

การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดย
ระบบไบโอสครับเบอร์

HYDROGEN SULFIDE REMOVAL FROM BIOGAS BY
BIO-SCRUBBER SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYDROGEN SULFIDE REMOVAL FROM BIOGAS BY
BIO-SCRUBBER SYSTEM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL MICROBIOLOGY)
DEPARTMENT OF BIOLOGY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดย
ระบบไบโอสครับเบอร์

Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by
Bio-scrubber System

ชื่อนักศึกษา

นายภูกฤษณ์ เรืองศรีไชยะ รหัสนักศึกษา 56051050
นายภูมินทร์ กุลเพชรเจริญธร รหัสนักศึกษา 56051051
นายวงศกร ปิติรัตนโยธิน รหัสนักศึกษา 56051061

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

ชีววิทยา

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยา
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กานต์ วงศาริยะ ประธานกรรมการ	
ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดยระบบไบโอสครับเบอร์
ชื่อนักศึกษา	นายภูฤกษ์ เรื่องศรีไชยะ รหัสนักศึกษา 56051050 นายภูมินทร์ กุลเพชรเจริญธร รหัสนักศึกษา 56051051 นายวงศกร ปิตรีตโนโยธิน รหัสนักศึกษา 56051061
ปริญญา ภาควิชา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ชีววิทยา
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ดุขณี ธนะบริพัฒน์

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สที่พบในแก๊สชีวภาพ มีความเป็นพิษสูงต่อสุขภาพของมนุษย์ ทั้งยังสร้างความเสียหายต่อพื้นผิวเครื่องจักรในอุตสาหกรรมโดยการกัดกร่อน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดจากแก๊สชีวภาพได้ โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพที่เรียกว่าระบบไบโอสครับเบอร์ ซึ่งระบบประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนคอลัมน์บรรจุตัวกลางพลาสติกและส่วนถังน้ำหมักเวียนอาหารเลี้ยงเชื้อ คอลัมน์ของไบโอสครับเบอร์มี 2 คอลัมน์ โดยคอลัมน์หนึ่งสำหรับการทดลองแบบควบคุมโดยหมักเวียนอาหารที่ไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนอีกคอลัมน์หนึ่งสำหรับหมักเวียนอาหารที่มีเชื้อจุลินทรีย์ จากผลการศึกษาพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria มีความสามารถในการเกิดออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ดีที่เร็วที่สุด เมื่อนำไปตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติกใช้เวลาทั้งหมด 96 ชั่วโมง ปริมาณซัลเฟตในระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราการไหลเข้าแก๊สชีวภาพต่าง ๆ กัน คือ 16 80 และ 160 ลิตร/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราการไหลเข้าแก๊สชีวภาพ 160 ลิตร/ชั่วโมง ที่ชั่วโมงที่ 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ร้อยละ 87.37 ค่าความจุการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกสูงถึง 11,013.80 ppm m⁻³ h⁻¹ และหากสามารถดำเนินระบบยาวนานขึ้น มีความเป็นไปได้ที่ระบบจะสามารถกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ทั้งหมด

คำสำคัญ : แก๊สชีวภาพ ไบโอสครับเบอร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ Sulfur Oxidizing Bacteria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by Bio-scrubber System		
Students	Mr. Bhukrit	Ruengsrichaiya	Student ID 56051050
	Mr. Pumin	Kulpetchareonthorn	Student ID 56051051
	Mr. Wongsakorn	Pitiratanayothin	Student ID 56051061
Degree	Bachelor of Science (Industrial Microbiology)		
Department	Biology		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Dr. Pramote Sirirote		
Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Dusanee Thanaboripat		

Abstract

Highly toxic hydrogen sulfide in biogas can have impact on human health and it can also corrode surface of industrial machines. Hydrogen sulfide can be removed from biogas by biological process called Bio-scrubber system. The system used this study contained two parts including packing media column and recirculate tank. Two types of packing media column were used for the experiment, i.e. a column with microbes fixed inside the column and the column without microbes served as control. The result showed that mixed cultures of sulfur oxidizing bacteria gave maximum sulfur oxidation and the amount of sulfate in the system reached steady state after bacteria were fixed in column for 96 h. The efficiency of hydrogen sulfide removal at different gas flow rates inlet of 16, 80 and 160 L/h was studied. The result showed that hydrogen sulfide was effectively removed (87.37%) at gas flow inlet of 160 L/h at 7 h and the elimination capacity was up to 11,013.80 ppm m⁻³ h⁻¹. If the system has been prolonged, it is possible to remove all hydrogen sulfide from biogas.

Keywords : Biogas, Bio-scrubber, Hydrogen sulfide, Sulfur Oxidizing Bacteria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษในหัวข้อเรื่อง การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดยระบบไบโอสครับเบอร์ รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้ข้อเสนอแนะ รวมถึงการติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึงรศ.ดร.ศุภณี ธนะบริพัทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ดร.กานต์ วงศาริยะ ประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้รายงานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณศักรินทร์ บุญล้ำ และนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และคอยให้คำแนะนำเป็นอย่างดี รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอวิส จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหา activated sludge จากบ่อระบบบำบัดน้ำเสียที่นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทไฮโย พลังงานทดแทน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำแก๊สชีวภาพมาทำให้ใช้และสถานที่พักมาให้สำหรับดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมไปถึงคุณเมฆที่ให้การสนับสนุนและดูแลเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่ไปทำการวิจัยที่บริษัท

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน หากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ภูกฤษณ์ เรืองศรีไชยะ
ภูมินทร์ กุลเพชรเจริญธร
วงศกร ปิติรัตนโยธิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	3
2.1.1 คุณสมบัติ.....	3
2.1.2 กระบวนการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	4
2.1.3 ผลกระทบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	4
2.2 แก๊สชีวภาพ.....	6
2.3 การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	7
2.4 ระบบกรองชีวภาพ.....	8
2.4.1 ไบโอฟิลเตอร์.....	8
2.4.2 ไบโอทรिकคลิ่งฟิลเตอร์.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ไบโอสคริปเบอร์	10
2.5 ระบบตรึงผิวชีวภาพ	11
2.5.1 ลักษณะสมบัติของระบบตรึงผิวชีวภาพ	11
2.5.2 การเกาะหลุดของจุลินทรีย์	11
2.5.3 องค์ประกอบทางเคมี	12
2.5.4 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์	12
2.5.5 ความหนาประสิทธิผล	13
2.5.6 สภาพขาดแคลนสารอินทรีย์ และออกซิเจน	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 แก๊สชีวภาพ	15
3.3 ระบบไบโอสคริปเบอร์	16
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง	17
3.4.1 การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง	17
3.4.2 การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก	18
3.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุม ที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก(Abiotic Test)	19
3.4.4 การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและค่าความจุการกำจัดออกที่สูงที่สุดในการกำจัด ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ	19
3.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	20
3.5.1 ระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง	20
3.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัด	20
3.5.3 ความจุการกำจัด	21
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	22
4.1 จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์	22
4.2 การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก	25
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มี การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก	26
4.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ	27
4.4.1 พีเอชและปริมาณซัลเฟต	27
4.4.2 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าความจุรื่การกำจัดออก	28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปผลการวิจัย	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	35
ภาคผนวก ก	36
ภาคผนวก ข	38
ภาคผนวก ค	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระดับของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์.....	5
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของแก๊สชีวภาพ.....	6
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของวิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	7
ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้าและค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	19
ตารางที่ 4.1 เชื้อจุลินทรีย์ 8 ชนิด ที่คัดแยกได้จาก activated sludge.....	22
ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณซัลเฟตที่เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดผลิตได้.....	24
ตารางที่ 4.3 พีเอชและประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก.....	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	3
2.2 ไบโอฟิลเตอร์.....	9
2.3 ไบโอทรिकคิ่งฟิวเตอร์.....	9
2.4 ไบโอสคริปเบอร์.....	10
3.1 ผังของระบบไบโอสคริปเบอร์.....	16
3.2 ระบบไบโอสคริปเบอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.3 พลาสติกตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	18
4.1 ปริมาณซัลเฟตที่เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดผลิตได้.....	23
4.2 เชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
4.3 ความสัมพันธ์ของซัลเฟตและพีเอชระหว่างการตรึงเซลล์ในระบบไบโอสคริปเบอร์.....	25
4.4 พีเอชและปริมาณของซัลเฟตระหว่างการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยระบบไบโอสคริปเบอร์.....	28
4.5 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าความจุรื่การกำจัดออกของระบบไบโอสคริปเบอร์ที่อัตราไหลของแก๊สต่าง ๆ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
H ₂ S	ไฮโดรเจนซัลไฟด์
CH ₄	แก๊สมีเทน
CO ₂	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
EBRT	ระยะเวลาที่กักเก็บในตัวกลาง (Empty Bed Residence Times)
RE	ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency)
EC	ค่าความจุการกำจัดออก (Elimination Capacity)
CRD	แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)
SOB	แบคทีเรียกลุ่มที่ออกซิไดซ์ซัลเฟต (Sulfur Oxidizing Bacteria)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแนวโน้มการขยายตัวทางเศรษฐกิจของไทยที่ปรับตัว และแผนการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานตามนโยบายรัฐบาล ซึ่งส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย ดังนั้นเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ ภาครัฐจึงได้มีการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) โดยให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานทดแทนจากวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศ โดยหนึ่งในพลังงานที่ภาครัฐให้ความสำคัญ คือ แก๊สชีวภาพ (ที่ผลิตจากน้ำเสีย/ของเสียและพืชพลังงาน) โดยมีแผนจะเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเดิมในปี พ.ศ. 2559 ที่สามารถผลิตอยู่ที่ 440.17 เมกะวัตต์ ให้เพิ่มขึ้นเป็น 1,280.00 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนั้น จะได้ผลผลิตแก๊สออกมาหลายชนิด โดยจะมีแก๊สมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ อาทิ ใช้ในการหุงต้ม ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแก๊สชนิดอื่น ๆ อีก อาทิ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยการมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อย ก็เพียงพอที่จะกัดกร่อนทำลายเครื่องจักรต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการสันดาปหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ มีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เตาทำครีว มีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำ คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 10 ppmv, อุปกรณ์ภายในของการสันดาป มีความสามารถในการทนได้ที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 100 ppmv และหม้อต้มสามารถทนได้ที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 1000 ppmv (Zicari, 2003) ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ โดยกระบวนการกำจัดจะมีหลายวิธี แต่การใช้วิธีทางเคมีนั้นจะมีต้นทุนที่สูงกว่าการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพมาก ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกด้วยวิธีทางชีวภาพ ก็มีหลายวิธีให้เลือก เช่น ไบโอฟิลเตอร์ ไบโอทรिकคลิ่งฟิลเตอร์ หรือไบโอสครับเบอร์ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ไบโอสครับเบอร์เนื่องจากระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงกว่าระบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดทางชีวภาพอื่น ๆ กล่าวคือ ไบโอสคริปเบออร์มีบริเวณที่เกิดกิจกรรมการกำจัดทางชีวภาพ 2 จุด คือ บริเวณตัวกลางในคอลัมน์และบริเวณถังของเหลวหมุนเวียนระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหาจุลินทรีย์กลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ
- 2) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบไบโอสคริปเบออร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur Oxidation) โดยวิธี Turbidimetric method ซึ่งเป็นการวัดปริมาณซัลเฟตที่เกิดขึ้น
- 2) ศึกษาความสัมพันธ์ของพีเอชและปริมาณซัลเฟตระหว่างการตรึงเซลล์กับตัวกลางพลาสติก
- 3) ศึกษาความสัมพันธ์ของพีเอช ปริมาณซัลเฟต อัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้า ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนและหลังการบำบัด ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง (Empty Bed Retention Time) ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Removal Efficiency) และค่าความจุการกำจัดออก (Elimination Capacity) ระหว่างการดำเนินระบบไบโอสคริปเบออร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถคัดเลือกจุลินทรีย์กลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ
- 2) สามารถกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยระบบไบโอสคริปเบออร์
- 3) เป็นแนวทางในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ โดยเลือกใช้วิธีทางชีวภาพที่มีต้นทุนต่ำกว่าวิธีทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

