การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ โดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

TREATMENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING A SEMI-CONTINUOUS OPERATING BIOFILTER

ณัฐชยาพร เรืองฤทธิ์

ณัฐธัญ แขจังหรีด

ทรงพล ทองมี

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TREATMENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING A SEMI-CONTINUOUS OPERATING BIOFILTER

NUTCHAYAPORN RUANGRIT
NATTHAN KHAECHANGRIT
SONGPON THONGMEE

COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง TREATMENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN THE ATMOSPHERE BY USING A SEMI-CONTINUOUS OPERATION BIOFILTERS
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐชายพร เรืองฤทธิ์ รหัสนักศึกษา 59050551 นายณัฐธัญ แขจังหรีด รหัสนักศึกษา 59050552 นายทรงพล ทองมี รหัสนักศึกษา 59050558
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
นางสาวพัชรินทร์ เงินใบอ่อน กรรมการ	Patchanin N.
ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐชายพร	เรืองฤทธิ์	รหัสนักศึกษา	59050551
	นายณัฐธัญ	แขจังหรีด	รหัสนักศึกษา	59050552
	นายทรงพล	ทองมี	รหัสนักศึกษา	59050558
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2562			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์			

บทคัดย่อ

รายงานสหกิจศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ระหว่างเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ และเครื่องกรองชีวภาพระดับนำร่อง ซึ่งมีขนาด 10.35 และ 34 ลิตร ตามลำดับ โดยใช้ตัวกลางหลัก ได้แก่ ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่ และถ่านกัมมันต์ ตัวกลางเสริม ได้แก่ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย บรรจุตัวกลางลงเครื่องกรองชีวภาพ ชั้นของตัวกลางแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างบรรจุตัวกลางผสม (ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่, กาบมะพร้าว ไบโอมีเดีย) ในอัตราส่วนตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริม 60:40 โดยปริมาตร ชั้นบนบรรจุตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์ ทำการจำลองสถานการณ์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแรกเข้าระบบกรองชีวภาพเท่ากับ 4.0 ส่วนในล้านส่วน (ppm_v) ใช้เวลากักพัก (Empty Bed Residence Time, EBRT) 60 วินาที เวลาการพักระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration Rest Time, BRT) ที่ 15, 30 และ 45 นาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ดีที่สุดของเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ ณ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 30 นาที เท่ากับ 94.50% และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ดีที่สุดของเครื่องกรองชีวภาพระดับนำร่อง ณ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 30 นาที เท่ากับ 95.10%

คำสำคัญ : สารอินทรีย์ระเหยง่าย, เครื่องกรองชีวภาพ, เวลากักพัก, เวลาการพักระบบกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Treatment of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere by Using a Semi-Continuous Operating Biofilter			
Students	Miss.Nutchayaporn	Ruangrit	Student ID	59050551
	Mr.Natthan	Khaechangrit	Student ID	59050552
	Mr.Songpon	Thongmee	Student ID	59050558
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)			
Department	Chemistry			
Faculty	Science			
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)			
Academic Year	2019			
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak			

Abstract

This cooperative education report aims to treatment Volatile Organic Compounds (VOCs) by using a semi-continuous biofilters. Comparative study of the treatment efficiency of VOCs between the laboratory-scale biofilter and the pilot-scale biofilter. Which measures 10.35 and 34 liters respectively. The main media, such as compost, chicken manure and activated carbon were used. The two supported media coconut coir and bio-media were packed. The biofilter was divided into two layers. The lower layer contained with mixed media (compost, chicken manure, coconut coir, bio-media) and support media at the ratio of main media 60:40 by volume. The top layer contained activated carbon. Simulated the concentration of the first VOCs into the biofilter system equal to 4.0 ppm_v with empty bed residence time (EBRT) 60 seconds and biofiltration rest time (BRT) at 15, 30 and 45 minutes. The result showed that the treatment efficiency of VOCs was the best of the laboratory-scale biofilter at 30 minutes of biofiltration rest time equal to 94.50% and the treatment efficiency of VOCs was the best of the pilot-scale biofilter at 30 minutes of biofiltration rest time equal to 95.10%

Keywords : Volatile Organic Compounds (VOCs), Biofilter, Empty Bed Residence Time (EBRT), Biofiltration Rest Time (BRT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาช่วยเหลือในหลากหลายด้าน ตลอดระยะเวลาการทำโครงงานสหกิจศึกษา จากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ ที่ปรึกษาโครงงานสหกิจศึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ข้อควรปรับปรุงแก้ไขและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงงานสหกิจศึกษาทุกขั้นตอน ตลอดจนสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำโครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ และคุณพัชรินทร์ เงินใบอ่อน กรรมการผู้คุมสอบ ที่กรุณาสละเวลาในการสอบโครงงานสหกิจศึกษานี้และให้คำแนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่อง ซึ่งเป็นแนวทางที่ทำให้โครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณรุ่งโรจน์ จิวะสุรัตน์ และ คุณธนภพ เลิศมหาฤทธิ์ ที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำโครงงานสหกิจศึกษา รวมทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในหน่วยงานสิ่งแวดล้อม ณ บริษัท สยามคูโบต้า คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่เอื้อเฟื้อน้ำใจ คอยช่วยเหลือ และดูแลเอาใจใส่ในด้านต่าง ๆ เสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และแนะนำในการทำโครงงานสหกิจศึกษานี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่มอบความช่วยเหลือเป็นกำลังใจและสนับสนุนในด้านต่าง ๆ อันทำให้โครงงานสหกิจศึกษานี้สำเร็จด้วยดี

ณัฐชยาพร เรืองฤทธิ์
ณัฐธัญ แขจังหรีด
ทรงพล ทองมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds VOCs) 4

2.1.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย/สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย 4

2.1.2 ประเภท คุณสมบัติ และที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 5

2.1.3 แหล่งกำเนิดและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 10

2.2 กระบวนการกรองทางชีวภาพ 12

2.3 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองทางชีวภาพ (Mechanism of biofiltration) 18

2.3.1 การเคลื่อนที่ของก๊าซ (Gas Transfer) 18

2.3.2 วัฏภาคน้ำ (The water phase) 20

2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants) 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษ (Contaminant Biodegradation) 21
2.3.5 สารที่เกิดขึ้น (Product Generation)..... 23
2.3.6 ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat generation)..... 23
2.4 หลักการในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม 24
2.4.1 ปริมาณธาตุอาหารอนินทรีย์..... 24
2.4.2 ปริมาณสารอินทรีย์ 24
2.4.3 ลักษณะการดูดซับและความพรุน 25
2.4.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย 25
2.4.5 สมบัติทางกลศาสตร์..... 25
2.4.6 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลางและอายุการใช้งาน..... 25
2.4.7 การกำจัดตัวกลางที่หมดอายุการใช้งาน..... 26
2.5 ประเภทของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ..... 26
2.5.1 ตัวกลางดิน (Soil bed)..... 26
2.5.2 ตัวกลางวัสดุหมัก (Compost material) 26
2.5.3 ตัวกลางสารอนินทรีย์ (Inorganic material) 26
2.5.4 ตัวกลางสังเคราะห์ (Synthetic material)..... 26
2.6 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ 27
2.6.1 ตัวกลาง (Media) 27
2.6.2 ความลึกของชั้นตัวกลางเครื่องกรองชีวภาพ (Depth of biofilter bed)..... 29
2.6.3 การเพาะเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculation) 30
2.6.4 การป้อนอากาศ (Air supply)..... 30
2.6.5 การป้อนธาตุอาหารอนินทรีย์ (Inorganic nutrient supply) 30
2.6.6 ปริมาณความชื้น (Moisture content)..... 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.7 อุณหภูมิ (Temperature) 31
2.6.8 ความเป็นกรด – ด่างของเครื่องกรองชีวภาพ (pH of Biofilter) 31
2.6.9 ภาระบรรทุก (Mass loading rate) 32
2.6.10 ความดันลด (Pressure drop) 32
2.6.11 การบำบัดก๊าซก่อนเข้าระบบ (Pretreatment of gas stream) 32
2.6.12 ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน (Oxygen limitation) 33
2.6.13 ปริมาณน้ำ (Water Content) 33
2.6.14 จุลชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพ 35
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
กรมควบคุมมลพิษ (2544) 35
เจตนา จิรวัชรเดช (2544) 36
สุโรชา พูลสวัสดิ์ (2546) 36
เอกชัย เลิศผดุงวิทย์ (2547) 36
จิรวัฒน์ กันพยันต์ (2548) 36
Bohn (1988) 37
Gostomaski, Sisson และ Cherry (1999) 37
Delhomenie และคณะ (2002) 37
Lith, Leson และ Michelsen (1997) 38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 39
3.1 แผนการวิจัย 39
3.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง 39
3.1.2 ประเภทและอัตราส่วนผสมวัสดุตัวกลาง 40
3.1.3 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลักและตัวกลางเสริมในการทดลอง 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 42
3.3 ชุดการทดลอง 43
3.3.1 เครื่องกรองชีวภาพ 43
3.3.2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 44
3.3.3 การทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง 45
3.3.4 ระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพ 46
3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์ 46
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างสื่อออนไลน์ 47
3.4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสื่อออนไลน์และการเผยแพร่ 48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 49
4.1 คุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง 49
4.1.1 ความพรุน (Porosity) 49
4.1.2 อินทรียวัตถุ (Organic Matter) 50
4.1.3 ความหนาแน่น (Density) 50
4.1.4 ความเป็นกรด - ด่าง (pH) 50
4.1.5 ความชื้น (Moisture Content) 50
4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่ 51
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์และเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง 51
4.2.1 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 51
4.3 ผลของตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสม 52
4.3.1 ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของตัวกลาง 52
4.3.2 การทรุดตัวของชั้นตัวกลาง 53
4.3.3 ความเป็นกรด – ด่างของชั้นตัวกลาง 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4 อุณหภูมิของชั้นตัวกลาง 55
4.3.5 ประสิทธิภาพการบำบัด 55
4.3.6 การพักระบบกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง 56
4.3.7 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพและขนาดของเครื่อง 58
_____กรองชีวภาพ 58
4.4 ผลของขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์ 59
4.4.1 ผลของขั้นตอนการออกแบบภาพอินโฟกราฟฟิค 59
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ 63
5.1 สรุปผลการวิจัย 63
5.2 ข้อเสนอแนะ 64
เอกสารอ้างอิง 65
ภาคผนวก 67
ภาคผนวก ก 68
ภาคผนวก ข 72
ภาคผนวก ค 76
ภาคผนวก ง 95
ภาคผนวก จ 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 2.1 กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 6
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 6
ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 11
ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษต่างๆด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ..... 12
ตารางที่ 2.5 ลักษณะของถังปฏิกิริยาชีวภาพชนิดต่างๆ (Devinny et al., 1999) 18
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง 29

ตารางที่ 3.1 วิธีทดสอบลักษณะคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง 39
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมตัวกลางในชุดการทดลอง 40
ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ 42

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวกลางหลัก 49

ตารางที่ ข - 1 ผลการทดสอบความพรุนตัวกลาง 72
ตารางที่ ข - 2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) 72
ตารางที่ ข - 3 ผลการทดสอบความหนาแน่น 73
ตารางที่ ข - 4 ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง 73
ตารางที่ ข - 5 ไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางหลัก (Total Nitrogen , N) 73
ตารางที่ ข - 6 ฟอสฟอรัสในตัวกลางหลัก 74
ตารางที่ ข - 7 โพแทสเซียมในตัวกลางหลัก 74

ตารางที่ ค - 1 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale 76
ตารางที่ ค - 2 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale 78
ตารางที่ ค - 3 ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง 80
ตารางที่ ค - 4 อุณหภูมิของตัวกลาง 81
ตารางที่ ค - 5 ความสูงของตัวกลาง 82
ตารางที่ ค - 6 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาที 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ ค - 7 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที 84
ตารางที่ ค - 8 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที 86
ตารางที่ ค - 9 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาที 88
ตารางที่ ค - 10 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที 89
ตารางที่ ค - 11 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที 92

ตารางที่ ง - 1 ผลการทดสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง 95
ตารางที่ ง - 2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2005 12
รูปที่ 2.2 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอฟิลเตอร์ 16
รูปที่ 2.3 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์ 17
รูปที่ 2. 4 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอสครับเบอร์ 17
รูปที่ 2. 5อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซตามระบบต่างๆ (Transfer Rates) 19
รูปที่ 2.6 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ 20
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารในเครื่องกรองชีวภาพ 23
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของจุลินทรีย์และกิจกรรมในเครื่องกรองชีวภาพ 31
รูปที่ 2.9 การกระจายของน้ำในตัวกลางที่มีรูพรุน 34

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลัก 41
รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริม 41
รูปที่ 3. 3 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale 43
รูปที่ 3. 4 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale 44
รูปที่ 3. 5 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย 45
รูปที่ 3. 6 ภาพแสดงการจัดวางเลย์เอ้าท์ต่างๆของอินโฟกราฟฟิคในการออกแบบ 47
รูปที่ 3. 7ภาพแสดงตัวอย่าง อินโฟกราฟฟิค ในการออกแบบ 48

รูปที่ 4.1 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ 52
รูปที่ 4.2 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale 53
รูปที่ 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale 53
รูปที่ 4.4 การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale 54
รูปที่ 4.5 การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale 54
รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาทีของ 56
รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาทีของ 57
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาทีของ 57
รูปที่ 4. 9 การเปรียบเทียบระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่มีผลต่อจำนวนครั้งในการ 58
รูปที่ 4.10 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 1 ผู้ออกแบบ นายณัฐธัญ แขจังหรีด 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 4.11 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 2 ผู้ออกแบบ นางสาวณัฐชยาพร เรืองฤทธิ์ 61
รูปที่ 4. 12 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 3 ผู้ออกแบบ นายทรงพล ทองมี 62

รูปที่ จ - 1 การเปรียบเทียบตัวกลางที่นำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย 98
รูปที่ จ - 2 การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ 99
รูปที่ จ - 3 กลไกและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
C_{ads}	ความเข้มข้นของมลพิษที่ดูดซับ
C_G	ความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ
C_L	ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของมลพิษที่อยู่ในน้ำ
C_L *	ความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับความเข้มข้นของอากาศบริเวณนั้น
$C_{L'j}$	ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย
$C_{L,O}$	ความเข้มข้นของออกซิเจน
C_{max}	ค่าความเข้มข้นของมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้
H	ค่าคงที่ของ Henry's Law
k	อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ
k_f	ค่าคงที่ของ Freundlich Adsorption
k_L	ค่าคงที่ของการดูดซับของ Langmuir
k_{max}	อัตราการย่อยสลายสูงสุด
$K_{M'j}$	ค่าคงที่การอิ่มตัวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย
$K_{M,O}$	ค่าคงที่การอิ่มตัวของออกซิเจน
k_s	Half-saturation Constant
k_t	ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล
n	ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง
X	ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ
u	ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ
u_{max}	ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด
BB	Control Set
B1	Biofilter Set1
B2	Biofilter Set2
B3	Biofilter Set3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคเกษตรตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนับว่ามีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยเป็นอย่างมาก ภาคเกษตรไทยได้มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเช่นเดียวกับทั่วโลก คือ การลดลงของการใช้กำลังแรงงาน ซึ่งถูกทดแทนโดยการเพิ่มขึ้นของการใช้เครื่องจักรกลและเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อใช้เป็นเครื่องทุ่นแรง และแก้ไขปัญหาการขาดแคลนแรงงาน รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต จึงนำไปสู่อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรที่มีการผลิตและจำหน่าย เพื่อตอบสนองความต้องการและเอื้อประโยชน์ต่อภาคเกษตรมากยิ่งขึ้น

ในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรมีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน รวมถึงขั้นตอนการพ่นสีเคลือบชิ้นงาน ได้ใช้สารเคมี อย่างเช่น ทินเนอร์ และสี ซึ่งมีสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เป็นส่วนประกอบ ส่งผลให้น้ำเสียจากกระบวนการนี้มีการปนเปื้อน และสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนี้สามารถระเหยสู่ชั้นบรรยากาศในบริเวณที่ไหลผ่านได้ โดยองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ได้จัดว่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเป็นอากาศพิษ (Toxic Air) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ และส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมตามมา อีกทั้งยังมีผลกระทบด้านลบต่อสุขภาพมนุษย์ ดังนั้น บริษัทผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรจำเป็นที่จะต้องมีวิธีการควบคุม และลดอัตราการปลดปล่อยหรือการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการพ่นสี

ดังนั้น สหกิจศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาการบำบัดอากาศที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการพ่นสีเคลือบชิ้นงานของบริษัทผลิตเครื่องจักรกลการเกษตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ศึกษาอิทธิพลของเวลาการพักระบบกรองชีวภาพ รวมทั้งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังผ่านการบำบัดด้วยเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ
3) เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ
4) เพื่อจัดทำ เผยแพร่ผลงานและองค์ความรู้ผ่านสื่อออนไลน์ในรูปแบบอินโฟกราฟฟิค (Infographic)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ตัวกลางที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย ตัวกลางหลัก คือ ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่ และ ถ่านกัมมันต์ ตัวกลางเสริม คือ ไบโอมีเดีย และ กาบมะพร้าว
2) ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้เครื่อง Multi-Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P with Pump) (Measuriment Gas : VOCs)
3) ศึกษาความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความเข้มข้นเท่ากับ 4.0 ส่วนในล้านส่วน ใช้เวลากักพัก 60 วินาที และเปลี่ยนแปลงเวลาในการพักระบบกรองชีวภาพ คือ 15, 30 และ 45 นาที ที่ใช้เครื่องกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้หลักการ Fluidized Bed Drier ซึ่งมีการดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
4) ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง คือ ปุ๋ยหมัก และ ปุ๋ยมูลไก่ โดยทำการศึกษา ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้นของวัสดุตัวกลาง ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และ ปริมาณธาตุอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทำให้ทราบปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ
2) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพระดับอุตสาหกรรม สำหรับใช้งานจริงในสถานประกอบการ
3) เพื่อนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการใช้เป็นตัวกลางบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
4) เพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ร่างกายในระหว่างปฏิบัติงานหรือลดอัตราการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่บรรยากาศและสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ผู้ศึกษาได้รวบรวม ทฤษฎี แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและเป็นข้อมูลในเบื้องต้น โดยมีการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ความหมาย, ชนิด, คุณสมบัติทั่วไป, แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย)

2.2 กระบวนการกรองทางชีวภาพ

2.3 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองทางชีวภาพ

2.4 หลักการในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

2.5 ประเภทของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

2.6 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ

2.7 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds – VOCs)

2.1.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย/สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

เทียนฉาย (2011) ได้ให้คำจำกัดความของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยมีความดันไอ (Vapor Pressure) น้อยกว่า 760 ทอร์ (101.3 kPa) และมากกว่า 1 ทอร์ (0.13 kPa) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (Derwent, 1995) และมีจุดเดือดสูงไม่เกิน 500 องศาฟาเรนไฮต์ (260 องศาเซลเซียส หรือ 533 เคลวิน)

Nevers (2000) ให้คำจำกัดความของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย คือ สารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งหรือของเหลวมีจุดเดือดที่ชั้นบรรยากาศปกติสูงจนถึง 500 องศาฟาเรนไฮต์ (260 องศาเซลเซียส) และส่วนใหญ่มักจะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนน้อยกว่า 12 อะตอมโดยมีความดันไอที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 0.01 psia (0.0007 บรรยากาศ)

Hunter และ Oyama (2000) ได้ให้คำจำกัดความของสารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือ VOCs คือ ของเหลว หรือ ของแข็งอินทรีย์ ซึ่งมีจุดเดือดที่ความดันบรรยากาศสูงจนถึง 260 องศาเซลเซียส และมีความดันไอที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 0.01 psia (0.0007 atm 70 Pa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ประเภท คุณสมบัติ และที่มาของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การแบ่ง VOCs ตามลักษณะของโมเลกุลสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1) Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated hydrocarbons คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ในโมเลกุลจะไม่มีธาตุคลอรีน ประกอบด้วย อะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbons) เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล ก๊าซธรรมชาติ เฮกเซน ตัวทำละลายในอุตสาหกรรม แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และ คีโตน เป็นต้น และกลุ่มสารจำพวกสารอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbons) เช่น สารตัวทำละลาย โทลูอีน เบนซีน เอธิลเบนซีน ไซลีน สไตรีน และฟีนอล เป็นต้น สาร VOCs กลุ่มนี้มี แหล่งที่มาจากการเผาไหม้จำพวกกองขยะ พลาสติก วัสดุ สารตัวทำละลายสีทาวัสดุ เป็นต้น จะเกิดผลเสียต่อคนที่ปฏิบัติงานนั้น เช่น พนักงานดับเพลิง คนงานเผาขยะ คนเผาถ่าน โดยโรคที่เกิดขึ้นมักจะเกิดเป็นโรคที่เกี่ยวกับโรคทางเดินลมหายใจบ่อยเพราะได้รับ VOCs ประมาณ 144 ชนิดรวมกันในปริมาตรสูงถึงร้อยละ 76.8 ของ VOCs ทั้งหมดที่วัดได้ในควันไฟ (Hester และ Harrison, 1995) เป็นประจำจากควันไฟและเชื้อเพลิง ในรูปของ เบนซีน โทลูอีน แนฟทาลีน โพรเพน 1,3 บิวตะไดอีน สไตรีน และ alkyl-substituted benzene compounds อื่น ๆ xylenes, 1-butane/2-methyl propene, propane, 2-methyl butane, ethyl benzene, isopropyl benzene

2) Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ในโมเลกุลมีธาตุคลอรีนอยู่ในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรมสาร Chlorinated VOCs นี้ มีความเป็นพิษมากกว่าและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มแรก (non-chlorinated VOCs) เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทานมากยากต่อการการสลายตัวในธรรมชาติ ทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยทางวิธีเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก รบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม หรือยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็ง การวิเคราะห์น้ำประปามักมีการปนเปื้อนของสารกลุ่ม Chlorinated VOCs ได้บ่อย น้ำประปายิ่งใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อมาก น้ำจะยิ่งมีสาร halogenated hydrocarbons มากขึ้น เช่น พบ Trihalomenthanes ได้บ่อยในน้ำดื่มจากท่อประปา แต่พบน้อยมากในบ่อน้ำธรรมชาติกรองมาจากใต้ดิน ในบรรดาสารกลุ่ม halogenated VOCs นี้ ตามนิยามและการยอมรับขององค์การอนามัยโลก (International Agency for Research on Cancer, IARC และ World Health Organization, WHO) trichloroethylene (TEC) ซึ่งเป็นสารตัวทำละลายในน้ำยาซักแห้ง น้ำยาละลายคราบน้ำมัน หรือคราบไขมัน และเรซินต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบปนเปื้อนได้บ่อยและได้รับการศึกษาค้นคว้าวิจัยมานานกว่า 30 ปี ในด้านผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์ทดลองและมนุษย์ เป็นสารก่อมะเร็งร้ายแรงชนิดหนึ่ง (Group 2A carcinogen (probably carcinogenic to humans)) (Hester และHarrison)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Hydrocarbons	Examples
Paraffins	Propane, Butane, Octane
Olefins	Ethylene, Butadiene
Acetylenes	Acetylene
Aromatics	Toluene, Benzopyrene Acids

Compounds	Examples
Alcohols	Methanols, Ethanols
Aldehydes	Formaldehyde
Ketones	Methyl ethylketone
Formic acids	-
Hydroperoxides	Peroxyacyllnitrite (PAN)
Halides	Vinyl chloride, Bromobenzene
S compounds	Dimethyl sulfide

ที่มา: ดัดแปลงจาก LaGrega และคณะ, 1994; Verchueren, 1996; Hunter และ Oyama, 2000

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Compounds name	**Attribute**	
Acetone	Chemical Formular	: $C_3H_6O_0$
	Molecular Weight	: 58.09
	Water Solubility	: Total
	Vapor Pressure	: 266
	Henry's Constant	: $2.50x10^{-5}$
	Melting Point	: -95
	Boiling Point	: 56.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Compounds name	Attribute	
Benzene	Chemical Formular	: C_8H_6
	Molecular Weight	: 78.12
	Water Solubility	: $1.78x10^3$
	Vapor Pressure	: 95.2
	Henry's Constant	: $5.55x10^{-3}$
	Melting Point	: 5.5
	Boiling Point	: 80.1
Ethyl benzene Compound	Chemical Formular	: C_8H_{10}
	Molecular Weight	: 106
	Water Solubility	: non attribute
	Vapor Pressure	: 102
	Henry's Constant	: -
	Melting Point	: -95
	Boiling Point	: 134
Chloroform	Chemical Formular	: $CHCl_{13}$
	Molecular Weight	: 119.37
	Water Solubility	: $8.00x10^3$
	Vapor Pressure	: 200
	Henry's Constant	: $1.5x10^{-1}$
	Melting Point	: -63.5
	Boiling Point	: 61.2
Formaldehyde	Chemical Formular	: CH_2O
	Molecular Weight	: 30.03
	Water Solubility	: $4.00x10^5$
	Vapor Pressure	: 3500
	Henry's Constant	: $3.00x10^{-7}$
	Melting Point	: -118
	Boiling Point	: -21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Compounds name	Attribute	
Ethanol	Chemical Formular	: C_2H_6O
	Molecular Weight	: 46.08
	Water Solubility	: 6.52×10^4
	Vapor Pressure	: 50
	Henry's Constant	: 3.03×10^{-5}
	Melting Point	: -114
	Boiling Point	: 78.4
Methanol	Chemical Formular	: CH_4O
	Molecular Weight	: 32.05
	Water Solubility	: Total
	Vapor Pressure	: 114
	Henry's Constant	: 5.20×10^{-6}
	Melting Point	: -98
	Boiling Point	: 65
Methyl ethylene Compound	Chemical Formular	: C_4H_8O
	Molecular Weight	: 72.12
	Water Solubility	: 3.50×10^5
	Vapor Pressure	: 100
	Henry's Constant	: 1.30×10^{-4}
	Melting Point	: -86.3
	Boiling Point	: 79.6
Phenol	Chemical Formular	: C_6H_6O
	Molecular Weight	: 94.12
	Water Solubility	: 8.20×10^4
	Vapor Pressure	: 0.341
	Henry's Constant	: 2.60×10^{-6}
	Melting Point	: 43
	Boiling Point	: 182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Compounds name	Attribute	
Toluene	Chemical Formular	: C_7H_8
	Molecular Weight	: 92.15
	Water Solubility	: 515
	Vapor Pressure	: 30
	Henry's Constant	: $6.42x10^{-3}$
	Melting Point	: -95.95
	Boiling Point	: 110.6
Trichloroethylene	Chemical Formular	: C_2HC_{13}
	Molecular Weight	: 131.38
	Water Solubility	: 1.1
	Vapor Pressure	: 75
	Henry's Constant	: $1.02x10^{-2}$
	Melting Point	: -73
	Boiling Point	: 87
Vinyl Chloride	Chemical Formular	: C_2H_3Cl
	Molecular Weight	: 62.5
	Water Solubility	: $4.27x10^{3}$
	Vapor Pressure	: 2660
	Henry's Constant	: $2.65x10^{-2}$
	Melting Point	: -154
	Boiling Point	: -13.9

