



การกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ
และแวกคัมอัลตราไวโอเล็ต

นายเอกพันธุ์ วรรณิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ

และแวกกัมอัลตราไวโอเลต

นายเอกพันธุ์ วรวานิช วศ.บ. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.เฉลิมราช วันทวิน)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล)

..... กรรมการ

(ดร.นงลักษณ์ บุญรัตนกิจ)

..... กรรมการ

(ดร.รัชฎ์กษณ์ ราษฎร์ภักดี)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อ	การกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ และแวกคัมอัลตราไวโอเลต
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเอกพันธ์ วรวานิช
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

เบนซีน เป็นสารมลพิษทางอากาศชนิดหนึ่งที่มีค่าสูงในบรรยากาศ จากการศึกษาวิจัยพบว่า เบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งเม็ดเลือดขาว และยังก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมากมายแก่ผู้ที่ได้รับสัมผัส การบำบัดไอระเหยเบนซีนที่แหล่งกำเนิดจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดไอระเหยเบนซีน ด้วยกระบวนการทางเคมี (แวกคัมอัลตราไวโอเลต; Vacuum Ultraviolet) และกระบวนการทางชีวภาพ (การกรองชีวภาพ; Biofilter) ผลการบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยแสงที่ความเข้มข้นของไอระเหย ตั้งแต่ 20-150 ppm และระยะเวลาพักที่ 0.76-3.03 นาที พบว่ากระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต สามารถบำบัดเบนซีนได้โดยมีประสิทธิภาพระหว่าง 67.3-92.5% อย่างไรก็ตามพบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขาเข้า ขณะที่การบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพด้วยตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ Kaolinite Activated Silica (KAS) (Surface area = 14.22 m²/g และ Pore Volume = 0.1582 cc/g) และ Ceramic ring (Surface area = 1.23 m²/g และ Pore Volume = 0.0029 cc/g) พบว่า KAS สามารถเก็บกักความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่า Ceramic ring เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่า นอกจากนี้ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าอีกด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการระสารอินทรีย์จากการใช้กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพพบว่า กระบวนการกรองชีวภาพสามารถแบกรับค่าการระสารอินทรีย์ได้สูงกว่าโดยที่ประสิทธิภาพการบำบัด 90% กระบวนการกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางชนิด KAS สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้เท่ากับ 28.99 g/m³-h ขณะที่ใช้ตัวกลางชนิด Ceramic ring สามารถรับได้ 22.86 g/m³-h ส่วนกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต (VUV) สามารถรับภาระอินทรีย์ได้สูงสุดเพียง 5.14 g/m³-h

คำสำคัญ : เบนซีน / แวกคัมอัลตราไวโอเลต / ระยะเวลาพัก / กระบวนการกรองชีวภาพ / ตัวกลาง

Thesis title	Benzene Removal Using VUV and Biofilter
Thesis Credit	12
Candidate	Mr.Aekkapan Worawanich
Thesis Adviser	Dr. Prapat Pongkiatkul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Environmental Engineering
Department	Environmental Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

Benzene is generally recognized as air pollutant, which is usually observed at high level in the ambient. A number of researches show that benzene vapor is responsible for leukemia deaths and also various health problems after exposure. Proper treatment of benzene vapor at a source is one of public concern issues, which is in focus nowadays. This study focuses on treatment of benzene vapor using 2 different techniques, i.e. physico-chemical process (Vacuum Ultraviolet, VUV) and biological process (biofilter). The results from a treatment using VUV system at 20-150 ppm inlet concentrations and 0.76-3.03 minutes resident time showed that the overall efficiency ranged from 67.3-92.5%. However, the influence from the change of resident time created more effects on the removal efficiency than the fluctuation of inlet concentrations. Treatment of benzene vapor using a biofilter was also conducted using 2 different media, i.e. Kaolinite Activated Silica (KAS) (Surface area = $14.22 \text{ m}^2/\text{g}$, Pore Volume = 0.1582 cc/g) and Ceramic ring (Surface area = $1.23 \text{ m}^2/\text{g}$, Pore Volume = 0.0029 cc/g). The results showed that KAS media can absorb more humidity and carried more microorganism than the ceramic ring due to higher surface area and pore volume. Due to the reason above, the biofilter with KAS media also provided higher benzene removal efficiency compared with another system using ceramic ring as a media. Comparison of maximum organic loading between the VUV system and biofilter was also performed. The results showed that the biofilter can receive higher loading than the VUV system. At 90% of removal efficiency, the biofilter with KAS media can receive a loading at $28.99 \text{ g/m}^3\text{-h}$, whereas the system with a ceramic ring media had a maximum loading at $22.86 \text{ g/m}^3\text{-h}$. In contrast with the biofilter, the loading for the VUV system was only $5.14 \text{ g/m}^3\text{-h}$.

Keyword: Benzene / VUV / Residents time / Biofiltration / Media

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการบำบัดเบนซีนด้วยแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น เนื่องจากการให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะรวมทั้งอุปการณ์การทดลองที่มีความจำเป็นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จากดร.ประพัทธ์พงษ์เกียรติกุล อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เฉลิมราชวันทวิน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. นงลักษณ์ บุญรัตนกิจ และดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์ถึงขั้นเรียบร้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.สิริลักษณ์ เจียรกรที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย คุณพิระดา ว่องเกษญา และคุณจงกลณี ประดิษฐ์พงษ์ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองที่มีความถูกต้อง คุณเด่นใจ โพธิ์ทอง และคุณนवलจันทร์ เลาหศิริชัยกุล เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องการติดต่อเอกสารและการเงิน คุณวิวัฒน์ ผ่องอิม ช่างเทคนิคที่เอื้อเพื่ออุปการณ์ในการประกอบปฏิกรณ์ให้เสร็จสมบูรณ์ ท้ายที่สุดขอขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ย่อมเป็นผลมาจากบุคคลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปภาพประกอบ	ญ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สารประกอบอินทรีย์	3
2.2 สารประกอบอะโรมาติก	4
2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)	5
2.4 เบนซีน	6
2.5 สารก่อมะเร็งจากเบนซีน	8
2.6 การเปลี่ยนแปลงของเบนซีนในสถานะต่างๆ	9
2.7 การใช้ประโยชน์จากเบนซีนและสถานการณ์ปริมาณเบนซีนในอากาศ	10
2.8 ค่ามาตรฐานในสิ่งแวดล้อม	11
2.9 กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต (VUV)	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2.10	หลอดไฟฟ้าที่ให้กำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต (VUV)	15
2.11	กระบวนการกรองชีวภาพ (Biofiltration)	16
2.11.1	กลไกของกระบวนการกรองชีวภาพ (Mechanism of biofiltration)	17
2.11.2	การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants)	18
2.11.3	การย่อยสลายสารมลพิษ (Contaminant biodegradation)	19
2.11.4	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Product generation)	19
2.11.5	การย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพ	20
2.11.6	วัสดุกรอง	21
2.11.7	ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง	21
2.12	การตรวจวัดเบนซีนอากาศ	22
2.12.1	แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)	22
2.12.2	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	23
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3.	วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1	แผนภาพแสดงลำดับการดำเนินงาน	26
3.2	ชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน	27
3.3	ระบบการบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต	28
3.4	วิธีการทดสอบการบำบัดด้วยแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต	29
3.4.1	ศึกษาอิทธิพลของการบำบัดเบนซีนโดยดูจากระยะเวลาพัก	29
3.4.2	ศึกษาอิทธิพลของการบำบัดเบนซีนโดยดูจากความเข้มข้นของไอระเหย	29
3.5	การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ (Biofiltration)	31
3.5.1	ลักษณะของตัวกลาง (Media Characteristic)	31
3.5.2	เชื้อจุลินทรีย์	32
3.5.3	อาหารเลี้ยงเชื้อ	32
3.5.4	การเตรียมเชื้อและการตรึงฟิล์มชีวภาพ	33
3.5.5	ชุดระบบกรองชีวภาพ	34
3.5.6	การดำเนินการทดลอง	35
3.6	การวิเคราะห์ไอระเหยเบนซีน	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลอง	37
4.1 การทดสอบชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน	37
4.2 การบำบัดเบนซีนด้วยแสงเวคัมอัลตราไวโอเลต	38
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพัก	38
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้น โดยระยะเวลาพักคงที่	40
4.2.3 การเปรียบเทียบอิทธิพลของระยะเวลาพักและระดับความเข้มข้น	41
4.2.4 การเปลี่ยนรูปของเบนซีนหลังผ่านการบำบัด	42
4.3 การบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ	43
4.3.1 การหาขนาดของรูพรุนแลพื้นที่ผิวของ Ceramic ring และ Kaolinite silica	43
4.3.2 การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	43
4.3.3 การตรึงฟิล์มชีวภาพ	45
4.3.4 การทดสอบการดูดซับทางกายภาพของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด	47
4.3.5 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ	48
4.3.6 อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพจากตัวกลาง 2 ชนิด	51
4.3.7 ลักษณะของตัวกลางทั้ง 2 ชนิดก่อนและหลังการบำบัด	52
4.3.8 สมดุลมวลภายในระบบ	53
4.3.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดจากทั้ง 2 ระบบ	54
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	63
ก. สารเบนซีน	63
ข. ผลการดำเนินงานวิจัย	65
ค. ตัวอย่างการคำนวณ	104
ประวัติผู้วิจัย	108