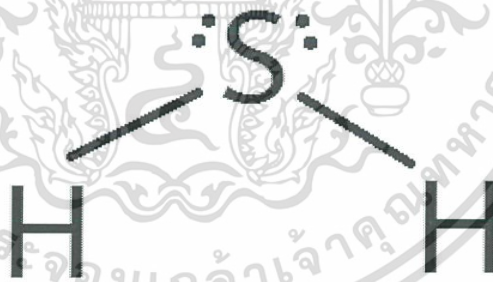
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.1.1 คุณสมบัติ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (รูปที่ 2.1) เป็นแก๊สที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีคุณสมบัติการกัดกร่อนสูง มีกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงประสงค์ (จรัญและคณะ, 2557) เป็นอันตรายมากที่สุดในอุตสาหกรรมน้ำมัน การเกษตร การบำบัดน้ำเสีย การจัดการของเสียจากสัตว์และการก่อสร้าง (Guidotti, 2015) มีกลิ่นเน่าเหม็นคล้ายไข่เน่า บ่อยครั้งเป็นผลจากแบคทีเรียย่อยสลายซัลไฟด์ในสารอินทรีย์ในสภาวะขาดออกซิเจน (Patnaik, 2002) และเป็นหนึ่งในสารประกอบที่ได้จากธาตุซัลเฟอร์ มีคุณสมบัติเป็นแก๊สพิษชนิดหนึ่งที่ไม่มีสี ค่าปริมาณไอระเหยของแก๊สต่ำสุดที่สามารถเกิดการระเบิดได้ หากมีออกซิเจนเพียงพอ (Lower explosive Limit, LEL) อยู่ที่ร้อยละ 4 จึงจัดแก๊สชนิดว่าเป็นแก๊สที่มีความว่องไวในการลุกติดไฟได้ง่ายมากและเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงและอุณหภูมิที่สามารถลุกติดไฟได้เองอยู่ที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส (วรรณพรและคณะ, 2557)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไฮโดรเจนซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์

การเกิดของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงในสมการที่ 2.1 โดยเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มที่รีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria) ที่เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปท่อน มีการใช้ซัลเฟต และไฮโดรเจน เป็นแหล่งพลังงาน โดยใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายดังสมการ



แบคทีเรียกลุ่มนี้พบได้ในตะกอนของแหล่งน้ำ และบ่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมักพบซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของแบคทีเรียดังกล่าว เช่น *Desulfovibrio*, *Desulfobacter* และ *Desulfuromonas* (วรรณพรและคณะ, 2557)

2.1.3 ผลกระทบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์พบได้ในธรรมชาติ กระบวนการผลิตแก๊สธรรมชาติ โรงงานกระดาษ รวมถึงแหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด แก๊สที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อด้านอุตสาหกรรมสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตด้วย (วรรณพรและคณะ, 2557)

ผลกระทบในด้านอุตสาหกรรม

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดเป็นกรดซัลฟิวริกก่อให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ เครื่องจักร ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะโรงงานผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพที่มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นระหว่างการผลิตแก๊สชีวภาพ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเครื่องจักร

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเมื่อออกสู่ชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ โดยเมื่อสัมผัสสู่บรรยากาศ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟต เมื่อรวมตัวกับไอน้ำหรือฝน ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งส่งผลกระทบต่อพืชทำให้พืชเติบโตช้า หากไหลลงสู่แม่น้ำทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ (ปีทมาและคณะ, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต

เมื่อสิ่งมีชีวิตได้สูดดมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำไปยังระดับความเข้มข้นที่สูง ล้วนมีผลกระทบต่อระบบต่างๆของร่างกาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 หากมนุษย์ที่ได้รับระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับที่ต่ำอาจทำให้เกิดอาการเวียนหัว อาเจียน รวมถึงมีอาการมวนท้อง และเมื่อได้รับในระดับที่มากขึ้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไปทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ในกระแสเลือด และไปยับยั้งกระบวนการหายใจในระดับเซลล์ นำไปสู่การหายใจที่เป็นอัมพาตและเสียชีวิตได้ (Gusseme *et al.*, 2009)

ตารางที่ 2.1 ระดับของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลต่อร่างกายของมนุษย์

ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ผลที่เกิดขึ้น	แหล่งอ้างอิง
0.011	เริ่มได้รับกลิ่น	Amoore & Hautala, 1983
2.8	เกิดภาวะหลอดลมหดตัวในผู้ที่ เป็นโรคหืด	Jappinen <i>et al.</i> , 1990
5.0	อาการระคายเคืองตา	Vanhoome <i>et al.</i> , 1995
7-14	ความเข้มข้นของแลคเตทใน เลือดเพิ่มขึ้น ลดกิจกรรมของ เอนไซม์ซีเตรทซินเทรสใน กล้ามเนื้อลาย ลดการนำเข้า ของแก๊สออกซิเจน	Bhambhani & Singh, 1991; Bhambhani <i>et al.</i> , 1996, 1997
28	มีอาการปวดหัว อ่อนเพลีย เบื่อ อาหาร คลื่นไส้	Ahlborg, 1951
>140	ประสาทรับกลิ่นไม่ทำงาน	Hirsch & Zavala, 1999
>560	เกิดภาวะหายใจลำบาก	Spolyar, 1951
≥700	ถึงแก่ชีวิต	Beauchamp <i>et al.</i> , 1984

ที่มา : วรณพรและคณะ (2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ (Biogas) หมายถึง แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้อินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลัก คือ แก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีแก๊สอื่น ๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือแก๊สไข่เน่า และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) กระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพต้องไม่ให้อากาศเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของแบคทีเรียกลุ่มผลิตแก๊สมีเทนมีการผลิตแก๊สมีเทนลดลง นอกจากนี้แก๊สชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรียสารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ โดยแก๊สชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึง และนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของแก๊สชีวภาพ

แก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร
มีเทน	50 – 80
คาร์บอนไดออกไซด์	25 – 50
ไนโตรเจน	0 – 10
ไฮโดรเจน	0 – 1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0 – 3
ออกซิเจน	0 – 2

ที่มา : Samuel (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

วิธีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี โดยในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ กระบวนการนาโนฟิลเทรชัน (Nanofiltration) ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดซัลเฟตที่เป็นสารตั้งต้นที่นำไปสู่การเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Haveman *et al.*, 2005) สำหรับวิธีทางเคมี เป็นการนำสารเคมีลดปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งวิธีนี้จะมีการใช้สารเคมีจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม (Syed *et al.*, 2006) จึงนิยมใช้วิธีทางชีวภาพมาใช้ในการกำจัดหรือลดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (วรรณพรและคณะ, 2557)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

วิธีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
วิธีทางกายภาพ	เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ	สามารถกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ในปริมาณที่ต่ำ ในบางกระบวนการมีความร้อนเกิดขึ้นทำให้ยากแก่การควบคุม	Syed <i>et al.</i> , 2006
วิธีทางเคมี	ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง	มีค่าใช้จ่ายสูง ก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อม	ปัทมา, 2552 Syed <i>et al.</i> , 2006
วิธีทางชีวภาพ	เป็นวิธีที่ประหยัดปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง	ใช้พื้นที่ในการติดตั้งเป็นจำนวนมากหากออกแบบมาเป็นระบบ	ปัทมา, 2552 Syed <i>et al.</i> , 2006

ที่มา : วรรณพรและคณะ (2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

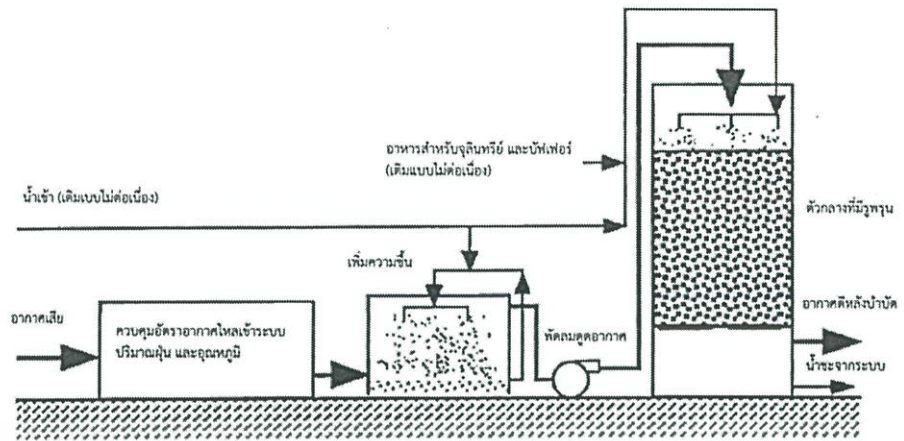
2.4 ระบบกรองชีวภาพ

เป็นระบบบำบัดอากาศเสียจากแหล่งกำเนิด สามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยระบบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ ข้อดีของระบบกรองชีวภาพคือ ต้นทุนในการติดตั้งระบบและต้นทุนในการเดินระบบต่ำ ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย บำรุงรักษาระบบง่าย และไม่เกิดของเสียที่ต้องส่งต่อไปกำจัดด้วยวิธีการอื่น แต่ระบบกรองชีวภาพมีข้อเสียคือ ต้องการอัตราการป้อนอากาศเสียที่ต่อเนื่อง ต้องรู้ชนิดและปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนของไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพราะสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ นอกจากนี้ระบบนี้ยังต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก (Zerbonia *et al.*, 1995) ระบบการกรองชีวภาพเหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ที่มีความระเหยง่ายเข้มข้นน้อยกว่า 1,500 ppm โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99 ระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ไบโอฟิลเตอร์ (biofilter), ไบโอทรिकคิ่งฟิลเตอร์ (biotrickling filter) และ ไบโอสครับเบอร์ (bioscrubber) (อมรพล, 2557)

2.4.1 ไบโอฟิลเตอร์

ในระบบไบโอฟิลเตอร์ (รูปที่ 2.2) จุลินทรีย์จะเคลือบอยู่บนตัวกลางที่มีรูพรุนในรูปของฟิล์มชีวภาพ (biofilm) อากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกดูดซับบนตัวกลางที่มีรูพรุนซึ่งเคลือบด้วยฟิล์มชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นในบริเวณฟิล์มชีวภาพ และในตัวกลางที่มีรูพรุน ตัวกลางที่มีรูพรุนที่นิยมใช้คือ ปุ๋ยหมัก (compost) เพราะมีพื้นที่ในการสัมผัสกับอากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และสามารถเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบไบโอฟิลเตอร์คงที่ จะต้องมีการเติมน้ำและอาหารแบบเป็นครั้งคราวเพื่อเพิ่มความชื้นและอาหารให้กับจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งการเติมน้ำและอาหารแบบเป็นครั้งคราวไม่ต่อเนื่อง ทำให้น้ำที่ชะออกมาจากระบบจะมีสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ปนออกมาด้วย แต่มีปริมาณน้อยมาก (อมรพล, 2557)

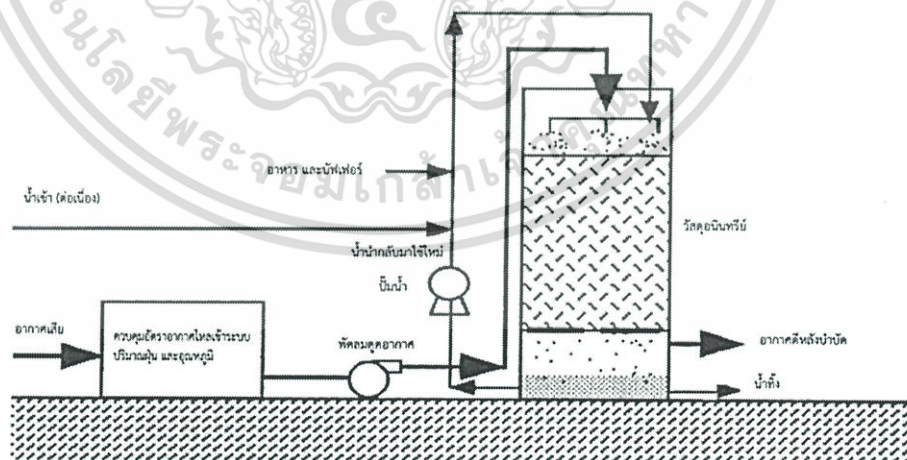
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ไบโอฟิลเตอร์ (อมรพล, 2557)

2.4.2 ไบโอทรिकคิ่งฟิลเตอร์

ระบบไบโอทรिकคิ่งฟิลเตอร์ (รูปที่ 2.3) จุลินทรีย์จะถูกตรึงอยู่ในวัสดุคือนินทรีย์ (inorganic packing material) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ และบางส่วนจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยน้ำ อาหาร และจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะถูกพ่นให้สัมผัสกับอากาศเสียอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ถูกตรึงอยู่ในวัสดุคือนินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ น้ำที่สัมผัสกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วจะไหลลงมาที่ด้านล่างของระบบ บางส่วนจะถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ เนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายแขวนลอยอยู่ ดังนั้นจึงเหลือน้ำทิ้งในปริมาณน้อยที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (อมรพล, 2557)