หมายเหตุ: - Molecular weight in g/g.mol

- Vapor Pressure in mmHg at 25 ^{O}C
- Henry's law coefficient at 25 ^{O}C in (atm.m^3/mol)
- Melting point ^{O}C
- Boiling point ^{O}C

ที่มา: ดัดแปลงจาก LaGrega และคณะ, 1994; Verchueren, 1996; Hunter และ Oyama, 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 แหล่งกำเนิดและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) มีคุณสมบัติที่ชะล้างไขมันและละลายสารเคมีอื่น ๆ ได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมและกิจกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น การผลิตน้ำหอม การผลิตสเปรย์ การผลิตยาและเวชภัณฑ์ การผสมสารเคมีในห้องปฏิบัติการ การผลิตแล็กเกอร์ กาว น้ำมันสน การผลิตสี การผลิตกาว การผลิตเครื่องหนัง การชะล้างโลหะ การสกัดน้ำมันจากพืชและสมุนไพร การผลิตสารเคมีกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ การผลิตเครื่องสำอาง การผลิตสารเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี การกลั่นน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบสารนี้ได้จากบุหรี่ และกิจกรรมต่าง ๆ ในชุมชน เช่น การใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช การทาสี การเติมน้ำมันจากสถานีบริการน้ำมัน (ปั๊มน้ำมัน) ไอน้ำมันจากการจราจรและการขนส่ง เป็นต้น

แหล่งกำเนิดที่สำคัญของ VOCs แบ่งออกเป็น แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (Natural Sources) ซึ่งเป็นแหล่งที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ไฟไหม้ป่าโดยเฉพาะในฤดูร้อนที่อากาศมีอุณหภูมิสูง เกิดการเสียดสีของต้นไม้ใบหญ้าและเกิดเป็นไฟไหม้ป่าขึ้น ทำให้ปล่อยสารมลพิษออกมาสู่บรรยากาศ ได้แก่ ควัน เถ้า หรือก๊าซต่าง ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น รวมถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไม่มีออกซิเจน ก็ส่งผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้เช่นกัน แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Sources) ซึ่งเป็นแหล่งที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์จากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง การระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงในขณะถ่ายเทน้ำมัน ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาตินี้ จะถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศ และหากมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ อาจก่อให้เกิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในรูปอื่นได้ การใช้สารทำละลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเคมีภัณฑ์ สารเคมี หรือวัสดุเคมี โรงงานกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมหรือประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสีน้ำมันชักเงา แล็กเกอร์ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาแยกประเภทตามลักษณะของแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากกิจกรรมของมนุษย์แล้ว อาจสามารถแบ่งได้เป็น แหล่งกำเนิดแบบเคลื่อนที่ (Mobile Source) หมายถึง ยานพาหนะประเภทต่าง ๆ ที่ใช้เชื้อเพลิง เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น แหล่งกำเนิดแบบไม่เคลื่อนที่ (Stationary Source) หมายถึง การปลดปล่อยสารมลพิษออกสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม สถานีบริการน้ำมัน ถังเก็บสารระเหยต่าง ๆ เป็นต้น

เมื่อ VOCs ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น จึงมักเกิดปัญหาขึ้นตามมา เพราะเมื่อ VOCs กระจายอยู่ในชั้นสตราโตสเฟียร์ จะส่งผลต่อชั้นโอโซนที่อยู่ใกล้โลก ทำให้เกิดปฏิกิริยา Photochemical Smog ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาของ VOCs ไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละออง และออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่ง ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยโอโซนที่อยู่ในบรรยากาศชั้นสูงจะทำหน้าที่กรองรังสีอัลตราไวโอเลต แต่เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นใกล้โลกกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้เจ็บไข้ เกิดอาการเจ็บคอ หายใจไม่สะดวก ถ้าได้รับเป็นเวลานานเนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลายอย่างถาวร และมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ นอกจากนี้โอโซนยังเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุด และยังมีผลทำให้ผลผลิตทางการเกษตรเสียหาย ตกต่ำลงอีกด้วย โอโซนจึงเป็นสารมลพิษทุติยภูมิในบรรยากาศใกล้โลกที่ยากต่อการควบคุมโดยตรง เนื่องจากไม่ได้เกิดจากการปล่อยสู่บรรยากาศ แต่เกิดจากกระบวนการ Photochemical ซึ่งมี VOCs เป็นตัวการสำคัญ

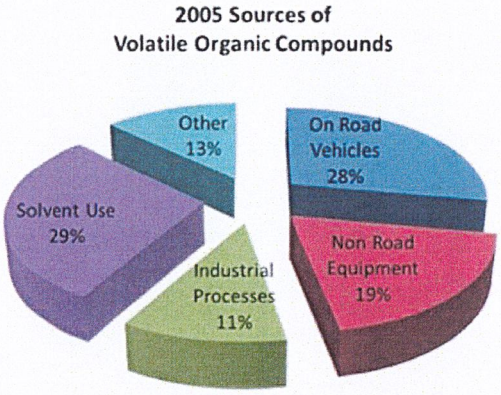
ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

Compounds	Ethylbenzene	Toluene	Xylene
Source	Gasoline combustion, Solvents, tobacco smoke	Gasoline combustion, Biomass burning, Petroleum refining, Detergent production	Gasoline combustion, lacquers, glues
Effect	Respiratory irritation, Dizziness, headache, Nausea, chromosome aberration, Leukemia, produces ozone	Nausea, confusion, fatal toxicity, Anemia, liver damage, dysfunction of central nervous system, coma, death, produces ozone painting, building materials	Eye, nose, and thoat irritation, liver and nerve damage, produces ozone

ที่มา: Hunter และ Oyama, 2000

นอกจากนี้องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) (2005) ได้ระบุแหล่งที่มาของสาร VOCs สูงสุด ลำดับแรก ได้แก่ การใช้สารเป็นตัวทำละลาย ร้อยละ 29 ลำดับที่สอง ได้แก่ จากยาพาหนะ ร้อยละ 28 และลำดับที่สาม ได้แก่ จากเครื่องมือก่อกำเนิดมลพิษกับที่ ร้อยละ 19 ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2005
ที่มา: Daniel.Cardenas, 2010

2.2 กระบวนการกรองทางชีวภาพ

กระบวนการกรองทางชีวภาพหรือการบำบัดทางชีวภาพ คือ กระบวนการที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในการบำบัดโดยจุลินทรีย์ในการบำบัดโดยจุลินทรีย์จะช่วยในการเปลี่ยนอากาศเสียให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ หลักการคือ ก๊าซเสียเข้ามาในระบบจะถูกดักจับโดยจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้ก๊าซเสียนี้เป็นอาหารเพื่อทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเป็นพลังงานให้กับเซลล์สารมลพิษที่บำบัดได้ทางชีวภาพนั้น จะต้องเป็นสารที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งทั่วไปของสารมลพิษที่สามารถใช้ในระบบนี้คือ น้ำหนักของโมเลกุลต่ำและมีโครงสร้างพันธะง่าย ๆเนื่องจากถ้าสารมลพิษมีโครงสร้างพันธะที่ซับซ้อน จะทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการย่อยสลาย ซึ่งพลังงานนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถหาเองได้ ดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดการย่อยสลายสารมลพิษขึ้น (Devinny *et al.*, 1999) ตัวอย่างสารมลพิษที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย ได้แก่ ฟีนอล โทลูอีน เอมีน อนิลีน แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษต่าง ๆ ด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

Contaminant	Biodegradability
Aliphatic hydrocarbons	
Methane	1
Propane	-
Butane	-
Pentane	1
Isopentane	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษต่าง ๆ ด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

Contaminant	Biodegradability
Aliphatic hydrocarbons (ต่อ)	
Hexane	2
Cyclohexane	1
Acetylene	1
Aromatic hydrocarbons	
Benzene	2
Phonol	3
Toluene	3
Xylene	2
Stylene	3
Ethylbenzene	3
Chlorinated hydrocarbons	
Carbon tetrachloride	1
Chloroform	1
Dichloromethane	3
Bromodichloromethane	-
1,1,1-Trichloroethane	-
1,1-Dichloroethane	-
Tetrachloroethane	1[b]
Trichloroethane	1[b]
1,2-Dichloroethane	-
Vinyl chloride	1
1,2-Dichlorobenzene	-
Chlorotoluene	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษต่าง ๆ ด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

Contaminant	Biodegradability
Nitrogen-containing carbon compounds	
Amines	3
Aniline	3
Nitriles	1
Acylonitrile	-
Pyridine	1
Sulfur-contaning[c] carbon compounds	
Carbon disulfind	2
Dimethyl sulfide	2
Dimethyl disulfide	2
Methyl mercaptan	1
Thiocyanated	1
Oxygenated carbon compounds	
Alcohols	3
Methanol	3
Butanol	3
2-Butanol	3
1-Propanol	3
2-Propanol	3
Aldehydes	3
Formaldehyde	3
Acetaldehyde	3
Carbonic acids (ester)	3
Butyric acid	3
Vinyl acetate	2
Ethyl acetate	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษต่าง ๆ ด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

Contaminant	Biodegradability
Oxygenated carbon compounds (ต่อ)	
Buthyl acetate	3
Isobuthyl acetate	3
Ethers	1
Diethyl ether	1
Dioxane	1
Methy tert-butyl ether	1
Tetrehydrofuran	3
Ketones	3
Acetone	3
Methyl ethyl ketone	3
Methyl isobutyl ketone	3
Inorganic[c] compounds	
Ammonia	3
Hydrogen sulfide	3
Nitrogen oxide	1

[b] indicates that cometabolism of anaerobic treatment has been identified within a biofilter

[c] indicates that change in filter bed pH may occur with treatment of these compounds.

Performance

Note : 1= some biodegradability ; 2 = moderate biodegradability

3 = good biodegradability ; - = unknown.

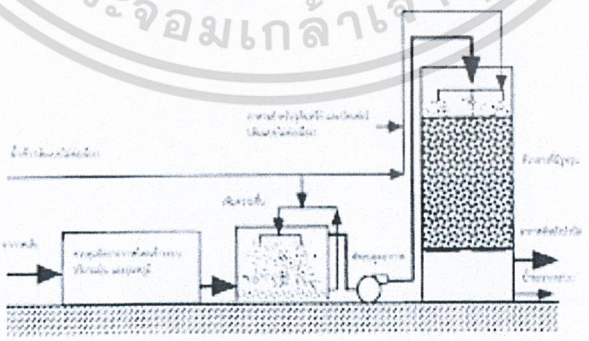
ที่มา : Devinny *et al.*, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการกรองชีวภาพเป็นระบบบำบัดอากาศเสียจากแหล่งกำเนิดที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยระบบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ ข้อดีของระบบการกรองชีวภาพ คือ ต้นทุนในการติดตั้งระบบและต้นทุนในการเดินระบบต่ำ ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อยบำรุงรักษาระบบง่ายและไม่เกิดของเสียที่ต้องส่งต่อไปกำจัดด้วยวิธีการอื่น อย่างไรก็ตามระบบการกรองชีวภาพมีข้อเสียกล่าวคือ ต้องการอัตราการป้อนอากาศเสียที่ต่อเนื่อง ต้องรู้ชนิดและปริมาณความเข้มข้น ที่แน่นอนของไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพราะสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบนอกจากนี้ระบบนี้ยังต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก (Zerbonia *et al*., 1995) ระบบการกรองชีวภาพเหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1,500 ส่วนในล้านส่วน (ppm) โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ระบบนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ไบโอฟิลเตอร์(biofilter), ไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์ (biotrickling filter) และไบโอสครับเบอร์ (bioscrubber) (Devinny *et al*., 1999).

ไบโอฟิลเตอร์

ในระบบไบโอฟิลเตอร์จุลินทรีย์จะเคลือบอยู่บนตัวกลางที่มีรูพรุนในรูปของฟิล์มชีวภาพ (biofilm) อากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกดูดซับบนตัวกลางที่มีรูพรุนซึ่งเคลือบด้วยฟิล์มชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นทั้งบริเวณฟิล์มชีวภาพและในตัวกลางที่มีรูพรุน ตัวกลางที่มีรูพรุนที่นิยมใช้คือ ปุ๋ยหมัก (compost) เพราะมีพื้นที่ในการสัมผัสกับอากาศเสียที่มีส่วนประกอบ ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมากและสามารถเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้เพื่อให้ประสิทธิภาพ ของระบบไบโอฟิลเตอร์คงที่ต้องมีการเติมน้ำและอาหารเป็นครั้งคราวเพื่อเพิ่มความชื้นและอาหารให้กับ จุลินทรีย์ในระบบ (รูปที่ 2.2) เนื่องจากมีการเติมน้ำและอาหารแบบเป็นครั้งคราวไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นน้ำชะที่ออกมาจากระบบจะมีสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ปะปนออกมา แต่มีในปริมาณที่น้อยมาก

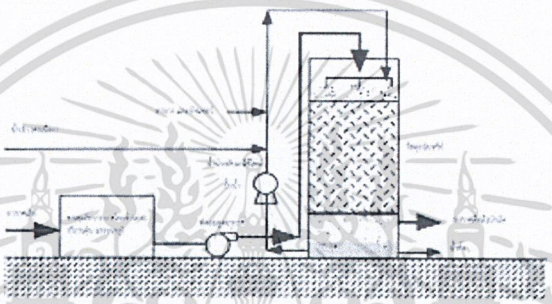


รูปที่ 2.2 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอฟิลเตอร์
ที่มา: Devinny et al., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์

การกรองชีวภาพประเภทไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์ จุลินทรีย์จะถูกตรึงอยู่ในวัสดุอนินทรีย์ (inorganic packing material) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์และบางส่วนจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยน้ำ อาหารและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยออยู่ในน้ำจะถูกพ่นให้สัมผัสกับอากาศเสียอย่างต่อเนื่อง ระบบนี้อากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ถูกตรึงอยู่ในวัสดุอนินทรีย์และจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ น้ำที่สัมผัสกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วจะไหลลงมาที่ส่วนล่างของระบบซึ่งบางส่วนจะถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (รูปที่ 2.3) เนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายแขวนลอยอยู่ ดังนั้นจึงเหลือน้ำทิ้งในปริมาณที่น้อยที่ถูกปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม

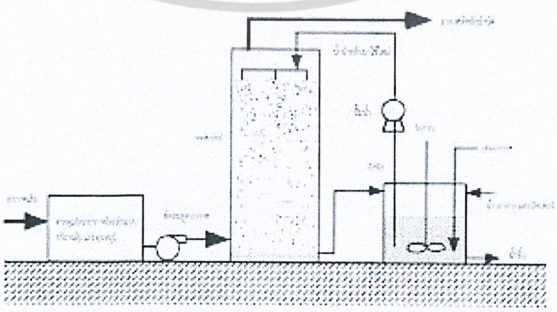


รูปที่ 2.3 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์

ที่มา: Devinny et al., 1999

ไบโอสครับเบอร์

สำหรับไบโอสครับเบอร์ จุลินทรีย์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ และอากาศเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกน้ำ ที่มีจุลินทรีย์ดูดซับบริเวณหอสเปรย์ (spray tower) หรือในแพ็คคอลัมม์ (packed column) จากนั้นน้ำที่มีส่วนผสมของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกส่งไปยังถังพัก (storage tank) (รูปที่ 2.4) และการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้น ณ บริเวณถังพัก และน้ำจากกระบวนการย่อยสลายจากถังพักจะถูกนำไปใช้อีกครั้ง เหลือเพียงบางส่วนถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับระบบไบโอทริคคลิ่งฟิลเตอร์



รูปที่ 2. 4 ระบบการกรองทางชีวภาพประเภทระบบกรองแบบไบโอสครับเบอร์

ที่มา: Devinny et al., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันระบบการกรองชีวภาพใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศแถบยุโรปและอเมริกา สำหรับในประเทศไทยและประเทศในกลุ่มอาเซียนนั้น ยังมีการวิจัยและใช้ระบบนี้อย่างจำกัด จึงควรมีการวิจัย พัฒนา และส่งเสริมการใช้ระบบการกรองชีวภาพในประเทศและกลุ่มประเทศอาเซียนอย่างจริงจังและต่อเนื่อง

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองการบำบัดมลพิษโดยวิธีทางชีวภาพ แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องกรองชีวภาพ (Biofilters) เครื่องโปรยกรองทางชีวภาพ (Biotricking filters) และเครื่องดักจับทางชีวภาพ (Bioscrubbers) โดยในการทำงานของถังปฏิกิริยาจะมีกลไกที่มีลักษณะคล้าย ๆ กัน แต่สถานะของจุลชีพและน้ำจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของถังปฏิกิริยาชีวภาพชนิดต่าง ๆ (Devinny et al., 1999)

Reactor type	Biofilter	Biotrickling	Bioscrubber
Microorganisms	Fixed	Fixed	Suspended
Water phase	Stationary	Flowing	Flowing

2.3 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองทางชีวภาพ (Mechanism of biofiltration)

2.3.1 การเคลื่อนที่ของก๊าซ (Gas Transfer)

ณ สภาวะที่สมดุลการแบ่งแยกระหว่างอากาศกับน้ำ อธิบายโดยสมการของ Henry 's Law สมการที่ 2.1

$$C_G = H.C_L \qquad 2.1$$

โดยที่ C_G = ความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ (atm หรือ g/$L_{อากาศ}$)

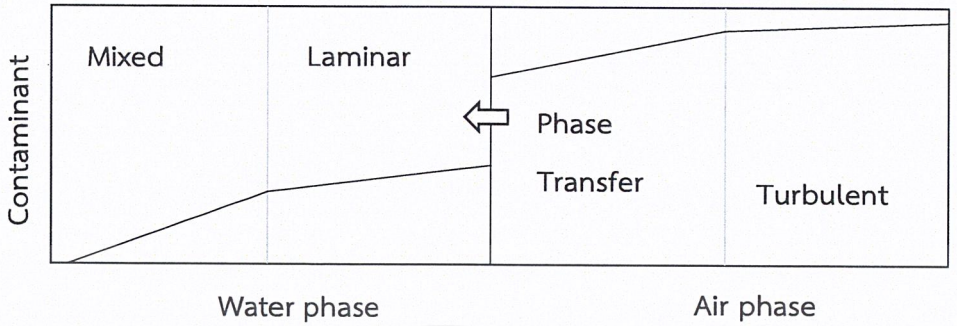
C_L = ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของมลพิษที่อยู่ในน้ำ (mol/$L_{น้ำ}$ หรือ g/$L_{น้ำ}$)

H = ค่าคงที่ของ Henry's Law (atm.$L_{น้ำ}$ / mol หรือ (g / $L_{อากาศ}$) / (g / $L_{น้ำ}$))

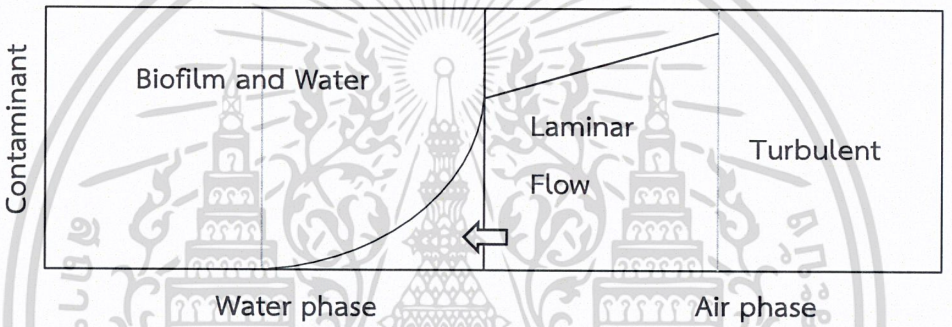
ณ สมดุล การซึมผ่านของก๊าซไปสู่น้ำในเครื่องกรองชีวภาพนั้น สามารถอธิบายอัตราการเคลื่อนที่ได้ 4 ลำดับ ตามรูปที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนที่ของก๊าซ ทางระบบวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมกับการเคลื่อนที่ของก๊าซทางระบบเครื่องกรองทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของก๊าซตามระบบวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม



การเคลื่อนที่ของก๊าซตามระบบเครื่องกรองทางชีวภาพ



รูปที่ 2. 5 อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซตามระบบต่าง ๆ (Transfer Rates)

ที่มา: Devinny et al., 1999

มลพิษจะเริ่มเคลื่อนที่จากความเข้มข้นสูงในสถานะก๊าซ ไปสู่ความเข้มข้นต่ำในสถานะน้ำ โดยการ เคลื่อนที่ในสถานะของก๊าซจะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) และเมื่อเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณผิวน้ำกับอากาศ แล้วก๊าซจะเคลื่อนที่แบบราบเรียบ (Laminar) เป็นกลไกการแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion) โดย สมการที่ใช้ในการคำนวณจะใช้สมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\frac{dC_L}{dt} = k_t\left[C_L^* - C_L\right] = k_t\left[\frac{C_G}{H} - C_L\right] \qquad 2.2$$

โดยที่ C_G = ความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ (atm หรือ $g/L_{อากาศ}$)

C_L = ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของมลพิษที่อยู่ในน้ำ ($mol/L_{น้ำ}$ หรือ $g/L_{น้ำ}$)

C_L^* = ความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับความเข้มข้นของอากาศบริเวณนั้น ($mol/L_{น้ำ}$ หรือ $g/L_{น้ำ}$)

H = ค่าคงที่ของ Henry's Law ($atm.L_{น้ำ}$ / mol หรือ (g / $L_{อากาศ}$) / (g / $L_{น้ำ}$))

k_t = ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกในการเคลื่อนที่ของก๊าซจะเกิดขึ้นในกระบวนการที่สารมลพิษในอากาศแพร่ลงมาสู่ฟิล์มชีวภาพซึ่งมีอัตราการถ่ายเทก๊าซนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารมลพิษ และค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

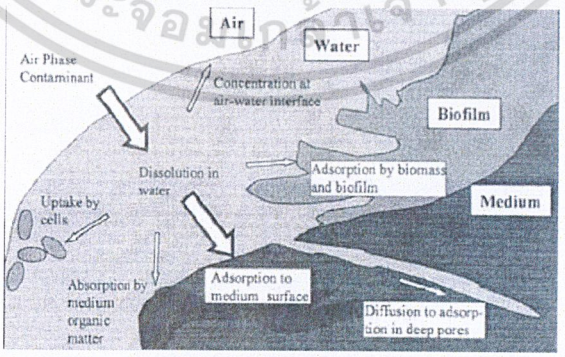
2.3.2 วัฏภาคน้ำ (The water phase)

การกรองทางชีวภาพมีสมมุติฐานว่าน้ำอยู่ในสภาวะอยู่กับที่ (Stationary) อาจจะมีน้ำไหลลงด้านล่างของถังปฏิกรณ์เนื่องจากการควบแน่นหรือการเติมน้ำ (Irrigation) มากเกินไปแต่การไหลจะช้า และปกติผู้ควบคุมระบบจะลดการไหลของน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดน้ำชะ (Leachate) การโดยการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นการไหลแบบราบเรียบมากกว่าการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นการแพร่จึงเป็น กลไกหลักในการถ่ายเทมวลไปสู่น้ำ การย่อยสลายทางชีวภาพและการดูดซับสารมลพิษในน้ำหรือในฟิล์มชีวภาพจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวกลางคล้ายกับการซึมสารมลพิษจะแพร่ไปยังตัวกลางและปล่อยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากย่อยสลายทางชีวภาพออกมา ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีความดันไอสูงจึงถ่ายเทไปสู่อากาศ

การแพร่ของสารมลพิษเข้าสู่ฟิล์มชีวภาพ โดยปกติแล้วจะช้ากว่าการแพร่ในอากาศเนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทมวลของน้ำ โดยที่ส่วนด้านล่างของชั้นฟิล์มชีวภาพจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษลดน้อยลงและอาจไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่น้ำเป็นสิ่งสำคัญโดยเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และสารมลพิษจะแพร่สู่น้ำ และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือดูดซับต่อไป

2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants)

เป็นปัจจัยพื้นฐานในการกำจัดสารมลพิษ เมื่อโมเลกุลของสารมลพิษละลายน้ำจะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ หนึ่งการดูดซับไว้บนผิวของตัวกลาง สองดูดซับไว้บนผิวของสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพและสารดูดซับไว้ภายในสารอินทรีย์ ในฟิล์มชีวภาพหรือตัวกลางหรือการสะสมที่ผิวน้ำจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพน้ำ สารมลพิษไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา: Devinny *et al.*, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพมีแบบจำลองที่ศึกษาอยู่ 2 ชนิด คือ การดูดซับบนตัวกลาง อธิบายตาม Freundlich Model

$$C_{ads}=k_f.C_L^{1/n} \qquad 2.3$$

โดยที่ C_{ads} = ความเข้มข้นของมลพิษที่ดูดซับ

C_L = ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของมลพิษที่อยู่ในน้ำ

n = ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง

k_f = ค่าคงที่ของ Freundlich Adsorption

แบบจำลองของ Freundlich Model มีสมมติฐานว่า การดูดติดผิวตัวกลางไม่จำกัดปริมาณ และปริมาณในการดูดติดก็ขึ้นกับความเข้มข้นของมลพิษที่ละลายลงน้ำ และค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงการดูดซับบนตัวกลางอธิบายตาม Langmuir Model

$$C_{ads}=\frac{C_{max}C_L}{k_L+C_L} \qquad 2.4$$

โดยที่ k_L = ค่าคงที่ของการดูดซับของ Langmuir

C_{max} = ค่าความเข้มข้นของมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้

แบบจำลองแบบ Langmuir Model มีสมมติฐานว่า สมดุลระหว่างค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ละลายกับค่าความเข้มข้นที่ถูกดูดซับนั้น ถ้าความเข้มข้นในน้ำ (C_L) มีค่าน้อย การดูดซับ (C_{ads}) จะไม่เกิดขึ้นและเมื่อความเข้มข้นในน้ำมีค่ามากก็จะมีค่าการดูดซับมาก

ซึ่งในการทำงานที่เกี่ยวกับเครื่องกรองชีวภาพนั้น ควรพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ของตัวกลางที่ใช้เพื่อการออกแบบและเลือกใช้ชนิดของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสม

2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษ (Contaminant Biodegradation)

1) ชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ (The Biofilm)

ชั้นฟิล์มจุลินทรีย์เป็นกลไกสำคัญในการทำลายมลพิษของเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งก็คือมวลของเซลล์ที่เติบโตบนผิวหน้าของตัวกลางที่มีความแข็งแรง และสามารถเปลี่ยนรูปสารมลพิษมาเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่อยู่ในรูปความเป็นพิษน้อยกว่า ถ้ามีอัตราการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้นก็จะทำงานได้ดีเมื่อมีความหนาประมาณ 5 มม. และมีความหนามากที่สุดประมาณ 2 ซม.