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติและข้อแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	3
2.2 คุณสมบัติต่างๆของเบนซีน	7
2.3 ค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆในอากาศ	11
2.4 ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี	12
2.5 ค่ามาตรฐานการ फैำระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศในเวลา 24 ชั่วโมง	13
2.6 ค่าพลังในการออกซิไดซ์ของสารต่างๆ	14
2.7 ความยาวคลื่นของหลอดเอ็กไซเมอร์	16
2.8 เปรียบเทียบการบำบัดเบนซีนของงานวิจัยอื่นๆ	25
2.9 เปรียบเทียบการการบำบัดเบนซีนด้วยแสงในงานวิจัยอื่นๆ	25
3.1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์	32
3.2 องค์ประกอบของสารอาหาร	32
4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิว	43
4.2 น้ำหนักของตัวกลาง ความชื้น และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัด	52
4.3 สมดุลปริมาณคาร์บอนในระบบกรองชีวภาพ	53
4.4 เปรียบเทียบการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพและVUVกับงานวิจัยอื่นๆ	56
4.5 เปรียบเทียบการการบำบัดเบนซีนด้วยแสงในงานวิจัยอื่นๆ	56
ข.1 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที	66
ข.2 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที	67
ข.3 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที	68
ข.4 ความเข้มข้นไอระเหย 60 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที	69
ข.5 ความเข้มข้นไอระเหย 110 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที	70
ข.6 ความเข้มข้นไอระเหย 150 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที	71
ข.7 ชุดการทดสอบทางกายภาพของตัวกลาง 2 ชนิด (Ceramic ring และ KAS)	72
ข.8 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ	73
ข.9 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้	77
ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ	78
ข.11 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางก่อนการบำบัด	86
ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด	89

รายการตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.13 ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยง่าย	94
ข.14 สัดส่วน VSS/SS	95
ข.15 ค่าความพรุนและพื้นที่ผิวของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด (BET)	96
ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์	97

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	6
2.3	8
2.4	9
2.5	10
2.6	14
2.7	15
2.8	16
2.9	17
2.10	18
2.11	19
2.12	20
2.13	20
2.14	22
2.15	23
3.1	26
3.2	27
3.3	27
3.4	28
3.5	30
3.6	30
3.7	31
3.8	33
3.9	34
3.10	35
4.1	37
4.2	37
4.3	38

ในอัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนต่างๆ(ระยะเวลาพัก 3.03 – 0.76 นาที)

รายการรูปภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	39
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายเบนซีน เมื่อความเข้มข้นคงที่ 20 ppm ในอัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนต่างๆ (ระยะเวลาพัก 3.03 – 0.76 นาที)	
4.5	40
เปรียบเทียบการย่อยสลายเบนซีนที่ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน 20-150 ppm และอัตราการไหลคงที่ 1 ลิตรต่อนาที (ระยะเวลาพัก 3.03 นาที)	
4.6	41
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายเบนซีน เมื่ออัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนคงที่ 1 ลิตรต่อนาทีในช่วงความเข้มข้นไอระเหยเบนซีน 20-150 ppm	
4.7	41
อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการแควคัมอัลตราไวโอเล็ต	
4.8	42
เปรียบเทียบการย่อยสลายระหว่างระยะเวลาพักและระดับความเข้มข้น	
4.9	42
สัดส่วนของเบนซีนและหมู่ไฮดรอกซิลก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี	
4.10	44
ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำขาออกของถังเลี้ยงเชื้อ	
4.11	44
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อ	
4.12	45
อัตราส่วน VSS/SS	
4.13	46
(ก.) ปฏิกรณ์ที่ใช้ตรึงฟิล์มขนาด 60 ลิตร (ข.) ตัวกลางที่ใช้ในการตรึงฟิล์ม (ซ้าย Kaolinite silica, ขวา Ceramic ring)	
4.14	46
การเกิดฟิล์มชีวภาพบนตัวกลาง (ซ้าย Kaolinite Silica ขวา Ceramic ring)	
4.15	47
การทดสอบการดูดซับทางกายภาพของเซรามิกริง Ceramic ring และ Kaolinite activated silica (KAS)	
4.16	48
การบำบัดไอระเหยเบนซีนที่ค่าการระเหยอินทรีย์ต่างๆ	
4.17	49
ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยเบนซีนที่ค่าการระเหยอินทรีย์ต่างๆ	
4.18	49
ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำชะจากระบวนการกรองชีวภาพ	
4.19	50
ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากกระบวนการกรองชีวภาพ	
4.20	51
อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพ	
4.21	54
สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงสารเบนซีนไปในรูปต่างๆ	
4.22	55
เปรียบเทียบค่าการระเหยอินทรีย์และประสิทธิภาพการบำบัด	
4.23	55
อัตราการย่อยสลายเบนซีนด้วยแสงและกระบวนการกรองชีวภาพ	

ประมวลศัพท์และคำย่อ

d	=	day
g	=	gram
mg	=	milligram
h	=	hour
nm	=	nanometre
m	=	metre
v	=	volume
m ²	=	square metre
m ³	=	Cubic metre
μg/m ³	=	microgram per cubic metre
g/m ³ -h	=	gram per cubic metre hour
ppm	=	part per million
Carcinogen	=	สารก่อมะเร็ง
Metabolism	=	การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต และมีผลต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต
Surface area	=	ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส
COD	=	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand)
Intermediate	=	สารมัธยันตร์ คือ โมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมที่เกิดระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ เป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี โดยจะเกิดขึ้นเพียงระยะสั้น

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากมลพิษทางอากาศดังกล่าว สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนทั้งภายในเมืองและนอกเมือง ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากการขนส่งคมนาคม สามารถทำให้เกิดความรำคาญจนถึงก่อให้เกิดโรค จนกระทั่งเสียชีวิตได้ มลพิษทางอากาศส่วนใหญ่ที่มักก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพทั้งที่เกี่ยวกับกับระบบทางเดินหายใจ การไหลเวียนของโลหิตและระบบประสาท (Kampa and Castanas, 2008) ทั้งนี้หนึ่งในมลพิษทางอากาศที่มีความสำคัญ ได้แก่ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs)ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และบ้านเรือน สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สำคัญที่มักตรวจพบได้ในบรรยากาศ ได้แก่ สาร เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน (รวมเรียกว่ากลุ่ม บีเทค, BTEX) (EPA, 2010) โดยเป็นสารที่ใช้เป็นส่วนประกอบของทั้งน้ำมัน เบนซีน สารเอ็มทีบีอี (MTBE, methyl tertiarybutyl ether) (สารเพิ่มค่าออกเทนแทนสารตะกั่ว) และสารตัวทำละลายต่างๆ สาร BTEX เหล่านี้มักถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดหลากหลายชนิดเป็นจำนวนมากทั้งเกิดจากการรั่วไหล หรือจากการประกอบกิจการ นอกจากนี้สาร BTEX ยังสามารถก่อให้เกิดอาการระคายเคืองต่อเยื่อตา และระบบทางเดินหายใจ (ATSDR, 2007) สารเบนซีนเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายตัวหนึ่งในกลุ่ม BTEX ที่มีศึกษากันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากสารดังกล่าวถูกพบในปริมาณมากในบรรยากาศ และมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดสารดังกล่าวที่แหล่งกำเนิดก่อนการปลดปล่อยสู่บรรยากาศ เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้ที่ได้รับสัมผัสกับสารดังกล่าว โดยวิธีการบำบัดไอระเหยเบนซีนสามารถบำบัดได้ทั้งทางเคมีและชีวภาพ (ATSDR, 2007) ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำกระบวนการกรองชีวภาพและกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ต โดยระบบกรองชีวภาพเป็นระบบการกำจัดสารเบนซีนที่มีราคาต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ และมีค่าใช้จ่ายในการดูแลที่ต่ำมาก ส่วนระบบแวกคัมอัลตราไวโอเล็ตก็มีจุดเด่นในเรื่องของการใช้งานที่ง่ายไม่ต้องการบำรุงรักษาระบบมากนัก รวมทั้งยังใช้เวลาสัมผัสน้อย ทั้ง 2 กระบวนการจึงเป็นวิธีการบำบัดที่มีความน่าสนใจต่อการบำบัดไอระเหยเบนซีนในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในการกำจัดไอรยะเหยเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพ
2. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดไอรยะเหยเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต และกระบวนการกรองชีวภาพ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. พัฒนาชุดสร้างไอรยะเหยเบนซิน โดยให้สามารถสร้างไอรยะเหยที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 20-400 ppm
2. ทำการศึกษากระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale)
3. ศึกษาความสามารถในการกำจัดไอรยะเหยของสารเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตที่ความเข้มข้นขาเข้า 20, 60, 110 และ 150 ppm ตามลำดับ
4. ศึกษาความสามารถในการกำจัดไอรยะเหยของสารเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต โดยการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักตั้งแต่ 0.76 – 3.03 นาที
5. วัสดุกรองที่นำมาใช้ในกระบวนการกรองชีวภาพภายใต้การศึกษานี้ คือเซรามิกริง (Ceramic ring) และ kaolinite activated silica (KAS)
6. เชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในระบบกรองชีวภาพเป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโรงบำบัดน้ำทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร
7. ตัวแปรเบื้องต้นที่ทำการศึกษาคือ ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวกลาง
8. ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการกรองชีวภาพที่ความเข้มข้นขาเข้า 20 - 400 ppm
9. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเบนซินที่ระยะเวลาพัก 1.8 นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดไอรยะเหยเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพ
2. ทำให้ทราบถึงความสามารถสูงสุดในการกำจัดไอรยะเหยเบนซินของกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลตและกระบวนการกรองชีวภาพ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบอินทรีย์