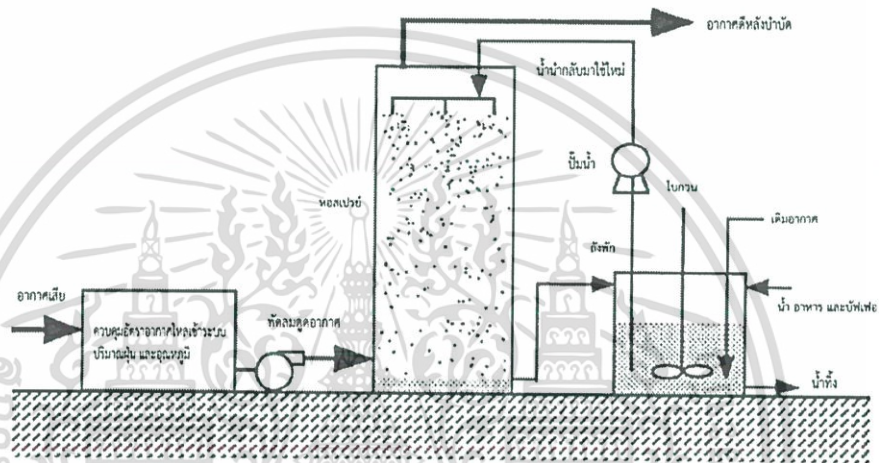


รูปที่ 2.3 ไบโอทรिकคิ่งฟิวเตอร์ (อมรพล, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ไบโอสคริปเบอร์

สำหรับไบโอสคริปเบอร์ (รูปที่ 2.4) จุลินทรีย์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ และอากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกน้ำที่มีจุลินทรีย์ดูดซับบริเวณหอสเปรย์ (spray tower) หรือในคอลัมน์ (packed column) จากนั้นน้ำที่มีส่วนผสมของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกส่งไปยังถังพัก (storage tank) และการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นที่ถังพักจะถูกนำไปใช้อีกครั้ง เหลือเพียงบางส่วนถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับกับระบบไบโอทรिकคอลลิงฟิลเตอร์ (อมรพล, 2557)



รูปที่ 2.4 ไบโอสคริปเบอร์ (อมรพล, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระบบตรึงผิวชีวภาพ

2.5.1 ลักษณะของระบบตรึงผิวชีวภาพ

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเมื่อระบายทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาตินั้น สามารถถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทำความสะอาดตัวเองในธรรมชาติ (Self-purification process) จุลินทรีย์ที่สามารถทำลายสารอินทรีย์นี้อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นจุลินทรีย์ประเภทที่แขวนลอยในของเหลว (plagiarism) และกลุ่มที่สองเป็นจุลินทรีย์ประเภทตรึงผิว (Fixed-film) เกาะบนพื้นผิววัสดุในบริเวณแหล่งน้ำ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายโดยพวกจุลินทรีย์ที่เกาะตามธรรมชาติ หลักการนี้จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียอย่างกว้างขวาง เช่น ระบบโปรยกรอง ระบบกรองชีวภาพ และระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ ซึ่งจุลินทรีย์ที่ตรึงผิว ที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจะทำให้เกิดฟิล์มชีวภาพ คุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพที่เกาะบนผิววัสดุต่าง ๆ นั้นขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ความเร็วของน้ำไหลผ่านผิววัสดุ ความเข้มข้นของสารอาหารที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ในน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิ ลักษณะผิววัสดุที่ฟิล์มชีวภาพเกาะ เป็นต้น (สิริภรณ์, 2553)

2.5.2 การเกาะหลุดของจุลินทรีย์

การเกาะหลุดของจุลินทรีย์ (Microbial Attachment and Sloughing) บนตัวกลางแล้วเกิดขึ้นเป็นฟิล์มชีวภาพนั้นเกิดขึ้นเป็นวัฏจักร โดยการหลุดของฟิล์มชีวภาพในระบบโปรยกรองเกิดทุก ๆ 14 วัน และจะมีฟิล์มชีวภาพใหม่มาเกาะแทนที่แล้วก็หลุดไปอีกเช่นนี้สลับกันไป จุลินทรีย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียสามารถเกาะบนผิววัสดุต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าผิววัสดุนั้นจะมีลักษณะแบบใด แต่จะเกาะได้ดีถ้าผิววัสดุมีความหยาบ การเกาะติดบนผิววัสดุของแบคทีเรียเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียจะสร้างเมือกเหนียวรอบตัวเซลล์ ทำให้แบคทีเรียสามารถเกาะกันติดหนาเป็นฟิล์มบนผิววัสดุได้ เมือกเหล่านี้เรียกว่า Glycocalyx ซึ่งเป็นสารพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประกอบด้วยโมเลกุลพวกน้ำตาลซึ่งมีกิ่งสาขา (Branching sugar molecule) และไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ที่อยู่ในลักษณะเกี่ยวพันกันแน่นทำให้เซลล์แบคทีเรียจับตัวกันแน่นขึ้น และเซลล์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เล็กลงและนำไปใช้ในการเจริญของเซลล์แบคทีเรีย การหลุดของฟิล์มชีวภาพขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายน้ำ โดยพบว่าอัตราการหลุดของมวลจุลินทรีย์แปรผันโดยตรงกับความเร็วรอบของระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ ความหนาของฟิล์มจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของของเหลว ในระบบโปรยกรองสาเหตุที่สำคัญของการหลุดของฟิล์มชีวภาพนั้นเนื่องมาจากฟิล์มชีวภาพมีความหนามากจนกระทั่ง บริเวณชั้นในเกิดสภาพขาดแคลนออกซิเจนอิสระ ดังนั้นสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแทน ทำให้เกิดแก๊สมีเทน ซึ่งแก๊สมีเทนที่จะเกิดจะดันให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มชีวภาพหลุดออก นอกจากนี้ถ้าฟิล์มชีวภาพมีความหนามากในที่สุดจะถูกถ่วงดึงให้หลุดโดยน้ำหนักของฟิล์มชีวภาพเอง (สิริภรณ์, 2553)

2.5.3 องค์ประกอบทางเคมี

ฟิล์มชีวภาพประกอบด้วยน้ำสูงถึงร้อยละ 87-96 โดยน้ำหนักและมีของแข็งระเหย (Volatile solids) เพียงร้อยละ 1.9-3.2 เท่านั้น นอกจากนี้ฟิล์มชีวภาพยังประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น ซึ่งปริมาณสารอนินทรีย์เหล่านี้ในฟิล์มชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย (สิริภรณ์, 2553)

2.5.4 กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบกำจัดแบบตรึงผิว นั้นเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดพร้อมกันซึ่งขั้นตอนกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์โดยฟิล์มชีวภาพมีดังนี้

1. สารอินทรีย์และออกซิเจนจะถ่ายเทจากชั้นของเหลวไปยังส่วนที่อยู่ร่วมกัน (Interface) ระหว่างชั้นของเหลวและฟิล์มชีวภาพ
2. สารอินทรีย์และออกซิเจนจะถ่ายเทผ่านบริเวณดังกล่าวไปยังชั้นของฟิล์มชีวภาพ
3. มีการใช้สารอินทรีย์และออกซิเจนโดยพวกจุลินทรีย์ในชั้นของฟิล์มชีวภาพ
4. มีการถ่ายเทผลิตภัณฑ์ได้ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจากชั้นฟิล์มชีวภาพ
5. ผลิตภัณฑ์ได้นี้จะถูกถ่ายเทต่อไปยังชั้นของเหลว

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนหรือสารอินทรีย์โดย ชั้นนอกจะเป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน ส่วนในชั้นถัดไปจะเป็นชั้นที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาย่อยสลายสารโดยใช้ออกซิเจนจะเกิดเร็วกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงขึ้นกับปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในชั้นที่มีออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ ความหนาของชั้นนี้เรียกว่า ความหนาประสิทธิผล (Effective Depth) ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำ ความหนาแน่นจุลินทรีย์ และอัตราการใช้สารอินทรีย์ (Substrate uptake rate) (สิริภรณ์, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 ความหนาประสิทธิผล

ลักษณะชั้นของฟิล์มของชีวภาพที่มีความหนามาก อาจแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นมีอากาศ และชั้นไร้อากาศ อัตราการใช้สารอินทรีย์โดยฟิล์มชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มชีวภาพเพิ่มขึ้น และอัตราการใช้อินทรีย์จะคงที่ เมื่อความหนาของฟิล์มชีวภาพ มีความหนามากกว่าความหนาของชั้นมีอากาศ (ความหนาของชั้นมีอากาศประมาณ 70-100 ไมโครเมตร) ความหนาของฟิล์มชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ซึ่งฟิล์มชีวภาพในระบบกำจัดน้ำเสียต่าง ๆ นั้น จะมีกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นเฉพาะชั้นผิวนอกบาง ๆ เท่านั้น ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดดังกล่าว กระทำได้โดยเพิ่มความหนาของชั้นมีอากาศ เช่น การใช้ออกซิเจนแทนอากาศ เป็นต้น (สิริภรณ์, 2553)

2.5.6 สภาพขาดแคลนสารอินทรีย์ และออกซิเจน

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ปฏิกริยาชีวเคมีนี้ประกอบด้วยสารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ได้แก่ สารอินทรีย์ต่าง ๆ และสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ได้แก่ ออกซิเจนซึ่งอยู่ในรูปละลายน้ำ อัตราการใช้สารอินทรีย์โดยฟิล์มชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสีย อาจถูกควบคุมโดยสารให้อิเล็กตรอนหรือสารรับอิเล็กตรอน (ในที่นี้หมายถึงสารอินทรีย์และออกซิเจนละลายน้ำ) ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นสารอินทรีย์ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำในน้ำเสีย อัตราการถ่ายเทมวลของสารทั้งสองและค่าสัมประสิทธิ์ย่อยสลาย (Stoichiometric coefficient) (Tchobanoglous, 1991)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nishimura และ Yoda (1997) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพด้วยระบบไบโอสแคร็บเบอร์ โดยกระบวนการกำจัดจะเกิดบริเวณคอลัมน์ที่มีการสัมผัสระหว่างของเหลวกับแก๊สและถังเติมอากาศ แก๊สชีวภาพเป็นแก๊สที่ได้จากถังบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบ UASB ถูกนำมาต่อเข้ากับคอลัมน์ที่บรรจุด้วย activated sludge ทำให้บริเวณคอลัมน์จะมีซัลไฟด์อยู่ภายในแล้วจึงดึงกลับไปยังถังเติมอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟตโดย Sulfur Oxidizing Bacteria เช่น *Thiobacillus* ทำการทดลองระดับ full-scale plant พบว่าสามารถลดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์จาก 2,000 ppm เหลือน้อยกว่า 20 ppm

Potivichayanon *et al.* (2006) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ระบบฟอกซ์ฟิล์มไบโอสแคร็บเบอร์ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ 2 ชนิด คือ *Acinetobacter* sp. MU1_03 และ *Alcaligenes faecalis* MU2_03 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่าร้อยละ 91 และพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Removal Efficiency) จะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราการไหลเข้าของแก๊สที่ต้องการบำบัด ความสูงของตัวกลาง และค่าระยะเวลาที่เก็บในตัวกลาง (EBRT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิริวัฒน์ (2550) ศึกษาการใช้ระบบกรองชีวภาพแบบมีน้ำหล่อในการบำบัดอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า พบว่าระบบกรองชีวภาพแบบมีน้ำหล่อสามารถนำไปใช้ในการบำบัดแก๊สไนตริกออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าได้โดยใช้ โซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นแหล่งพลังงาน ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 ในวันแรก เป็นมากกว่าร้อยละ 95 ในวันที่ 3 ของการทดลอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเนื่องมาจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เจริญเพิ่มขึ้นจากวันแรกจะสามารถใช้ไนตริกออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาที่เก็บในตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดพบว่า เมื่อระยะเวลาลดลง ประสิทธิภาพจะลดลงด้วย ซึ่งอาจเนื่องมาจากระยะเวลาไม่เพียงพอต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศและจุลินทรีย์ และการย่อยสลายไนตริกออกไซด์ของจุลินทรีย์เอง

Liu *et al.* (2013) ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยพบว่าแบคทีเรียจะมีกิจกรรมสูงสุดที่พีเอช 7.8–8.2. ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตซัลเฟอร์ที่ลดลง ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลางมีผลเล็กน้อยและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินระบบอยู่ที่ 33°C