2) จลนศาสตร์ (Kinetics)

จลนศาสตร์ (Kinetics) คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการ ย่อยสารมลพิษทางชีวภาพและอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน การพิจารณาค่าทางจลนศาสตร์คือ Michalis-Menten equation เป็นดังสมการ 2.5

$$\frac{dC_L}{d_t} = \frac{k_{max} \cdot C_L}{K_s + C_L} \qquad 2.5$$

โดยที่ C_L = ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของมลพิษที่อยู่ในน้ำ (mol/L)

k_{max} = อัตราการย่อยสลายสูงสุด (mol/L.s)

k_s = Half-saturation Constant (mol/L)

เมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษ (CL) มากกว่าค่าคงที่การอิ่มตัว (KS) มาก ๆ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะเท่ากับ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด (kmax) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หมายถึงว่า อัตราการย่อยสลายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษ

เมื่อสารมลพิษมีความเข้มข้นต่ำ ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยในการกรองทางชีวภาพบริเวณทางเข้าของก๊าซจะเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เนื่องจากมีความเข้มข้นสูง แต่เมื่อห่างออกไปจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พิจารณาได้จากสมการที่ 2.6

$$\frac{dX}{dt} = uX \qquad 2.6$$

โดยที่ X = ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ

u = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ

การคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ ใช้ความสัมพันธ์ของ Monod ดังสมการที่ 2.7

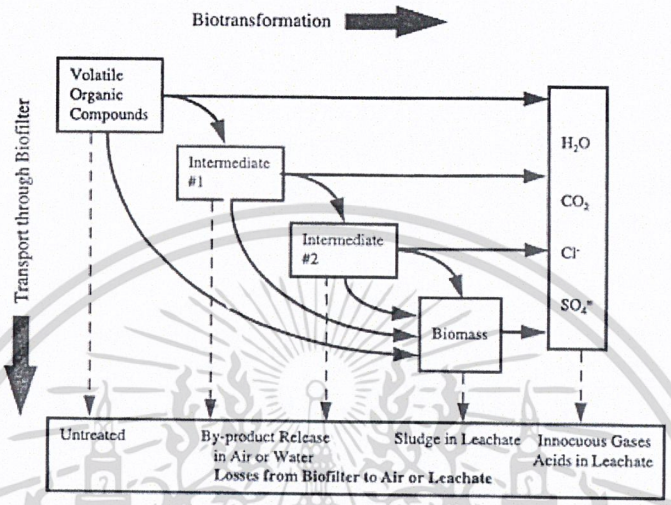
$$u = \frac{u_{max} C_L}{k_m + C_L} \qquad 2.7$$

โดยที่ u_{max} = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 สารที่เกิดขึ้น (Product Generation)

สารมลพิษที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย หรือสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ซัลไฟต์ หรือแอมโมเนีย นั้นสารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟต และไนเตรท โดยเซลล์จุลินทรีย์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารในเครื่องกรองชีวภาพ
ที่มา: Devinny *et al.*, 1999

สารประกอบสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สอง (Second Product) และผ่านไปสู่เซลล์อื่น ๆเมื่อเครื่องกรองชีวภาพเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะมีการสะสมของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นขึ้น หากต้องการหาสมดุลมวลของสารสามารถคิดได้จากจำนวนธาตุคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับผลบวกของจำนวนคาร์บอนที่สะสมบวกกับจำนวนคาร์บอนที่มีการปล่อยออกมา ก็จะทำให้ทราบถึงจำนวนคาร์บอนที่มีการนำไปสร้างเป็นเซลล์จุลชีพ ค่าความแตกต่างระหว่างจำนวนคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบและจำนวนคาร์บอนที่ออกจากระบบ คืออัตราการสะสมมวลจุลชีพ

2.3.6 ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat generation)

ปกติปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น ขณะที่จุลินทรีย์ต้องการพลังงานในดำรงชีวิตซึ่งได้มาจากพลังงานทางเคมี ก่อให้เกิดพลังงานความร้อน สำหรับสารมลพิษบางชนิดปริมาณความร้อนมีความสำคัญมาก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ของเอทานอล 1 กรัมต่ออากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 20 °ซ เป็น 38 °ซ

ในระบบสภาวะไม่คงที่ (Non steady state) พลังงานความร้อนเกิดเนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพจะช่วยให้เครื่องกรองชีวภาพมีอุณหภูมิสูงขึ้นตัวกลางและเครื่องกรองชีวภาพจะดูดซับพลังงานความร้อนไว้ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) อุณหภูมิของตัวกลางและถังปฏิกรณ์จะไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิของระบบมีความแตกต่างกับอุณหภูมิภายนอกจะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับถังปฏิกรณ์

ในระดับห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนโดยทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนสำหรับถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับภายนอกต่อปริมาตรต่ำ การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังถังปฏิกรณ์ถือว่าน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลให้ปริมาณน้ำในตัวกลางจะระเหยออกและอุณหภูมิของอากาศที่ออกจะสูงกว่าอากาศที่เข้า

ความร้อนของอากาศที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณปริมาณพลังงานที่ถูกใช้ไปในการทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลรวมของความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยกับความร้อนที่ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยความร้อนที่ เกิดขึ้นสามารถเปรียบเทียบกับความร้อนจากการเผาไหม้ของสารมลพิษที่บำบัด เพื่อคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ถูกย่อยสลายไป ดังนั้นสมดุลความร้อนสามารถคำนวณได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ

2.4 หลักการในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

Devinny *et al* (1999) ได้เสนอแนะหลักเกณฑ์ในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสมกับ เครื่องกรองชีวภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ปริมาณธาตุอาหารอนินทรีย์

ประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซัลเฟตในปริมาณที่สูง เป็น สิ่งจำเป็นสำหรับการก่อให้เกิดจุลินทรีย์ที่หนาแน่น ในเวลานี้มีข้อมูลน้อยมากเกี่ยวกับปริมาณธาตุอาหารและวัฏจักรการให้ธาตุอาหารของระบบเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปจะมีแต่เพียงการเติม ธาตุอาหารโดยใช้การสเปรย์น้ำที่มีธาตุอาหารลงบนตัวกลาง แต่ใช้เพียงแค่ตอนเริ่มต้นของการเดินระบบเท่านั้น อย่างไรก็ตามในบางกรณีจะมีการเติมธาตุอาหารในระหว่างการดำเนินงานด้วย

2.4.2 ปริมาณสารอินทรีย์

ในหลายกรณีเครื่องกรองชีวภาพจะมีการบำบัดมลพิษแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนตัวกลางหรือหยุดทำงานในช่วงสุดสัปดาห์ มวลชีวภาพและสารอินทรีย์ที่ดูดซึมได้อื่น ๆ จะเป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในช่วงหยุดระบบ ปกติแล้ววัสดุตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักจะมีปริมาณสารอินทรีย์มาก ดังนั้นตัววัสดุตัวกลางชนิดนี้จึงไม่ต้องมีการเติมมวลสารอินทรีย์เข้าไปในระบบอีกเมื่อหยุดการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ลักษณะการดูดซับและความพรุน

การดูดซับสารมลพิษไปยังวัสดุตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพ วัสดุตัวกลางที่ใช้ควร มีสมบัติในการดูดซับสารมลพิษได้อย่างเพียงพอและยังสามารถบำบัดสารมลพิษได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบมีการผันแปรกระบวนการดูดซับสารมลพิษ ไปยังตัวกลางควรจะมีบทบาทสำคัญในการลดความเข้มข้นของสารมลพิษที่สูงให้เจือจางลง

โดยส่วนมากแล้วตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันควรจะมีความพรุนหรือปริมาตรช่องว่างประมาณ 40 – 80 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าอากาศจะเคลื่อนที่ได้ดีและความดันลดที่เกิดขึ้นน้อยลง การบรรจุตัวกลางควรจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากสำหรับให้จุลินทรีย์อาศัยอยู่ได้และมีการถ่ายเทสารมลพิษเกิดขึ้นได้

2.4.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย

วัสดุตัวกลางที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ ควรจะมีสมบัติในการยึดเกาะจุลินทรีย์จาก งานวิจัยได้พบว่าตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพ ควรจะมีผิวขรุขระ มีความพรุน และเก็บกักน้ำไว้ได้ เพื่อที่จะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ พื้นที่ผิวขรุขระเป็นสมบัติที่สำคัญที่ตัวกลางควร มีเพื่อที่จะเป็นการป้องกันจุลินทรีย์จากแรงเฉือนทางชลศาสตร์ (Hydraulic shear) สำหรับตัวกลางที่ เป็นวัสดุสังเคราะห์บางครั้งอาจมีการใช้สารเคมีทำการชะล้างเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเมือก จุลินทรีย์ (Slime growth) ที่เป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการอุดตัน

2.4.5 สมบัติทางกลศาสตร์

วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพควรจะใช้ได้นานไม่เกิดการอุดตันและหดตัว โดยสมบัติสำคัญที่เป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของโครงสร้างตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพคือ ความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง กล่าวคือเมื่อวัสดุตัวกลางมีความหนาแน่นมากจะเป็นนัยสำคัญว่าวัสดุดังกล่าวจะมีโครงสร้างที่แข็งแรง ในทางกลับกันถ้าวัสดุมีความหนาแน่นน้อยจะ แสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นไม่แข็งแรง ดังนั้นวัสดุตัวกลางที่แข็งแรงจึงสามารถสร้างเครื่องกรองชีวภาพที่มีความสูงมาก ๆ ได้ ด้วยเหตุนี้ถังปฏิกิริยาจึงมีปริมาตรมากขึ้นรวมทั้งสามารถทำให้ก่อสร้างในพื้นที่จำกัดได้ จึงเป็นผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบลดลง ปกติแล้ววัสดุ ตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 300 – 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรส่วนวัสดุตัวกลางที่เป็นดินจะมีความหนาแน่นประมาณ 1,000 – 5,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.4.6 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลางและอายุการใช้งาน

วัสดุตัวกลางที่ใช้ควรสามารถใช้งานได้อย่างน้อย 2 – 4 ปี ก่อนจะถึงเวลากำจัดและราคาค่าวัสดุตัวกลางควรจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในด้านอื่น รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรจะต่ำการเปลี่ยนตัวกลางใหม่เป็นสิ่งจำเป็นเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดต่ำลงกว่าค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อค่าความดันลดสูงมาก

2.4.7 การกำจัดตัวกลางที่หมดอายุการใช้งาน

วัสดุตัวกลางที่ใช้แล้วไม่ควรที่จะเป็นขยะอันตรายและควรที่จะกำจัดได้ด้วยวิธีที่ง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อย เช่น การผสมกับดิน (Land farming)

2.5 ประเภทของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

2.5.1 ตัวกลางดิน (Soil bed)

ดินนับเป็นตัวกลางแบบแรกที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ ดินที่มีความเหมาะสมที่สุดในระบบบำบัดกลิ่นหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายควรจะเป็นดินที่อุดมสมบูรณ์ (Loam) ส่วนดินเหนียวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ

2.5.2 ตัวกลางวัสดุหมัก (Compost material)

ตัวกลางวัสดุหมัก เช่น ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางที่นิยมใช้ในเครื่องกรองชีวภาพเนื่องจาก เป็นวัสดุราคาถูกและมีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่ในตัวแล้วยังมีธาตุอาหาร (Nutrients) ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณมาก วัสดุหมักมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี และมีความพรุนทำให้อากาศถ่ายเทได้ดี แต่มีข้อเสียคือสามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวกลางใหม่อยู่เสมอ

2.5.3 ตัวกลางสารอนินทรีย์ (Inorganic material)

สารอนินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพได้แก่ ถ่านกัมมันต์ระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์จะมีข้อดีเหนือระบบที่ใช้วัสดุหมัก ในด้านอายุการใช้งานของตัวกลางและมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า ทำให้สามารถลดขนาดของระบบลงได้แต่ข้อเสียคือ ราคาค่อนข้างแพง

2.5.4 ตัวกลางสังเคราะห์ (Synthetic material)

ตัวกลางสังเคราะห์ที่ใช้กันทั่วไปจะทำจากวัสดุ อาทิเช่น พลาสติก โพลีโพรพีลีน เป็นต้น โดยวัสดุตัวกลางชนิดนี้จะมีสมบัติที่โครงสร้างของตัวกลางมีความแข็งแรง อายุการใช้งานยาวนาน แต่มีข้อด้อยอยู่ตัวกลางชนิดนี้จะไม่มีสมบัติในการกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์ ดังนั้นตัวกลางประเภทนี้จึงต้องมีการเติมน้ำและธาตุอาหารให้ระบบอย่างสม่ำเสมอจึง เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของระบบค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พารามิเตอร์ในการควบคุมและการออกแบบระบบ

Schnelle และ Brown (2002) ได้กล่าวว่าการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพสามารถออกแบบ ได้หลายรูปแบบ แต่หน้าที่การทำงานจะเหมือนกันเครื่องกรองชีวภาพสามารถออกแบบได้ทั้งแบบปิดและเปิดหรือเป็นแบบติดตั้งด้วยการขุดเป็นหน้าดิน หรือเป็นแบบถังปฏิกิริยา โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเครื่องกรองชีวภาพจะประกอบด้วยชั้นตัวกลาง (Media packed bed) ระบบกระจายอากาศ (Air distribution system) เครื่องทำความชื้น (Humidifier) และเครื่องจ่ายอากาศ (Blower) ส่วนอุปกรณ์ทางเลือกเสริมของเครื่องกรองชีวภาพนั้น ประกอบด้วย อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchange chamber) เพื่อปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับระบบและระบบกระจายน้ำ (Water sprinkler system) ซึ่งใช้ในการควบคุมความชื้นของพื้นผิวชั้นตัวกลาง

2.6.1 ตัวกลาง (Media)

2.6.1.1 เกณฑ์ในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

1) การเพิ่มวัสดุเฉื่อยและสารเคมี (Chemical and inert additives) การเติมวัสดุเฉื่อยปฏิกิริยามีวัตถุประสงค์ คือการป้องกันการเกิดการอัดตัว (Compaction) ของตัวกลาง และ การลดค่าความดันลด (Pressure drop) ตัวอย่างของวัสดุเฉื่อย เช่น Polystyrene beads, เศษไม้ (Wood chips) มีความยาว 2-5 ซม., Expanded clay, Glass beads และ Perlite เป็นต้น และมีการเติมหินปูน (Limestone) หรือ เศษเปลือกหอย เป็นบัฟเฟอร์เพื่อรักษาระดับพีเอชให้เหมาะสม

2) ปริมาณน้ำ (Water content) ตัวกลางที่ดีต้องควรมีคุณสมบัติในการกัก เก็บปริมาณน้ำในระดับที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ โดยตัวกลางควรมีปริมาณน้ำระหว่าง 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

3) พีเอช (pH) แบคทีเรียจะทำงานได้ดี เมื่อพีเอชใกล้เคียงกับธรรมชาติ วัสดุตัวกลางจึงควรมีพีเอชในช่วง 6 ถึง 8 ในบางกรณี การบำบัดสารประกอบที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้พีเอชลดต่ำลง ประมาณ 2 ถึง 4 แต่ระบบก็ยังสามารถทำงานได้ดี

4) ความพรุนและการดูดซับ (Sorption characteristics, porosity) เพื่อความมั่นใจว่าก๊าซมีการไหลแบบตามกัน (Plug flow) และมีค่าความดันลดที่ต่ำดังนั้นความพรุนของตัวกลางควรอยู่ในช่วง 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

5) การยึดเกาะของแบคทีเรีย (Bacteria attachment) วัสดุตัวกลางจะต้องมี คุณสมบัติเหมาะสมต่อการยึดเกาะของแบคทีเรีย งานวิจัยที่ผ่านมาสรุปว่าตัวกลางที่ขรุขระมีความ พรุนสูงและชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีการสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2 ประเภทของตัวกลาง

1) ปุ๋ยหมัก (Compost) เป็นวัสดุที่มีจุลินทรีย์หนาแน่น และหลากหลาย ตลอดจนมีคุณสมบัติการกักเก็บน้ำที่ดี พีเอชที่เป็นกลาง มีปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมแต่มีค่าความดันลดที่สูงกว่าถ่าน และมีโอกาสการอัดตัวของตัวกลางสูง อาจทำการแก้ไขโดยผสมวัสดุเพิ่มความพรุน (Bulking agent) เช่น เศษไม้ หรือเพอร์ไลต์ (Perlite) ด้วยการแปรผันอัตราส่วนตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปุ๋ยหมักอาจนำมาจากสลัดจ์ ใบไม้ และมูลสัตว์

2) พีท (Peat) โดยธรรมชาติพีทมีสภาพเป็นกรดและไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการ ควบคุมปริมาณน้ำจึงทำได้ค่อนข้างยาก จึงต้องนำสลัดจ์มาเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เนื่องจากพีทไม่มีกลุ่ม จุลินทรีย์อาศัยอยู่ ตลอดจนมีปริมาณธาตุอาหารน้อยกว่าปุ๋ยหมักจึงต้องมีการเติมธาตุอาหาร แต่มี ข้อดีที่ว่ามีค่าความดันลดที่ต่ำมาก

3) ดิน (Soil) การนำดินมาใช้ประโยชน์ในการกรองทางชีวภาพเนื่องจาก ดินมีราคาถูกและอุดมสมบูรณ์ไปด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ท้องถิ่น แต่ดินก่อให้เกิดค่าความดันลดที่สูงจึง ต้องมีการฟื้นฟูบ่อย

4) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดมีคุณสมบัติ ทางโครงสร้างที่ดีมาก เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ มีความคงทนต่อการแตกหัก มี คุณสมบัติในการยึดเกาะของน้ำที่ ดีและมีพื้นผิวการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูง น้ำและมวลชีวภาพที่ผิว จะทำให้ความสามารถการดูดซับลดลง แต่จำเป็นต้องมีการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ และการให้ธาตุ อาหาร ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานกันทั่วไปทำมาจากกะลามะพร้าวซึ่งมีรูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 0.3 ซม. ยาว 0.5 ซม.

5) เศษไม้หรือเปลือกไม้ (Wood chips or bark) ปกติวัสดุตัวกลางประเภท เศษไม้หรือเปลือกไม้มักจะใช้เป็นวัสดุเพิ่มความพรุน (Bulking agent) โดยมีขนาด 1- 5 ซม.

6) เพอร์ไลต์ (Perlite) เป็นวัสดุที่เบา และมีความพรุนสูง ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ตั้งแต่ 3 ถึง 15 มม. มีราคาไม่แพงและพื้นที่ผิวมาก แต่ไม่มีจุลินทรีย์และธาตุอาหาร จึงมักใช้เป็นวัสดุเพิ่มความพรุน (Bulking agent)

7) วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic media) วัสดุสังเคราะห์เป็นวัสดุที่ไม่มีจุลินทรีย์และธาตุอาหาร ตัวอย่างของวัสดุสังเคราะห์ที่มีการนำไปใช้เป็นตัวกลาง เช่น Vermiculite, Silica, Cordierite, Polyurethane foam, Extruded diatomaceous earth, Ceramic, Polystyrene coated with powder activated carbon เป็นต้น การใช้วัสดุสังเคราะห์เป็นตัวกลางจำเป็นต้องมีการเติมธาตุอาหารให้เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์

สรุปการเลือกใช้ตัวกลาง ดังตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของตัวกลางที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้ตัวกลางขึ้นกับความเหมาะสม โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและประโยชน์การใช้งาน ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ และเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

เอกสารนี้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 6 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

คุณสมบัติ/ตัวกลาง	ปุ๋ยหมัก	พีท	ดิน	ถ่านกัมมันต์	วัสดุสังเคราะห์
จำนานจุลินทรีย์	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
พื้นที่ผิวสัมผัส	ปานกลาง	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง
การซึมผ่านอากาศ	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
ปริมาณธาตุอาหาร	สูง	ปานกลาง-สูง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
ความสามารถการดูดซับ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-สูง	ไม่มี-สูง
อายุการใช้งาน	2-4 ปี	2-4 ปี	มากกว่า 30 ปี	มากกว่า 5 ปี	มากกว่า 15 ปี
ราคา	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
การใช้งานทั่ว ๆ ไป	ง่ายและคุ้มค่าต่อการลงทุน	มีปัญหาเรื่องการควบคุมความชื้น	เหมาะกับระบบที่ภาวะบรรทุกต่ำ	ต้องเติมธาตุอาหาร อาจทำให้ราคาสูง	เหมาะสำหรับ Biotricking filter

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Devinny *et al.*, 1999

2.6.2 ความลึกของชั้นตัวกลางเครื่องกรองชีวภาพ (Depth of biofilter bed)

ความลึกของชั้นตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ โดยทั่วไปจะมีความลึกอยู่ที่ 0.5 – 2.5 เมตร ซึ่งปกติในการออกแบบจะกำหนดความลึกอยู่ที่ประมาณ 1 เมตร เพื่อเป็นการป้องกันการอัดตัวของชั้นตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การเพาะเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculation)

การเพาะเชื้อจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยทั่วไปตัวกลางที่เป็นปุ๋ยหมักจะไม่จำเป็นที่จะต้องมีการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากภายในตัวกลางมีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามการเติมเชื้อจุลินทรีย์ก็ยังเป็นสิ่งที่ควรปฏิบัติ เพราะว่าจะทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบลดลง และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ปกติแล้วหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มเดินระบบของเครื่องกรองชีวภาพ จะใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) การเริ่มเดินระบบของเครื่องกรองชีวภาพ โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 10 วัน เพื่อต้องการให้เวลาจุลินทรีย์ในการปรับตัวกับสารมลพิษที่เข้ามาในระบบในกรณีที่สารมลพิษเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน การปรับตัวของจุลินทรีย์จะต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น

2.6.4 การป้อนอากาศ (Air supply)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ ปกติแล้วจะทำการป้อนอากาศให้กับเครื่องกรองชีวภาพในสัดส่วน อัตราไหลอากาศต่ออัตราไหล ก๊าซมลพิษเท่ากับ 100 ส่วน ต่อ 1 ส่วน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้มีออกซิเจนเกิน (Excess oxygen) ในเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อให้แน่ใจว่ามีออกซิเจนเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และยัง เป็นการป้องกันการเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic process) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นเหม็นในเครื่องกรองชีวภาพ

2.6.5 การป้อนธาตุอาหารอนินทรีย์ (Inorganic nutrient supply)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยหนึ่งในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ก็ยังมีอีกปัจจัยที่สำคัญไม่แพ้กันก็คือ ธาตุอาหารอนินทรีย์ อาทิเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยทั่วไป สำหรับตัวกลางที่เป็นปุ๋ยหมัก การเติมธาตุอาหารในช่วงเริ่มต้นจะมีอัตราส่วนดังนี้ ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : โพแทสเซียม อยู่ในช่วง 0.4 : 0.15 : 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2.6.6 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