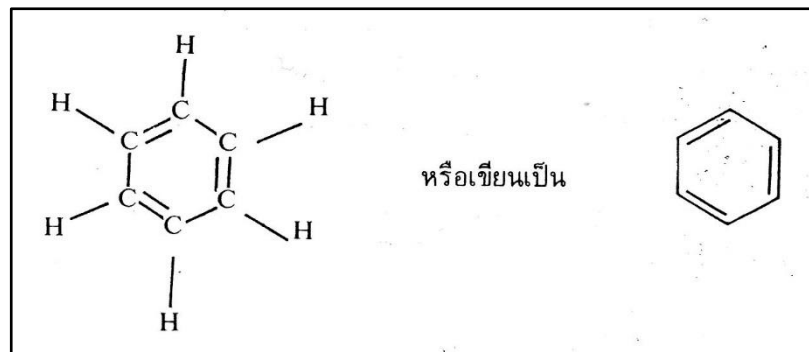
สารประกอบอินทรีย์ หมายถึง สารประกอบเคมีที่อยู่ในสถานะใดก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ที่มีธาตุคาร์บอน เป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ธาตุ O, N, P, S, Cl, และ Br เป็นต้น อาจมาจากสิ่งมีชีวิตและจากการสังเคราะห์ ยกเว้นสารประกอบบางชนิดที่ไม่จัดว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์แม้ว่าจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบก็ตาม ตัวอย่างเช่น สารประกอบคาร์ไบน์, คาร์บอนेट, ออกไซด์ของคาร์บอนและไซยาไนด์ เช่นเดียวกับอัญรูปของคาร์บอน อย่างเช่น เพชรและแกรไฟต์ ซึ่งถูกจัดเป็นสารประกอบอนินทรีย์ (กฤษณา ชูติมา, 2541) โดยข้อแตกต่างของสารอินทรีย์และอนินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติและข้อแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์
(ที่มา: กฤษณา ชูติมา, 2541)

สมบัติ	สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ส่วนใหญ่เป็นธาตุ C และ H ธาตุอื่น ๆ เช่น O, N, S, P, Cl, Br, และ I	ธาตุทุกชนิด
ชนิดของพันธะเคมี	พันธะโคเวเลนต์	มีทั้งพันธะโคเวเลนต์และพันธะไอออนิก(ส่วนมากเป็นไอออนิก)
การละลายน้ำ	ส่วนมากไม่ละลายน้ำ ยกเว้นพวกโมเลกุลมีขั้วขนาดเล็ก ๆ เช่น แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์	ส่วนมากละลายน้ำได้ดี
การนำไฟฟ้าของสารละลาย(ในน้ำ)	ไม่นำไฟฟ้าหรือนำได้น้อยมาก	ส่วนใหญ่พวกที่ละลายน้ำจะนำไฟฟ้าได้ดีโดยเฉพาะสารไอออนิก
การละลายในตัวทำละลายอินทรีย์	ส่วนมากละลายได้ดี	ส่วนมากไม่ละลาย
จุดหลอมเหลว จุดเดือด	ส่วนมากค่อนข้างต่ำ	ส่วนมากค่อนข้างสูง
การเผาไหม้	ติดไฟง่าย อาจมีเขม่า	ติดไฟยาก ต้องใช้ความร้อนสูงมากและเมื่อติดไฟแล้วจะมีกากของแข็งเหลืออยู่
อัตราการเกิดปฏิกิริยา	เกิดค่อนข้างช้า	เกิดเร็ว
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ส่วนมากต้องใช้	ส่วนมากไม่ต้องใช้

2.2 สารประกอบอะโรมาติก

อะโรมาติกเป็นไฮโดรคาร์บอน เป็นสารที่มีแต่คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างเป็นวงในลักษณะที่แตกต่างจากสารอะลิฟาติก ถ้าเป็นวงเดี่ยวที่ไม่มีหมู่เกาะที่วง จะมีสูตรทั่วไปเป็น C_nH_n ตัวอย่างเช่น เบนซีน (C_6H_6) รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของสารอะโรมาติกจะเป็นสารที่ไม่อิ่มตัวสูง เพราะมีพันธะคู่ในโมเลกุลหลายพันธะ จึงมีความเสถียรสูง โดยทั่วไปเบนซีนมักไม่เกิดปฏิกิริยาการเพิ่ม เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน เพราะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความไวสูง เช่น โรเดียมคาร์บอน หรือถ้าใช้ตัวเร่งปกติเช่นแพลตตินั่มจะต้องทำในบรรยากาศที่มีความดันและความร้อนสูง สารอะโรมาติกจึงเกิดปฏิกิริยาแทนที่ได้ง่ายกว่า เช่น การแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์และนิวคลีโอไฟล์ (สุนันทา วิบูลย์จันทร์, 2548)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเบนซีน

(ที่มา: สุนันทา วิบูลย์จันทร์, 2548)

2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เป็นสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ในอุณหภูมิห้องและความดันปกติทำให้เกิดอากาศที่มีความเป็นพิษ (Toxic Air) โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลักซึ่งอาจมีอะตอมของออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารเคมีที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ทุกคนต้องใช้ในครัวเรือนหลายประเภท เช่น ทินเนอร์ สารทำความสะอาด สารตัวทำละลาย น้ำมันหล่อลื่น ควันบุหรี่ สีทาบ้าน น้ำยาฟอกสี น้ำยาซักแห้ง ยางมาแมลง หรือแม้แต่สารที่เกิดจากการเผาไหม้ และสารอินทรีย์ระเหยง่ายยังสามารถแฝงตัวอยู่ในอากาศ อาหาร และแหล่งน้ำ เป็นต้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้สามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจ การบริโภค การสัมผัส ในปัจจุบันกำลังเป็นปัญหาที่กำลังได้รับความสนใจจากองค์กรที่เกี่ยวข้องทางด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมทั้งในประเทศและต่างประเทศ (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

สารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

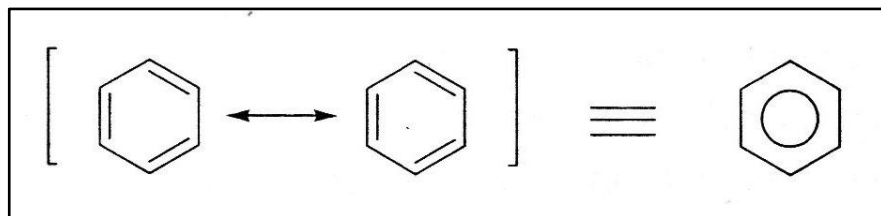
2.3.1 กลุ่ม Non Chlorinated VOCs หรือ Non Halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล เช่น Hexane, Ethyl Alcohol, Methyl Alcohol, Formaldehyde, Toluene, Xylene, Benzene, Naphthalene, Styrene และ Phenol สารกลุ่มนี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างยิ่งโดยเฉพาะกับระบบทางเดินหายใจ (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

2.3.2 กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล เช่น 1,1,1,2-Tetrachloroethane, Carbon Tetrachloride, Chloroform, Dibromomethane, Dichloromethane, Ethylene Dibromide และ Vinyl Chloride โดยสารจำพวกนี้ จะออกฤทธิ์เป็นพิษมากกว่า ก่อให้เกิดโรคมะเร็งและเป็นตัวกระตุ้นการเกิดโรคมะเร็งอีกด้วย อีกทั้งยังมีความเสถียรมากกว่าสารในกลุ่ม Non Chlorinated VOCs (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

2.4 เบนซีน

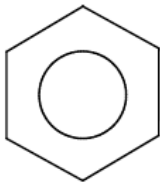
เบนซีนเป็นสารประกอบอะโรมาติกตัวแรกที่ถูกค้นพบ ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1825 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Michael Faraday ที่ได้ทำการแยกสารประกอบบริสุทธิ์ชนิดหนึ่งจากแก๊สที่ใช้จุดให้ความสว่างที่ได้จากไขของปลาวาฬ พบว่าสารประกอบนี้มีจุดเดือด 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบว่าประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งมีสูตรอย่างง่ายคือ CH เขาจึงตั้งชื่อสารประกอบนี้ว่า Carbureted hydrogen ต่อมาในปีค.ศ. 1834 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Eilhard Mitscherlich ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบชนิดเดียวกันนี้ จากการให้ความร้อนกรดเบนโซอิกกับปูนขาว และพบว่าสูตรอย่างง่ายคือ CH เช่นเดียวกันและยังสามารถหามวลโมเลกุลได้เท่ากับ 78 ดังนั้นสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้คือ C_6H_6 ขณะเดียวกันก็ยังสามารถแยกสารประกอบนี้ได้จากกำยาน (Gum benzoin) ดังนั้น Mitscherlich จึงให้ชื่อสารประกอบนี้ว่า เบนซีน (Benzin)