Vikromvarasiri และ Pisutpaisal (2016) ได้ศึกษาแบคทีเรีย *Halothiobacillus neapolitanus* NTV01 (HTN) ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Chemolithoautotroph ที่มีความสามารถในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ โดยเชื้อนี้ถูกคัดเลือกจากการเกิดซัลเฟอร์ออกซิเดชันสูงสุด และนำมาใช้กับระบบไบโอทรिकคลิ่งฟิลเตอร์ เชื้อนี้จะเจริญได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ประกอบด้วย ไทโอซัลเฟต 10 กรัมต่อลิตร และฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 52 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7.0 เชื้อนี้สามารถทนต่อความเข้มข้นของซัลเฟตได้สูงถึง 8.35 กรัมต่อลิตร ในการดำเนินระบบไบโอทรिकคลิ่งฟิลเตอร์ ที่ใช้ในการบำบัดแก๊สชีวภาพ พีเอชเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ นอกจากนี้ควรจะมีการเปลี่ยนของเหลวหมุนเวียนระบบใหม่ทุก ๆ 48 ชั่วโมง เพื่อควบคุมพีเอชให้เท่ากับ 7.0 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ อยู่ที่ร้อยละ 95 - 100 จากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 45 -225 ppmv

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท Demver
2. เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น AR120 บริษัท Ohaus
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น AR2140 บริษัท Ohaus
4. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น UV-1601 บริษัท Shimadzu
5. กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) รุ่น E100 บริษัท Nikon
6. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น ED53 บริษัท Binder
7. เครื่องบ่มเขย่า (Shaker Incubator) รุ่น FT01/156 บริษัท Gallenkamp
8. ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar Flow) รุ่น LA-CLEANLINE-120 บริษัท M-TECH
9. หม้อนึ่งความดันไอฆ่าเชื้อ (Autoclave) รุ่น HA-300 MIV บริษัท HIRYAMA
10. เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น HS10-2 บริษัท Torrey pines scientific
11. ถังน้ำหมุนเวียนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Recirculate Tank)
12. ปั๊มควบคุมอัตราการไหลของเหลว (Pump) รุ่น AP5000 บริษัท Sonic
13. ตัวควบคุมอัตราไหลของแก๊สแบบลูกกลิ้ง (Rotameter)
รุ่น CX-LZB-4 บริษัท Shanghai Cixi Instrument
14. เครื่องวัดองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best technic

3.2 แก๊สชีวภาพ

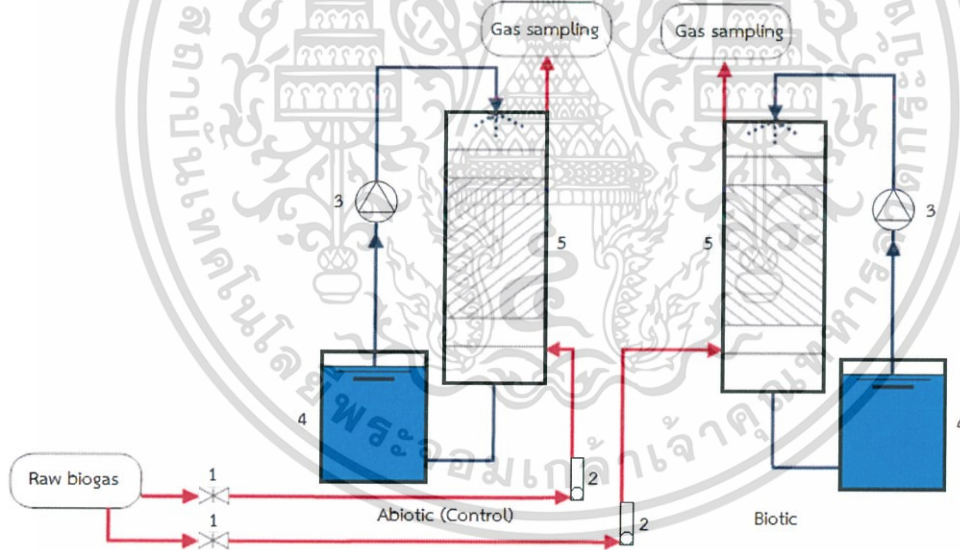
แก๊สชีวภาพได้รับความอนุเคราะห์จากจากบ่อผลิตแก๊สชีวภาพที่จังหวัดอ่างทองของ บริษัท ไชโยพลังงานทดแทน จำกัด ซึ่งมีองค์ประกอบของแก๊สโดยประมาณประกอบด้วย มีเทน (CH_4) ร้อยละ 43-45 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 48-55 และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 700-955 ppm โดยการใช้แก๊สชีวภาพของโรงงาน ไม่สามารถใช้อย่างต่อเนื่องได้เกิน 3 ชั่วโมงเนื่องจากโรงงานอยู่ในช่วงปรับปรุงระบบการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ ทำให้หากเปิดตัวดูดแก๊ส (Blower) เกิน 3 ชั่วโมงจะทำให้ระบบการผลิตมีความร้อนสูงและอาจเกิดอันตรายได้ ยกเว้นในช่วงสุดท้ายที่ได้รับความอนุเคราะห์เป็นพิเศษทำให้สามารถดำเนินระบบได้ 7 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบไบโอสครีบบเอร์

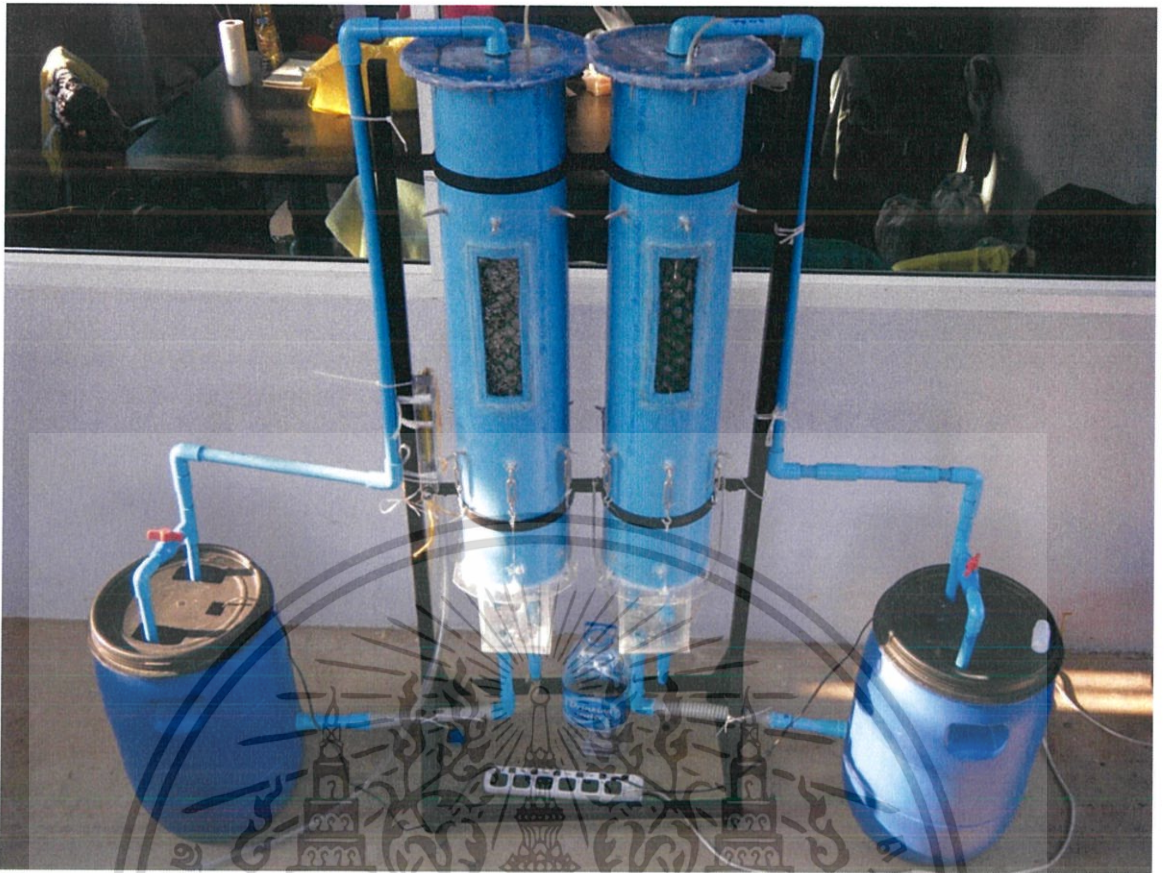
ระบบไบโอสครีบบเอร์แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ระบบไบโอสครีบบเอร์ประกอบไปด้วย คอลัมน์ของไบโอสครีบบเอร์ทำจากท่อ PVC (Polyvinyl chloride) เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 เมตร ความสูง 1 เมตร ภายในคอลัมน์บรรจุตัวกลางพลาสติก (Packing Media) ความสูง 0.6 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.16 เมตร ปริมาตรทำงาน (Working Volume) 0.0120576 ลูกบาศก์เมตร คอลัมน์ของไบโอสครีบบเอร์มี 2 คอลัมน์ โดยคอลัมน์หนึ่งสำหรับการทดลองแบบควบคุมโดยหมุนเวียนอาหารที่ไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ (Abiotic Test) ส่วนอีกคอลัมน์หนึ่งสำหรับหมุนเวียนอาหารที่มีเชื้อจุลินทรีย์ (Biotic Test)

ถังน้ำหมุนเวียนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Recirculate Tank) ภายในมีปั๊มและวาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลของเหลวโดยอาหารหมุนเวียนระบบจะถูกปั๊มขึ้นไปฉีดแบบกระจายตัว บริเวณด้านบนของคอลัมน์และไหลผ่านตัวกลางพลาสติกและตกกลับลงมาในถังหมุนเวียนอาหาร นอกจากนี้ยังมีตัวควบคุมอัตราไหลของแก๊สแบบลูกลอย (Rotameter) สำหรับปรับอัตราไหลของแก๊สชีวภาพที่จะบำบัด โดยแก๊สจะเข้าสู่ระบบจากทางด้านหลังไหลผ่านตัวกลางพลาสติกและออกจากระบบเพื่อทำการวัดองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพภายหลังการบำบัด



รูปที่ 3.1 ผังของระบบไบโอสครีบบเอร์ โดยหมายเลข 1 คือ วาล์วแก๊ส (Gas valve), หมายเลข 2 คือ ตัวควบคุมอัตราไหลของแก๊สแบบลูกลอย (Rotameter), หมายเลข 3 คือ ปั๊ม (Pump), หมายเลข 4 คือ ถังน้ำหมุนเวียนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Recirculate Tank) และ หมายเลข 5 คือ คอลัมน์บรรจุตัวกลางพลาสติก (Packing Media)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ระบบไบโอสคริปเบอร์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

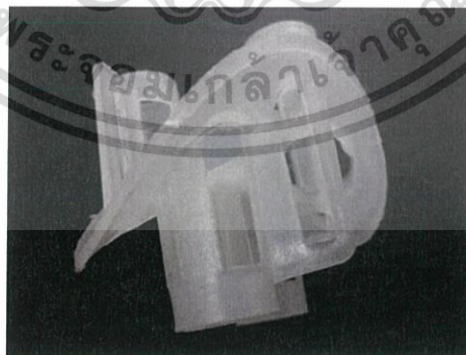
นำ activated sludge ได้จากบ่อบำบัดน้ำเสียของบริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอวิส จำกัด นิคมอุตสาหกรรม ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ เพื่อนำมาคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยนำ activated sludge 10 มิลลิลิตร ถ่ายลงในอาหาร Nutrient broth (NB) 90 มิลลิลิตร เพื่อให้เชื้อที่ต้องการมีความแข็งแรง เนื่องจากใน activated sludge มีเชื้อจุลินทรีย์หลายกลุ่มและมีเชื้อ Sulfur Oxidizing Bacteria ในปริมาณน้อยจึงจำเป็นต้องใช้อาหารนี้ โดยทำการเลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง (30-32 °ซ) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นเพื่อทำการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ นำเชื้อจุลินทรีย์ที่เลี้ยงในอาหาร Nutrient broth (NB) 10 มิลลิลิตร ถ่ายลงในอาหาร Thiosulfate Broth 90 มิลลิลิตร โดยทำการเลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำมาคัดแยกเชื้อบนอาหาร Thiosulfate Agar (ภาคผนวก ก) โดยใช้เทคนิค Spread plate โดยบ่มที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(30-32 °ซ) เป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำโคโลนีที่ขึ้นบนจานเพาะเชื้อมาศึกษาเบื้องต้นทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา เพื่อแยกจุลินทรีย์ที่มีลักษณะต่างกัน เก็บไว้แยกเป็นแต่ละสายพันธุ์ รวมไปถึงจุลินทรีย์ผสม (Mixed Culture) ในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria จากนั้นจึงถ่ายเชื้อเหล่านั้นลงในอาหาร Thiosulfate Broth 100 มิลลิลิตร ทำการเลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง (30-32 °ซ) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน ทำทั้งหมด 3 ชุด แล้วจึงนำไปทดสอบความสามารถในการออกซิเดชัน สารประกอบซัลเฟอร์โดยวิธี Turbidimetric method (ภาคผนวก ข) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณซัลเฟตที่เกิดขึ้น โดยหากเชื้อจุลินทรีย์ตัวใดสามารถเปลี่ยนไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เป็นซัลเฟตได้มาก ก็จะมีแนวโน้มที่จะสามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เมื่อได้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการออกซิเดชัน สารประกอบซัลเฟอร์สูงสุดแล้วทำการถ่ายเชื่อนั้น 10 มิลลิลิตร ลงในอาหาร Thiosulfate Broth 90 มิลลิลิตร จำนวน 15 ฟลาสก์ (ปริมาตรรวม 1.5 ลิตร) เพื่อเตรียมเป็นหัวเชื้อในการตรึงเซลล์บนตัวกลาง พลาสติก