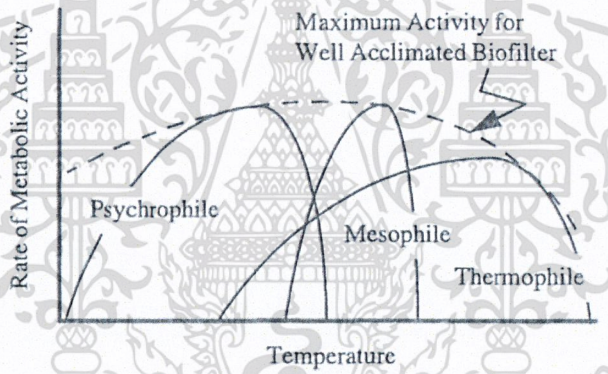
ปริมาณความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำให้การเดินระบบประสบความสำเร็จได้ โดยทั่วไปก๊าซมลพิษที่เข้าระบบ จะทำให้ชั้นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพแห้งจึงทำให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง เป็นผลให้ก๊าซที่ไม่ผ่านกระบวนบำบัดไหลออกสู่สภาวะแวดล้อมภายนอก ส่วนในกรณีที่มีน้ำอยู่ในชั้นตัวกลางมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดเขตไร้อากาศ (Anaerobic zone) ซึ่งจะทำให้เกิดกลิ่น และทำให้เกิดความดันลดมากขึ้นปริมาณความชื้นในชั้นตัวกลางโดยทั่วไปควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20 – 60 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับระบบสามารถทำได้ 2 ทาง คือ การเพิ่มความชื้นแก่ก๊าซก่อนเข้าระบบ ปกติความชื้นของก๊าซควรมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ และการเพิ่มความชื้นโดยตรงที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง วิธีการนี้ควรระมัดระวังเรื่องขนาดของหยดน้ำเพราะถ้าหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินไปอาจจะทำให้เกิดการอัดตัวของชั้นตัวกลางปกติขนาดของหยดน้ำที่ใช้ควรมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ภาระบรรทุกน้ำสูงสุดจะอยู่ที่ 0.021 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - ชั่วโมง

2.6.7 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ในการทำงานและเจริญเติบโตจะอยู่ที่ประมาณ 10 – 40 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเป็นผลให้จุลินทรีย์ถูกทำลายในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะเป็นผลให้จุลินทรีย์ทำงานลดลง ดังนั้นในฤดูหนาวจึงจำเป็นจะต้องมีการทำความร้อนให้กับก๊าซที่จะเข้าระบบเพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่วนในกรณีที่ก๊าซเข้าระบบมีอุณหภูมิสูงเกินไปควรจะทำให้ก๊าซนั้นเย็นก่อนที่จะเข้าระบบเพื่อให้แน่ใจว่าจุลินทรีย์จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของจุลินทรีย์และกิจกรรมในเครื่องกรองชีวภาพ
ที่มา: Devniny *et al.*, 1999

2.6.8 ความเป็นกรด – ด่างของเครื่องกรองชีวภาพ (pH of Biofilter)

ความเป็นกรด – ด่างของเครื่องกรองชีวภาพควรมีค่าเป็นกลางโดยอยู่ในช่วง 7 – 8 เมื่อทำการบำบัดก๊าซอินทรีย์จะเป็นผลทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น ตัวอย่างเช่น การบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้เกิดกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ซึ่งกรดเหล่านี้จะทำให้ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลางต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด – ด่างให้เหมาะสม โดยถ้ามีค่าความเป็นกรด – ด่างต่ำเกินไปควรจะต้องทำการเติมปูนขาวลงไปเพื่อปรับค่าความเป็นกรด – ด่างให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.9 ภาระบรรทุก (Mass loading rate)

ภาระบรรทุกของเครื่องกรองชีวภาพเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการหาขนาดของระบบ โดยภาระบรรทุกนี้สามารถใช้ในการหาพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ได้ คือ อัตราไหลของก๊าซผ่านชั้นกรอง เวลากักพักก๊าซ และอัตราการกำจัดอัตราไหลของก๊าซผ่านชั้นกรอง ปกติอยู่ในช่วง 0.3 – 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร - นาที ถ้าอัตราไหลมากกว่านี้จะเป็นผลให้ก๊าซเสียออกจากระบบ โดยไม่ผ่านการบำบัด

เวลากักพัก คือ เวลาที่ก๊าซใช้ในการสัมผัสกับวัสดุตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อทำให้เกิดการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) เวลากักพักโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ ชนิดก๊าซมลพิษและวัสดุตัวกลาง เช่น เวลากักพักในการกำจัดก๊าซอินทรีย์ (Organic gas) วัสดุตัวกลางที่เป็นปุ๋ยหมักและดินจะใช้เวลากักพักอย่างต่ำสุดเท่ากับ 30 วินาที และ 1 นาที ตามลำดับ ส่วนเวลากักพักของก๊าซอินทรีย์ (Inorganic gas) จะใช้เวลานานขึ้นกว่านี้

อัตราการกำจัดจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ และชนิดของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งทั่วไปแล้วก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและเป็นสารประกอบที่ไม่ซับซ้อนจะสามารถทำการย่อยสลายและบำบัดได้ง่ายในเครื่องกรองชีวภาพ

2.6.10 ความดันลด (Pressure drop)

ความดันลดในเครื่องกรองชีวภาพจะขึ้นอยู่กับประเภทตัวกลาง ความพรุน ปริมาณน้ำ และการอัดตัวของตัวกลาง เมื่อทำการเดินระบบเป็นเวลานาน จะทำให้ความพรุนของตัวกลางลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการอัดตัวของชั้นตัวกรอง ดังนั้นการเปลี่ยนตัวกลางเมื่อครบอายุการใช้งาน จะเป็นการป้องกันการอัดตัว และการเกิดความดันลดสูงได้ การเกิดความดันลดสูงๆ นั้นเป็นสาเหตุ สำคัญที่ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการเพิ่มความดันอากาศเข้ามาในระบบ ปกติเครื่องกรองชีวภาพจะเกิดแรงดันลดประมาณ 1 – 3 นิ้วของน้ำ และใช้พลังงานในการขับดันอากาศประมาณ 1.8 – 2.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อหนึ่งพันลูกบาศก์เมตร ความดันลดยังมีความสัมพันธ์กับภาระบรรทุกพื้นผิว (Surface loading) ในการกำจัดสารปนเปื้อนและประเภทของตัวกลาง

2.6.11 การบำบัดก๊าซก่อนเข้าระบบ (Pretreatment of gas stream)

การบำบัดก๊าซก่อนเข้าระบบมีจุดประสงค์เพื่อเป็นการกำจัดฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนมากับก๊าซมลพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบกระจายอากาศ ทั้งยังมีจุดมุ่งหมายในการจัดเตรียมก๊าซมลพิษให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพอาทิ เช่น กระบวนการเพิ่มความชื้นให้กับก๊าซ (Humidification) และการปรับสภาพอุณหภูมิของก๊าซให้เหมาะสม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.12 ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน (Oxygen limitation)

การปฏิบัติการของเครื่องกรองชีวภาพขั้นสูง ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจนอาจเกิดขึ้นภายในฟิล์มชีวภาพ การที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดจะมีอิทธิพลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ ถ้าใช้ออกซิเจนหมดอย่างสมบูรณ์ในฟิล์มชีวภาพ ในกรณีนี้เป็นปัจจัยจำกัดคู่ (Double limitation) และอัตราการย่อยสลายมลพิษอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Michaelis - Menten ดังสมการที่ 2.8

$$k = k_{max} \frac{C_{L,J}}{K_{M,J}+C_{L,J}} \cdot \frac{C_{L,O}}{K_{M,O}+C_{L,O}} \qquad 2.8$$

โดยที่ k = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

k_{max} = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด

$K_{M'j}$ และ $K_{M,O}$ = ค่าคงที่การอิ่มตัวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและออกซิเจนตามลำดับ

$C_{L'j}$ และ $C_{L,O}$ = ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และออกซิเจนตามลำดับ

การที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดอาจมีข้อโต้แย้ง เนื่องจากในอากาศมีปริมาณออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเหตุผลที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัด เนื่องจากสัมประสิทธิ์ การแยกตัวของก๊าซออกซิเจนจากน้ำเท่ากับ 33.5 หมายความว่าปริมาณออกซิเจนส่วนมากอยู่ใน อากาศมากกว่าที่ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25°ซ ก๊าซออกซิเจนมีความสามารถในการละลายน้ำ 8.1 มก.ต่อลิตร หรือ 0.253 มิลลิโมลต่อลิตร เพราะฉะนั้นหากพิจารณาจากปริมาณสมมูล (Stoichiometric) ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต้องใช้ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (เป็นความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่รอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ) มากกว่า 0.25 มิลลิโมลต่อลิตร (เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่รอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ) มีโอกาสที่ออกซิเจนในฟิล์มชีวภาพหมดก่อนที่นำไปใช้บำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาควบคู่ไปกับคุณสมบัติของสารมลพิษและอุณหภูมิ เป็นต้น

2.6.13 ปริมาณน้ำ (Water Content)

ปริมาณน้ำในเครื่องกรองชีวภาพเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการดำเนินระบบ หากไม่มีการควบคุมปริมาณน้ำในเครื่องกรองชีวภาพหรือหากมีความยากลำบากในการควบคุมปริมาณน้ำจะทำให้เครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ดี เครื่องกรองชีวภาพในการควบคุมมลพิษทางอากาศ แตกต่างจากที่ใช้ในการบำบัดน้ำเพราะพื้นที่ผิวส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยอากาศ แต่น้ำก็ยังคงมีความจำเป็น จุลินทรีย์นั้นจะไม่สามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้หากปราศจากน้ำ นอกจากนี้น้ำยังมีผล

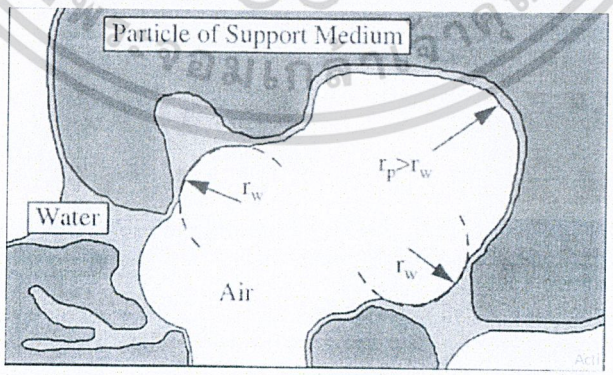
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการถ่ายโอนสารปนเปื้อนจากอากาศ และเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของตัวกลางอีกด้วย โดยมีผลกระทบดังนี้

ก) ผลกระทบทางชีวภาพ (Biological Effects) น้ำมีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ แต่จุลินทรีย์นั้นจะได้รับแรงดันออสโมติกจากน้ำ น้ำมีแนวโน้มที่จะไหลเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพราะน้ำมีความเข้มข้นของสารมลพิษที่สูงเซลล์จุลินทรีย์นั้นจะมี กิจกรรมของเซลล์ที่ลดต่ำลง และจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการ แพร่กระจายของน้ำนั้นช้ากว่าอากาศ ดังนั้นวัสดุตัวกลางที่อยู่ด้านล่างจะเต็มไปด้วยน้ำทำให้เซลล์จุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างมีปัญหาเรื่องการรับสารตั้งต้น และออกซิเจนจากอากาศ และต้องเผชิญกับมลพิษที่มีความเข้มข้นสูง

ข) ผลกระทบต่อการแยกตัว (Partition Effects) ปริมาณน้ำนั้นมีผลต่อการถ่ายเทมวล เนื่องการขั้นตอนการกรองทางชีวภาพเป็นการถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศไปสู่น้ำ ก่อนที่จะเข้าสู่กลไกต่าง ๆ เช่น การดูดซับ การดูดซึม การย่อยสลายทางชีวภาพ โดยที่ถ้ามีปริมาณน้ำมากหมายความว่าสารมลพิษละลายน้ำได้มากขึ้นโอกาสในการย่อยสลายก็จะมากขึ้นด้วย

ค) การขัดขวางการไหลของอากาศ (Interference with Air Flow) ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านรูพรุนที่เต็มไปด้วยน้ำได้ นอกจากนี้น้ำยังทำให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ด้วยเหตุนี้น้ำส่วนเกินในเครื่องกรองชีวภาพจะมีแนวโน้มที่จะรบกวนการไหลของอากาศ สำหรับตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และมีความเสถียร เช่น ถ่านกัมมันต์ ผลกระทบนี้จะเกิดขึ้นน้อย อย่างไรก็ตามหากวัสดุ ตัวกลางมีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น ดิน และปุ๋ยหมักหากมีน้ำมากเกินไปจะทำให้อากาศไม่สามารถไหล ผ่านเครื่องกรองชีวภาพได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศในบางส่วนของเครื่องกรองชีวภาพซึ่งไม่เหมาะสมในการบำบัดสารปนเปื้อน และอาจสร้างสารที่มีกลิ่น เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเมอร์แคปแทน เมื่อน้ำในเครื่องกรองชีวภาพเพิ่มขึ้นน้ำจะเต็มรูพรุนขนาดเล็กทำให้ปริมาณที่พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศได้น้อยลง สิ่งเหล่านี้อาจลดอัตราการถ่ายโอนของสารปนเปื้อน และออกซิเจน



รูปที่ 2.9 การกระจายของน้ำในตัวกลางที่มีรูพรุน

ที่มา: Devniny *et al.*, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.14 จุลชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพ

หลักการที่สำคัญของระบบเครื่องกรองชีวภาพ คือการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบมีหน้าที่เปลี่ยนรูปของสารมลพิษที่อันตรายมากเป็นสารที่มีความเป็นพิษน้อยลง โดยต้องรักษาสภาพแวดล้อมของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีตามที่ได้ออกแบบไว้ จุลชีพที่สำคัญในระบบนั้นก็คือ แบคทีเรีย และเชื้อรา โดยแบคทีเรียจะสามารถกินอาหารและเจริญเติบโตได้เร็วกว่าเชื้อราในสภาพที่พีเอช ใกล้ ๆ กับความเป็นกลาง (6 ถึง 8) และมีค่าความชื้นของชั้นตัวกลางมาก แต่ถ้าพีเอช ลดลงและชั้นตัวกลางเริ่มแห้งเชื้อราก็จะสามารถมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่า โดยทั่วไประบบจะใช้การกินอาหารของแบคทีเรียเพราะว่าแบคทีเรียมีการกินอาหารและมีค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to Volume Ratio) ที่มากกว่าเชื้อราที่มีลักษณะที่เป็นเส้นใย ซึ่งมีส่วนทำให้ระบบมีค่าความดันลดสูงขึ้นเพราะว่าเส้นใยจะไปกับอากาศและเป็นตัวทำให้อนุภาคของระบบเชื่อมติดกัน

จุลินทรีย์ที่มีส่วนในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นจุลินทรีย์ประเภทจุลินทรีย์ที่สร้างสารอาหารเองไม่ได้ (Heterotrophic bacteria) ซึ่งใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน ตัวอย่างเช่น ฟลูโดโมนัส แอทโนมายซีสท์ (Pseudomonas Actinomycete) และ โนคารเดีย (Nocardia) จุลินทรีย์เหล่านี้มักจะมีอยู่แล้วในตัวกลางที่เป็นวัสดุธรรมชาติแต่ก็ควรมีการเติมเชื้อด้วย เช่น การเติมตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

ชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการขับถ่ายโพลีเซคคาไรด์เจลของจุลินทรีย์ออกมาแล้วเกาะติดตามผิวของของแข็ง โดยน้ำที่อยู่ในชั้นฟิล์มจะอยู่กับที่ เมื่อมีมลพิษเข้ามาในระบบก็จะเกิดการเคลื่อนที่แบบการแพร่โดยโมเลกุล ซึ่งก่อนจะให้ระบบทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้

ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพเป็นแบบปลั๊กโฟร์ความเข้มข้นของมลพิษจะลดลงเมื่ออากาศผ่านระบบ ดังนั้นความเข้มข้นจึงมากบริเวณทางเข้าและจะค่อยลดลงไปเรื่อย ๆ ตรงบริเวณทางออกซึ่งลักษณะของจุลชีพก็จะเป็นไปตามนี้เช่นกัน การเติบโตมาก ๆก็อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันบริเวณทางอากาศเข้าได้

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรมควบคุมมลพิษ (2544) ศึกษาโครงการวิจัยเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบเครื่องกรองชีวภาพ) เพื่อกำจัดกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสียและโรงงานปลาป่น พบว่า

โรงบำบัดน้ำเสียกลิ่นที่บำบัดคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และเมทธิลเมอร์แคปแทน (CH_3SH) โดยใช้ตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย กาบมะพร้าว ปุ๋ยคอก และ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในอัตราส่วน 75:20:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 99 % ใช้ระยะเวลากักพักที่เหมาะสมประมาณ 30-40 วินาทีอัตราภาระบรรทุกที่เหมาะสมในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทธิลเมอร์แคปแทน เท่ากับ 30 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลบ.ม.-ชม. และ 64 กรัมเมทธิลเมอร์แคปแทนต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรงงานปลาป่นกลิ่นที่บำบัดคือ แอมโมเนีย (NH3) โดยใช้ตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย กาบมะพร้าว ปุ๋ยคอก และ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในอัตราส่วน 75:20:5 โดยปริมาตร ตามลำดับระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 80 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลากักพักที่เหมาะสม 50-60 วินาที อัตราภาระบรรทุกที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 10 กรัมแอมโมเนียต่อลบ.ม.ชม.

เจตนา จิรวัชรเดช (2544) ศึกษาประสิทธิภาพการการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนในอากาศโดยใช้ระบบบำบัดด้วยดิน โดยใช้ตัวกลางดิน 3 ประเภทได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และดินสีดา ทดลองที่ความเข้มข้นไนโตรเจนไดออกไซด์ระหว่าง 2-4 สนล. พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ 100 % สำหรับตัวกลางทั้ง 3 ประเภท และประสิทธิภาพการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนของปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และดินสีดา เท่ากับ 53.7, 43.2 และ 58.6 % ตามลำดับ

สุโรชา พูลสวัสดิ์ (2546) ศึกษาการกำจัดไอของไซลีนโดยเครื่องกรองชีวภาพ โดยใช้แกลบและกาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่าง ตัวกลางหลัก : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย : ปุ๋ยคอก เป็น 75:5:20 ตัวกลางหลักเป็นแกลบ ในช่วงความเข้มข้นไซลีน 20-200 สนล. เมื่อใช้เวลากักพักมากกว่า 80 วินาที มีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่าง 92-100 % และในช่วงความเข้มข้นไซลีน 200-1,200 สนล. เมื่อใช้เวลากักพักเท่ากับ 80 วินาทีมีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่าง 7-30 % และตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าว ในช่วงความเข้มข้นไซลีน 20-200 สนล. เมื่อใช้เวลากักพักมากกว่า 65 วินาที มีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่าง 93-100 % และในช่วงความเข้มข้นไซลีน 200-1,200 สนล. มีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่าง 10-25 % ความสามารถในการบำบัดสูงสุดของตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวเท่ากับ 20.30 และ 28.44 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ

เอกชัย เลิศผดุงวิทย์ (2547) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม โดยความเข้มข้นไซลีนเข้าระบบอยู่ในช่วง 20 ถึง 2,000 ส่วนในล้านส่วน แปรผันเวลากักพักที่ 36, 60 และ 90 วินาที ระยะเวลาในการเดินระบบ 60 วัน และแปรผันอัตราส่วนของตัวกลางผสมของดินใบก้ามปูและปุ๋ยหมักต่อขยะพลาสติกดังนี้ 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 โดยปริมาตร พบว่าอัตราส่วนผสมของดินใบก้ามปูและปุ๋ยหมักต่อขยะพลาสติกที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซลีนสูงสุดเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 70 142 และ 194 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่เวลากักพัก 36 60 และ 90 วินาที ตามลำดับ

จิรวัฒน์ กันพยันต์ (2548) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไออะซิโตนโดยเครื่องกรองชีวภาพ โดยความเข้มข้นไออะซิโตนที่ใช้อยู่ในช่วง 200 ถึง 1,000 ส่วนในล้านส่วน แปรผันเวลากัก พักระหว่าง 51 ถึง 102 วินาที ระยะเวลาในการเดินระบบ 95 วัน ใช่ตัวกลางหลัก 4 ชนิด ได้แก่ ดิน ใบ

เอกสารนี้ ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ อัตราส่วนของตัวกลางผสมประกอบด้วย ตัวกลางหลัก : เศษ ไม้ : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน : ปุ๋ยคอก เท่ากับ 60 : 20 : 10 : 10 โดยปริมาตร พบว่า ปุ๋ยหมัก เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการกำจัดไอออะซิโตน โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 92 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลากักพัก 68 วินาที จากงานวิจัยนี้ได้เสนอแนะให้ทำการศึกษาการเปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าของอากาศ โดยสลับการไหลขึ้นและไหลลง ซึ่งคาดว่าจะช่วยแก้ไขการอุดตันของจุลินทรีย์ ในส่วนล่างของเครื่องกรองชีวภาพ

Bohn (1988) ศึกษาการกำจัดสารมลพิษในอากาศโดยใช้ดิน พบว่าดินมีประสิทธิภาพการบำบัด 99 เปอร์เซ็นต์ ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย และสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เช่น อัลดีไฮด์ กรดอินทรีย์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับก๊าซที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ เช่น มีเทน โพรเพน และคาร์บอนมอนอกไซด์ มีประสิทธิภาพการบำบัด 90 เปอร์เซ็นต์ โดยดินยังทำหน้าที่ในการกำจัดกลิ่นในอุตสาหกรรมประเภท สารเคมี เภสัชภัณฑ์และผลิตอาหาร

Gostomaski, Sisson และ Cherry (1999) ศึกษากลศาสตร์ของน้ำในการกรองทางชีวภาพ เรื่องบทบาทของความชื้นและความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์อธิบายว่า ความชื้นเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการไหลเข้า – ออกของก๊าซมลพิษและความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการออกซิเดชั่นของจุลินทรีย์เป็นกลไกหลักในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ จากการทดลองการกรองทางชีวภาพแสดงว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับการออกซิเดชั่นโทลูอีนโดยจุลินทรีย์ การเกิดความร้อนเนื่องจากจุลินทรีย์เพียงพอที่ทำให้น้ำระเหยออกจากเครื่องกรองชีวภาพ อาจทำให้การย่อยสลายมลพิษมีประสิทธิภาพต่ำลง

Delhomenie และคณะ (2002) ศึกษาผลกระทบของอนุภาคและปรากฏการณ์ดูดซับในตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก โดยการบำบัดโทลูอีนโดยการกรองทางชีวภาพ พบว่า ขนาดของอนุภาคปุ๋ยหมัก และพื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นปัจจัยหลักสำหรับกระบวนการย่อยสลายการย่อยทางชีวภาพ เมื่อลดขนาดอนุภาคซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมีความสามารถในการกำจัดดังนี้ 180 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (5 มม., 590 ม2./ม.3), 90 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (10 มม., 280 ม2. /ม.3) และ 45 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (20 มม., 120 ม2./ม.3) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lith, Leson และ Michelsen (1997) ศึกษาการประเมินข้อมูลการออกแบบของเครื่องกรองชีวภาพ พบว่า เมื่อเครื่องกรองชีวภาพได้รับความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสูงและอัตราการกำจัดสูงเป็นสาเหตุทำให้สูญเสียความชื้นสูงทำให้ต้องมีการเติมน้ำให้ระบบ ในทางกลับกันหากเติมน้ำมากเกินไปและเกิดการควบแน่นในระบบเป็นสาเหตุให้มีน้ำมากเกินไปส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างเครื่องกรองชีวภาพที่สามารถใช้งานได้จริงในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย จำนวน 4 ชุดการทดลอง (ดังแสดงในตาราง 3.2) โดยใช้วัสดุตัวกลางหลักในการทดลอง คือ ปุ๋ยหมักผสมปุ๋ยมูลไก่ ในอัตราส่วน 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และถ่านกัมมันต์ สำหรับวัสดุตัวกลางเสริม คือ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการพักระบบกรองชีวภาพที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องและศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ

3.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง

การวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุตัวกลาง คือ ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่, ถ่านกัมมันต์, กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย สำหรับวัสดุตัวกลางหลัก ได้แก่ ปุ๋ยหมัก เนื่องด้วยมีจุลินทรีย์ที่หนาแน่นสามารถกักเก็บน้ำได้ดี ปุ๋ยมูลไก่ เป็นแหล่งธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์ และถ่านกัมมันต์ เพื่อดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย สำหรับวัสดุตัวกลางเสริม ได้แก่ กาบมะพร้าว ทำหน้าที่เพิ่มความพรุน ช่วยป้องกันการทรุดตัวของตัวกลาง และไบโอมีเดีย ทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ และสร้างฟิล์มชีวภาพ คุณสมบัติของวัสดุตัวกลางถือเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับเครื่องกรองชีวภาพ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีทดสอบลักษณะคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง

พารามิเตอร์	เครื่องมือทดสอบ / วิธีการวิเคราะห์	ตัวอย่างที่ทดสอบ
ความหนาแน่น	JS 1474 – 1976	ปุ๋ยผสม (ปุ๋ยหมักผสมปุ๋ยมูลไก่)
ความพรุน	Core Method	
ความเป็นกรด – ด่าง	pH Meter	
ปริมาณ TKN	Kjeldahl Method	
ปริมาณโพแทสเซียม	Flame Spectrophotometer	
ปริมาณฟอสฟอรัส	Bray II Method	
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	Walkley Black Methoda	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ประเภทและอัตราส่วนผสมวัสดุตัวกลาง

ในงานวิจัย การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้วัสดุตัวกลางในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยมีอัตราส่วนของตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริมเท่ากับ 60 : 40 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ตัวอย่างในการทดลองเลือกใช้ปุ๋ยผสม ซึ่งเป็นการผสมระหว่างปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่ โดยชุดการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมตัวกลางในชุดการทดลอง

ตัวอย่าง	ชุดการทดลอง	สัดส่วนโดยปริมาตร (%)				
		ตัวกลางหลัก			ตัวกลางเสริม	
		ปุ๋ยหมัก	ปุ๋ยมูลไก่	ถ่านกัมมันต์	กาบมะพร้าว	ไบโอมีเดีย
ปุ๋ยผสม	Control	20	20	20	20	20
	B1	20	20	20	20	20
	B2	20	20	20	20	20
	B3	20	20	20	20	20

หมายเหตุ: อัตราส่วนตัวกลางหลักและตัวกลางเสริม (60:40) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อ้างอิงจากงานวิจัยของเอกชัย เลิศผดุงวิทย์ (2547)

3.1.3 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลักและตัวกลางเสริมในการทดลอง

วัสดุตัวกลางหลักที่ใช้ในการทดลองมีหน้าที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายและ การเพิ่มจำนวนประชากรของจุลินทรีย์ให้กับเครื่องกรองชีวภาพ ได้แก่

ปุ๋ยหมัก เป็นวัสดุตัวกลางที่สามารถกักเก็บน้ำได้ดีมีความหลากหลาย มีปริมาณสารอินทรีย์ที่มีความเหมาะสม ค่าความเป็นกรด – ด่างเป็นกลาง ที่สำคัญถือเป็นตัวกลางที่มีจุลินทรีย์หนาแน่นเหมาะแก่การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ปุ๋ยมูลไก่ เป็นวัสดุตัวกลางที่มีหน้าที่หลักในการสร้างแหล่งอาหารให้กับประชากรจุลินทรีย์ เมื่อมีการหยุดเดินระบบปุ๋ยมูลไก่จะทำหน้าที่ในการซ่อมแซมระบบ

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการดูดซับกลิ่น สารมลพิษ และน้ำได้ดี โดยถ่านกัมมันต์มีอนุภาคที่สม่ำเสมอและคงทนต่อการแตกหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ปุ๋ยหมัก ข. ปุ๋ยมูลไก่ ค. ถ่านกัมมันต์

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางหลัก

วัสดุตัวกลางเสริมที่ใช้ในการทดลองมีหน้าที่ช่วยลดการทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพและมีความสามารถในการเพิ่มความพรุน ได้แก่

กาบมะพร้าว เป็นตัวกลางเสริมที่ช่วยการป้องกันการอัดตัวและลดการทรุดตัวของชั้นตัวกลาง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความพรุนให้กับตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

ไบโอมีเดีย เป็นตัวกลางเสริมที่ทำหน้าที่ให้ประชากรจุลินทรีย์ยึดเกาะ หรือเรียกว่า Packing Media โดยภายในไบโอมีเดียจะมีฟิล์มจุลินทรีย์ยึดเกาะบนวัสดุอินทรีย์ที่สามารถนำไปแช่ในหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้จุลินทรีย์สร้างฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ทำให้สามารถบำบัดสารมลพิษได้ดีขึ้น

ก. กาบมะพร้าว ข. ไบโอมีเดีย

รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมทั้งการสร้างเครื่องกรองชีวภาพระดับการทดลองที่เป็นแนวทางต่อยอดสู่การสร้างเครื่องกรองชีวภาพระดับอุตสาหกรรม โดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในเครื่องกรองชีวภาพ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง อุณหภูมิ ความชื้นของตัวกลาง เป็นต้น

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	รุ่น
ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย	เครื่องวัดความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยเครื่อง Multi-Gas Monitors	ยี่ห้อ mPower (Model : POLI MP400P)
การป้อนไอระเหย	ปั๊มอากาศ VACUUM PUMP TC-501v	
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	
ความชื้นของตัวกลาง	ตู้อบ Hot Air Oven	Models – 30 – 1060
ความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง	pH – indicator strips pH 0 – 14 universal indicator : 100 test	
ความชื้นในกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector	
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector	
ความเข้มข้นของฝุ่น PM 2.5 ในกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector	
อุณหภูมิของกระแสอากาศ	เครื่อง Xiaomi Mijia Air Detector	
อัตราการไหลของกระแสอากาศ	กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร วัดโดยการแทนที่น้ำ	

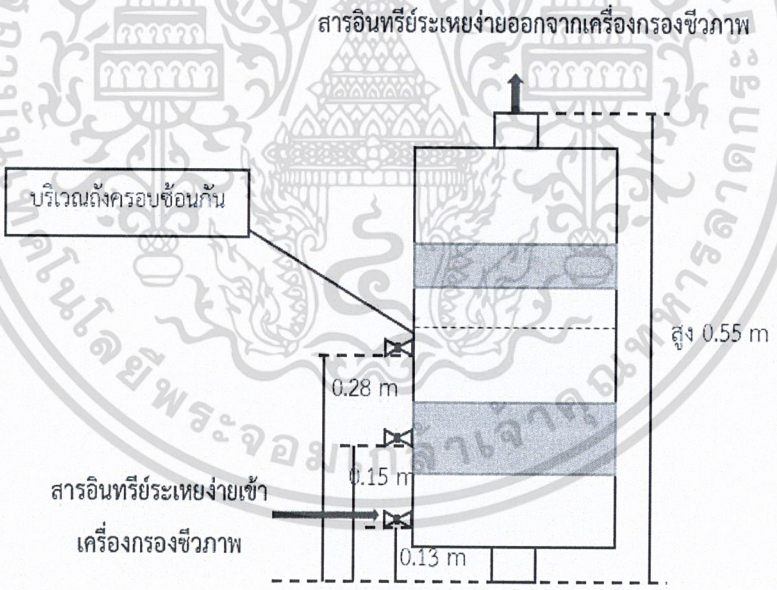
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดการทดลอง

3.3.1 เครื่องกรองชีวภาพ

ในการทดลอง ดำเนินการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพ 2 ขนาด แบบที่ 1 คือ เครื่องกรองชีวภาพ Laboratory Scale (Lab Scale) แบบที่ 2 คือ เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

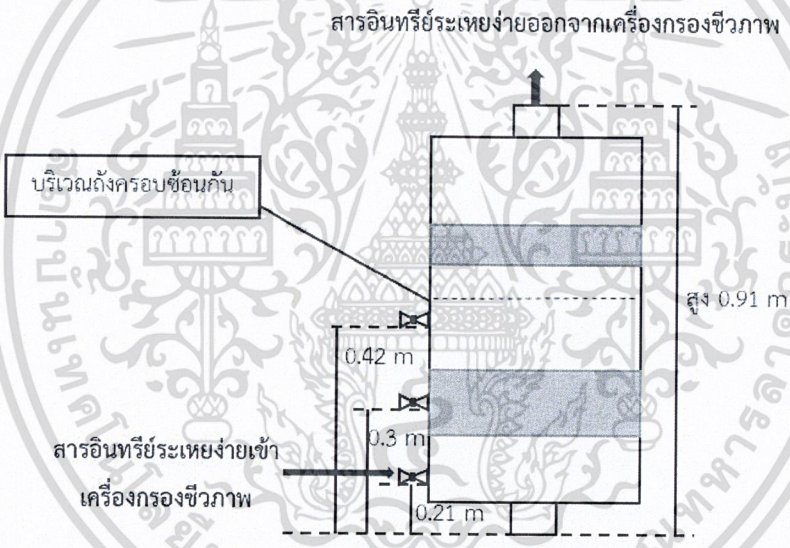
เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ หรือ เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale สร้างจากขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร ตัดก้นขวดครอบซ้อนกัน 2 ขวด โดยส่วนด้านล่างของถัง คือ จุดปล่อยเข้าสารอินทรีย์ระเหยง่าย ส่วนด้านบนของถัง คือ จุดปล่อยออกสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเครื่องกรองชีวภาพมีขนาด 10.35 ลิตร จำนวน 4 ชุดการทดลอง แบ่งบรรจุตัวกลางออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างบรรจุตัวกลางผสม ได้แก่ ปุ๋ยผสม (ปุ๋ยหมักผสมปุ๋ยมูลไก่), กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย ชั้นบนบรรจุถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนแสดงดังในตารางที่ 3.2) จุดกระแสอากาศเข้า-ออกเครื่องกรองชีวภาพมีความสูงจากขวดด้านล่างของถัง 0.13 เมตร และ 0.55 เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้มีช่องสำหรับการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ อยู่ที่จุด S1 มีความสูงจากคอขวดด้านล่างของถัง 0.15 เมตร และช่องสำหรับเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางอยู่ที่จุด S2 มีความสูงจากคอขวดด้านล่างของถัง 0.28 เมตร อากาศที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย



รูปที่ 3. 3 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกรองชีวภาพระดับนำร่อง (Pilot Scale) สร้างจากพลาสติก PET หรือ Polyethylene Terephthalate ขนาด 18.9 ลิตร ตัดก้นขวดครอบซ้อนกัน 2 ขวด โดยส่วนด้านล่างของถัง คือ จุดปล่อยเข้าสารอินทรีย์ระเหยง่าย ส่วนด้านบนของถัง คือ จุดปล่อยออกสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเครื่องกรองชีวภาพมีขนาด 34 ลิตร จำนวน 4 ชุดการทดลอง แบ่งบรรจุตัวกลางออกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างบรรจุตัวกลางผสม ได้แก่ ปุ๋ยผสม (ปุ๋ยหมักผสมปุ๋ยมูลไก่), กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย ชั้นบนบรรจุถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนแสดงดังในตารางที่ 3.2) จุดกระแสอากาศเข้า-ออกเครื่องกรองชีวภาพมีความสูงจากขวดด้านล่างของถัง 0.21 เมตร และ 0.91 เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้มีช่องสำหรับการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ อยู่ที่จุด S1 มีความสูงจากคอขวดด้านล่างของถัง 0.30 เมตร และช่องสำหรับเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางอยู่ที่จุด S2 มีความสูงจากคอขวดด้านล่างของถัง 0.42 เมตร อากาศที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

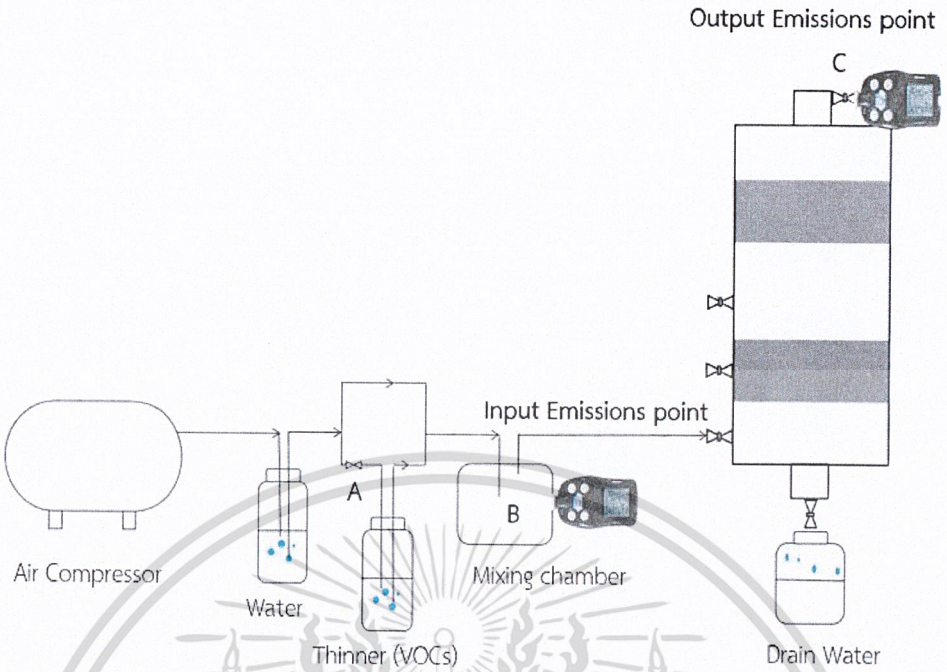


รูปที่ 3. 4 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

3.3.2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายก่อนเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพ ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่พิจารณาในการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 5 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

จากรูปที่ 3.5 ตัวแปรคงที่ คือ พ่นอากาศลงภายในภาชนะบรรจุสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ทินเนอร์) ซึ่งมีวาล์วจุด A ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิด โดยใช้ปั๊มที่มีอัตราการไหลของอากาศ 5.742 ลิตรต่อนาที ปั๊มพ่นอากาศและดันอากาศที่มีการปนเปื้อนไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เข้าสู่ภาชนะผสมและผสมเข้ากับอากาศที่บริเวณจุด B ปิดวาล์วจุด A ทำการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังจากที่ผ่านการผสมกับอากาศเพื่อให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้องการ โดยใช้เครื่อง Multi Gas Monitor USA ยี่ห้อ mPower (Model: POLI MP400P with Pump) ซึ่งทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายทุก 12 นาที หรือทุก ๆ รอบใหม่ของการเริ่มดำเนินการทดลองในแต่ละรอบ ตัวแปรอิสระ คือ สภาวะบรรยากาศจริง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ อุณหภูมิของกระแสอากาศในช่วง 16-31 องศาเซลเซียส และความชื้นของกระแสอากาศอยู่ในช่วง 70-100

3.3.3 การทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแบบกึ่งต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในตัวกลาง ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่พิจารณามีดังนี้ ในการทำทดลองมีการดำเนินการ 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีการพักระบบกรองชีวภาพทุกครั้งเมื่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายลดลงต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการพักระบบกรองชีวภาพเป็น 15, 30 และ 45 นาที ดำเนินการทดลองนี้เป็นเวลา 5 วันต่อสัปดาห์ รวมเวลาตลอดการทดลองเป็น

เอกสารนี้ [illegible] ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 วัน ทำการจำลองสถานภาพที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศเป็น 4.0 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้อัตราการไหลของปั๊ม 5.742 ลิตรต่อนาที และใช้เวลากักพักที่ 60 วินาที

3.3.4 ระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพ

ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้ตัวกลางเพื่อสร้างประชากรจุลินทรีย์ให้เจริญเติบโตและมีปริมาณมากเพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องด้วยจุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิต ดังนั้น ในการบำบัดจึงต้องมีการพักระบบเพื่อฟื้นฟูจุลินทรีย์และยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดอีกด้วย โดยระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration Rest Time, BRT) ดำเนินการพักที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที เพื่อเป็นการศึกษาเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้มากที่สุด

3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์

ในยุคปัจจุบันนี้ยุคที่มีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอย่างมาก สื่อที่ให้ความรู้ต่าง ๆ นั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งสื่อที่พบเห็นได้อย่างแพร่หลายและยังเป็นที่นิยม คือ ภาพอินโฟกราฟฟิค (Infographic) และ โปสเตอร์ ซึ่งเป็นสื่อที่มีบทบาทอย่างมากสื่อหนึ่งทั้งนี้เพราะทั้งสองเป็นสื่อที่สามารถเผยแพร่ได้สะดวก กว้างขวาง สามารถเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้ทุกพื้นที่ สื่อสารกับผู้รับสารได้ทุกเพศ ทุกวัย ทุกระดับการศึกษา มีความยืดหยุ่นในตัวของสื่อเป็นอย่างดี ทั้งโปสเตอร์ และ อินโฟกราฟฟิค ได้นำมาใช้โดยมีจุดประสงค์เพื่อ บอกกล่าว เผยแพร่ ให้ผู้รับสารมีความรู้ความเข้าใจและปฏิบัติตาม ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆที่ได้จากการทดลอง ผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง นำมาสรุปเป็นข้อมูลสั้น ๆ ให้เข้าใจได้ง่าย เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาเป็นข้อมูลเพื่อนำไปทำภาพอินโฟกราฟฟิค และโปสเตอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการผลิตสื่อประชาสัมพันธ์ในเรื่องการบำบัดมลพิษของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองทางชีวภาพ ให้สามารถเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายที่มีความสนใจในเรื่องนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ขั้นตอนการสร้างสื่อออนไลน์

ในขั้นตอนของการสร้างสื่อออนไลน์ สื่อที่เราจะทำการสร้างนั้นคือ ภาพอินโฟกราฟฟิค

3.4.1.1 รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ทั้งข้อมูลวิธีการทดลอง ข้อมูลการค้นคว้าต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยเราจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลให้ครบและครอบคลุมที่สุด

3.4.1.2 พิจารณา วิเคราะห์ และสรุปผลของข้อมูลที่ทำการรวบรวมมาทั้งหมด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความสั้นกระชับและเข้าใจได้ง่าย

3.4.1.3 นำข้อมูลที่ได้จากการพิจารณา วิเคราะห์ และสรุปผลมากำหนดขอบเขตของโปสเตอร์ โดยแบ่งออกเป็น

1) ขนาดของภาพอินโฟกราฟฟิค

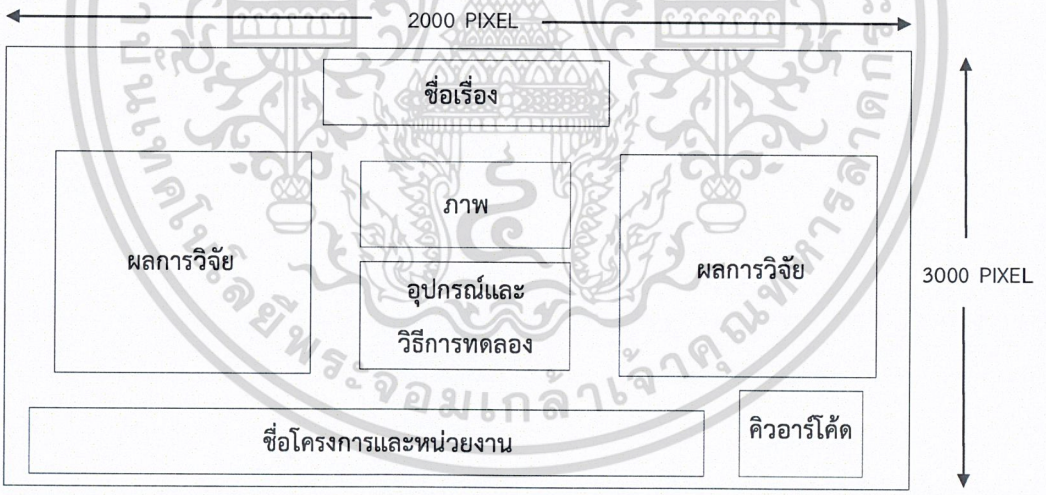
2.) เนื้อหา

3.) ภาพประกอบ

4.) แนวคิดในการออกแบบ

5.) สีและฟอนต์ที่ใช้ในการออกแบบ

3.4.1.4 การออกแบบภาพอินโฟกราฟฟิค โดยในการออกแบบ โปรแกรมที่เราใช้ในการออกแบบนั้น คือ โปรแกรม Adobe Photoshop โดยภาพในการจัดวางเลย์เอ้าท์ต่าง ๆ มีค่าดังต่อไปนี้



หมายเหตุ: ในการจัดวางเลย์เอ้าท์ต่าง ๆ อาจมีการปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสม

รูปที่ 3. 6 ภาพแสดงการจัดวางเลย์เอ้าท์ต่าง ๆ ของอินโฟกราฟฟิคในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสื่อออนไลน์และการเผยแพร่

ภาพอินโฟกราฟฟิค ที่ได้หลังผ่านขั้นตอนการสร้าง นำมาประเมินคุณภาพ ตรวจสอบความถูกต้องและครบถ้วนของข้อมูลตลอดจนความสวยงาม ความน่าสนใจของภาพ เมื่อผ่านขั้นตอนของการตรวจสอบแล้วภาพอินโฟกราฟฟิค ที่ได้จะถูกนำเผยแพร่โดยผ่านการประชาสัมพันธ์ต่าง ๆ เช่น เว็บไซต์ หรือคิวอาร์โค้ด เป็นต้น

รูปที่ 3. 7 ภาพแสดงตัวอย่าง อินโฟกราฟฟิค ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง

ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบเครื่องกรองชีวภาพที่สามารถใช้งานได้จริงให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ โดยการศึกษาระยะเวลาการพักระบบที่เหมาะสมต่อการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และ Pilot Scale โดยในการวิจัยเลือกใช้วัสดุตัวกลางหลัก คือ ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยมูลไก่ และถ่านกัมมันต์ วัสดุตัวกลางเสริม คือ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดีย วัสดุที่นำมาใช้ถือว่ามีความเหมาะสมต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับเครื่องกรองชีวภาพได้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวกลางหลัก

พารามิเตอร์	คุณสมบัติของตัวกลางหลัก		
	ปุ๋ยหมัก ($\bar{x} \pm SD$)	ปุ๋ยมูลไก่ ($\bar{x} \pm SD$)	ค่าที่แนะนำ
ความพรุน (%)	68.34	60.18	40 – 80 %
อินทรียวัตถุ (%)	54.28	61.76	> 55 %
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.55	0.72	-
pH	7.82	7.55	6 - 8
N %	0.56	0.86	0.4 %
P %	0.08	0.24	0.15 %
K %	0.33	0.81	0.15 %

หมายเหตุ *ค่าที่แนะนำมาจาก Devniny *et al.*, 1999

4.1.1 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ วัสดุตัวกลางที่มีความพรุนสูง ข้อดี คือ การทำให้การกระจายตัวของอากาศได้ดี ทำให้มลพิษเกิดการสัมผัสกับฟิล์มชีวภาพในการบำบัดได้สูงขึ้น และทำให้เกิดการสูญเสียความดันน้อย (Head Loss) ข้อเสีย คือ อาจมีการทรุดตัวภายหลังถ้าวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้มีความพรุนที่ไม่สามารถรองรับหรือสัมผัสกับมลพิษได้ จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เลือกใช้ตัวกลางที่มีความพรุนประมาณ 40 – 80 เปอร์เซ็นต์ (Devinny และคณะ, 1999) จากผลการทดลองในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ พบว่า ตัวกลางปุ๋ยหมักมีความพรุน 68.34 เปอร์เซ็นต์ และปุ๋ยมูลไก่ 60.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งตัวกลางหลักและตัวกลางเสริมถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความพรุนเหมาะสมจึงนำมาใช้เป็นตัวกลางผสม

4.1.2 อินทรียวัตถุ (Organic Matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวกลางมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยปกติจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์จากสารมลพิษ หากระบบหยุดการทำงานในช่วงเวลาพักระบบ จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์จากตัวกลางแทน ซึ่งตัวกลางควรมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ (Leson and Winer, 1991) ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยผสมประกอบด้วยตัวกลางหลัก คือ ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยมูลไก่ มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในช่วง 54.28 – 61.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงตามเกณฑ์

4.1.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยนำมาพิจารณาการออกแบบโครงสร้างรองรับตัวกลาง จากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุตัวกลางพบว่าตัวกลางหลัก คือ ปุ๋ยหมัก และ ปุ๋ยมูลไก่ มีความหนาแน่นประมาณ 0.55 และ 0.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุตัวกลางเสริม โดยการเติมกาบมะพร้าวเพื่อเพิ่มความพรุน และป้องกันการทรุดตัวของตัวกลางนอกจากนี้เพื่อให้มีออกซิเจนแทรกไปตามรูพรุน ส่งผลทำให้อายุการใช้งานของตัวกลางสามารถใช้งานได้นานมากขึ้น

4.1.4 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ความเป็นกรด - ด่างมีผลต่อการดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพเพราะจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในสภาพเป็นกลางโดย โดยจุลินทรีย์ทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6-8 (Devinny *et al.*, 1999) จากการทดลองเลือกใช้ปุ๋ยผสม ผลการวิเคราะห์ตัวกลางปุ๋ยผสม พบว่า มีความเป็นกรด – ด่างอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

4.1.5 ความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในระบบของเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากความชื้นช่วยในการละลายมลพิษและธาตุอาหารไว้สำหรับจุลินทรีย์ในการดำรงชีวิตและกิจกรรมจุลชีพในระบบด้วยค่าความชื้นตัวกลางที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ (Devinny *et al.*, 1999) ซึ่งจำเป็นต้องมีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางก่อนการเดินระบบเพื่อให้ความชื้นของตัวกลางอยู่

เอกสารนี้ ... การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นช่วงเวลาที่มีการหยุดเดินระบบจะต้องมีการปิดช่องทางเข้าและทางออกของเครื่องกรองชีวภาพเพื่อให้ระบบในเครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบปิด เพื่อเป็นการรักษาความชื้นในเครื่องกรองชีวภาพ นอกจากนี้ได้มีการพ่นน้ำสู่ตัวกลางวันละ 1 ครั้ง เพื่อเป็นการทำให้ความชื้นของตัวกลางอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารประเภทไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมประมาณ 0.4, 0.15 และ 0.15% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่ามีไนโตรเจนและโพแทสเซียมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ส่วนธาตุฟอสฟอรัสของตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

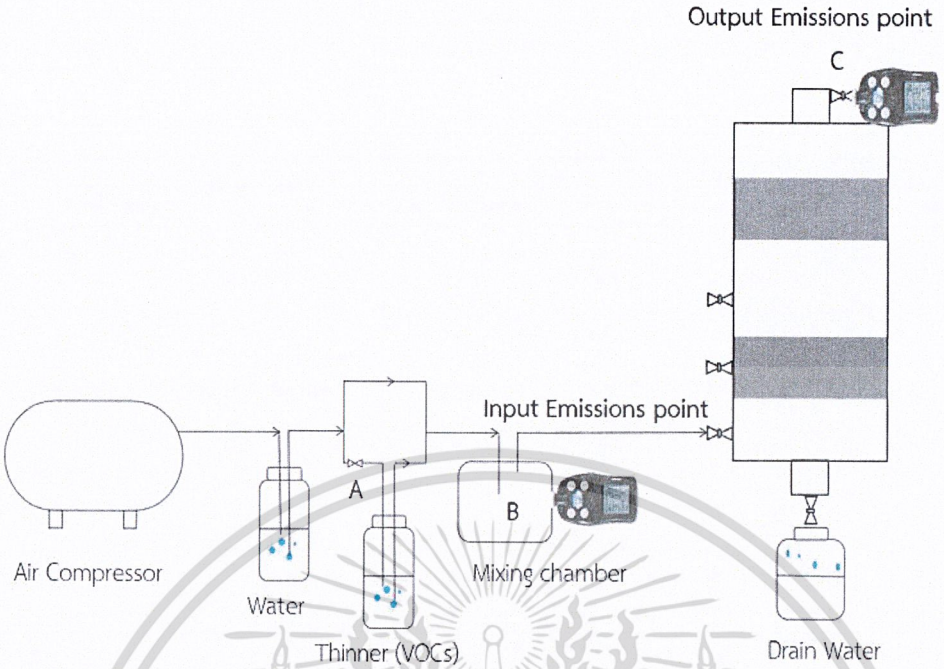
จากผลของคุณสมบัติตัวกลาง คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของตัวกลางแต่ละชนิดที่เลือกใช้ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่อาจมีสมบัติทางกายภาพบางประการที่ต้องทำการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ เช่น การเติมน้ำให้กับตัวกลางเพื่อเป็นความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เติมปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไก่ เป็นต้น