ถึงแม้ว่านักเคมีจะรู้จักสารประกอบเบนซีนกันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างโมเลกุลนี้ก็ยังคงเป็นความลับอยู่จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1866 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Friedrich August Kekule' ได้เสนอโครงสร้างของเบนซีนว่ามีโครงสร้างเป็นวงที่ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ Kekule' กล่าวว่าโครงสร้างนี้ได้จากความฝันครั้งหลังครั้งต้นของเขา โคนเขาฝันว่าอะตอมจำนวนมากกำลังกระโดดโลดเต้นไปมาแล้วเริ่มจับกลุ่มเรียงตัวเป็นเส้นยาวเหมือนงู แต่มีงูตัวหนึ่งกำลังกินหางของตัวเองทำให้เห็นเป็นวงกลม เมื่อเขาตกใจตื่นเขาจึงสร้างความคิดรวบยอดเกี่ยวกับคาร์บอนหกอะตอมจับตัวกันในลักษณะวงแหวนของเบนซีน โดยมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวดังรูปที่ 2.2 (ทวีสิน นาวารัตน์, 2553)



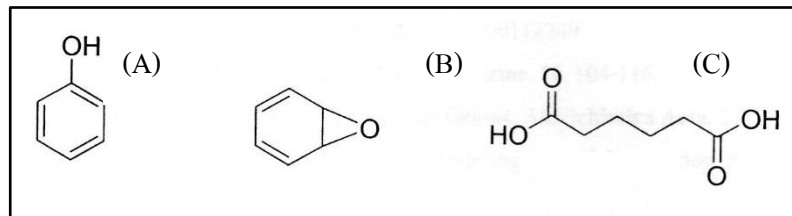
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเบนซีนของ Kekule'
(ที่มา: ทวีสิน นาวารัตน์, 2553)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆของเบนซีน
(ที่มา: EPA,1998)

IUPAC name	Benzene
ชื่ออื่น	Phenyl hydride, Benzohexatriene, Benzol, Pyrobenzole, Coal naphtha, Cyclohexatriene
CAS Number	71-43-2
UN Number	1114
สูตรโมเลกุล	C ₆ H ₆
โครงสร้าง	
มวลโมเลกุล	78.12 g (0.17 lbs)
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลว ไม่มีสีมีกลิ่นหอม ระเหยเป็นไอได้ง่าย
ความหนาแน่น	0.8749 g/cm ³ (0.0141 lb/ft ³) ที่ 20°C
จุดหลอมเหลว	5.5°C (41.9°F)
จุดเดือด	80.1°C (176.18°F)
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.180 g/100 mL (1800 ppm) ที่ 25°C ละลายในตัวทำละลาย ได้แก่ แอลกอฮอล์, อีเทอร์, อะซิโตน, คาร์บอนเตตระคลอไรด์, คาร์บอนไดซัลไฟด์ และ กรดอะซิติก
ความหนืด	0.652 cP ที่ 20°C
แรงตึงผิว	0.033 g/cm ³ (28.18 dynes/cm ³)
ความดันไอ	95.2 mmHg (12.7 kPa) ที่ 25°C
อุณหภูมิที่ระเบิดได้เอง	562°C (1044°F)
จุดวาบไฟ	-11.1°C (12°F)
Conversion factors	$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ ppm} = 3.19 \text{ mg/m}^3 \\ 1 \text{ mg/L} = 313 \text{ ppm} \text{ ที่ } 25^\circ\text{C} \text{ (77}^\circ\text{F)} \\ 1 \text{ mg/m}^3 = 0.31 \text{ ppm} \end{array} \right\}$

2.5 สารก่อมะเร็งจากเบนซีน

รายงานที่แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องระหว่างเบนซีนกับการเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวได้ถูกตีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1928 โดย Delore และ Borgomano ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง จนนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งโดยเป็นพิษต่อสารพันธุกรรมทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว รายงานจากคณะกรรมการวิชาการ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์นครราชสีมา และศูนย์ข้อมูลพิษวิทยาระบุว่า เมื่อเบนซีนเข้าสู่ร่างกายจะกระจายตัวในเลือดอย่างรวดเร็วและถูกเมตาโบไลต์ (Metabolized) ที่ตับไปเป็นสารตัวกลาง (Metabolites) เช่น ฟีนอล เบนซีนออกไซด์ และกรดมิวโคนิก เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสารตัวกลางบางตัวจะกลายสภาพไปเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความไวต่อความผิดปกติทางพันธุกรรม (Mutation) ผลทางพิษวิทยาเมื่อได้รับสารเบนซีนเข้าสู่ร่างกายทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง ได้แก่ ทำให้เกิดการระคายเคืองและพุพอง พิษต่อระบบประสาท ทำให้ปวดศีรษะ มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน ชักหมดสติ และเสียชีวิตได้ พิษต่อระบบเลือด ทำลายไขกระดูกทำให้จำนวนเม็ดเลือดขาวและเกล็ดเลือดต่ำ ก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางแบบ Aplastic anemia (ทวิสิน นาวารัตน์, 2553)



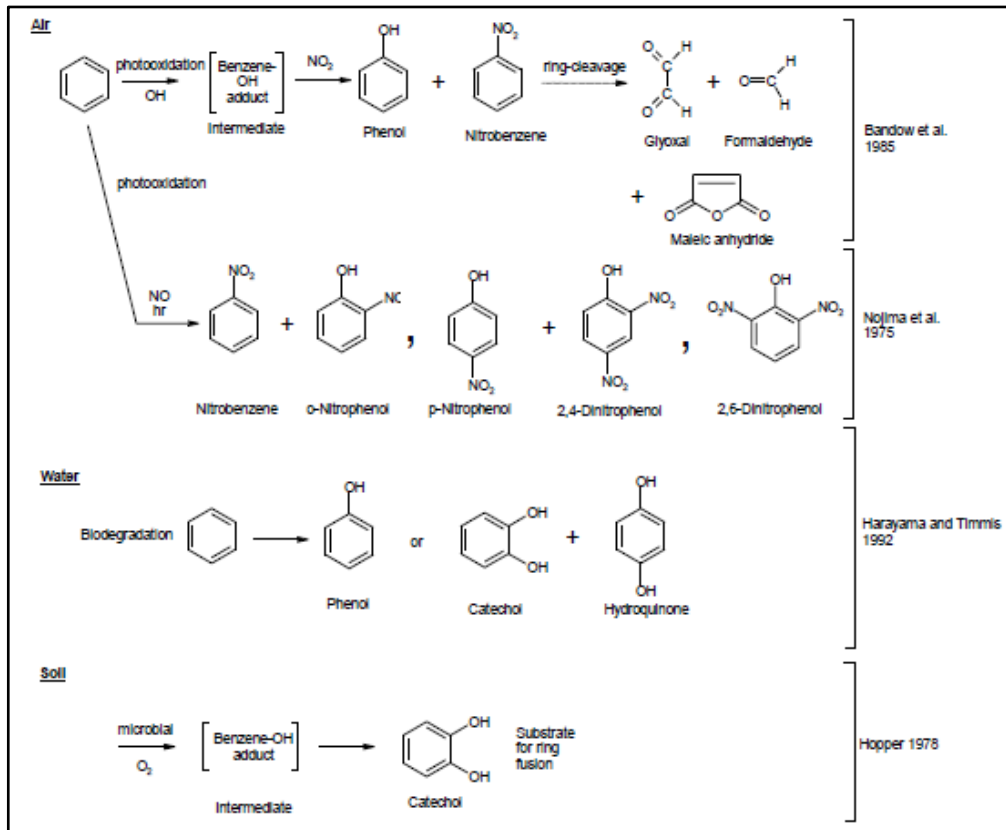
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างสารตัวกลาง (Metabolites)

(A= ฟีนอล, B= เบนซีนออกไซด์, C= กรดมิวโคนิก)

(ที่มา: ทวิสิน นาวารัตน์, 2553)

2.6 การเปลี่ยนรูปของเบนซีนในสถานะต่างๆ

การเปลี่ยนรูปและการย่อยสลายเบนซีนมีความแตกต่างกันทั้งในน้ำ ดินและอากาศ ดังรูปที่ 2.4 โดยในบรรยากาศมักอยู่ในรูปของไอระเหย (Eisenreich et al., 1981) การย่อยสลายเบนซีนสามารถทำได้โดยการปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\text{OH}\cdot$) โดยค่าคงที่การทำปฏิกิริยาของเบนซีนกับไฮดรอกซิลแรดดิคัลอยู่ที่ $1.3 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{molecule-second}$ ที่ระยะเวลา 8 วัน ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลแรดดิคัลในบรรยากาศเท่ากับ $1.1 \times 10^6 \text{ molecule/cm}^3$ (Gaffney and Levine, 1979; Lyman, 1982) หากไฮดรอกซิลแรดดิคัลมีความเข้มข้น $1 \times 10^8 \text{ molecule/cm}^3$ ระยะเวลาจะสั้นเพียง 2.1 ชั่วโมง (Lyman, 1982) นอกจากนี้เบนซีนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารออกซิแดนท์อื่นๆ อย่างเช่น ไนเตรทแรดดิคัลและโอโซน อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายพิจารณาแล้วว่าจะไม่มีความสำคัญเมื่อเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลแรดดิคัล โดยค่าคงที่การทำปฏิกิริยาของโอโซนเท่ากับ $7 \times 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{molecule-second}$ จะใช้เวลาในการย่อยสลายเบนซีนสูงถึง 472 ปี (นอกเมือง) และ 152 ปี (ในเมือง) (Pate et al., 1976) โดยความเข้มข้นของโอโซนนอกเมืองเท่ากับ $9.6 \times 10^{11} \text{ molecule/cm}^3$ และความเข้มข้นของโอโซนในเมืองเท่ากับ $3 \times 10^{12} \text{ molecule/cm}^3$ (Lyman, 1982)