3.4.2 การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก

การตรึงเซลล์จะใช้อาหาร Thiosulfate Broth หมุนเวียนในระบบปริมาตรรวม 15 ลิตร โดยภายในอาหารจะประกอบด้วยเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่มีผลทดสอบความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ที่ดีที่สุดจากข้างต้น 1.5 ลิตร นำเข้าสู่ระบบโดยปั้มน้ำหมุนเวียนอาหารในอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อวินาทีซึ่งเป็นอัตราที่น้ำกระจายทั่วถึงตัวกลางทั้งหมด การตรึงเซลล์ดำเนินภายใต้อุณหภูมิห้อง (30-32 °ซ) จะมีการเก็บตัวอย่างอาหารที่หมุนเวียนในระบบทุก 12 ชั่วโมง เพื่อคำนวณปริมาณของซัลเฟตและพีเอช โดยการตรึงเซลล์จะตรึงจนกระทั่งการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) และมีการเปลี่ยนอาหารเมื่อ พีเอชของอาหารเลี้ยงเชื้อต่ำกว่า 6 เพื่อรักษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Vikromvarasiri and Pisutpaisal, 2016)



รูปที่ 3.3 พลาสติกตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก (Abiotic Test)

เนื่องจากต้องการให้จุลินทรีย์ในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ใช้แหล่งพลังงานจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ ดังนั้นในอาหารที่ใช้หมุนเวียนในระบบในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก และการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ที่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก จะใช้อาหาร Thiosulfate Broth ที่ไม่มีการเติมไทโอซัลเฟต ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งพลังงานในช่วงของการคัดเลือกเชื้อจุลินทรีย์และการตรึงเซลล์ โดยของเหลวที่ใช้หมุนเวียนระบบจะถูกปั๊มขึ้นเพื่อฉีดบริเวณด้านบนสุดของตัวกลางที่จุลินทรีย์ยึดเกาะ ส่วนแก๊สจะไหลจากด้านล่างขึ้นสวนทางกับของเหลวที่ใช้หมุนเวียนระบบ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจะใช้อุณหภูมิห้อง (32-37 °C) ตลอดการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก ใช้อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพที่ 160 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของของเหลวหมุนเวียนอยู่ที่ 0.5 ลิตรต่อวินาทีซึ่งเป็นอัตราที่น้ำกระจายทั่วถึงตัวกลางทั้งหมด โดยดำเนินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีการวัดองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพภายหลังการบำบัดและวัดค่าพีเอชทุก ๆ 30 นาที

3.4.4 การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและค่าความจุการกำจัดออกที่สูงที่สุดในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพใช้อัตราการไหลของของเหลวหมุนเวียนอยู่ที่ 0.5 ลิตรต่อวินาทีซึ่งเป็นอัตราที่น้ำกระจายทั่วถึงตัวกลางทั้งหมด, อัตราการไหลของแก๊สที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมงและค่าระยะเวลาเวลากักเก็บในตัวกลางตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้าและค่า EBRT ที่ใช้ในการทดลอง

อัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้า (L/hr)	EBRT (min)
16	45.216
80	9.0432
160	4.5216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยดำเนินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อดูว่าเชื้อจุลินทรีย์ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้หรือไม่ หากเชื้อจุลินทรีย์ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สขึ้นเป็น 80 และ 160 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับในวันถัดไป สามารถดำเนินระบบเพื่อให้มีค่าความจุการกำจัดออกที่สูงที่สุด เนื่องจากในโรงงานผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ แก๊สชีวภาพจะถูกผลิตออกมาตลอดเวลา ดังนั้นระบบไบโอสครีบบเอร์ที่ใช้ควรมีความสามารถรับแก๊สชีวภาพได้สูงที่สุด

ในการทดลองมีการวัดองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพภายหลังการบำบัดทุกๆ 30 นาที วัดค่าพีเอชทุกๆ 1 ชั่วโมงและวัดปริมาณซัลเฟตเริ่มต้นและปริมาณซัลเฟตสุดท้าย โดยทดลองปรับอัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้า เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ พีเอช ปริมาณซัลเฟต อัตราการไหลแก๊สชีวภาพขาเข้า ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนและหลังการบำบัด ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และค่าความจุการกำจัดออกในระหว่างการดำเนินระบบไบโอสครีบบเอร์

3.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ ใช้วิธีของ Wawevu *et al.* (2008) ดังนี้

3.5.1 ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง (Empty Bed Retention Time) คือ ค่าเวลาที่แก๊สอยู่ภายในตัวกลางในระบบซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการดังนี้

$$EBRT = \frac{V:3600}{Q} \quad [s]$$

ซึ่ง V คือ ปริมาตรของตัวกลางในระบบซึ่งมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) และ
Q คือ อัตราการไหลของแก๊ส มีหน่วยเป็น $[m^3 h^{-1}]$

3.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal efficiency) คือ เศษส่วนของการกำจัดมลภาวะหรือของเสียในระบบที่แสดงออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$RE = \frac{C_{g-in} - C_{g-out}}{C_{g-in}} \times 100 \quad [\%]$$

ซึ่ง RE คือ ประสิทธิภาพการกำจัด, C_{g-in} คือ ปริมาณแก๊สขาเข้า และ
 C_{g-out} คือ ปริมาณแก๊สขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 ความจุการกำจัด (Elimination Capacity) คือ ค่าความจุการกำจัดของแก๊สจากปริมาณของมลภาวะหรือของเสียที่ถูกกำจัดต่อปริมาตรของระบบต่อเวลา ซึ่งความจุการกำจัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$EC = \frac{Q(C_{g-in} - C_{g-out})}{V} \text{ [ppm m}^{-3} \text{ h}^{-1}]$$

ซึ่ง C_{g-out} คือ ความเข้มข้นของมลภาวะหรือของเสียในแก๊สที่ออกมา มีหน่วยเป็น $[\text{ppm m}^{-3}]$

3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้ในขั้นการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดย Duncan's new multiple range (DMRT) ใช้โปรแกรม Statics version 24.0 (SPSS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Montgomery, 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้เทคนิค Spread plate โดยบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำโคลนที่เจริญบนจานเพาะเชื้อมาศึกษาทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา เพื่อแยกจุลินทรีย์ที่มีลักษณะต่างกัน พบว่าได้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งหมด 8 ชนิด ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เชื้อจุลินทรีย์ 8 ชนิด ที่คัดแยกได้จาก activated sludge

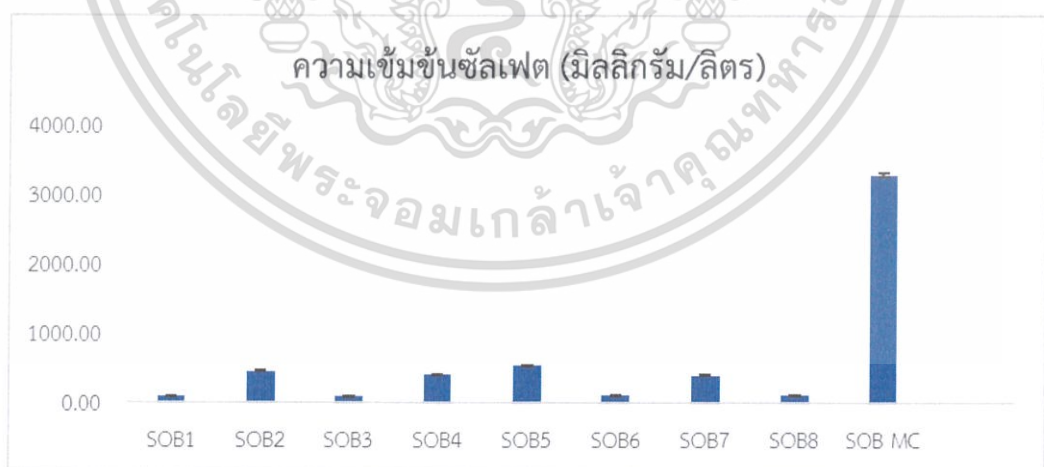
รหัสเชื้อ	ลักษณะเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์	การติดสีแกรม	ลักษณะเซลล์
SOB1		ลบ	เซลล์รูปกลม
SOB2		ลบ	เซลล์รูปท่อนสั้นมักอยู่เป็นคู่ ๆ
SOB3		ลบ	เซลล์รูปกลมผสมท่อน
SOB4		ลบ	เซลล์รูปท่อนสั้นมีการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่
SOB5		บวก	เซลล์รูปท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ) เชื้อจุลินทรีย์ 8 ชนิด ที่คัดแยกได้จาก activated sludge

รหัสเชื้อ	ลักษณะเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์	การติดสีแกรม	ลักษณะเซลล์
SOB6		ลบ	เซลล์รูปท่อนสั้น
SOB7		ลบ	เซลล์รูปท่อนสั้น
SOB8		ลบ	เซลล์รูปท่อน

จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 8 ชนิด และจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria โดยวิธี Turbidimetric method ซึ่งเป็นการวัดปริมาณซัลเฟตที่เกิดขึ้น โดยหากเชื้อจุลินทรีย์ตัวใดสามารถเปลี่ยนไทโอซัลเฟตเป็นซัลเฟตได้มาก ก็จะมีแนวโน้มที่จะสามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ปริมาณซัลเฟตที่เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดผลิตได้

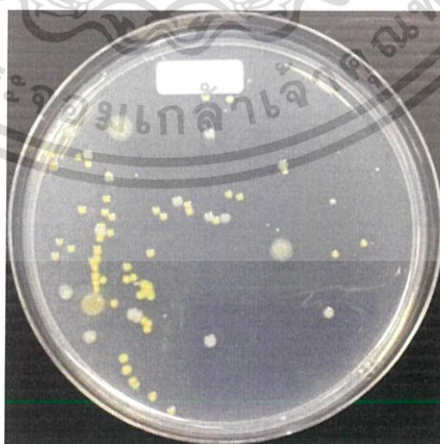
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณซัลเฟตที่เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดผลิตได้

รหัสเชื้อ	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)
SOB1	98.23 ^{es} ±2.45
SOB2	453.37 ^c ±3.74
SOB3	84.77 ^s ±2.12
SOB4	408.52 ^d ±3.08
SOB5	533.29 ^b ±3.08
SOB6	105.16 ^e ±4.3
SOB7	397.10 ^d ±3.08
SOB8	116.98 ^e ±3.08
SOB MC	3286.03 ^a ±30.78

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 4.2 แสดงว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ ได้แก่ เชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria แสดงในรูปที่ 4.2 รองลงมา คือ เชื้อจุลินทรีย์รหัส SOB 5 ซึ่งเหตุที่เชื้อจุลินทรีย์ผสมมีค่าความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์สูงกว่ามากนั้นอาจเกิดจากอันตรกริยาของเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial Interaction) ที่เชื้อจุลินทรีย์บางชนิดในระบบอาจมีประโยชน์ร่วมกันแบบพึ่งพา (Mutualism) กับเชื้อจุลินทรีย์อีกชนิดหนึ่ง (สารโรจน์, 2556)