4.2 ผลการจำลองสถานการณ์และเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.2.1 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่า สามารถควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ โดยในการทดลองครั้งนี้ทำการพ่นอากาศที่มีอัตราการไหลของอากาศสำหรับเครื่องกรองขนาด Lab Scale และขนาด Pilot-Scale ที่ 5.742 ลิตรต่อนาที เข้าสู่ขวดที่บรรจุน้ำและเปิดวาล์วที่จุด A ให้อากาศเข้าสู่ขวดที่บรรจุทินเนอร์ ทำการบรรจุทินเนอร์ที่ 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเปิดวาล์วจุด A เพื่อเจือจางความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายใน Mixing Chamber ซึ่งเป็นจุดวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นเมื่อได้ความเข้มข้นเท่ากับ 4.00 ล้านในล้านส่วน(ppm) ตามที่ต้องการให้ทำการเปิดวาล์ว จุด B ทำการพ่นอากาศที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายปนเปื้อนเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพเมื่ออากาศไหลจาก Mixing Chamber จนหมดจะทำการปิดวาล์ว จุด B และกักอากาศในเครื่องกรองชีวภาพเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นเปิดวาล์วที่จุด B และ C เพื่อไล่อากาศทั้งหมดเข้าสู่จุดวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังจากออกจากเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งในกระบวนการทดลองนี้เรียกว่า 1 ครั้งต่อการทดลอง ใช้เวลาในการทดลองประมาณ 12 นาที ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จึงทำการพักระบบเครื่องกรองชีวภาพ โดยเครื่องกรองชีวภาพมีกลไกการทำงานดังแสดงในรูป 4.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

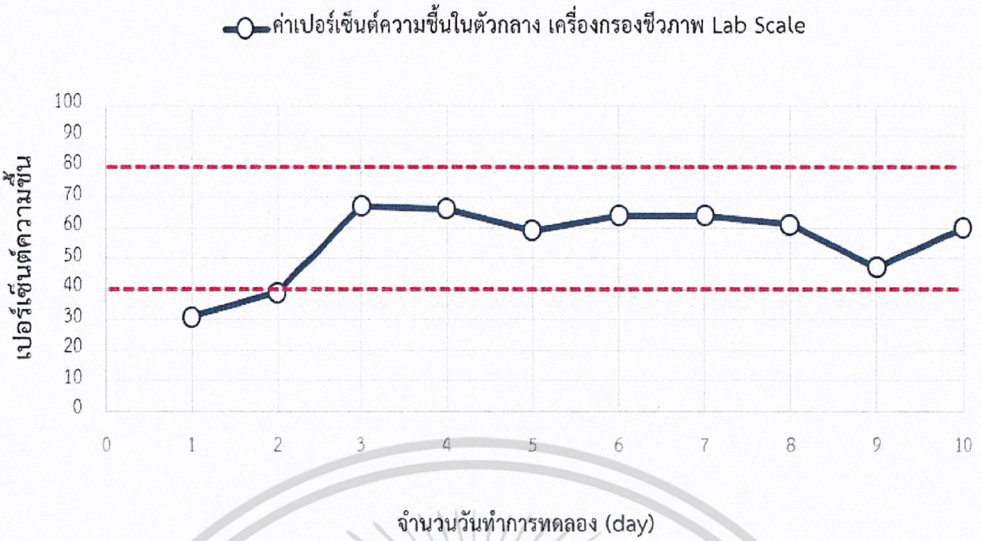
4.3 ผลของตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสม

4.3.1 ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของตัวกลาง

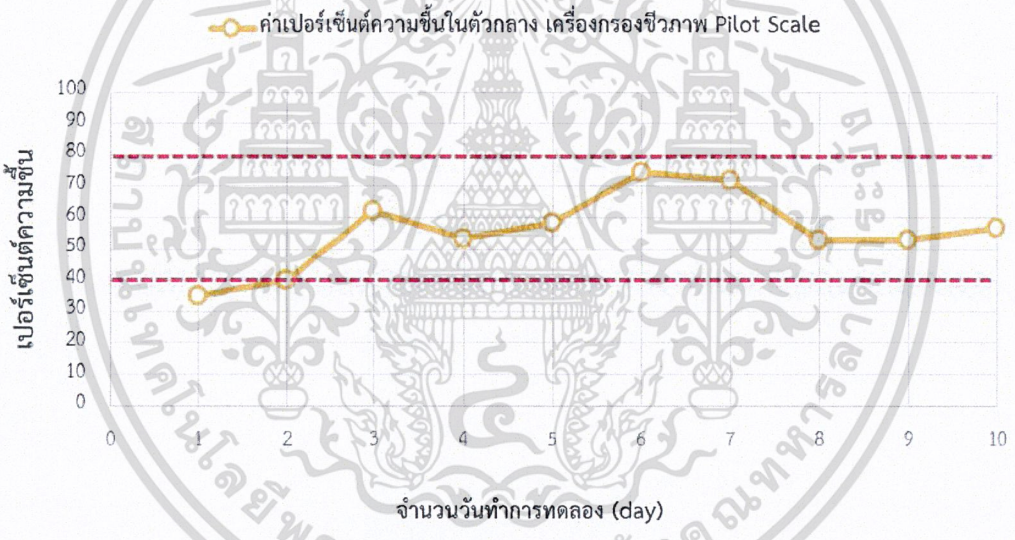
ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องมีการใช้ความชื้นในการทำงานและการดำรงชีพ โดยระดับความชื้นของตัวกลางที่เหมาะสมในเครื่องกรองชีวภาพมีค่าประมาณ 40 - 80 เปอร์เซ็นต์ (Devinny et *al*., 1999) ในการควบคุมความชื้นนั้นทำได้ 2 วิธี คือการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในกระแสที่อากาศเข้าระบบให้สูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และการเติมน้ำให้ผิวหน้าของชั้นตัวกลางซึ่งการทดลองนี้ได้มีการเพิ่มความชื้นให้กับตัวกลางทั้ง 2 วิธี

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของชั้นตัวกลางและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าสู่ระบบกับระยะเวลาการเดินระบบของตัวกลาง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวกลางปุ๋ยผสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง และมีการทำชุดการทดลองเป็น 2 ขนาด ระหว่างเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale จะเห็นถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดเครื่องกรองชีวภาพ ที่มีความชื้นของตัวกลางที่แตกต่างกัน แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่มีความเหมาะสมของชั้นตัวกลาง พบว่า ในการทดลองสามารถควบคุมความชื้นของชั้นตัวกลางได้ตัวกลางมีความพรุนที่มีความเหมาะสม โดยในช่วงต้นของการเดินระบบมีการควบคุมความชื้นได้ยากแต่ก็สามารถควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale



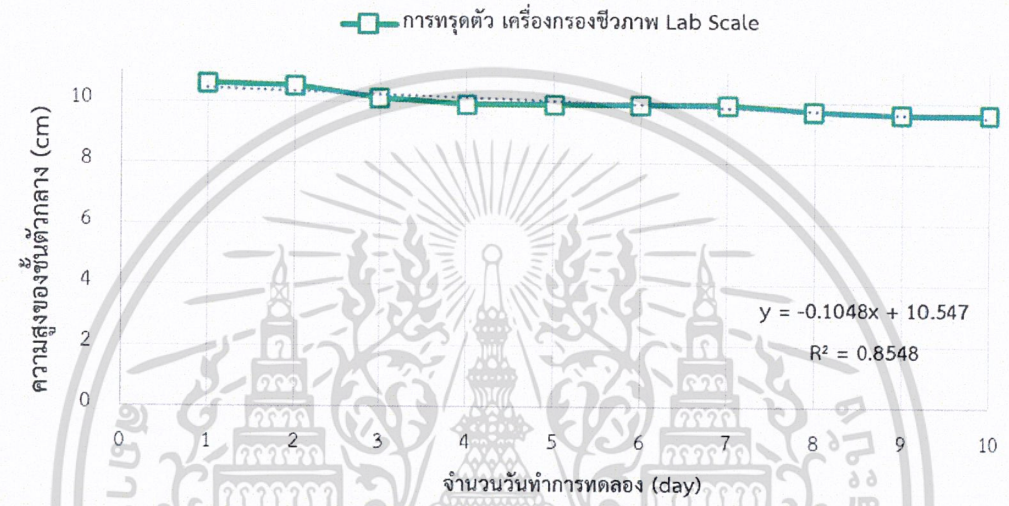
รูปที่ 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

4.3.2 การทรุดตัวของชั้นตัวกลาง

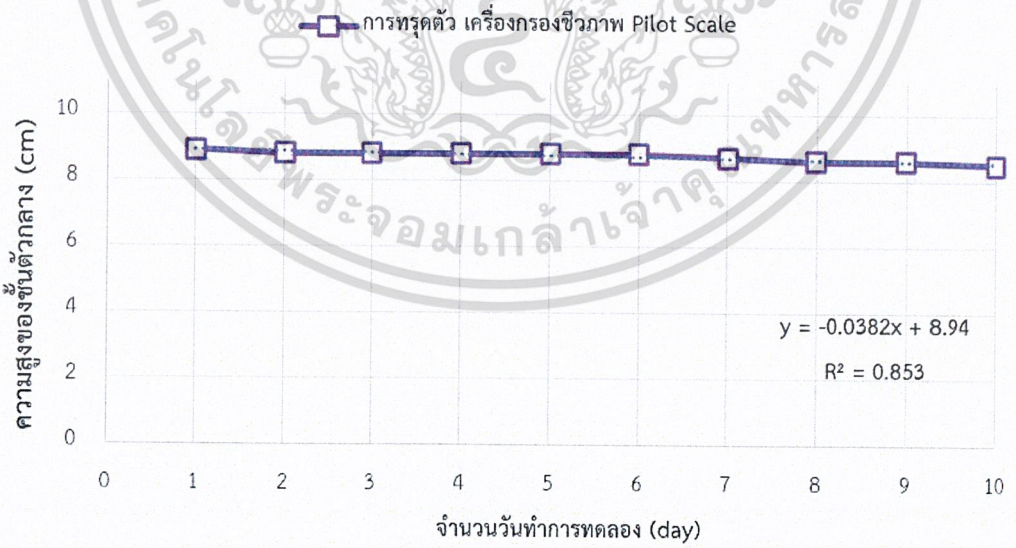
จากการทดลองพบว่าเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองมีการทรุดตัวลงของชั้นตัวกลางสังเกตได้จากการลดลงของความสูงของชั้นตัวกลางเมื่อระยะเวลาผ่านไปในแต่ละวัน การทรุดตัวของตัวกลางจากรูป 4.4 - 4.5 เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale มีการทรุดตัวของชั้นตัวกลางที่มีความแตกต่างกัน เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale มีการทรุดตัวของชั้นตัวกลางเท่ากับ 1 เซนติเมตรมีการทรุดตัวมากกว่าเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale ที่มีการทรุดตัวของชั้นตัวกลางเท่ากับ 0.4 เซนติเมตร การทรุดตัวของชั้นตัวกลางที่แตกต่างกันอาจมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นในชั้นตัวกลางในแต่ละขนาดของเครื่องกรองชีวภาพ ส่งผลให้การทรุดตัวของชั้นตัวกลางมีความแตกต่างกัน ซึ่งหากมีการทรุดตัวลงของชั้นตัวกลางในระบบเครื่องกรองส่งผลให้กระแสอากาศสามารถไหลผ่านตัวกลางได้ยากจึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในเครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลง นอกจากนี้การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพส่งผลให้เกิดการอัดแน่นของตัวกลางซึ่งอาจทำให้ตัวกลางบางส่วนของเครื่องกรองชีวภาพมีสภาวะไร้อากาศจึงเป็นที่มาที่อาจส่งผลให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 4.4 การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale



รูปที่ 4.5 การทรุดตัวของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ความเป็นกรด – ด่างของชั้นตัวกลาง

ตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพประกอบไปด้วยจุลินทรีย์ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง โดยค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลางมีความเหมาะสมอยู่ในช่วง 6 - 8 (Devinny *et al.*, 1999) ซึ่งจากการทดลองระบบการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ถือได้ว่ามีค่าความเป็นกรด – ด่างที่มีความเหมาะสมอยู่ในช่วง 6 - 7 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด – ด่างที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.3.4 อุณหภูมิของชั้นตัวกลาง

อุณหภูมิของชั้นตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองตลอดระยะเวลาในการเดินระบบในการทดลอง พบว่า อุณหภูมิของเครื่องกรองชีวภาพแต่ละชุดการทดลองมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 26 - 29 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อเครื่องกรองชีวภาพที่มีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส (Diks and Ottengraf, 1991) แต่อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงไม่ให้อุณหภูมิเกิน 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอาจจะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ดังนั้นอุณหภูมิของตัวกลางในขณะทดลองจึงอยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสม

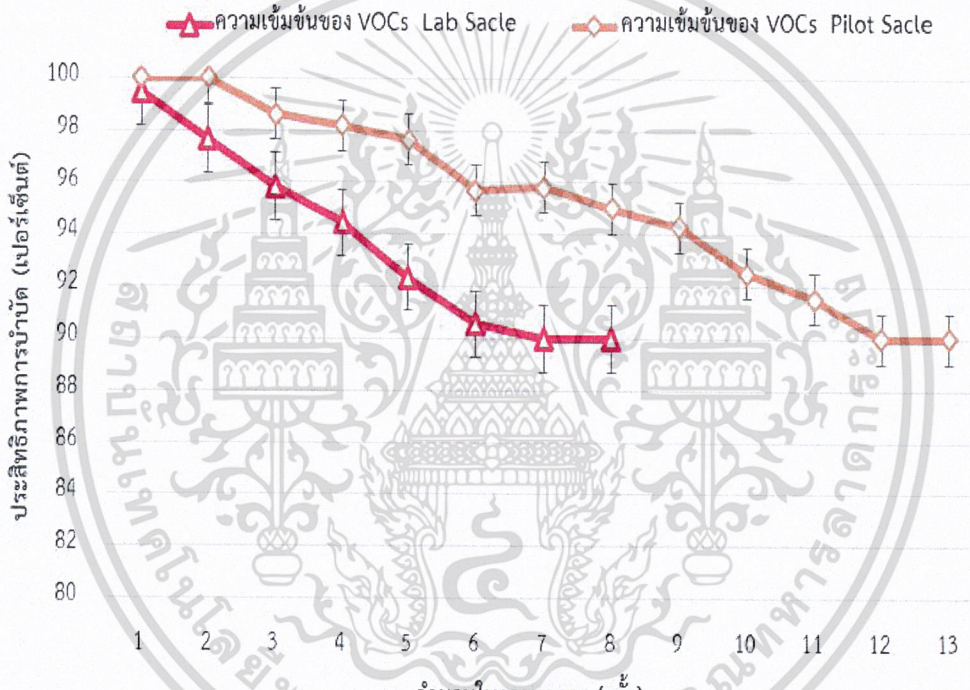
4.3.5 ประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษาชุดควบคุมของเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องเลือกใช้ตัวกลางในการบำบัด คือ ปุ๋ยผสม (Compost and Manure) เป็นการผสมระหว่างปุ๋ยหมัก (Compost) และปุ๋ยมูลไก่ (Manure) ในการทดลอง พบว่า ไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากตัวกลางหรือจะสลายออกมาในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic degradation) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ในชุดการทดลองมีสภาวะอากาศที่เพียงพอและไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากตัวกลางในระบบ จากการศึกษาตัวกลางและตัวแปรที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ทำการเลือกใช้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายคือ 4.00 ล้านในล้านส่วน ใช้เวลากักพักเท่ากับ 60 วินาที และใช้อัตราการไหลของอากาศ ที่ 5.74 ลิตรต่อนาที ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายและประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันของเครื่องกรองชีวภาพขนาด Lab Scale และขนาด pilot-scale ดังแสดงในรูปที่ 4.6 - 4.8 พบว่า เมื่อมีการขยายขนาดของเครื่องกรองชีวภาพให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศจะมีค่าที่สูงขึ้นขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

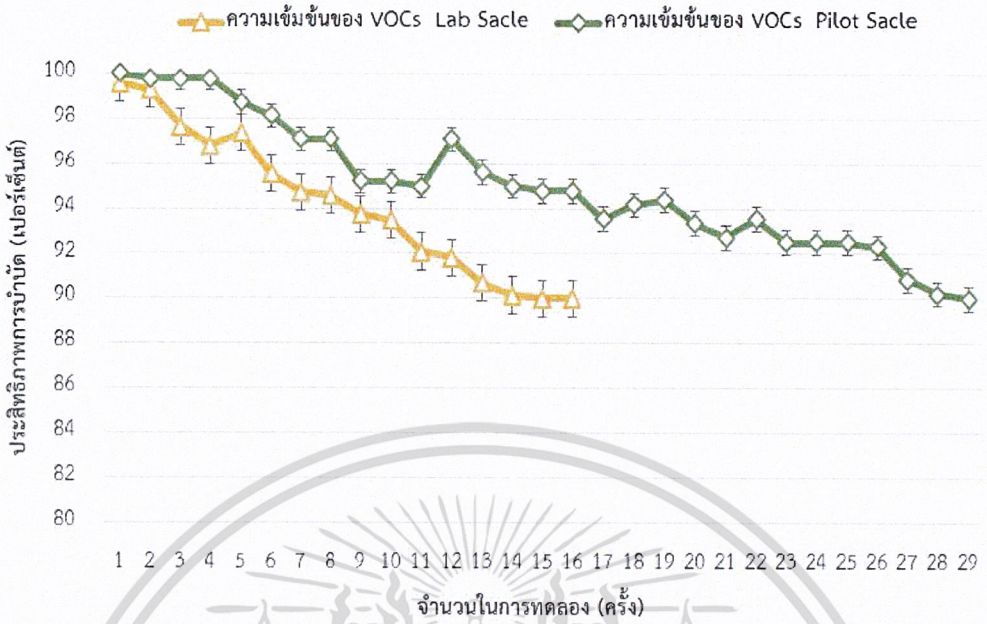
4.3.6 การพักระบบกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องมีการใช้ตัวกลางสำหรับสร้างประชากรจุลินทรีย์ให้เจริญเติบโตและมีปริมาณมากเพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องด้วยจุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิต ดังนั้นในการบำบัดจึงต้องมีการพักระบบเพื่อฟื้นฟูจุลินทรีย์และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยระยะเวลาในการพักระบบกรองชีวภาพดำเนินการพักที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที เพื่อเป็นการศึกษาเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้มากที่สุด

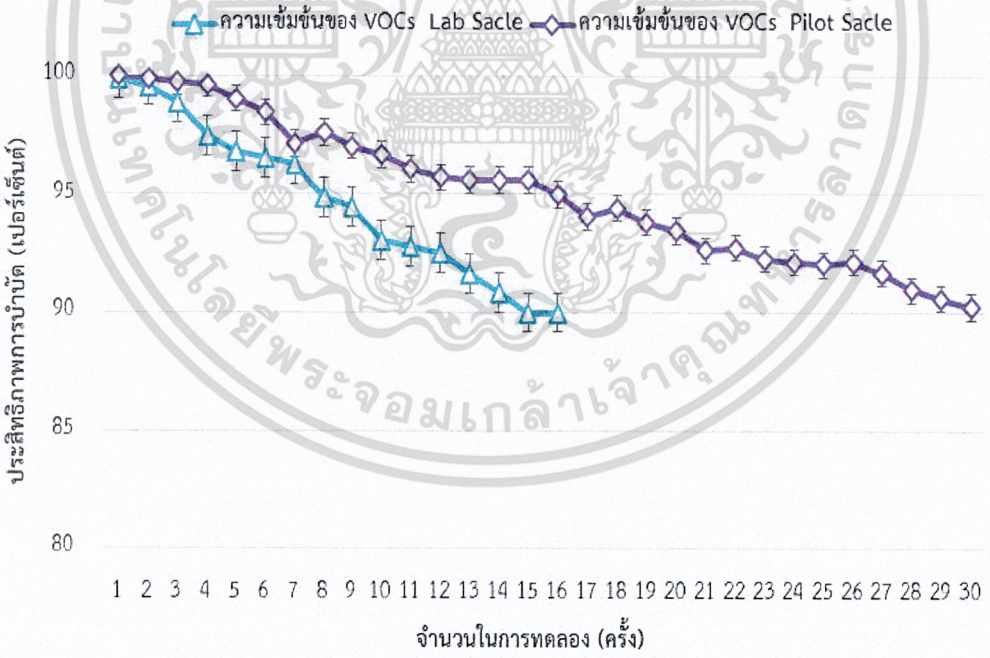


รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาทีของเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาทีของเครื่องกรองชีวภาพ

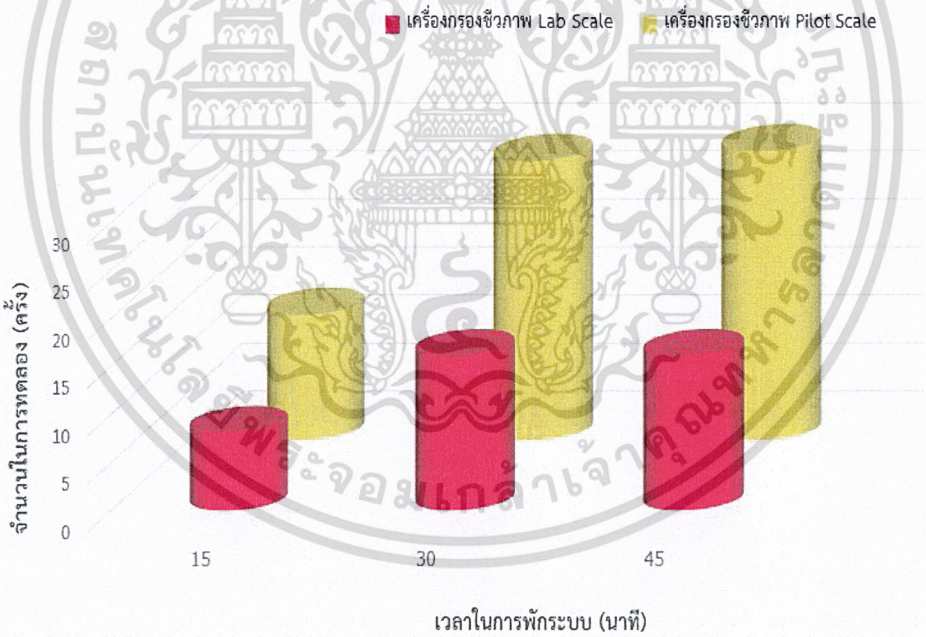


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนครั้งการทดลองจากการพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาทีของเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพและขนาดของเครื่องกรองชีวภาพ

การดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องของเครื่องกรองชีวภาพที่มีขนาดของเครื่องกรองและระยะเวลาในการพักระบบที่แตกต่างกันคือ มีขนาดของเครื่องกรองชีวภาพ 2 ขนาดนั้น คือ Lab Scale และ Pilot Scale ตามลำดับ และเวลาในการพักระบบกรองชีวภาพ 3 เวลา คือ 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ เมื่อเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเครื่องกรองชีวภาพมีระยะเวลาที่นานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษของเครื่องกรองทั้งสองขนาดพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีประสิทธิภาพที่ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดไม่สามารถฟื้นตัวทัน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษของจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพที่ลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการพักระบบเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อให้จุลินทรีย์ฟื้นตัวกลับมามีประสิทธิภาพในการบำบัดอีกครั้ง ซึ่งจากรูป 4.9 เมื่อมีการขยายขนาดของเครื่องกรองชีวภาพประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะมากขึ้นและระยะเวลาในการพักระบบของเครื่องกรองชีวภาพเมื่อมีการพักระบบนานขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษก็จะมากขึ้นตามเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4. 9 การเปรียบเทียบระยะเวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่มีผลต่อจำนวนครั้งในการทดลองที่ขนาดของเครื่องกรองชีวภาพที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานการเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์

ในการดำเนินการออกแบบสื่อออนไลน์ ซึ่งสื่อที่จัดทำ คือ ภาพอินโฟกราฟฟิค (Infographic) เป็นการออกแบบและเผยแพร่เพื่อประกอบการให้ความรู้เรื่องการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ภาพอินโฟกราฟฟิค ที่มีคุณภาพและมีความเหมาะสมในการนำไปประกอบการให้ความรู้กับผู้ที่สนใจ นอกจากนี้ยังสามารถเป็นแนวทางในการสร้างสื่อให้ความรู้ด้านการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ระบบทางชีวภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อีกด้วย

ผู้จัดทำได้มีการออกแบบภาพอินโฟกราฟฟิค ไว้ 3 ภาพ ซึ่งในแต่ละภาพจะเป็นการอธิบายข้อมูลต่าง ๆที่เกี่ยวกับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ ที่ได้มีการยกประเด็นที่น่าสนใจ มีการสรุปเนื้อหา มีการยกตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพอินโฟกราฟฟิคที่สามารถทราบและเข้าใจในเนื้อหาได้ง่าย โดยภาพอินโฟกราฟฟิคทั้งหมดได้มีการสร้างคิวอาร์โค้ดในภาพเพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถแสกนเพื่อเข้าไปยังข้อมูลที่มีการอธิบายเนื้อหาของภาพนั้นได้ เพื่อให้เข้าใจในเนื้อหาของภาพนั้นมากยิ่งขึ้น

