60}\right)} = \frac{440.514963}{778.138176} = 0.566$

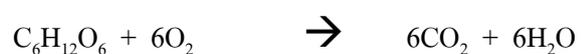
ตัวอย่าง

date	gas	mins	area	corrected factor	corrected area	corrected concentration (%V)
6/8/1952	air	0.514	6588.49023	-		
	CH ₄	0.778	36709.6	0.566	20777.6336	88.59125723
	CO ₂	1.594	6246.86173	0.399	2492.49783	10.62746224
	H ₂ S	6.446	183.2366	1	183.2366	0.781280538
	Total				23453.36803	100



ภาคผนวก ง
สมการที่เกี่ยวข้องในการกำจัดซัลเฟต

1. COD ในรูปของ $C_6H_{12}O_6$ ที่ใช้ในการกำจัด SO_4^{2-}



จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

192 g COD ต้องการ SO_4^{2-} 288 g

$$\frac{COD(C_6H_{12}O_6)}{SO_4^{2-}} = 0.67$$

2. COD ในรูปของอะซิติก (CH_3COOH) ที่ใช้ในการกำจัดซัลเฟต



จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

64 g COD ต้องการ SO_4^{2-} 96 g

$$\frac{COD_{CH_3COOH}}{SO_4^{2-}} = 0.67$$

3. ตัวอย่างการคำนวณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ให้อยู่ในรูปของ COD ในรูปของ CH_3COOH

- ความเข้มข้นของ VFA = 439 mg/L as CH_3COOH

จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (sCOD) = 1,124 mg/L

จะได้ว่า

CH_3COOH 64 g คิดเป็น COD 60 g

∴ VFA = 439 mg/L as CH_3COOH คิดเป็น COD 468 mg/L

จาก $\text{COD}_{\text{Total}} = \text{COD}_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} + \text{COD}_{\text{CH}_3\text{COOH}}$

$$1,124 \text{ mg/L} = \text{COD}_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} + 468 \text{ mg/L}$$

จะได้ $\text{COD}_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 656 \text{ mg/L}$ หรือคิดเป็นอัตราส่วน $\frac{\text{COD}_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}}{\text{COD}_{\text{CH}_3\text{COOH}}} = 1.4$



ภาคผนวก จ

การสกัดเม็ดสี (pigment) ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

1. การสกัดเม็ดสี (pigment) ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

- 1) นำเอาตะกอนจุลินทรีย์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 2) ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,500 rpm เป็นเวลา 30 นาที ค่อยๆ รินเอาส่วนใสออก
- 3) ใสเมทานอลแล้วเขย่าให้เข้ากันนำไปแช่แข็งเป็นเวลา 20 นาที
- 4) นำไปปั่นเหวี่ยงอีก 1 ครั้ง ด้วยความเร็วรอบ 4,500 rpm เป็นเวลา 10 นาที
- 5) นำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายกฤษณะ จิรสารสวัสดิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 29 ธันวาคม 2526
สถานที่เกิด	กำแพงเพชร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ๓๓ อยุธยา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับปริญญาตรี (IPUS) เรื่องการ บำบัดน้ำเสียอิมัลชันน้ำมันหล่อเย็น โดยวิธีชีวเคมี