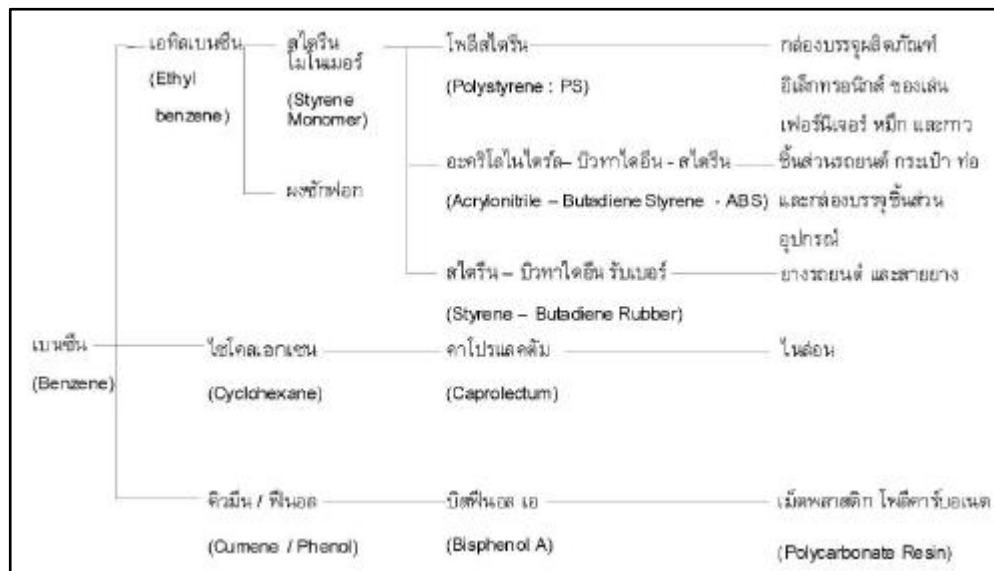


รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนรูปของเบนซีนที่อยู่ในสถานะต่างๆ

(ที่มา: ATSDR, 2007)

2.7 การใช้ประโยชน์จากเบนซีนและสถานการณ์ปริมาณเบนซีนในอากาศ

เบนซีนเป็นตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกชนิดหนึ่ง เป็นสารที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันดิน ในอดีตนิยมใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น สี หมึก ทินเนอร์ ยาฆ่าแมลง น้ำยาลบสี เป็นตัวทำละลายและเป็นส่วนผสมในน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) และยังเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในการผลิตสารเคมีอื่นหลายชนิด เช่น styrene phenol cyclohexane สารเคมีที่ใช้ในการผลิตสารซักฟอกยาฆ่าแมลงยาน้ำหอมวัตถุระเบิด และน้ำยาลบสี อุตสาหกรรมที่มีการนำเบนซีนไปใช้ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอกและผลิตภัณฑ์ซักล้าง อุตสาหกรรมผลิตตัวทำละลาย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552) รูปที่ 2.5 แต่เนื่องจากมีคุณสมบัติก่อมะเร็ง ทำให้ปัจจุบันมีการใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ น้อยลง ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะเปลี่ยนมาใช้ตัวทำละลายตัวอื่นที่ปลอดภัยกว่า เช่น toluene หรือ xylene แทน อย่างไรก็ตามในผลิตภัณฑ์บางประเภทก็ยังคงมีการใช้เป็นส่วนผสมอยู่ โดยต้องดูจากผลตกค้างส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนหากผลิตจากผู้ผลิตที่มีคุณภาพจะไม่มีการใช้สารเบนซีน ในหลายประเทศมีการออกกฎหมายห้ามใช้เบนซีนผสมในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.5 การนำเบนซีนมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ
(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

2.8 ค่ามาตรฐานในสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันมีการกำหนดค่ามาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อมในหลายๆหน่วยงาน เพื่อเป็นการควบคุมการปลดปล่อยที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของมนุษย์ โดยมีค่ามาตรฐานต่างๆดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆในอากาศ
(ที่มา: ชนสร ต้นศฤงฆาร, 2548)

สาร	หน่วยงาน	ปริมาณความเข้มข้น
เบนซีน	OSHA	1.0 ppm > 8 hours (TWA)
	NIOSH	5.0 ppm < 5 minute (STEL)
		0.1 ppm > 10 hours (TWA)
	ACGIH	1.0 ppm 15 minute (STEL)
โทลูอีน	OSHA	0.5 ppm > 8 hours (TWA)
	NIOSH	2.5 ppm (STEL)
		100 ppm (STEL)
	ACGIH	500 ppm (STEL)
เอทิลเบนซีน	OSHA	100 ppm (TWA)
	NIOSH	50 ppm (TWA)
		100 ppm (TWA)
	ACGIH	100 ppm > 10 hours (TWA)
ไซลีน	OSHA	125 ppm (STEL)
	ACGIH	100 ppm > 8 hours (TWA)
		125 ppm (STEL)
	OSHA	0.1 mg/m ³ (TWA)
MTBE	ACGIH	0.1 mg/m ³ (TWA)
	OSHA	100 ppm (TWA)
MTBE	ACGIH	50 ppm (TWA)

หมายเหตุ TWA = Time – Weighted – Average, STEL = Short – Term Exposure Limit
OSHA = Occupational Safety and Health Administration
NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health
ACGIH = American Conference of Industrial Hygienists

ตารางที่ 2.4 ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

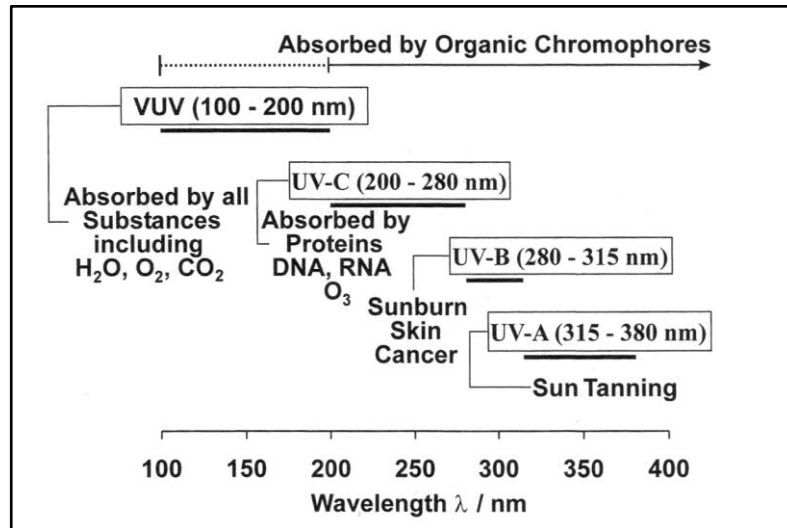
สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน
1. เบนซีน (Benzene)	ไม่เกิน $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.000495 ppm)
2. ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
3. 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	ไม่เกิน $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
4. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$
5. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$
6. 1,2-ไดคลอโรโพรเพน (1,2-Dichloropropane)	ไม่เกิน $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
7. เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$
8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$
9. 1,3-บิวทาไดอีน (1,3-Butadiene)	ไม่เกิน $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ตารางที่ 2.5 ค่ามาตรฐานการเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 2 ชั่วโมง
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน
1. อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde)	ไม่เกิน $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2. อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile)	ไม่เกิน $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
3. เบนซีน (Benzene)	ไม่เกิน $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.00221 ppm)
4. เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride)	ไม่เกิน $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$
5. 1,3 – บิวทาไดอีน (1,3-Butadiene)	ไม่เกิน $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$
6. โบรโมมีเทน (Bromomethane)	ไม่เกิน $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$
7. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	ไม่เกิน $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$
9. 1,2 – ไดโบรโมอีเทน (1,2-Dibromoethane)	ไม่เกิน $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$
10. 1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	ไม่เกิน $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
11. 1,2 – ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	ไม่เกิน $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$
12. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$
13. 1,2 – ไดคลอโรโพรเพน (1,2-Dichloropropane)	ไม่เกิน $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$
14. 1,4-ไดออกเซน (1,4-Dioxane)	ไม่เกิน $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$
15. อะครอลีน (2-Propenal/acrolein)	ไม่เกิน $0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$
16. เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$
17. 1,1,2,2-เตตระคลอโรเอทิลีน (1,1,2,2-Tetrachloroethane)	ไม่เกิน $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$
18. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$
19. ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

2.9 กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต (VUV)

กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) โดยใช้แสงที่มีความคลื่นในช่วง 100-200 นาโนเมตร รูปที่ 2.6 โดยกระบวนการนี้จะสามารถทำให้เกิดอนุมูลของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical) ที่มีหน้าที่ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH•) นี้ยังมีศักยภาพการออกซิไดซ์ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่น ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าความยาวคลื่นและการดูดซับของแสงแต่ละประเภท (ที่มา: Oppenlander, 2003)