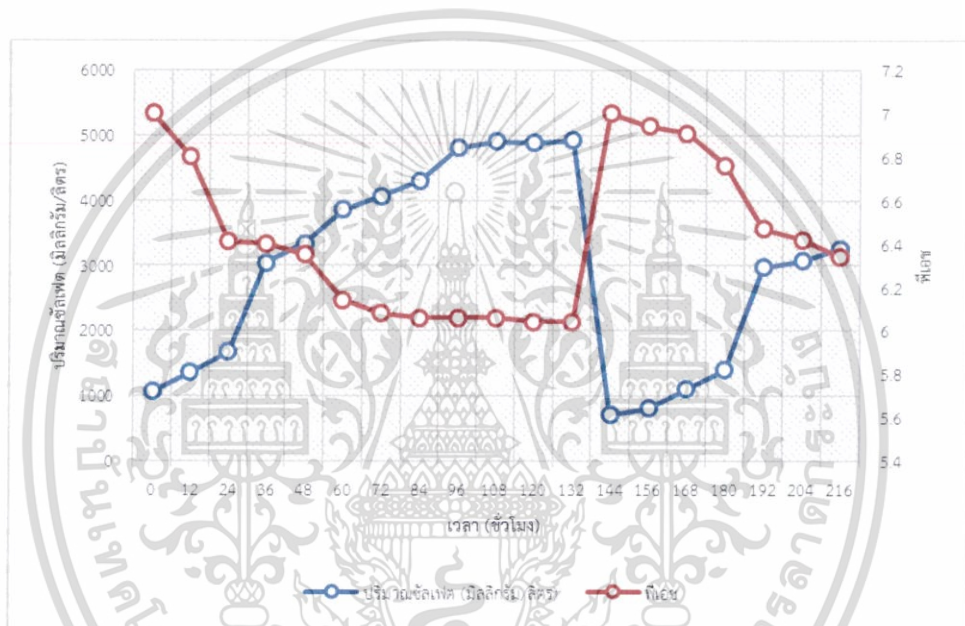


รูปที่ 4.2 เชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก

จากการทดลองตรึงเซลล์จะใช้อาหารไทโอซัลเฟตหมุนเวียนในระบบ โดยภายในอาหารจะประกอบด้วยเชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ที่มีความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์สูงสุดจากการทดลองก่อนหน้า ปริมาณการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 96 โดยมีปริมาณซัลเฟตสูงถึง 4,922.94 มิลลิกรัมต่อลิตร และในชั่วโมงที่ 144 พีเอชของระบบลดลงต่ำกว่า 6.0 มีการเปลี่ยนอาหารหมุนเวียนโดยไม่มีการเติมเชื้อจุลินทรีย์เพิ่ม พบว่าปริมาณซัลเฟตยังคงเพิ่มขึ้นซึ่งช่วยยืนยันได้ว่าเชื้อจุลินทรีย์นั้นได้ตรึงอยู่ในระบบแน่นอนแล้ว ความสัมพันธ์ของซัลเฟตและพีเอชระหว่างการตรึงเซลล์ในระบบไบโอสครีบบอร์แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของซัลเฟตและพีเอชระหว่างการตรึงเซลล์ในระบบไบโอสครีบบอร์

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าซัลเฟตและพีเอชมีความสัมพันธ์กันในระหว่างการตรึงเซลล์ โดยปริมาณซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นจากความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อระยะเวลาดำเนินไป ซึ่งระหว่างที่มีการเพิ่มซัลเฟตนั้นก็ส่งผลทำให้พีเอชของระบบลดลงจนกระทั่งจุดที่เกิดการสะสมของซัลเฟตสูง ทำให้จุลินทรีย์มีความสามารถในการเกิดออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ลดลง ปริมาณซัลเฟตจึงเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่และพีเอชก็มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเช่นเดียวกัน และเมื่อมีการเปลี่ยนอาหารหมุนเวียนระบบใหม่โดยไม่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์เพิ่ม ปริมาณซัลเฟตก็ยังคงเพิ่มขึ้นเช่นเดิม จึงเป็นการยืนยันได้ว่าเชื้อจุลินทรีย์ได้เกาะติดในระบบแล้ว ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Vikromvarasiri และ Pisutpaisal (2016) ที่ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ระบบไบโอทรินคคิ่งฟิลเตอร์ของเชื้อ *Halothiobacillus neapolitanus* NTV01 (HTN) ที่มีความสามารถในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยพบว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ คือ พีเอช และ ปริมาณซัลเฟต เนื่องจากหากต้องการที่จะให้เกิดการเจริญและการออกซิเดชันสูงสุดของเชื้อ จะต้องมีการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุก ๆ 48 ชั่วโมง มีการปรับพีเอชอาหารให้เท่ากับ 7.0 ทุก ๆ วันในการดำเนินระบบไบโอทรินคคิ่งฟิลเตอร์

4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก

จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพที่ 160 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของของเหลวหมุนเวียนอยู่ที่ 0.5 ลิตรต่อวินาทีซึ่งเป็นอัตราที่น้ำกระจายทั่วถึงตัวกลางทั้งหมด โดยดำเนินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีการวัดองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพภายหลังการบำบัด ทุก ๆ 30 นาทีด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best technic เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พีเอชและประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขาเข้า (ppm)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขาออก (ppm)	ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (%)	พีเอช
0	705	395	43.97	7.00
30	710	385	45.77	6.81
60	730	395	45.89	6.72
90	740	365	50.68	6.60
120	750	375	50.00	6.50
150	780	385	50.64	6.41
180	790	380	51.90	6.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มี การตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติกในระยะแรกจะลดลงและเริ่มคงที่ที่ประมาณร้อยละ 50 ซึ่งเหตุที่ระบบ ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก เกิดจากการที่ของเหลวในระบบดูดซึมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และ ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดลง

4.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

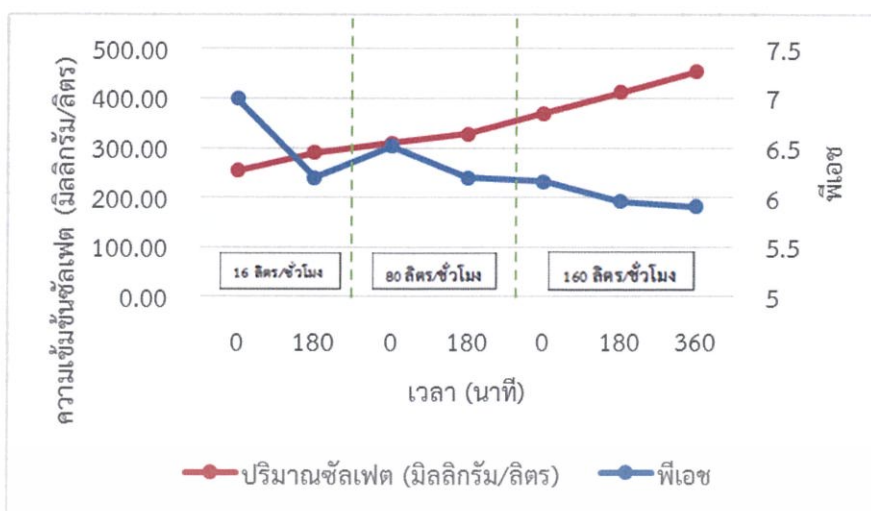
4.4.1 พีเอชและปริมาณซัลเฟต

จากการทดลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ พบว่าพีเอชในระบบจะอยู่ในช่วง 5.91-7 ส่วนปริมาณซัลเฟตอยู่ที่ 254.40 – 454.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสัมพันธ์ของพีเอชและปริมาณ ของซัลเฟตระหว่างการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยระบบไบโอสคริปเบอร์แสดงในรูปที่ 4.4 กล่าวคือ ในระหว่างการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ โดยปริมาณซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นจาก ความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อระยะเวลาดำเนินไป ซึ่งระหว่าง ที่มีการเพิ่มซัลเฟตนั้นก็ส่งผลทำให้พีเอชของระบบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ พีเอชและ ปริมาณซัลเฟตในช่วงของการตรึงเซลล์แต่การเกิดของซัลเฟตเกิดในปริมาณน้อยกว่า เนื่องจากในช่วงของ การตรึงเซลล์มีการดำเนินระบบอย่างต่อเนื่อง เชื้อจุลินทรีย์มีการใช้อาหารไทโอซัลเฟตที่เป็นแหล่ง พลังงาน แต่ในช่วงที่ทำการทดลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพเชื้อจุลินทรีย์จะใช้ ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแหล่งพลังงาน แต่การดำเนินระบบในช่วงนี้ไม่สามารถดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ จุลินทรีย์คลาดแคลนแหล่งพลังงาน จึงมีความสามารถในการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ได้น้อยกว่า



นอกจากนี้การลดลงของพีเอชยังเกิดจากการที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกดูดซึมโดยของเหลวที่ใช้ หมุนเวียนระบบจากการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ ในชั่วโมงที่ 0 ค่าพีเอชของอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ที่ พีเอช 7 ทำให้เกิดการแตกตัวให้โปรตอน (H^+) เนื่องจากค่า pKa ของไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ 6.97-7.06 ที่ 25 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 4.1 (Li and Lancaster, 2013) อย่างไรก็ตามในช่วงที่มีหยุดการดำเนิน ระบบและมีการเปลี่ยนอัตราการไหลเข้าของแก๊สชีวภาพจาก 16 ลิตรต่อชั่วโมง เป็น 80 ลิตรต่อชั่วโมงใน วันถัดมา พีเอชของระบบมีการเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกดูดซึมโดย ของเหลวที่ใช้หมุนเวียนระบบระเหยออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



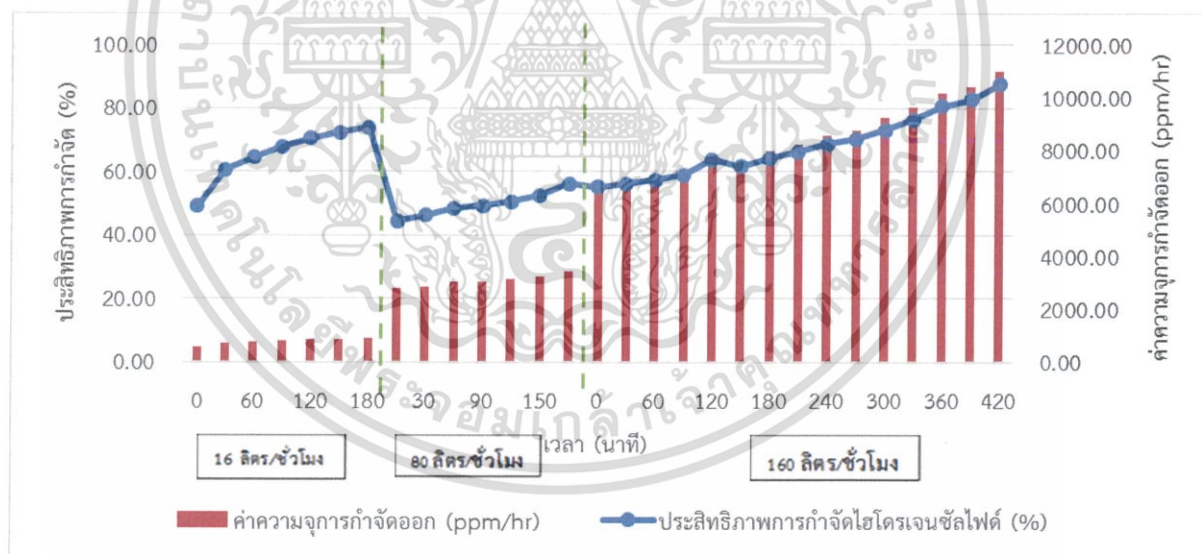
รูปที่ 4.4 พีเอชและปริมาณของซัลเฟตระหว่างการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยระบบไบโอสครีบบอร์

4.4.2 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าความจุการกำจัดออก

จากการทดลองการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าความจุการกำจัดออก ของระบบไบโอสครีบบอร์แสดงในรูปที่ 4.5 โดยค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กับอัตราแก๊สชีวภาพที่เข้าในระบบและค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง (EBRT) โดยในระยะแรกอัตราแก๊สชีวภาพเข้าระบบอยู่ที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมง (EBRT อยู่ที่ 45.216 นาที) ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 49.16 – 74, ค่าความจุการกำจัดออก $583.86 - 882.43 \text{ ppm m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ โดยในช่วง 30 นาทีแรกจะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลจากการที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกดูดซับโดยของเหลวที่หมุนเวียนระบบ จากนั้นค่าประสิทธิภาพในการกำจัดและค่าความจุการกำจัดออก ยังคงสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในการทดลองวันถัดมาจึงได้เพิ่มอัตราแก๊สชีวภาพเข้าในระบบเป็น 80 ลิตรต่อชั่วโมง (EBRT อยู่ที่ 9.0432 นาที) ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 44.50 – 56.22, ค่าความจุการกำจัดออก $2819.80 - 3450.11 \text{ ppm m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ซึ่งแสดงว่าค่าความจุการกำจัดออกเพิ่มขึ้นซึ่งก็เป็นไปตามความสัมพันธ์ของค่าความจุการกำจัดออกที่แปรผันตามอัตราแก๊สชีวภาพ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบที่ลดลงนั้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราแก๊สชีวภาพ จะส่งผลต่อค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลางลดลง ทำให้เวลาในการเกิดการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอ์ที่จะเกิดบริเวณตัวกลางพลาสติกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Potivichayanon *et al.* (2006) ที่ได้ทำการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ระบบพิกซ์ฟิล์มไบโอสครีบบอร์ แล้วพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราการไหลเข้าของแก๊สที่ต้องการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลที่ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดยังสามารถเพิ่มขึ้นได้เรื่อย ๆ แสดงว่าเชื้อจุลินทรีย์ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ในการทดลองวันถัดมาจึงได้เพิ่มอัตราแก๊สชีวภาพเข้าในระบบเป็น 160 ลิตรต่อชั่วโมง (EBRT อยู่ที่ 4.52 นาที) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพสูงสุดในการทดลองนี้และได้ทำการทดลองโดยใช้เวลาที่มากขึ้น คือ ดำเนินระบบต่อเนื่อง 7 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงที่สุดที่ร้อยละ 87.37, ค่าความจุการกำจัดออกสูงถึง $11,013.80 \text{ ppm m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ และหากสามารถดำเนินระบบยาวนานขึ้น ก็มีความเป็นไปได้ที่ระบบจะสามารถกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ทั้งหมด นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่อัตราแก๊สชีวภาพเข้านี้ ในชั่วโมงที่ 0 มีประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชั่วโมงที่ 3 ของอัตราการไหลที่ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งก็เป็นผลมาจากการที่จุลินทรีย์ในระบบมีการเจริญเพิ่มมากขึ้น เพราะได้ทำการทดลองคนละวันกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของสิริวัฒน์ (2550) ที่ได้ศึกษาการใช้ระบบกรองชีวภาพแบบมีน้ำหล่อในการบำบัดอากาศเสียจากโรงงานไฟฟ้า พบว่าระบบกรองชีวภาพแบบมีน้ำหล่อสามารถนำไปใช้ในการบำบัดแก๊สไนตริกออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าได้โดยใช้ โซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นแหล่งพลังงาน ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 ในวันแรกเป็นมากกว่าร้อยละ 95 ในวันที่ 3 ของการทดลอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพจะเนื่องมาจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เจริญเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และค่าความจุการกำจัดออกของระบบไบโอสครับเบอร์ ที่อัตราไหลของแก๊สต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาหาเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงที่สุด เมื่อนำไปตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติกใช้เวลาทั้งหมด 96 ชั่วโมง ปริมาณซัลเฟตในระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถทนต่อปริมาณซัลเฟตได้ถึง 4,922.94 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อศึกษาพารามิเตอร์ของกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ พบว่า ค่าพีเอชและปริมาณซัลเฟตมีความสัมพันธ์กันในช่วงการตรึงเซลล์และการกำจัดกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยถ้ามีปริมาณซัลเฟต ค่าพีเอชจะลดลง ค่าอัตราการไหลเข้าของแก๊สชีวภาพ, ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลาง ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ค่าความจุการกำจัดออก มีความสัมพันธ์กัน คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอัตราการไหลเข้าของแก๊สชีวภาพลดลง, ค่าระยะเวลาการกักเก็บในตัวกลางเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความจุการกำจัดออกจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอัตราการไหลเข้าของแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น และเมื่อนำระบบไบโอสคริปเบอร์ไปใช้ในการของกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ พบว่าที่อัตราการนำเข้าแก๊สชีวภาพ 160 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงที่สุดที่ร้อยละ 87.37 ค่าความจุการกำจัดออกสูงถึง 11,013.80 ppm m⁻³ h⁻¹ ที่การทดลองในชั่วโมงที่ 7 ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดการทดลองและหากสามารถดำเนินระบบยาวนานขึ้น ก็มีความเป็นไปได้ที่ระบบจะสามารถกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาความสัมพันธ์กันของเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial Interaction) ของเชื้อจุลินทรีย์ผสมในกลุ่ม Sulfur Oxidizing Bacteria ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เหตุใดจึงมีความสามารถในการเกิดออกซิเดชันซัลเฟตได้ดีที่สุด

2. การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ มีระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นมากเพียง 3-7 ชั่วโมงซึ่งแตกต่างกับการใช้จริงในอุตสาหกรรม ที่จะทำค่อนข้างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงควรเพิ่มระยะเวลาการทดลองเพื่อให้เห็นความสอดคล้องกับการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุม คุณภาพ และการใช้แก๊สชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงาน.
- จรัญ บุญกาญจน์, รัตนา จริยาบุรณ์, สุदारัตน์ ถิ่นจะนะ และพรพิมล แสนสุข. 2557. “การกำจัด ไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือนโดยการดูดซึมทางเคมีด้วยสารละลาย คีเลทไอออน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปัทมา อรุณราช, จรัญ บุญกาญจน์ และจันทิมา ชั่งสิริพร. 2552. “การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการ ดูดซึมและปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโปแทสเซียม เปอร์แมงกานेटในหอดูดซึมแบบแพค.” หน้า 114. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. สงขลา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วรรณพร วัฒนสุนทร, วิษณุ สีโหน, เฉลิมชัย เรืองชัยนิคม, ปัญญามี สัจจกมล, อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกูล และวรุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล. 2557. “การลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ ผลิตแก๊สด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว.* 30(2) : 187-202.
- สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล. (2556). วิศวกรรมกระบวนการหมัก. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- สิริภรณ์ โพธิ์วิชานนท์. 2553. “การพัฒนาความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการกำจัดกลิ่นในรูปของ แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์โดยใช้ระบบฟ็อกซ์-ฟิล์มไบโอสคริปเบอร์.” รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
- สิริวัฒน์ จินศิริวานิชย์. (2550). “การใช้ระบบกรองชีวภาพแบบมีน้ำหล่อในการบำบัดอากาศเสียจาก โรงงานไฟฟ้า.” หน้า 763-767. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อมรพล ช่างสุพรรณ. 2557. “เทคโนโลยีการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยระบบการกรองชีวภาพ.” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.* 62(194) : 36-37.
- Ahlborg, G. 1951. “Hydrogen Sulfide Poisoning in Shale Oil Industry.” *Archives of Industrial Hygiene and Occupational Medicine.* 3 : 247-266.
- Amoore, J. E., and Hautala, E. 1983. “Odor as an Aid to Chemical Safety Odor Thresholds Compared with Threshold Limit Values and Volatilities for 214 Industrial Chemicals in Air and Water Dilution.” *Journal of Applied Toxicology.* 3(6) : 272-290.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- APHA. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th (Ed). Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Beauchamp, R.O. , Bus, J.S, Popp, J.A., Boreiko, C.J. and Andjelkovich, D.A. 1984. "A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity." *Critical Reviews in Toxicology*. 13 : 25-97.
- Bhambhani, Y. and Singh, M. 1991. "Physiological Effects of Hydrogen Sulfide Inhalation during Exercise in Healthy Men." *Journal of Applied Physiology*. 71 : 1872-1877.
- Bhambhani, Y. Burnham, R., Snydmiller, G. MacLean, I. and Martin, T. 1996. "Effects of 5 ppm Hydrogen Sulfide Inhalation on Biochemical Properties of Skeletal Muscle in Exercising Men and Women." *American Industrial Hygiene Association Journal*. 57 : 464-468.
- Bhambhani, Y. Burnham, R., Snydmiller, G., and MacLean, I. 1997. "Effects of 10-ppm Hydrogen Sulfide Inhalation in Exercising Men and Women." *Cardiovascular, metabolic, and biochemical responses Journal of Occupational Environmental Medicine*. 39(2) : 122-129
- Guidotti, T. 2015 "Hydrogen sulfide intoxication," *Handbook of Clinical Neurology* 131: 111-133.
- Gusseme, B. D., Schryver, P. D., Cooman, M. D., Verbeken, K., Boeckx, P., Verstraete, W. and Boon, N. 2009. " Nitrate-Reducing, Sulfide-Oxidizing Bacteria as Microbial Oxidants for Rapid Biological Sulfide Removal." *Federation of European Microbiological Societies*. 67 : 151-161.
- Haveman, S. A., Greene, E. A. and Voordouw, G. 2005. "Gene Expression Analysis of the Mechanism of Inhibition of *Desulfovibrio vulgaris hildenborough* by Nitrate-Reducing Sulfide-Oxidizing Bacteria." *Environmental Microbiology*. 7(9) : 1461-1465.
- Hirsch, A. R. and Zavala, G. 1999. "Long Term Effects on the Olfactory System of Exposure to Hydrogen Sulfide." *Occupational and Environmental Medicine*. 56 : 284-287.
- Jappinen, P., Vikka, V., Marttila, O. and Haahtela, T. 1990. "Exposure to Hydrogen Sulfide and Respiratory Function." *British Journal of Industrial Medicine*. 47 : 824-828.
- Li, Q. and J. R. Lancaster, Jr. 2013. "Chemical Foundations of Hydrogen Sulfide Biology." *Nitric Oxide*. 35 : 21-34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Liu, W. Liang, C. Chen, J. and Zhu, L. 2013. "Effect of Operating Parameters on Sulfide Biotransformation to Sulfur." *Journal of Environmental Sciences*. 25(12) : 2417–2421
- Montgomery, Douglas C. 1997. **Design and Analysis of Experiments**. 4th ed. New York : John Wiley & Sons.
- Nishimura, S. and Yoda, M. 1997. "Removing Hydrogen Sulfide from Anaerobic Biogas using a Bio-scrubber." *Water Science and Technology*. 36(6-7) : 349-356
- Patnaik. 2002. **Handbook of Inorganic Chemicals**. McGraw-Hill. New York.
- Potivichayanon, S., Pokethitiyook, P. and Kruatrachue, M. 2006. "Hydrogen Sulfide Removal by a Novel Fixed-film Bioscrubber System." *Process Biochemistry*. 41(3) : 708–715.
- Samuel, P. O. 2014. "Production of Biogas from Perennial and Biennial Crop Wastes: Peach Palm and Banana's Wastes as Alternative Biomass in Energy Generation and Environmental Sustainability." *American Journal of Environmental Engineering*. 5(4) : 79-89.
- Spolyar, L. W. 1951. "Three Men Overcome by Hydrogen Sulfide in Starch Plant." *Industrial Health Monthly*. 11 : 16-117.
- Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P. and Beland, M. 2006. "Removal of Hydrogen Sulfide from Gas Streams Using Biological Processes - A Review." *Canadian Biosystems Engineering* 48 : 2.1-2.14.
- Tchobanoglous, G. and Burton, L. F. 1991. **Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse**. 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Vanhoome, M., de Rouck, A., and de Bacquer, D. 1995. "Epidemiological Study of Eye Irritation by Hydrogen Sulphide and/or Carbon Disulphide Exposure in Viscose Rayon Workers." *Annals of Occupational Hygiene*. 39 : 307-315.
- Vikromvarasiri, N. and N. Pisutpaisal. 2016. "Hydrogen Sulfide Removal in Biotrickling Filter System by *Halothiobacillus neapolitanus*." *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(35) : 15682-15687.
- Waweru, M., Herrygers, V., Van Langenhove, H. and Verstraete, W. 2008. "Process Engineering of Biological Waste Gas Purification." 259-272. in. H.-J. Rehm, G. Reed, A. Pühler and P. Stadler. **Biotechnology: Environmental Processes**. Volume 11c. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Zerbonia, R. , Spivey J.A., Agarwal S.J., Damle A.K. and Sanford, C.W. 1995. "Survey of Control Technologies for Low Concentration Organic Vapor Gas Streams.". New York : Control Technology Center U.S. Environmental Protection Agency.
- Zicari, S.M. 2003. "Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas using Cow-manure Compost." A Thesis of the Graduate School of Cornell University, United State



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

อาหารเลี้ยงเชื้อ

สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ Thiosulfate

KH_2PO_4	2.0	กรัม/ลิตร
K_2HPO_4	2.0	กรัม/ลิตร
NH_4Cl	0.4	กรัม/ลิตร
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.2	กรัม/ลิตร
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.01	กรัม/ลิตร
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	8.0	กรัม/ลิตร