4.4.1 ผลของขั้นตอนการออกแบบภาพอินโฟกราฟฟิค

4.4.1.1 ภาพอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 1 ในภาพนี้เป็นการเปรียบเทียบตัวกลางชนิดใดที่สามารถให้ค่าการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศได้มากที่สุดเป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลาง 3 ชนิดคือปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ และปุ๋ยผสม โดยในตัวกลางชนิดที่ 1 คือปุ๋ยหมักจะมีส่วนประกอบคือปุ๋ยหมัก ถ่านกัมมันต์ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดียในอัตราส่วน 30 : 30 : 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ตัวกลางชนิดที่ 2 คือปุ๋ยมูลไก่จะมีส่วนประกอบคือปุ๋ยมูลไก่ ถ่านกัมมันต์ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดียในอัตราส่วน 30 : 30 : 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ และตัวกลางชนิดที่ 3 คือปุ๋ยผสมจะมีส่วนประกอบคือปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ ถ่านกัมมันต์ กาบมะพร้าว และไบโอมีเดียในอัตราส่วน 20 : 20 : 20 : 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนั้นให้ค่าการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ 84.63, 90.10 และ 90.80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวกลางชนิดที่ 3 คือปุ๋ยผสมเป็นตัวกลางที่ให้ค่าการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 1 ผู้ออกแบบ นายณัฐธัญ แขจังหรีด

4.4.1.2 ภาพอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 2 ในภาพนี้เป็นการยกประเด็นที่เกี่ยวกับการอธิบายข้อมูลของระบบการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ มีการอธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบของเครื่องกรองชีวภาพซึ่งส่วนประกอบของเครื่องกรองจะแบ่งออกเป็นชั้นบนและชั้นล่างโดยในชั้นบนของเครื่องกรองชีวภาพจะมีการบรรจุถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และชั้นล่างจะเป็นการผสมกันระหว่างปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลไก่ ไบโอมีเดีย กากมะพร้าว ในอัตราส่วน 20 : 20 : 20 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงข้อดีของระบบกรองชีวภาพเพื่อให้ผู้ที่สนใจได้ทราบและเข้าใจมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 2 ผู้ออกแบบ นางสาวณัฐชยาพร เรืองฤทธิ์

4.4.1.3 ภาพอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 3 ในภาพนี้เป็นการยกประเด็นที่เกี่ยวกับการอธิบายการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยในภาพจะมีการอธิบายกลไกของการบำบัดซึ่งกลไกของการบำบัดจะมีกลไกดังนี้คือมีการป้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศที่มีความเข้มข้น 4 ppm เข้าทางด้านล่างของเครื่องกรองโดยมลพิษที่ผ่านเข้าไปจะผ่านชั้นของตัวกลางและออกมาทางด้านบนของเครื่องกรองโดยผลิตภัณฑ์ที่ออกมาคือ น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งไม่เป็นอันตราย ประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพนั้นสามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีการแสดงผลของข้อมูลจากการดำเนินระบบของเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง เนื่องจากการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพจะเป็นการดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องจะมีการใช้จุลินทรีย์ในการทำงานมากขึ้นและนานขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อตัวจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษมีค่าน้อยลงจึงต้องมีการพักระบบกรองชีวภาพเกิดขึ้น ซึ่งในภาพจะมีผลของเวลาในการพักระบบนานเท่าใดที่สามารถฟื้นฟูตัวจุลินทรีย์ให้กลับมามีประสิทธิภาพที่เหมาะสมมากที่สุด จากการทดลองพบว่าเวลาที่ 30 นาทีจะเป็นเวลาในการพักระบบกรองชีวภาพที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4. 12 ภาพแสดงอินโฟกราฟฟิค ภาพที่ 3 ผู้ออกแบบ นายทรงพล ทองมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ ระหว่างเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale นอกจากนี้ยังศึกษาระยะเวลาการพักระบบที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัย และมีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1). ในการทดลองทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ 2 ขนาด คือ เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และ เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale ซึ่งเป็นการต่อยอดสร้างเครื่องกรองชีวภาพให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จากขนาด 10.35 ลิตร เป็นขนาด 34 ลิตร จึงส่งผลให้ตัวกลางที่ใช้ในการบำบัดมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน เพื่อเหมาะสมแก่การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้อัตราส่วนตัวกลางหลักต่อตัวกลางเสริม คือ 60 : 40 โดยปริมาตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ pilot scale มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น 57% จากประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale

2). ในการทดลองนี้เมื่อประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จะทำการพักระบบกรองชีวภาพตามเวลาที่กำหนด คือ 15, 30 และ 45 นาที หลังจากนั้นดำเนินการทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายอีกครั้ง พบว่าจำนวนครั้งในการทดลองเพิ่มขึ้นเมื่อมีการพักระบบกรองชีวภาพที่นานขึ้น โดยจำนวนครั้งการทดลอง ณ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 15, 30 และ 45 นาที ของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale คือ 8, 16 และ 16 ครั้ง ตามลำดับ สำหรับจำนวนครั้งการทดลองของเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale คือ 13, 29 และ 30 ครั้ง ตามลำดับ ดังจะเห็นว่าที่เวลาการพักระบบกรองชีวภาพระหว่าง 30 และ 45 นาที ได้จำนวนครั้งการทดลองที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 30 นาที

3). ในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และ เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale ทำการบำบัดที่ความเข้มข้น 4.0 ส่วนในล้านส่วน โดยมีอัตราการไหล 5.74 ลิตรต่อนาที ณ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 15, 30 และ 45 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale คือ 93.75, 94.50 และ 94.87 % ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของเครื่อง

เอกสารนี้ [illegible] การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองชีวภาพ Pilot Scale คือ 95.46, 95.10 และ 95.13 % ตามลำดับ ดังจะเห็นว่า การพักระบบกรองชีวภาพที่ 30 นาที ใช้เวลาน้อยกว่า การพักระบบกรองชีวภาพที่ 45 นาที แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale และ Pilot Scale ณ เวลาการพักระบบกรองชีวภาพที่ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด คือ 94.50 และ 95.10% ตามลำดับ

4). จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale สูงกว่าเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale จึงมีความเหมาะสมในการเป็นฐานข้อมูลและแนวทางเพื่อนำไปสู่การต่อยอด พัฒนาเครื่องกรองชีวภาพระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5). ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับสภาพ ปัจจัย และคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเดินระบบเครื่องกรองชีวภาพ นอกจากนี้วัสดุตัวกลางที่ใช้ในการบำบัดสามารถกักเก็บความชื้นได้ดี ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

6). ในการสร้างเครื่องกรองชีวภาพเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถซื้อได้ ค่าใช้จ่ายต่ำ และมีความสะดวกในการเดินระบบเครื่องกรองชีวภาพ

7). จากการดำเนินงานเมีการออกแบบภาพ infographic ทั้งหมด 3 รูปแบบ รูปแบบละหนึ่งภาพเพื่อเผยแพร่ผลงานและองค์ความรู้ผ่านสื่อออนไลน์ในรูปแบบอินโฟกราฟฟิค

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้สามารถต่อยอดการสร้างเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งในระบบอุตสาหกรรมต้องมีระบบการทำงานของเครื่องจักรกลตลอดเวลาและอากาศต้องมีการปลดปล่อยออกมาตลอดเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการพักระบบกรองชีวภาพขึ้นอาจส่งผลทำให้เสียเวลาในช่วงที่มีการพักระบบกรองชีวภาพ โดยในการศึกษาเครื่องกรองชีวภาพทั้ง Lab Scale และ Pilot Scale ได้ทำการศึกษาแค่ขนาดละหนึ่งยูนิต ดังนั้นถ้าบริษัทหรือองค์กรต้องการนำไปใช้สามารถตั้งเครื่องกรองชีวภาพได้หลายยูนิตเช่นตั้ง 6 ยูนิต ยูนิตที่ 1-3 ไม่มีการพักระบบแต่พักระบบยูนิตที่ 4-6 เอาไว้เมื่อยูนิตที่ 1-3 มีประสิทธิภาพต่ำ สามารถวนสลับกลับไปใช้ยูนิตที่ 4-6 ซึ่งการดำเนินงานในลักษณะนี้เหมือนไม่มีการพักระบบกรองชีวภาพเพียงแค่เปลี่ยนระบบ ดังนั้นระบบจะกลายเป็นระบบต่อเนื่องได้ ซึ่งควรมีการศึกษาประสิทธิภาพพารามิเตอร์รวมทั้งปัจจัยด้านอื่น ๆ ต่อการเดินระบบในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังควรศึกษาทิศทางของอากาศเข้าตรงข้ามจากการเดินระบบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ควบคุมมลพิษ. กรม. 2544. **โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบการกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ)**.รายงานฉบับสมบูรณ์.

ควบคุมมลพิษ. กรม. 2544. **ไซลีน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : อินทิเกรเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี.

จิรวัฒน์ กันพยันต์. 2548. **การบำบัดไอออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชาตรี อิณชิต. 2546. **ประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพในการบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนด้วยสไตรีนโมโนเมอร์.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์. 2554. **ปุ๋ยหมัก ดินหมัก และปุ๋ยน้ำชีวภาพ : เพื่อการปรับปรุงดินโดยวิธีการเกษตรธรรมชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์.

เทียนฉาย สถิรภิวงศ์. 2554. **การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย ด้วยแผ่นฟอกอากาศโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซีส.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นพภาพร พานิชและคณะ. 2547. **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สราวุธ หาญทนงค์. 2543. **ประสิทธิภาพการบำบัดไอของเบนซีนและโทลูอีนโดยเครื่องอากาศชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุโรชา พูลสวัสดิ์. 2546. **การกำจัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เสริมศักดิ์ ทั่งมั่งมี. 2546. **ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีนโดยเครื่องกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกชัย เลิศพดุงวิทย์. 2548. **การกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Arulneyam, D., and Swaminathan. T. 2000. **Biodegradation of Ethanol Vapor in a Biofilter**. Bioprocess Engineering 22 : 63-67.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chou, M-S., and Cheng W-H 1997. **Screening of Biofiltration Material for VOC Treatment**. Journal of the Air and Waste Management Association. 47 (6) : 674-681.

Daniel.Cardenas. 2010. File : **2005 Source of VOCs.png**. [Online]. เข้าถึงได้ : https://en.wikipedia.org/wiki/File:2005_sources_of_vocs.png

Devinny, J. S., Deshusses, M.A., and Webster, T.S. 1999. **Biofiltration for Air Pollution Control**. Boca Raton : CRC Press.

Hester, R.E., and Harrison, R.M. 2007. **Risk Assessment and Risk Management**. Royal Society of Chemistry.

Hong, J.H. and Park, K.J. 2005. **Compost Biofiltration of Ammonia Gas from Bin Composting**. Journal of Bioresource Technology. 96 : 741-745.

Hunter, P ., and Oyama, S.T. 2000. **Control of Volatile Organic Compound Emissions**. USA : John Wiley and Sons.

Schnelle, K.B., and Brown, C.A. 2002. **Air Pollution Control Technology Handbook**. New York : CRC Press.

Switzenbaum, M.S., Ergass, S.J., and Beatriz, C.G. 1999. **Characterization of Compost Biofiltration Media. Journal of the Air and Waste Management** Association. 49 (7) : 784-793.

Williams, T.O., and Miller, F.C. 1992. **Odor Control Using Biofilter : Part I. Biocycle** 33 (10) : 72, 74-77.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการทดสอบวัสดุตัวกลาง

ขั้นตอนการทดสอบวัสดุตัวกลาง

1) การทดสอบค่าเป็น กรด - ด่าง (Hodge and Devinny (1995))

1. ทำการตักตัวอย่างใส่ลงกระบอกตวงขนาด 10 ml.
2. เติมน้ำกลั่นใส่ลงในกระบอกตวงที่บรรจุตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ โดยใส่น้ำกลั่นให้ท่วมพอดีกับขนาดตัวอย่าง
3. ใช้พาราฟิล์มปิดกระบอกตวง เพื่อป้องกันก๊าซ CO_2 ในบรรยากาศละลายลงไป
4. ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง และใช้เครื่องมือวัดความเป็น กรด – ด่าง ทำการวัดตัวอย่าง

2) การทดสอบค่าความชื้นของตัวกลาง (ASTM D420 – D4914)

1. จดบันทึกน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องที่จะนำไปใส่ตัวอย่าง โดยจดบันทึกน้ำหนักละเอียด 2 ตำแหน่ง
2. ผสมตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบให้เข้ากันและตกตัวอย่าง อย่างน้อย 50 กรัมลงในถ้วยกระเบื้องที่เตรียมไว้
3. บดตัวอย่างเพื่อป้องกันตัวอย่างจับกันเป็นก้อน และปิดด้วยกระดาษฟอยล์อลูมิเนียมทำการชั่งน้ำหนักและกำหนดให้เป็น A
4. นำตัวอย่างหลังจากชั่งน้ำหนักแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสอย่างน้อย 16 ชั่วโมง และนำไปอบต่ออีก 1 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ นำออกจากเตาอบแล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักหลังจากเย็นแล้วกำหนดให้เป็น B

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \qquad \text{ก.1}$$

3) การทดสอบค่าความพรุนของตัวอย่าง (Hodge and Devinny (1995))

1. นำตัวอย่างใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml. ใส่ลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม ทำการกระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับ ที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่เราต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้ว ทำการ กระแทกก้นกระบอกตวงใหม่อีกครั้ง จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่ปริมาตรที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงทำทำการเตรียมไว้ให้เป็น X_1
3. เติมน้ำลงในกระบอกตวงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในของตัวกลาง โดยทำการกระแทกก้นของกระบอกตวง
4. เมื่อน้ำลงไปแทนที่ช่องว่างของตัวกลางจนถึงปริมาตรที่เราต้องการแล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้เป็น X_2
5. คำนวณค่าความพรุนดังสมาการ

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{(X_2-X_1)}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ / ปริมาตรของตัวกลาง}} \qquad \text{ก.2}$$

4) การวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวกลาง (JIN 1474 - 1976)

1. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
2. ชั่งกระบอกตวงขนาด 10 ml. ความละเอียด 2 ตำแหน่งน้ำหนักเป็น X_0
3. ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็มหลังจากนั้นกระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับตัวอย่างในกระบอกตวงมีปริมาตรคงที่
4. ถ้าระดับคงที่ไม่เท่ากับระดับที่เราต้องการ ให้ทำการตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วทำการกระแทกก้นกระบอกตวงอีกครั้ง จนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่เท่ากับระดับที่เราต้องการ
5. ทำการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกับน้ำหนักของกระบอกตวงเป็น X_1
6. คำนวณค่าความหนาแน่นของตัวกลางดังสมาการ

$$BD\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{(X_1-X_0)}{130} \qquad \text{ก.3}$$

5) วิธีวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุในวัสดุตัวกลาง (Walkley and Black, 1947)

1. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุตัวกลาง 19 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตต์สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท 10 มิลลิลิตร
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเขย่าขวดแก้วเบา ๆ เป็นเวลา 12 นาที ตั้งทิ้งไว้เป็น เวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่น ประมาณ 50 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
5. หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ ออร์โทฟีแนนโทรลีน 5 หยด
6. ทำการไทเทรตสารด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล เพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทที่เหลือจากปฏิกิริยาจนกระทั่งสีของสารละลายวัสดุตัวกลางเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. บันทึกปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมท และเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้

8. ทำ blank เช่นเดียวกันกับการวิธีวิเคราะห์วัสดุตัวกลาง

9. คำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณอินทรียวัตถุ

$$\% \text{ Organic Carbon} = \frac{(B - T)}{N / B} \times \frac{100}{77} \times 3 \times \frac{100}{10^3} \times \frac{10}{w} \qquad \text{ก.4}$$

$$\% \text{ Organic Matter} = \% \text{ Organic Carbon} \times 1.724 \qquad \text{ก.5}$$

เมื่อ

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (มิลลิลิตร)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ ตัวอย่างวัสดุตัวกลาง (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักวัสดุตัวกลาง (กรัม)

6) การหาปริมาณฟอสฟอรัส (Bray II method)

1. เติมสารละลายสกัด Bray II ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ml.) ทำการเขย่า 1 นาที แล้วกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง No.5 ขนาด 11 เซนติเมตร (cm.)
2. ปิเปตต์สารละลายที่สกัดได้ในข้อที่ (1) ในอัตราส่วน 1 ส่วนต่อสารละลาย develop สี 16 ส่วนใส่ลงในหลอดแก้วทดลองหลังจากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที แล้วนำไปอ่านค่าความเข้มข้นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 nm.
3. ทำ blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (Standard Set) เช่นเดียวกับการทดลองในที่ข้อ (2)
4. การคำนวณการหาปริมาณฟอสฟอรัสดังสมาการ

$$\text{ฟอสฟอรัส (P)} = \frac{B * df\,(sample) * R}{A * df\,(standard)}\ mg\ kg^{-1} \qquad \text{ก.6}$$

7) การหาปริมาณโพแทสเซียม

1. ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวกลางปริมาตร 2.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร (ml.)
2. เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท ปริมาตร 25 มิลลิลิตร (ml.)
3. เขย่าสารละลายที่เตรียมได้ด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 นาที
4. สารละลายที่ผ่านการเขย่าแล้วจะทำการกรองสารผ่านกระดาษกรอง No.5 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.50 เซนติเมตร (cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมให้มีความเข้มข้น 0, 5, 10, 15 และ 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ด้วยสารแอมโมเนียมอะซิเตท
6. สารละลายที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกนำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมโดยเครื่อง Flame Photometer ถ้ามีความเข้มข้นมากเกินไปต้องมีการเจือจางด้วยแอมโมเนียมอะซิเตท
7. การคำนวณหาปริมาณโพแทสเซียมดังสมาการ

$$\text{โพแทสเซียม (available K)} = \frac{D * df * B}{A} \text{ mg kg}^{-1} \qquad \text{ก.7}$$

8) การวิเคราะห์หาไนโตรเจนทั้งหมดในวัสดุตัวกลาง (Total Nitrogen , N) (Bremner, 1965)

1. ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวกลาง 0.5 - 0.2 กรัม ใส่ลงใน Micro - Kjeldahl Tub
2. เติมสารเร่งสำเร็จรูปอัดเม็ด Kjeltab 2 เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร (ml.)
3. นำสารละลายที่ได้ไปย่อยด้วยเตาย่อย (Digestion System) จนได้สารละลายที่มีสีขาวขุ่น
4. นำสารละลายตัวอย่างในข้อที่ (3) มาต่อเข้ากับเครื่องกลั่น Keltec System แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร (ml.) และ NaOH 40% 25 มิลลิลิตร (ml.) กลั่นเป็นเวลา 4 นาที
5. เติมสารกรดบอริก 4 % 25 มิลลิลิตร(ml.) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วหยด Mixed Indicator ประมาณ 6 -7 หยด หลังจากนั้นสารละลายจะมีสีม่วงแดง นำสารละลายที่ได้ไปกลั่นจากข้อ (4) สารละลายนี้จะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว และรองรับจนได้สารละลายในขวดชมพู่ประมาณ 150 มิลลิลิตร (ml.) ไทเทรตสารละลายที่ได้จากการกลั่นในข้อ (5) กับกรดไฮโดรคลอริคมาตฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็น สีม่วงแดงกลั่น Blank และไทเทรต เช่นเดียวกับวัสดุตัวกลางอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง
6. การคำนวณหาไนโตรเจนทั้งหมดดังสมาการ

สมมติ

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (X นอร์มอล)

ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้กับ blank (B มิลลิลิตร)

จำนวนปริมาตรกรดไฮโตรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ (Y - B มิลลิลิตร)

วัสดุตัวกลาง A กรัม มีปริมาณไนโตรเจน = X (Y -B) มิลลิสมมูล (meq) ก.8

วัสดุตัวกลาง 100 กรัม มีปริมาณไนโตรเจน $= \frac{X (Y - B) \times 100 \times 0.014}{A} \text{ mg kg}^{-1}$ ก.9

$= \frac{1.4 \times (Y - B)}{A} \%$ ก.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

ตารางที่ ข - 1 ผลการทดสอบความพรุนตัวกลาง

ตัวกลาง	ครั้งที่	ตัวอย่าง+กระบอกตวง (กรัม)	ตัวอย่าง+กระบอกตวง +น้ำ(กรัม)	ความพรุน (%)
ปุ๋ยหมัก	1	48.61	55.24	66.22
	2	48.92	55.85	69.30
	3	48.34	55.29	69.50
	เฉลี่ย	48.62	55.46	68.34
ปุ๋ยมูลไก่	1	41.64	48.94	73.04
	2	42.57	48.18	56.10
	3	42.63	47.77	51.40
	เฉลี่ย	42.28	48.29	60.18

ตารางที่ ข - 2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM)

ตัวกลาง	ครั้งที่	อินทรียวัตถุ			
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	FAS (มิลลิลิตร)		OM (%)
			Blank	ตัวอย่าง	
ปุ๋ยหมัก	1	0.0932	20.90	20.86	53.13
	2	0.0921	20.90	20.86	53.46
	3	0.0943	20.90	20.86	56.25
	เฉลี่ย	0.0932	20.90	20.86	54.28
ปุ๋ยมูลไก่	1	0.1156	20.90	20.85	59.71
	2	0.1475	20.90	20.83	63.42
	3	0.1565	20.90	20.83	62.15
	เฉลี่ย	0.1398	20.90	20.84	61.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ตัวกลาง	ครั้งที่	ปริมาณกระบอกตวง (มิลลิลิตร)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.ซม)
ปุ๋ยหมัก	1	10	5.352	0.535
	2	10	5.471	0.547
	3	10	5.680	0.568
	เฉลี่ย	10	5.528	0.552
ปุ๋ยมูลไก่	1	10	7.096	0.709
	2	10	7.171	0.717
	3	10	7.343	0.734
	เฉลี่ย	10	7.242	0.724

ตารางที่ ข - 4 ความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง

ตัวอย่าง	ความเป็นกรด – ด่าง	
	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ค่า pH
ปุ๋ยหมัก	20.2329	7.82
ปุ๋ยมูลไก่	20.8076	7.55

ตารางที่ ข - 5 ไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางหลัก (Total Nitrogen , N)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด			
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	HCl (มิลลิลิตร)		ไนโตรเจน (%)
			Blank	ตัวอย่าง	
ปุ๋ยหมัก	1	1.0364	0.2	4.27	0.55
	2	1.1272	0.2	4.79	0.57
	เฉลี่ย	1.0818	0.2	4.53	0.56
ปุ๋ยมูลไก่	1	1.0934	0.2	6.84	0.85
	2	1.1227	0.2	7.18	0.87
	เฉลี่ย	1.1080	0.2	7.01	0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 6 ฟอสฟอรัสในตัวกลางหลัก

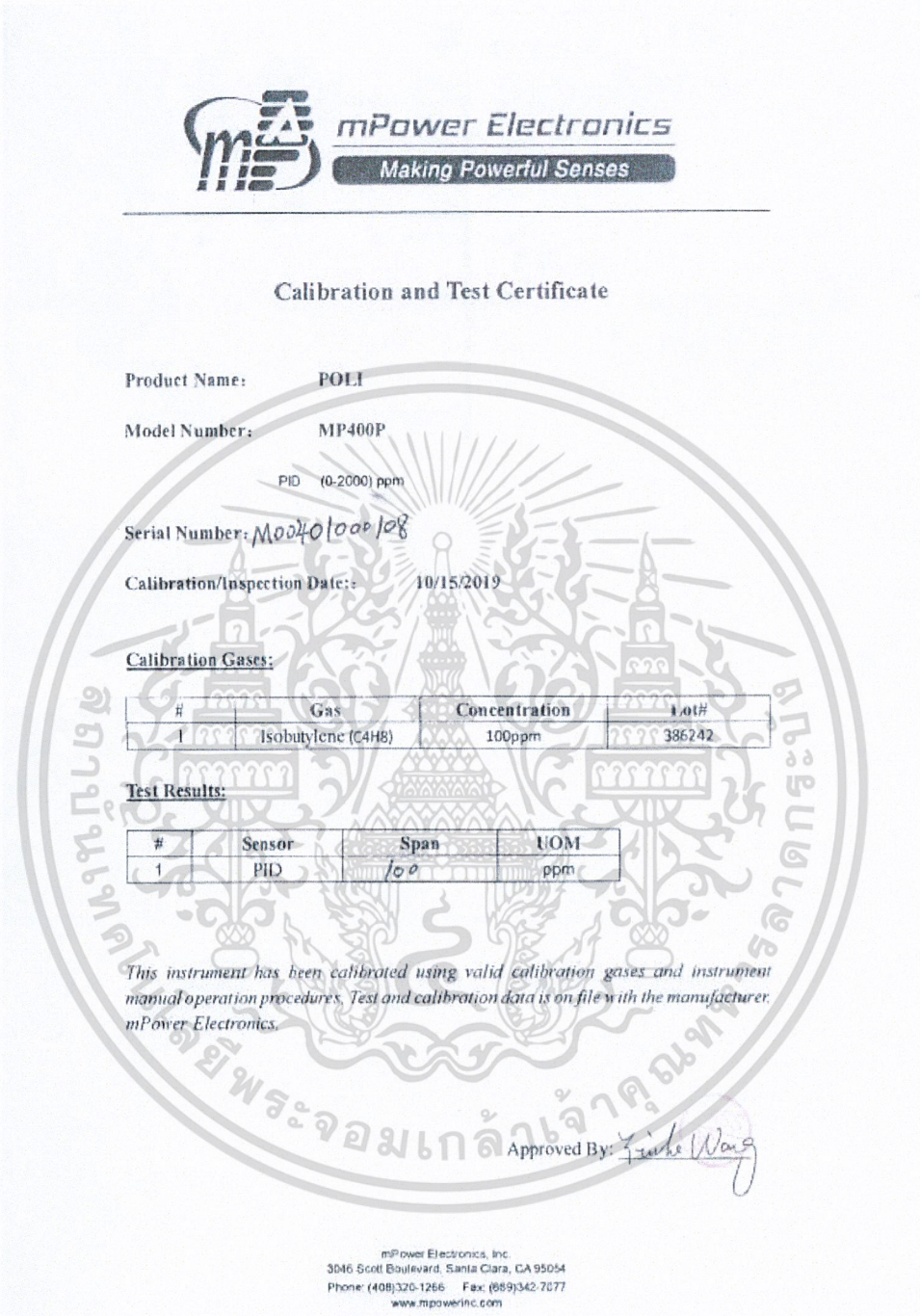
ตัวอย่าง	ครั้งที่	ฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ต่อพืช		
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความเข้มข้น (กรัม/มิลลิลิตร)	ฟอสฟอรัส (%)
ปุ๋ยหมัก	1	1.0567	21.786	0.07
	2	1.0643	22.385	0.09
	เฉลี่ย	1.0605	22.085	0.08
ปุ๋ยมูลไก่	1	1.0968	60.572	0.23
	2	1.0895	62.938	0.25
	เฉลี่ย	1.093	61.755	0.24

ตารางที่ ข - 7 โพแทสเซียมในตัวกลางหลัก

ตัวอย่าง	ครั้งที่	โพแทสเซียมที่มีประโยชน์ต่อพืช		
		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความเข้มข้น (ppm)	โพแทสเซียม (%)
ปุ๋ยหมัก	1	2.7546	28.5778	0.32
	2	2.8421	29.1631	0.34
	เฉลี่ย	2.7983	28.8704	0.33
ปุ๋ยมูลไก่	1	2.8563	89.7518	0.79
	2	2.9549	96.0634	0.83
	เฉลี่ย	2.9056	92.9076	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบรองรับการปรับเทียบ Multi – Gas Monitors USA. ยี่ห้อ mPower (Model POLIMP400P)



mPower Electronics
Making Powerful Senses

Calibration and Test Certificate

Product Name: POLI

Model Number: MP400P

PID (0-2000) ppm

Serial Number: M00401000108

Calibration/Inspection Date:: 10/15/2019

Calibration Gases:

#	Gas	Concentration	Lot#
1	Isobutylene (C4H8)	100ppm	386242

Test Results:

#	Sensor	Span	UOM
1	PID	100	ppm

This instrument has been calibrated using valid calibration gases and instrument manual operation procedures. Test and calibration data is on file with the manufacturer, mPower Electronics.