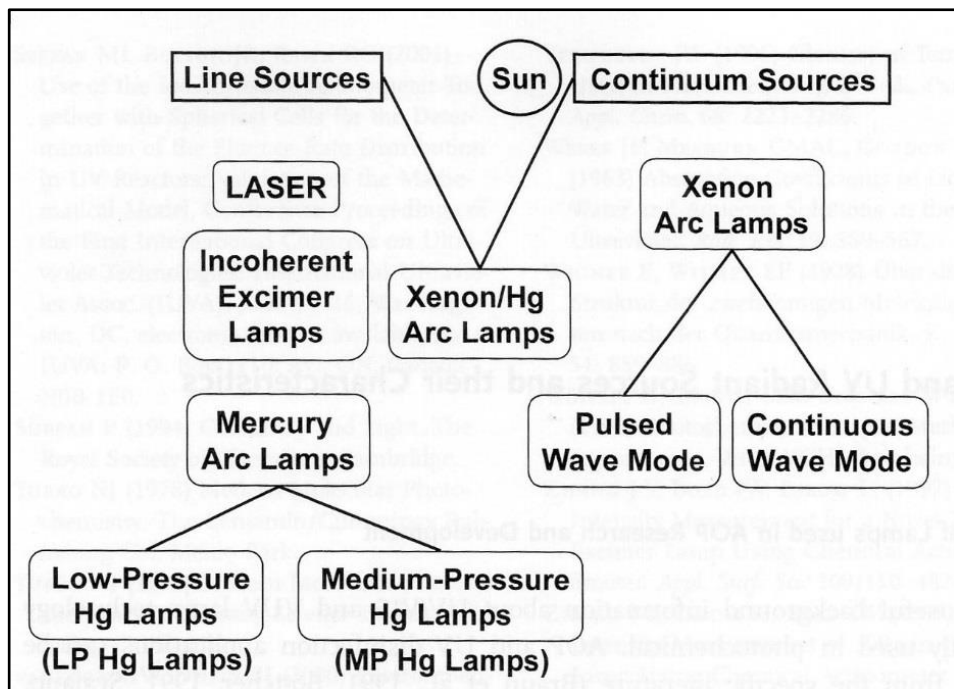
ตารางที่ 2.6 ค่าพลังในการออกซิไดซ์ของสารต่างๆ (ที่มา: Metcalf and Eddy, 2003)

Oxidizing agent	Oxidation Potential
Fluoride	3.06
Hydroxyl radical	2.80
Oxygen (atomic)	2.42
Ozone	2.08
Hydrogen peroxide	1.78
Hypochlorite	1.49
Chlorine	1.36
Chlorine dioxide	1.27
Oxygen molecular	1.23

2.10 หลอดไฟฟ้าที่ให้กำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต (VUV)

หลอดไฟฟ้าที่สามารถให้กำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลตได้มีอยู่ 2 ประเภท

1. หลอดเอ็กไซเมอร์ (Excimer lamp) หลอดประเภทนี้สามารถสร้างความยาวคลื่นได้หลายช่วง โดยแหล่งกำเนิดที่ได้ี้้นมาจาก rare gases และ halogen เช่นแก๊สนีออน (Ne) แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สคริปทอน (Kr) และแก๊สซีนอน (Xe) เป็นต้น ในงานสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่จะใช้หลอดที่บรรจุแก๊สซีนอนซึ่งจะปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 172 นาโนเมตรซึ่งที่ความยาวคลื่นนี้ผลิตอนุมูลไฮดรอกไซด์ได้ดี แต่ข้อเสียคือหลอดประเภทนี้มีราคาแพง
2. หลอดปรอทความดันต่ำ (Low pressure mercury lamp, LP Hg lamps) หลอดประเภทนี้สามารถผลิตแสงที่มีความยาวคลื่น 185 และ 254 นาโนเมตร หลอดปรอทความดันต่ำมีความแตกต่างกับหลอดไฟที่ให้กำเนิดแสง UV ทั่วไปโดยเป็นหลอดที่ถูกห่อหุ้มด้วยแก้วควอทซ์ (quartz) ที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงสามารถให้กำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตรที่เป็นตัวทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.7 แหล่งกำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต

(ที่มา: Oppenlander, 2003)

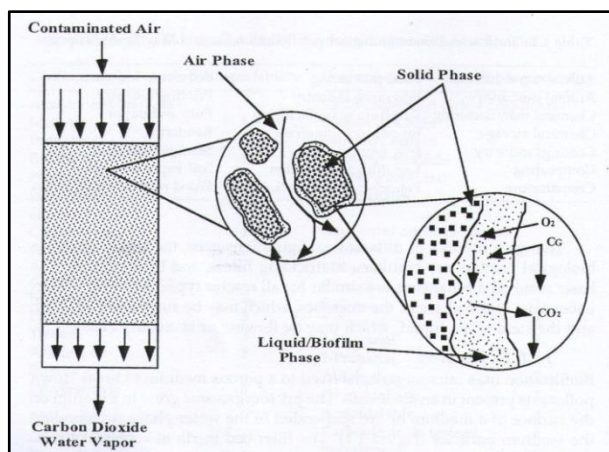
ตารางที่ 2.7 ความยาวคลื่นของหลอดเอกไซเมอร์

(ที่มา: Oppenlander, 2003)

	Rare gas	-	Ne	Ar	Kr	Xe
Halogen	-	-	-	126 nm	146 nm	172 nm
	F	158 nm	108 nm	193 nm	249 nm	354 nm
	Cl	259 nm	-	175 nm	222 nm	308 nm
	Br	289 nm	-	165 nm	207 nm	283 nm
	I	342 nm	-	-	190 nm	253 nm

2.11 กระบวนการกรองชีวภาพ (Biofiltration)

การกรองชีวภาพจะเป็นการกรองที่ประกอบไปด้วยตัวกลางพรุน โดยผิวของตัวกลางจะถูกปกคลุมไปด้วยน้ำและจุลินทรีย์ การทำงานของระบบจะเริ่มขึ้นจากการแลกเปลี่ยนสารมลพิษจากอากาศเข้าสู่ น้ำ (ไบโอฟิล์ม) การละลายสารมลพิษจะเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่และการเคลื่อนที่ของอากาศ สารมลพิษจะกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ จะถูกดูดซับโดยเอกไซโพลีแซกคาไรด์บนไบโอฟิล์มที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาหรือจากตัวเซลล์จุลินทรีย์เอง และยังสามารถถูกดูดซับโดยตัวกลางที่ใช้ทำที่สุดการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพจะเปลี่ยนสารมลพิษให้กลายเป็นสารชีวมวล (Biomass), metabolic by-product หรือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังรูปที่ 2.8 ถ้าสารมลพิษประกอบด้วยคลอรีนหรือซัลเฟอร์เราจะเห็นอยู่ในรูปของคลอไรด์และซัลเฟต การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยระบบนิเวศที่ซับซ้อนของสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลาย ผู้แข่งขัน และผู้ล่า (Joseph, 1999)

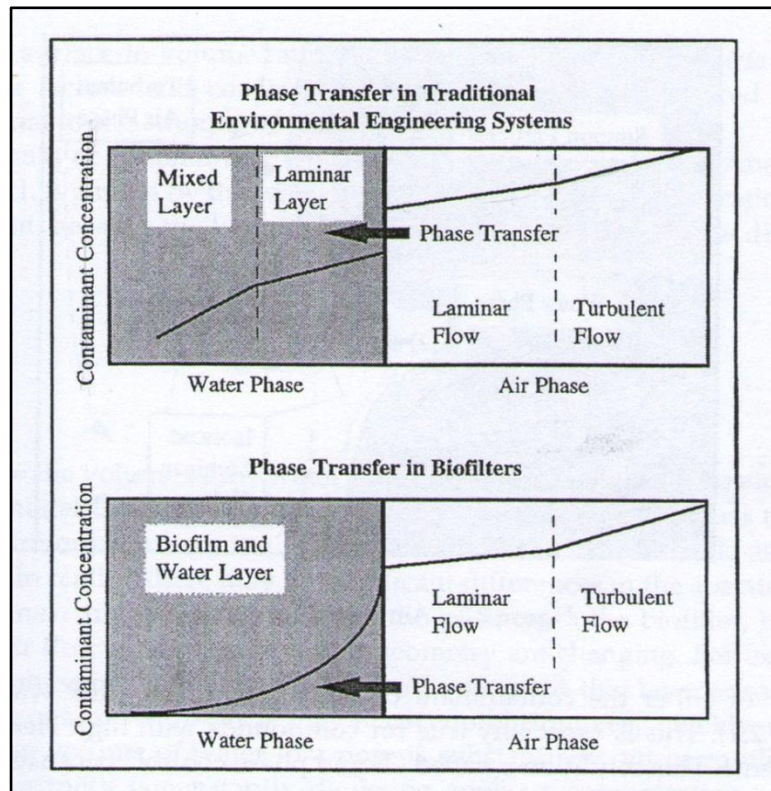


รูปที่ 2.8 กลไกการทำงานของกระบวนการกรองชีวภาพ

(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.1 กลไกของกระบวนการกรองชีวภาพ (Mechanism of biofiltration)

การถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศไปสู่ น้ำจะมีด้วยกัน 4 ขั้นตอน เมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำต่ำจะเกิดการถ่ายเทมวลการจากอากาศที่มีความเข้มข้นสูงไปยังน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังรูปที่ 2.9 เมื่อการไหลของอากาศเป็นแบบปั่นป่วนจะทำให้สารมลพิษเคลื่อนที่โดยกระบวนการ Advection และ eddy diffusion เมื่อรวมกันเรามักจะเรียกว่า convection โดยบริเวณผิวน้ำและอากาศการไหลของอากาศจะเปลี่ยนเป็นแบบราบเรียบ จึงทำให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลซึ่งเป็นที่มาของกลไกการเคลื่อนที่ เพราะการแพร่ของโมเลกุลจะช้ากว่า convection จึงสามารถเป็นตัวบ่งบอกอัตราของการถ่ายเทมวลในระบบ Activated sludge ได้ โดยเฉพาะในกรณีการถ่ายเทมวลของสารที่มีสภาพการละลายสูง แต่อากาศในระบบกรองชีวภาพไหลอย่างรวดเร็ว การไหลแบบปั่นป่วนจึงน้อยมาก เพราะระบบอื่นๆจะถ่ายเทมวลได้ช้าในขั้นนี้ อย่างไรก็ตามลักษณะของผิวน้ำในระบบจะไม่ราบเรียบ จึงเกิดการขัดขวางการถ่ายเทมวลในอากาศ และความแรงของผลกระทบนี้ไม่สามารถวัดค่าได้