ขั้นตอนการเตรียม

ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดเติมน้ำกลั่นละลายส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ปรับปริมาตรสุดท้ายตามปริมาตรที่ต้องการ ปรับพีเอช ให้เป็น 7.0 ถ้าอาหารเป็นกรดหรือต่างมากเกินไปให้ปรับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนได้พีเอช ประมาณ 7.0 หากต้องการใช้เป็นอาหารแข็งให้เติม Bacto Agar 18 กรัม/ลิตร แล้วจึงนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอ(Autoclave) ที่ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient broth (NB)

Beef extract	3.0	กรัม/ลิตร
Peptone	5.0	กรัม/ลิตร

ขั้นตอนการเตรียม

ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดเติมน้ำกลั่นละลายส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ปรับปริมาตรสุดท้าย ตาม ปริมาตรที่ต้องการ ปรับพีเอช ให้เป็น 7.0 ถ้าอาหารเป็นกรดหรือต่างมากเกินไปให้ปรับด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนได้พีเอช ประมาณ 7.0 แล้วจึงนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอ(Autoclave) ที่ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์

1. การวัดปริมาณซัลเฟตด้วยวิธี Turbidimetric Method (APHA, 1998)

หลักการ

วิธีนี้ BaSO_4 จะตกตะกอนและอยู่ในรูปคอลลอยด์ซึ่งทำได้โดยการเติม BaCl_2 ใน acid medium (HCl) ซึ่งมี glycerol อยู่วัด absorbance ของ BaSO_4 suspension โดยใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) วิธีนี้ต้องทำ calibration curve เพื่ออ่านค่าซัลเฟตของตัวอย่าง เป็นวิธีที่ไวและใช้กันมาก โดยเฉพาะกับตัวอย่างที่มีซัลเฟตน้อย สำหรับปริมาณซัลเฟตที่มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจใช้วิธีนี้ได้โดยใช้ตัวอย่างให้น้อยลงแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในการทำทุกครั้งควรทำ standard ควบคู่ไปด้วย ข้อเสียของวิธีนี้ คือ สีและสารห้อยแขวนที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำเป็นจำนวนมากจะขัดขวางการหา แต่อาจกำจัดได้โดยการกรอง โดยวิธีนี้สามารถหาซัลเฟตได้น้อยถึง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Magnetic Stirrer และ Magnetic bar
2. Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
3. Stop-watch
4. ซ้อนตวงที่มีความจุ 0.2-0.3 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. Conditioning reagent ให้ผสมกลีเซอรอล 50 มิลลิลิตร กับ สารละลายที่ประกอบด้วยกรดเกลือเข้มข้น 30 มิลลิลิตร น้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร 95% เอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร และ โซเดียมคลอไรด์ 75 กรัม
2. BaCl_2 crystal 20-30 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารละลายมาตรฐานซัลเฟต โดยการละลาย Na_2SO_4 (anhydrous) 147.9 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร หรือโดยการนำกรดกำมะถัน 0.02 นอร์มอล มา 10.41 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

1 มิลลิลิตร = 100 ไมโครกรัมซัลเฟต

วิธีการวิเคราะห์

1. Formation of BaSO_4 Turbidity

นำตัวอย่างมา 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำ Conditioning reagent 5 มิลลิลิตร ผสมและคนค่อยๆ เติมน้ำ BaCl_2 crystal 1 ช้อน จับเวลาพอได้ 1 นาที ให้หยุดคนทันที

2. Measurement of BaSO_4 Turbidity

เทสารละลายจากข้อ 1 ลงใน absorption cell ของ Spectrophotometer วัดค่าความขุ่นทุกๆ 30 วินาทีที่ 420 นาโนเมตร เป็นเวลา 4 นาที ทั้งนี้เพราะ maximum turbidity จะเกิดขึ้นที่ 2 นาที และจะอยู่ตัวไปถึง 10 นาที ให้เอาค่าที่อ่านได้มากที่สุดภายใน 4 นาที

3. Preparation of calibration curve

เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0 10 15 20 25 30 35 40 มิลลิลิตรต่อลิตร (ถ้ามากกว่า 40 มิลลิลิตร ความแน่นอนของวิธีนี้จะลดลง) โดยการบีบอัด 0 10 15 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่เตรียมไว้ใส่ในขวดรูปกรวยแล้วเติมน้ำจนได้ปริมาตรแต่ละขวดเป็น 100 มิลลิลิตร และทำทุกอย่างเหมือนตัวอย่าง

4. Correction of sample color and turbidity

โดยการทำให้ blank เหมือนตัวอย่างแต่ไม่ต้องเติมน้ำ BaCl_2

5. การคำนวณ (Calculation)

$$\text{ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม)} \times 1,000}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

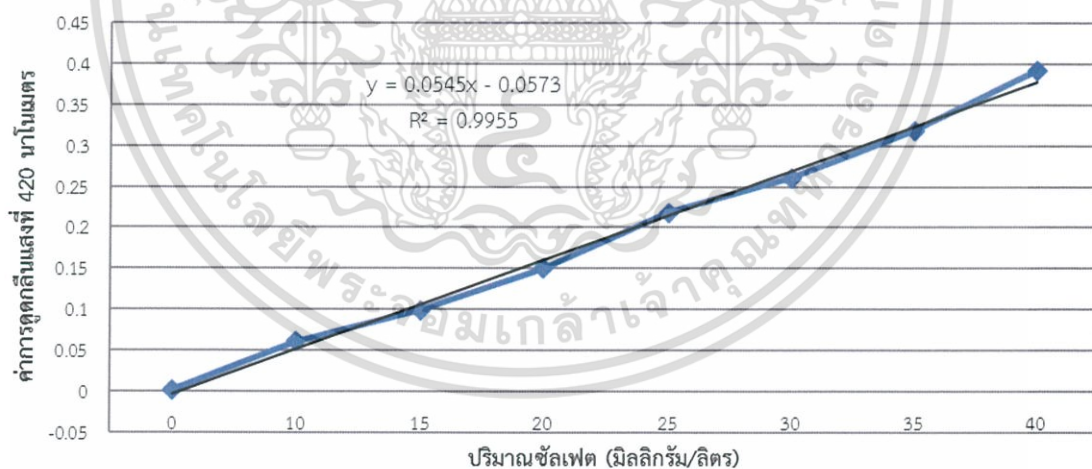
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่เป็นข้อมูลดิบ

การทำการกราฟมาตรฐานปริมาณซัลเฟต

ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร
0	0.002
10	0.061
15	0.099
20	0.15
25	0.218
30	0.261
35	0.319
40	0.392



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

ซ้ำที่ 1

ปริมาตรที่ใช้วัด (มิลลิลิตร)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.473394495	98.22629969
15	6.812844037	454.1896024
15	1.234862385	82.32415902
15	6.133944954	408.9296636
1.5	3.656880734	2437.920489
15	8.005504587	533.7003058
15	1.583486239	105.5657492
15	5.950458716	396.6972477
15	1.748623853	116.5749235
1.5	4.92293578	3281.957187

ซ้ำที่ 2

ปริมาตรที่ใช้วัด (มิลลิลิตร)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.510091743	100.6727829
15	6.849541284	456.6360856
15	1.289908257	85.99388379
15	6.170642202	411.3761468
1.5	3.730275229	2486.850153
15	8.042201835	536.146789
15	1.63853211	109.235474
15	6.005504587	400.3669725
15	1.803669725	120.2446483
1.5	4.977981651	3318.654434

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้ำที่ 3

ปริมาตรที่ใช้วัด (มิลลิลิตร)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.436697248	95.77981651
15	6.739449541	449.2966361
15	1.289908257	85.99388379
15	6.078899083	405.2599388
1.5	3.63853211	2425.688073
15	7.950458716	530.030581
15	1.510091743	100.6727829
15	5.913761468	394.2507645
15	1.711926606	114.1284404
1.5	4.886238532	3257.492355

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
SOB1	3	98.2263	2.44648	1.41248	92.1489	104.3037	95.78	100.67
SOB2	3	453.3741	3.73706	2.15760	444.0907	462.6575	449.30	456.64
SOB3	3	84.7706	2.11872	1.22324	79.5075	90.0338	82.32	85.99
SOB4	3	408.5219	3.07842	1.77733	400.8747	416.1691	405.26	411.38
SOB5	3	533.2926	3.07842	1.77733	525.6453	540.9398	530.03	536.15
SOB6	3	105.1580	4.29588	2.48023	94.4864	115.8296	100.67	109.24
SOB7	3	397.1050	3.07842	1.77733	389.4578	404.7522	394.25	400.37
SOB8	3	116.9827	3.07842	1.77733	109.3354	124.6299	114.13	120.24
SOBMC	3	3286.0347	30.78424	17.77329	3209.5624	3362.5069	3257.49	3318.65
Total	27	609.2740	979.43580	188.49251	221.8221	996.7259	82.32	3318.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	24939599.646	8	3117449.956	27280.362	.000
Within Groups	2056.941	18	114.275		
Total	24941656.587	26			

Duncan

Bact	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
SOB3	3	84.7706					
SOB1	3	98.2263	98.2263				
SOB6	3		105.1580				
SOB8	3		116.9827				
SOB7	3			397.1050			
SOB4	3			408.5219			
SOB2	3				453.3741		
SOB5	3					533.2926	
SOBMC	3						3286.0347
Sig.		.141	.056	.207	1.000	1.000	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรึงเซลล์ด้วยระบบไบโอสคริปเบอร์

เวลา (ชั่วโมง)	Ab 420 nm	ปริมาตรที่ใช้วัด (ml)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช
0	0.232	5	5.308256881	1061.651376	7
12	0.312	5	6.776146789	1355.229358	6.8
24	0.399	5	8.372477064	1674.495413	6.41
36	0.357	2.5	7.601834862	3040.733945	6.4
48	0.398	2.5	8.35412844	3341.651376	6.35
60	0.363	2	7.711926606	3855.963303	6.14
72	0.386	2	8.133944954	4066.972477	6.08
84	0.294	1.5	6.44587156	4297.247706	6.06
96	0.335	1.5	7.198165138	4798.776758	6.06
108	0.21	1	4.904587156	4904.587156	6.06
120	0.209	1	4.886238532	4886.238532	6.04
132	0.211	1	4.92293578	4922.93578	6.04
144	0.136	5	3.546788991	709.3577982	7
156	0.164	5	4.060550459	812.1100917	6.94
168	0.244	5	5.528440367	1105.688073	6.91
180	0.325	5	7.014678899	1402.93578	6.76
192	0.348	2.5	7.436697248	2974.678899	6.47
204	0.361	2.5	7.675229358	3070.091743	6.42
216	0.298	2	6.519266055	3259.633028	6.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า (ppm)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก (ppm)
0	705	395
30	710	385
60	730	395
90	740	365
120	750	375
150	780	385
180	790	380

เวลา (ชั่วโมง)	Ab 420 nm	ปริมาตรที่ใช้วัด (ml)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช
0	0.051	20	1.987155963	99.35779817	7
3	0.052	20	2.005504587	100.2752294	6.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่มีการตรึงเซลล์บน
ตัวกลางพลาสติก ที่อัตราการไหลของแก๊ส 16 ลิตร/ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า (ppm)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก (ppm)
0	895	455
30	900	355
60	900	320
90	900	290
120	900	265
150	900	250
180	900	235

เวลา (ชั่วโมง)	Ab 420 nm	ปริมาตรที่ใช้ วัด (ml)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช
0	0.22	20	5.088073394	254.4036697	7
3	0.26	20	5.822018349	291.1009174	6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก ที่อัตราการไหลของแก๊ส 80 ลิตร/ชั่วโมง

เวลา (นาท)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า (ppm)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก (ppm)
0	955	530
30	930	500
60	940	485
90	935	475
120	930	460
150	925	440
180	925	405

เวลา (ชั่วโมง)	Ab 420 nm	ปริมาตรที่ใช้วัด (ml)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช
0	0.196	15	4.647706422	309.8470948	6.52
3	0.211	15	4.92293578	328.1957187	6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพของคอลัมน์ควบคุมที่มีการตรึงเซลล์บนตัวกลางพลาสติก ที่อัตราการไหลของแก๊ส 160 ลิตร/ชั่วโมง

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า (ppm)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก (ppm)
0	925	415
30	925	405
60	925	395
90	925	380
120	925	335
150	925	355
180	935	335
210	935	315
240	940	295
270	940	280
300	950	255
330	950	225
360	950	185
390	950	165
420	950	120

เวลา (ชั่วโมง)	Ab 420 nm	ปริมาตรที่ใช้วัด (ml)	$x=(y+0.0573)/0.0545$	ปริมาณซัลเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช
0	0.245	15	5.546789	369.7859	6.16
3	0.28	15	6.188991	412.5994	5.96
6	0.314	15	6.812844	454.1896	5.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้