Approved By: Jinke Wang

mPower Electronics, Inc.
3046 Scott Boulevard, Santa Clara, CA 95054
Phone: (408)320-1266 Fax: (669)342-7077
www.mpowerinc.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การศึกษาความชื้นของตัวกลางที่ใช้ในการบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ตารางที่ ค - 1 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale

วันที่	เครื่องกรองชีวภาพ	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักปุ๋ยผสม (กรัม)	น้ำหนักแห้งของปุ๋ยผสม (กรัม)	% ความชื้นของตัวกลาง	ค่าเฉลี่ย (%)
1	BB	85.554	85.621	85.604	33.895	
	B1	85.387	85.969	85.821	34.101	30.971
	B2	82.015	82.934	82.718	30.725	
	B3	84.326	85.042	84.885	28.086	
2	BB	85.209	86.244	85.234	40.365	
	B1	85.42	85.999	85.833	40.194	38.986
	B2	82.673	83.09	82.971	39.933	
	B3	84.165	84.804	84.632	36.831	
3	BB	56.842	56.864	56.854	86.045	
	B1	53.708	55.619	54.729	87.169	66.550
	B2	59.729	60.967	60.557	49.517	
	B3	52.408	53.288	52.948	62.963	
4	BB	85.045	85.075	85.061	70.483	
	B1	85.386	86.113	85.798	76.456	65.986
	B2	81.676	82.586	82.23	64.260	
	B3	84.46	84.916	84.75	57.241	
5	BB	58.006	58.955	58.566	69.457	
	B1	53.705	54.802	54.331	75.240	59.409
	B2	59.719	60.492	60.25	45.574	
	B3	52.403	53.072	52.828	57.412	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 1 (ต่อ) ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale

วันที่	เครื่องกรองชีวภาพ	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักปุ๋ยผสม (กรัม)	น้ำหนักแห้งของปุ๋ยผสม (กรัม)	% ความชื้นของตัวกลาง	ค่าเฉลี่ย (%)
6	BB	86.465	86.590	86.554	64.879	
	B1	85.382	85.857	85.674	62.671	
	B2	81.676	82.095	81.928	66.270	64.074
	B3	84.461	84.67	84.589	63.281	
7	BB	54.398	54.495	54.467	69.054	
	B1	53.704	55.22	54.576	73.853	
	B2	59.721	60.203	59.995	75.912	64.230
	B3	52.401	52.997	52.818	42.926	
8	BB	85.211	86.158	85.885	62.374	
	B1	85.201	86.54	85.965	75.262	
	B2	81.578	82.126	81.933	54.366	66.009
	B3	84.461	87.44	86.23	68.400	
9	BB	54.819	55.118	55.032	53.645	
	B1	53.704	55.22	54.676	55.967	
	B2	59.721	60.853	60.51	43.473	47.455
	B3	52.401	52.997	52.818	42.926	
10	BB	83.565	83.909	83.767	65.861	
	B1	85.391	86.34	85.95	69.767	
	B2	81.678	82.136	81.993	45.397	60.421
	B3	84.461	85.24	84.93	66.098	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 2 ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

วันที่	เครื่องกรองชีวภาพ	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักปุ๋ยผสม (กรัม)	น้ำหนักแห้งของปุ๋ยผสม (กรัม)	% ความชื้นของตัวกลาง	ค่าเฉลี่ย (%)
1	BB	83.125	83.575	83.456	35.897	
	B1	84.002	84.827	84.623	32.844	
	B2	55.829	56.538	56.34	38.748	34.996
	B3	87.698	88.409	88.231	33.396	
2	BB	54.987	55.011	55.004	42.765	
	B1	55.42	56.048	55.864	41.441	
	B2	56.907	58.062	57.733	39.831	40.478
	B3	59.332	60.022	59.824	40.163	
3	BB	84.690	85.228	84.988	80.483	
	B1	85.389	85.461	85.428	84.615	
	B2	81.68	81.797	81.757	51.948	63.065
	B3	84.466	84.524	84.504	52.632	
4	BB	52.865	53.086	53.104	58.782	
	B1	53.705	53.725	53.718	53.846	
	B2	59.724	59.84	59.795	63.380	53.890
	B3	52.405	52.457	52.441	44.444	
5	BB	83.564	83.211	83.337	55.439	
	B1	85.388	85.454	85.43	57.143	
	B2	81.68	81.863	81.8	52.500	59.178
	B3	84.467	84.65	84.576	67.890	
6	BB	84.563	85.299	84.953	88.641	
	B1	85.387	85.521	85.464	74.026	
	B2	81.68	81.954	81.824	90.278	91.610
	B3	84.466	84.586	84.523	110.526	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 2 (ต่อ) ความชื้นของตัวกลางปุ๋ยผสมของเครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale

วันที่	เครื่องกรองชีวภาพ	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักปุ๋ยผสม (กรัม)	น้ำหนักแห้งของปุ๋ยผสม (กรัม)	% ความชื้นของตัวกลาง	ค่าเฉลี่ย (%)
7	BB	59.485	60.158	59.881	69.864	
	B1	53.705	53.808	53.763	77.586	
	B2	59.723	59.799	59.768	68.889	72.724
	B3	52.403	52.494	52.456	71.698	
8	BB	84.766	85.122	84.992	57.408	
	B1	85.387	85.449	85.432	37.778	
	B2	81.68	81.857	81.782	73.529	53.152
	B3	84.466	84.586	84.547	48.148	
9	BB	53.129	53.829	53.578	55.814	
	B1	53.704	53.776	53.748	63.636	
	B2	59.721	59.814	59.784	47.619	52.826
	B3	52.402	52.508	52.474	47.222	
10	BB	54.976	55.623	55.385	58.085	
	B1	53.789	53.8727	53.842	57.925	
	B2	54.801	54.9225	54.882	50.000	56.660
	B3	52.114	53.391	52.902	62.056	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 3 ค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง

วันที่	ความเป็นกรด – ด่าง ของตัวกลางปุ๋ยผสม							
	เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale				เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale			
	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)
1	7	6	7	6	7	7	7	7
2	7	6	7	6	7	7	7	7
3	7	7	7	6	7	7	7	7
4	7	7	7	6	7	7	7	7
5	7	6	7	7	7	6	6	7
6	6	6	7	6	7	7	7	7
7	7	6	6	6	7	6	6	7
8	6	7	6	6	7	6	6	7
9	7	7	7	7	7	6	6	7
10	7	7	7	7	7	6	6	6

ตารางที่ ค - 4 อุณหภูมิของตัวกลาง

วันที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)							
	เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale				เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale			
	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)
1	27	27	27	27	28	28	28	28
2	27	27	27	27	28	28	28	28
3	27	27	26	26	28	28	28	28
4	26	26	26	26	28	28	28	28
5	26	26	26	26	28	29	28	28
6	26	26	26	26	29	29	29	29
7	27	27	27	27	26	26	26	26
8	25	26	25	25	28	28	28	28
9	26	26	26	26	28	28	28	28
10	26	26	26	27	29	29	29	29

ตารางที่ ค - 5 ความสูงของตัวกลาง

วันที่	ความสูงของตัวกลาง (เซนติเมตร)							
	เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale				เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale			
	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)	(BB)	(B1)	(B2)	(B3)
1	10.9	10.9	11.0	10.8	9.0	8.7	8.9	9.0
2	10.9	10.5	10.8	10.4	9.0	8.7	8.9	8.9
3	10.9	10.3	10.5	10.2	9.0	8.7	8.9	8.9
4	10.9	10.2	10.0	9.8	9.0	8.7	8.9	8.9
5	10.9	9.7	9.5	9.4	9.0	8.7	8.9	8.9
6	10.9	9.6	9.5	9.2	9.0	8.7	8.9	8.9
7	10.9	9.6	9.5	9.2	9.0	8.7	8.8	8.8
8	10.8	9.3	9.2	9.2	9.0	8.7	8.8	8.8
9	10.8	9.2	9.2	9.2	9.0	8.7	8.8	8.8
10	10.7	8.5	8.9	9.1	9.0	8.7	8.8	8.8

ตารางที่ ค - 6 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.04	1050	1677	74.0	45.0	31.5	32.4	100.0	84.5	99
2	5.742	60	4.0	0.08	2279	2186	56.0	32.0	35.6	34.8	99.8	86.4	98
3	5.742	60	4.0	0.16	3910	3845	46.0	11.0	39.8	39.4	100.0	96.7	96
4	5.742	60	4.0	0.24	1185	1709	24.0	19.0	24.5	25.6	94.5	83.4	94
5	5.742	60	4.0	0.32	2354	1978	38.0	30.0	28.5	26.7	97.8	56.8	92
6	5.742	60	4.0	0.36	1908	1567	27.0	24.0	29.4	30.4	99.2	92.4	91
7	5.742	60	4.0	0.40	987	1698	37.0	32.0	35.7	35.6	99.6	67.8	90
8	5.742	60	4.0	0.40	945	1046	88.0	84.0	31.9	32.5	93.6	72.6	90

ตารางที่ ค - 7 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.00	1043	1035	56.0	55.0	30.5	31.4	96.2	91.5	100
2	5.742	60	4.0	0.04	1765	1740	53.0	48.0	32.4	33.8	99.3	83.4	99
3	5.742	60	4.0	0.08	2656	2674	89.0	80.0	32.8	33.4	100.0	92.7	98
4	5.742	60	4.0	0.12	1785	1709	24.0	23.0	26.5	27.6	100.0	95.4	97
5	5.742	60	4.0	0.12	1564	1542	33.0	30.0	28.5	29.7	94.4	85.3	97
6	5.742	60	4.0	0.16	1248	1233	56.0	55.0	29.4	30.4	93.1	92.4	96
7	5.742	60	4.0	0.20	924	1004	45.0	41.0	32.7	34.6	98.3	88.8	95
8	5.742	60	4.0	0.20	956	986	89.0	81.0	30.9	31.5	92.6	82.6	95
9	5.742	60	4.0	0.24	1359	1331	35.0	31.0	31.7	31.5	91.3	80.9	94
10	5.742	60	4.0	0.28	1676	1674	46.0	42.0	28.8	29.6	98.5	88.2	93
11	5.742	60	4.0	0.32	1948	1934	67.0	62.0	28.4	29.4	96.2	82.4	92
12	5.742	60	4.0	0.32	1345	1403	34.0	30.0	31.7	32.6	93.1	77.8	92
13	5.742	60	4.0	0.36	1876	1855	23.0	19.0	30.9	31.5	99.7	72.6	91
14	5.742	60	4.0	0.40	1056	1077	26.0	20.0	31.7	30.5	95.4	60.9	90

ตารางที่ ค – 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
15	5.742	60	4.0	0.40	985	964	36.0	33.0	27.8	28.6	93.3	78.2	90
16	5.742	60	4.0	0.40	953	945	57.0	52.0	26.8	27.6	93.5	88.2	90

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 8 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.00	997	994	73.0	67.0	29.9	29.4	100.0	99.5	100
2	5.742	60	4.0	0.00	1959	1246	52.0	53.0	30.2	32.8	100.0	96.4	100
3	5.742	60	4.0	0.04	1210	1215	98.0	86.0	30.2	31.4	100.0	87.7	99
4	5.742	60	4.0	0.08	1485	1309	67.0	76.0	23.5	24.6	99.7	85.4	98
5	5.742	60	4.0	0.12	2154	2178	34.0	56.0	27.5	25.7	96.8	87.8	97
6	5.742	60	4.0	0.12	2308	2367	67.0	45.0	27.4	31.4	93.2	96.4	97
7	5.742	60	4.0	0.16	1777	1798	87.0	76.0	30.7	33.6	92.6	98.8	96
8	5.742	60	4.0	0.20	998	946	45.0	35.0	32.9	32.5	95.6	96.6	95
9	5.742	60	4.0	0.24	1349	1232	36.0	35.0	31.7	30.5	100.0	96.9	94
10	5.742	60	4.0	0.28	1026	1095	86.0	65.0	28.8	31.6	93.9	94.2	93
11	5.742	60	4.0	0.28	948	1107	56.0	35.0	28.4	29.4	94.2	95.4	93
12	5.742	60	4.0	0.28	956	1048	76.0	65.0	33.7	34.6	97.6	97.8	93
13	5.742	60	4.0	0.32	932	1026	46.0	34.0	32.9	32.5	92.6	88.6	92
14	5.742	60	4.0	0.36	1359	1432	87.0	76.0	31.7	31.5	96.1	85.9	91

ตารางที่ ค – 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
15	5.742	60	4.0	0.40	1036	999	65.0	65.0	28.8	30.6	92.3	88.2	90
16	5.742	60	4.0	0.40	1456	1498	64.0	62.0	29.8	30.6	97.9	93.2	90

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 9 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 15 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.00	1043	1125	84.0	85.0	30.5	30.4	98.0	94.5	100
2	5.742	60	4.0	0.00	1235	1092	66.0	62.0	34.6	34.8	97.8	96.4	100
3	5.742	60	4.0	0.04	1765	1754	76.0	71.0	32.8	35.4	90.0	88.7	99
4	5.742	60	4.0	0.08	2453	2856	44.0	39.0	25.5	25.6	94.5	93.4	98
5	5.742	60	4.0	0.08	2468	2563	68.0	60.0	35.5	34.7	100.0	94.8	98
6	5.742	60	4.0	0.16	1998	1957	36.0	24.0	25.4	27.4	99.0	93.4	96
7	5.742	60	4.0	0.16	1004	1167	33.0	32.0	32.7	33.6	100.0	88.8	96
8	5.742	60	4.0	0.2	2421	2476	83.0	74.0	33.9	32.5	94.6	92.6	95
9	5.742	60	4.0	0.24	1789	1824	57.0	42.0	36.7	34.5	93.1	88.9	94
10	5.742	60	4.0	0.28	1365	1243	26.0	21.0	24.8	25.6	97.9	65.2	93
11	5.742	60	4.0	0.32	1876	1870	27.0	24.0	27.4	30.4	98.2	94.4	92
12	5.742	60	4.0	0.4	1657	1624	85.0	72.0	33.7	35.6	97.6	92.8	90
13	5.742	60	4.0	0.4	1374	1347	98.0	84.0	32.9	32.5	94.6	81.6	90

ตารางที่ ค - 10 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.00	2342	2637	88.0	85.0	30.8	30.4	100.0	94.3	100
2	5.742	60	4.0	0.00	2342	2146	78.0	72.0	31.6	30.8	100.0	96.4	100
3	5.742	60	4.0	0.00	3871	3845	65.0	51.0	29.8	29.4	100.0	95.7	100
4	5.742	60	4.0	0.00	3214	3709	35.0	29.0	23.5	25.6	98.5	93.4	100
5	5.742	60	4.0	0.04	2046	2278	76.0	60.0	28.2	26.7	95.8	36.8	99
6	5.742	60	4.0	0.08	1908	1767	45.0	44.0	25.1	27.4	93.2	62.4	98
7	5.742	60	4.0	0.12	1098	1498	24.0	32.0	32.3	32.6	99.6	67.8	97
8	5.742	60	4.0	0.12	945	1046	65.0	54.0	32.4	32.5	100.0	72.6	97
9	5.742	60	4.0	0.20	1045	1032	45.0	42.0	30.7	30.5	99.1	80.9	95
10	5.742	60	4.0	0.20	2134	2375	34.0	31.0	29.4	30.6	94.9	88.2	95
11	5.742	60	4.0	0.20	2089	2567	65.0	64.0	25.3	26.4	99.6	82.4	95
12	5.742	60	4.0	0.12	1043	1098	34.0	32.0	25.2	25.6	96.6	77.8	97
13	5.742	60	4.0	0.16	988	946	25.0	24.0	34.1	32.5	100.0	82.6	96
14	5.742	60	4.0	0.20	1049	1332	44.0	42.0	32.7	30.5	98.5	70.9	95

ตารางที่ ค – 10 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
15	5.742	60	4.0	0.20	1346	1265	46.0	41.0	28.8	30.1	93.7	88.2	95
16	5.742	60	4.0	0.20	2056	1965	35.0	31.0	30.5	30.3	90.3	68.2	95
17	5.742	60	4.0	0.24	2056	1972	64.0	61.0	30.2	30.4	90.9	88.3	94
18	5.742	60	4.0	0.24	2830	2677	88.0	85.0	30.4	31.4	100.0	84.5	94
19	5.742	60	4.0	0.24	2359	2186	66.0	62.0	34.6	34.3	100.0	83.4	94
20	5.742	60	4.0	0.28	3940	3945	66.0	61.0	33.8	34.4	100.0	97.7	93
21	5.742	60	4.0	0.28	1345	1409	64.0	62.0	26.5	25.6	94.5	82.4	93
22	5.742	60	4.0	0.24	2354	2378	78.0	78.0	28.5	26.7	97.8	64.8	94
23	5.742	60	4.0	0.28	1968	1867	47.0	45.0	25.4	24.4	99.4	96.4	93
24	5.742	60	4.0	0.28	2456	2498	37.0	35.0	32.7	33.6	95.6	65.8	93
25	5.742	60	4.0	0.28	3622	3546	78.0	74.0	31.9	32.5	93.6	87.6	93
26	5.742	60	4.0	0.32	1584	1332	43.0	42.0	30.7	30.5	86.1	85.9	92
27	5.742	60	4.0	0.36	1245	1265	46.0	41.0	28.8	29.6	88.9	75.2	91
28	5.742	60	4.0	0.40	1964	1767	37.0	34.0	25.4	27.4	99.2	97.4	90

ตารางที่ ค – 10 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 30 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
29	5.742	60	4.0	0.40	2461	2498	77.0	72.0	34.7	35.6	96.6	64.8	90

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค - 11 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
1	5.742	60	4.0	0.00	1350	1254	42.0	42.0	26.5	30.9	100.0	98.5	100
2	5.742	60	4.0	0.00	2349	2634	63.0	56.0	25.7	26.8	99.8	74.4	100
3	5.742	60	4.0	0.00	1340	1453	26.0	19.0	29.8	31.4	100.0	96.7	100
4	5.742	60	4.0	0.00	1375	1354	85.0	74.0	27.5	25.6	100.0	86.4	100
5	5.742	60	4.0	0.04	2284	2532	56.0	55.0	28.8	27.7	100.0	86.8	99
6	5.742	60	4.0	0.08	1288	1245	36.0	35.0	27.4	28.4	100.0	72.4	98
7	5.742	60	4.0	0.12	1484	1535	74.0	79.0	33.7	34.6	98.8	75.8	97
8	5.742	60	4.0	0.08	1632	1532	25.0	32.0	34.9	32.5	94.6	82.6	98
9	5.742	60	4.0	0.12	2627	2643	65.0	64.0	32.7	30.5	92.1	70.9	97
10	5.742	60	4.0	0.12	3626	3642	35.0	32.0	26.8	29.6	91.9	88.2	97
11	5.742	60	4.0	0.16	1742	1632	37.0	26.0	27.4	31.4	98.2	92.4	96
12	5.742	60	4.0	0.16	2674	2675	83.0	77.0	32.7	32.6	93.6	88.8	96
13	5.742	60	4.0	0.16	2578	2642	83.0	84.0	34.9	35.5	100.0	92.6	96
14	5.742	60	4.0	0.16	1574	1642	72.0	65.0	32.7	30.6	100.0	73.9	96

ตารางที่ ค – 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
15	5.742	60	4.0	0.16	1775	1643	57.0	37.0	26.8	30.7	98.2	98.2	96
16	5.742	60	4.0	0.20	1364	1256	81.0	57.0	29.3	29.6	94.6	68.2	95
17	5.742	60	4.0	0.24	1436	1532	36.0	31.0	27.5	26.6	90.0	88.2	94
18	5.742	60	4.0	0.24	1674	1584	54.0	45.0	28.5	30.3	100.0	94.5	94
19	5.742	60	4.0	0.24	2746	2564	25.0	24.0	29.6	30.8	99.6	96.4	94
20	5.742	60	4.0	0.28	964	945	57.0	46.0	24.8	29.4	100.0	99.7	93
21	5.742	60	4.0	0.28	1165	1259	84.0	83.0	26.5	26.6	93.0	89.4	93
22	5.742	60	4.0	0.28	2644	2648	38.0	30.0	26.5	26.7	94.2	86.7	93
23	5.742	60	4.0	0.32	1638	1637	64.0	54.0	30.4	30.4	96.2	62.4	92
24	5.742	60	4.0	0.32	964	968	73.0	72.0	31.7	36.6	96.6	87.1	92
25	5.742	60	4.0	0.32	2573	2546	53.0	54.0	33.1	33.5	92.6	87.6	92
26	5.742	60	4.0	0.32	3632	3832	83.0	82.0	31.7	32.5	98.3	60.9	92
27	5.742	60	4.0	0.32	1254	1675	56.0	41.0	25.8	29.6	96.9	88.2	92
28	5.742	60	4.0	0.36	1643	1467	36.0	34.0	26.4	30.4	97.2	95.4	91

ตารางที่ ค – 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale หลังจากพักระบบกรองชีวภาพ 45 นาที

จำนวนการทดลอง (ครั้ง)	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)		CO_2 (ppm)		PM 2.5 (ug/m^3)		TEMP (°C)		HUMID (%)		Removal Efficiency (%)
			inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	
29	5.742	60	4.0	0.36	2632	2638	46.0	42.0	31.7	33.6	92.2	68.5	91
30	5.742	60	4.0	0.40	1574	1468	28.0	26.0	30.7	32.6	96.6	77.7	90

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบความเข้มข้นของ
สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง

ตารางที่ ง - 1 ผลการทดสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากวัสดุตัวกลาง

Date	Air Flow (LPM)	EBRT (Sec.)	TVOC (ppm)			
			เครื่องกรองชีวภาพ Lab Scale		เครื่องกรองชีวภาพ Pilot Scale	
			ambient	outlet	ambient	outlet
1	5.742	60	0.5	0.5	0.9	0.7
2	5.742	60	0.5	0.4	0.9	0.8
3	5.742	60	0.4	0.4	0.8	0.8
4	5.742	60	0.5	0.3	0.6	0.8
5	5.742	60	0.3	0.2	0.7	0.6
6	5.742	60	0.0	0.0	0.6	0.6
7	5.742	60	0.0	0.0	0.3	0.1
8	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0
9	5.742	60	0.0	0.0	0.0	0.0
10	5.742	60	0.	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง - 2 การจำลองสถานการณ์ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่าย

นาทีที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ค่าเฉลี่ย
0	8.5	8.4	7.2	7.6	6.5	6.7	7.1	7.4
1	6.2	6.3	5.9	5.7	6	5.4	5.9	5.9
2	3.9	4.2	3.8	3.7	3.8	3	3.4	3.7
3	1.8	2.3	2.4	1.9	2.5	1.7	1.4	2.0
4	1.2	1.5	1.3	1.2	1.8	1	1.2	1.3
5	0.8	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8
6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8
7	0.6	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
การเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์

การเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์

งานวิจัยการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ได้ทำการเผยแพร่ผลงานผ่านสื่อออนไลน์เพื่อเป็นความรู้สู่การเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดและพัฒนา โดยการเผยแพร่ครั้งนี้ทำเป็นรูปแบบอินโฟกราฟฟิค (infographic) คือ การแสดงผลของข้อมูลหรือความรู้โดยภาพที่อ่านและเข้าใจง่าย ในงานวิจัยได้ทำอินโฟกราฟฟิค แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยขั้นตอนการเข้าสู่ข้อมูลอินโฟกราฟฟิค สามารถเข้าได้ด้วยลิ้งค์ที่แสดงดังนี้

1. การเปรียบเทียบตัวกลางที่นำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
https://drive.google.com/file/d/1Q7MU8VuaEaD6xAb5RLQDEcpimBrPcaqo/view
2. การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ
https://drive.google.com/file/d/1HYCQDw2M3Z2Y-qJfgflZehqVnm4S9e7e/view
3. กลไกและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ
https://drive.google.com/file/d/1PZzSXVOdEx_I1ff7GtRjCWlVm_rcszUY/view

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ - 1 การเปรียบเทียบตัวกลางที่นำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

รูปที่ จ - 2 การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ - 3 กลไกและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