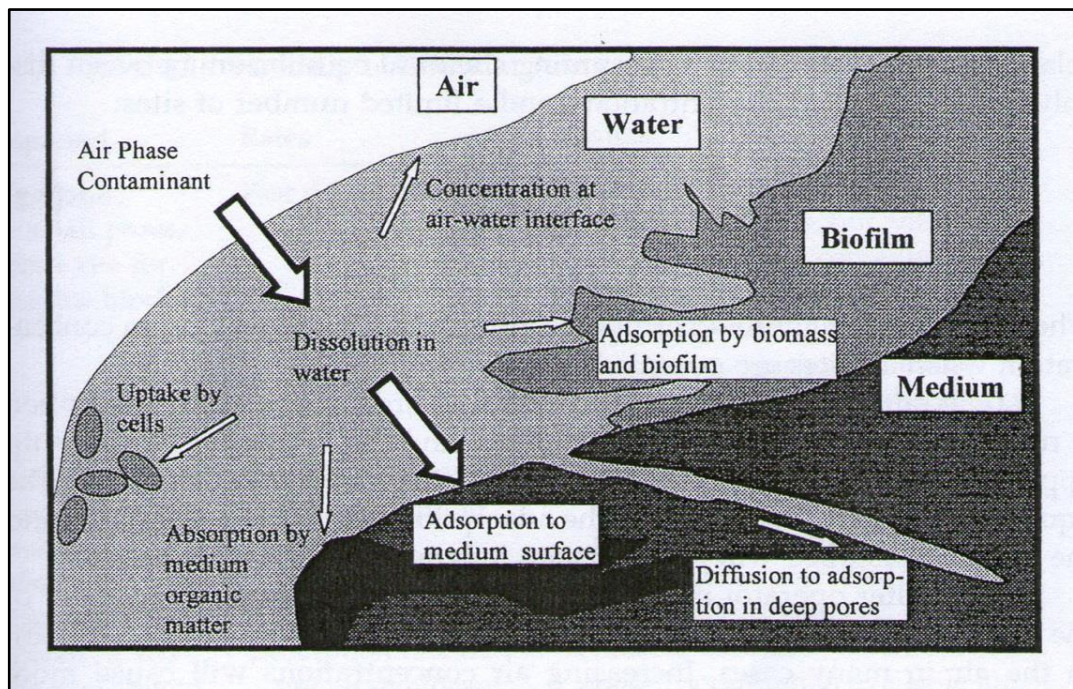


รูปที่ 2.9 กลไกการถ่ายเทมวลระหว่างเฟส

(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.2 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants)

การถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศสู่น้ำและของแข็งในการกรองชีวภาพเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการบำบัด โมเลกุลของสารมลพิษอาจจะละลายได้ง่ายในน้ำแต่ก็อาจจะถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซึมเข้าไปในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ถูกดูดซับโดยไบโอฟิล์ม ถูกดูดซับโดยอินทรีย์สารในไบโอฟิล์มหรือตัวกลาง หรือถูกรวมอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.10 สำหรับมลพิษที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น เอทานอล การละลายจะเป็นลักษณะเด่น และปริมาณของน้ำจะสามารถพิจารณาจากอิทธิพลของจำนวนการถ่ายเทมวลไปสู่อากาศ (Devinny et al., 1997) ส่วนสารมลพิษไม่ชอบน้ำจะถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางและถูกดูดซับภายในสารอินทรีย์เป็นหลัก



รูปที่ 2.10 กระบวนการดูดซับสารมลพิษ

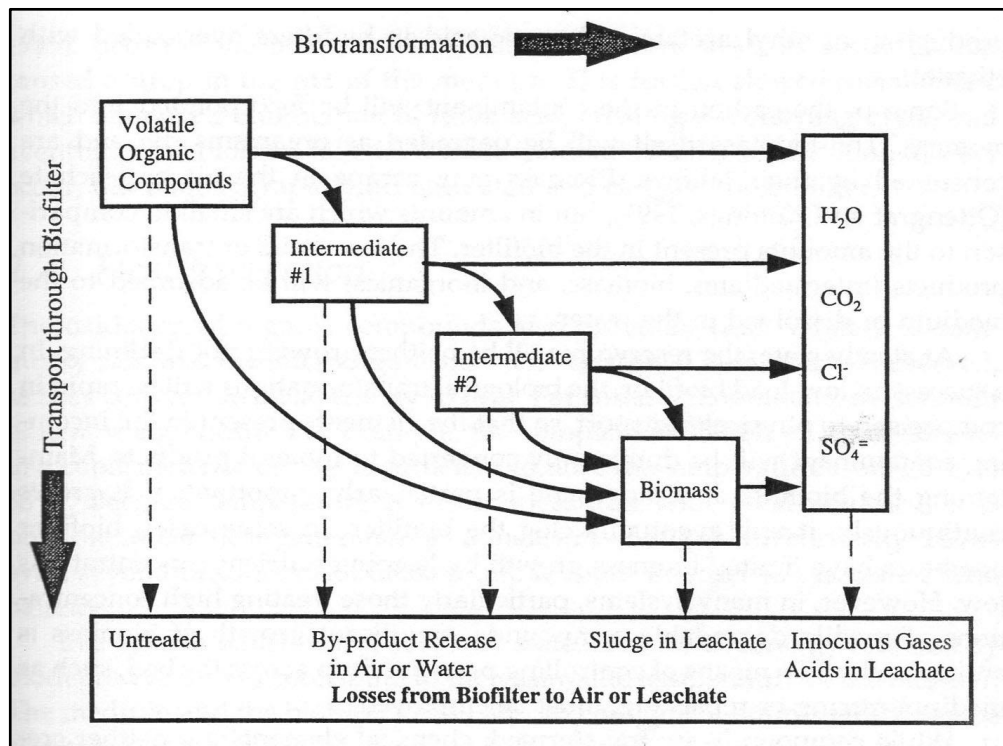
(ที่มา: Devinny et al., 1997)

2.11.3 การย่อยสลายสารมลพิษ (Contaminant biodegradation)

ปัจจัยในการทำลายสารมลพิษนั้นคือไบโอฟิล์ม ซึ่งเกิดจากสิ่งมีชีวิตที่เจริญเติบโตบนผิวของตัวกลาง และจากกิจกรรมภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารมลพิษไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีความเป็นพิษ โดยจุลินทรีย์จะได้รับประโยชน์เป็นพลังงานทางเคมีจากองค์ประกอบของสารมลพิษ เช่น คาร์บอนจะใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์อีกด้วย

2.11.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Product generation)

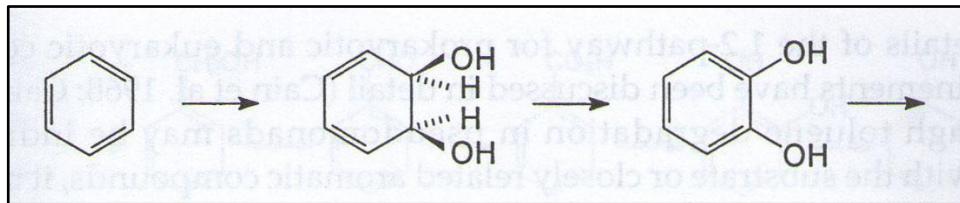
สารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารอนินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบกรองเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ แอมโมเนีย จะถูกเปลี่ยนเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือ ซัลเฟตและไนเตรด สารประกอบบางชนิดสามารถเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์อันดับ 2 (Intermediate) ได้ โดยความซับซ้อนในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดอาจแตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.11



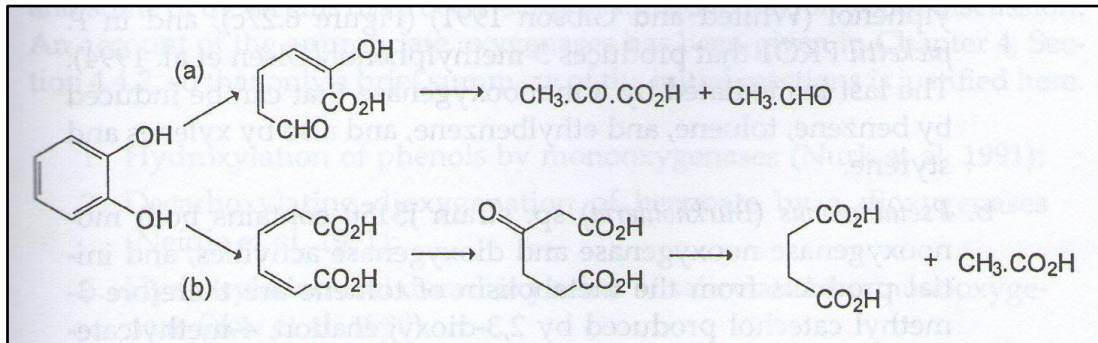
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ระเหยง่าย
(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.5 การย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพ

ในการย่อยสลายเบนซีนซึ่งเป็นสารอะโรมาติก จะย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการ Catabolic pathway เอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาจะทำการออกซิไดซ์เบนซีนให้เป็นสาร intermediate นั้นก็คือ catechol โดยกลุ่มจุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้ได้แก่ *Mycobacterium rhodochrous*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *Pseudomonas putida*



รูปที่ 2.12 การย่อยสลายเบนซีนทางชีวภาพโดย *PseudomonasPutida*
(ที่มา: Alasdair H. Neilson, 1999)



รูปที่ 2.13 กระบวนการ Metabolism catechol โดย catechol2,3-dioxygenase ใน *Pseudomonas Putida* และ โดย catechol1,2-dioxygenase ใน *Moraxella sp.*
(ที่มา: Alasdair H. Neilson, 1999)

เมื่อเบนซีนถูกออกซิไดซ์เป็น Catechol จากนั้นเอนไซม์ dioxygenase จะทำการแตกวงของ Catechol แล้วจะได้ *cis*,-*cis* - Muconate จากนั้นเอนไซม์ muconate – lactonizing ก็จะทำการเปลี่ยน *cis* ,-*cis* – Muconate ให้กลายเป็น Muconolactone ต่อจากนั้นเอนไซม์ muconolactoneisomerase ก็จะเปลี่ยน Muconolactone ให้กลายเป็น 3-oxoadipate enol – lactone ขั้นตอนที่ต่อไปเอนไซม์ oxoadipate enol – lactone hydrolase ก็จะเปลี่ยน 3-oxoadipate enol – lactone ให้กลายเป็น 3-oxoadipate สุดท้ายจะมีเอนไซม์ oxoadipate succinyl – CoA transferase ทำการเปลี่ยน 3-oxoadipate ให้ได้ Succinate และ Acetyl – CoA ออกมาเป็น product

2.11.6 วัสดุกรอง

การกรองชีวภาพจะทำงานโดยใช้ตัวกลางที่มีรูพรุนเพื่อสนับสนุนการทำงานของจุลินทรีย์และให้มลพิษในอากาศไหลผ่าน โดยตัวกลางที่ใช้มีทั้งที่ทำจากสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และวัสดุสังเคราะห์ โดยแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันที่ขนาด ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของไบโอฟิล์ม บางชนิดมีลักษณะเรียบ บางชนิดก็มีความขรุขระ ซึ่งความพรุนภายในตัวกลางจะเป็นตัวสร้างพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสารมลพิษและในตัวกลางบางชนิดยังมีธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์อีกด้วย ลักษณะของตัวกลางและการบรรจุจะเป็นพื้นฐานสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์และการเกิดแรงดันที่ต่ำลงในกระบวนการกรองชีวภาพ

2.11.7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

- ความชื้น (Water content)

การทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพ ต้องมีการรักษาความชื้นในตัวกลางให้ได้เท่ากับ 40-80% โดยน้ำหนัก เพื่อรักษาสภาพให้จุลินทรีย์อาศัยและเจริญเติบโตได้

- ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดีที่สุด ค่าความเป็นกรด-ด่างควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-8

- อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการกรองชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20-30°C

- ภาระสารอินทรีย์ (Loading)

อัตราภาระสารอินทรีย์ หมายถึง ปริมาตรของก๊าซเสียต่อปริมาตรวัสดุตัวกรองต่อเวลา ดังสมการ

$$\text{Volumetric Loading} = Q \times V_f$$

โดย V_f = ปริมาตรของตัวกรองในระบบ (filter bed)

Q = อัตราการไหลของก๊าซ (Air flow rate)

$$\text{Mass loading} = (Q \times C_i) / V_f$$

C_i = ความเข้มข้นของสารมลพิษในก๊าซเสียที่เข้าสู่ระบบ (g/m^3)

2.12 การตรวจวัดเบนซีนในอากาศ

2.12.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

การตรวจวัดเบนซีนในอากาศจะใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ตู้อบ (Oven) สำหรับให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ, ตัวฉีดสาร (injector), คอลัมน์ (Column), เครื่องตรวจวัด (Detector) และเครื่องจดบันทึก (recorder) โดยเครื่องตรวจวัดจะตรวจวัดปริมาณสารที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าสู่เครื่องจดบันทึก (คณิต กฤษณังกูร, 2548)



รูปที่ 2.14 แก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น GC-14BFIDยี่ห้อ Shimadzu

2.12.2 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

FTIR เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของสารอินทรีย์ อนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุล และยังสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด หลักการทำงานจะใช้รังสีอินฟราเรดในช่วง Middle Infrared ซึ่งสามารถให้ข้อมูลของโครงสร้างโมเลกุล เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับรังสีอินฟราเรดจะทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลและการหมุนของพันธะ โมเลกุลจะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มเดียวกันกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ในการสั่นที่ต่างกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารนั้นๆได้ (นภาพร พานิช และคณะ, 2553)



รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส FTIR

(ที่มา: Gasmeter, 2014)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชลันดา คุ่มวงษ์ (2552) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเบนซีนโดยกระบวนการกรองชีวภาพชนิด 3-Stage Trickle-Bed Air Biofilter (TBAB) โดยใช้ดินมวลเบา LECA (Light Weight Expanded Clay Aggregate) ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600-1200 °C ซึ่งพื้นที่ผิว (Surface Area) 164.90 m²/g ปริมาตรของรูพรุน(Pore volume)0.2087 cc./g Poresize 50.63 Å โดยพบว่าเมื่อดินมวลเบาสามารถในการดูดซับสารเบนซีนระหว่าง 0.00378 – 0.00467 g_{benzene}/g_{LECA} โดยประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพได้จากการใช้จุลินทรีย์จากบริษัทไบโอวิสท์และจากระบบ Activated Sludge (AS) มีค่าเท่ากับ 81% (37.8 g/m³-h)และ89% (34.1 g/m³-h) ตามลำดับ และระยะเวลาการกักเก็บ (EBRT: Empty Bed Residence Time) เท่ากับ 34.37 วินาที

Wang et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพ โดยผลการศึกษาพบว่า การกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า การกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียว โดยในช่วงความเข้มข้นขาเข้าเท่ากับ 250-1500 mg/m³ เวลาพัก 41-122 วินาทีในกระบวนการกรองชีวภาพและ 24-81 วินาทีในกระบวนการฉายแสงยูวี โดยหลังจากการทำกำบังเบื้องต้นด้วยแสงยูวีทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการกรองชีวภาพสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเท่ากับ 50 g/m³-h

Moussavi and Mohseni (2007) ได้ศึกษาการทำกำบังเบื้องต้นด้วยแสงยูวี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกรองชีวภาพในการกำจัดสารผสมของสารอินทรีย์ระเหยง่ายอะโรมาติก (aromatic VOCs) ในที่นี้คือ โทลูอีนและโอไซลีน (o-xylene) โดยใช้แสงยูวีปริมาณ 6 และ 12 mJ/cm² อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 6.3 และ 9.4 L/min เวลาพักเท่ากับ 45 และ 30 วินาที โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 70 และ 650 mg_{carbon}/m³ โดยประสิทธิภาพที่ได้มากกว่า 95% นอกจากนี้ โอโซนที่ได้จากฉายแสงยูวียังช่วยในการควบคุมการเจริญเติบโตในไบโอฟิล์ม และกระบวนการกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียวมี Pressure drop เท่ากับ 14 mm H₂O/m of bed ในขณะที่กระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพนั้นมี pressure drop น้อยกว่า 3 mm H₂O/m of bed

จากงานวิจัยอื่นๆของกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพพบว่ามีการใช้ตัวกลางหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นการตัวกลางที่มาจากธรรมชาติ เช่น ดิน ปุ๋ย ชานอ้อย และบางงานวิจัยใช้ตัวกลางที่ได้จากการสังเคราะห์เช่น Polyurethane โดยแต่ละงานวิจัยจะได้ค่า Elimination capacity ที่แตกต่างกัน ซึ่งความสามารถในการรับภาระค่าสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ได้แก่ ขนาดของปฏิกรณ์ ระยะเวลาพัก ชนิดของตัวกลางที่ใช้ เป็นต้นดังตารางที่ 2.8

ส่วนกระบวนการบำบัดไอระเหยเบนซินด้วยแสงนั้น ยังไม่พบงานวิจัยที่มีการใช้แสงแควคัม อัลตราไวโอเลต มีแต่การใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าระบบ VUV อาทิเช่น UV และ ฟลูออเรสเซนต์ ทั้งนี้การใช้ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่สูงกว่าก็ยังคงสามารถบำบัดไอระเหยเบนซินได้ และยังทราบถึง intermediate ที่เกี่ยวข้อง โดยประสิทธิภาพการบำบัดแต่ละงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบการบำบัดเบนซินของงานวิจัยอื่นๆ

Medium	Elimination capacity (g/m ³ -h)	ระบบ	reference
Sucarcane	3.8	Biofilter	L.sene et al.(2002)
Activated carbon	20.1	Biofilter	Jong-O Kim (2003)
Powdered compost	24.8	Biofilter	Zilli et al.(2005)
polyurethane	30-40	Biofilter	Eun-lee et al.(2009)
LECA (soil)	34.1	Biofilter	ชลันดา คุ่มวงษ์(2011)

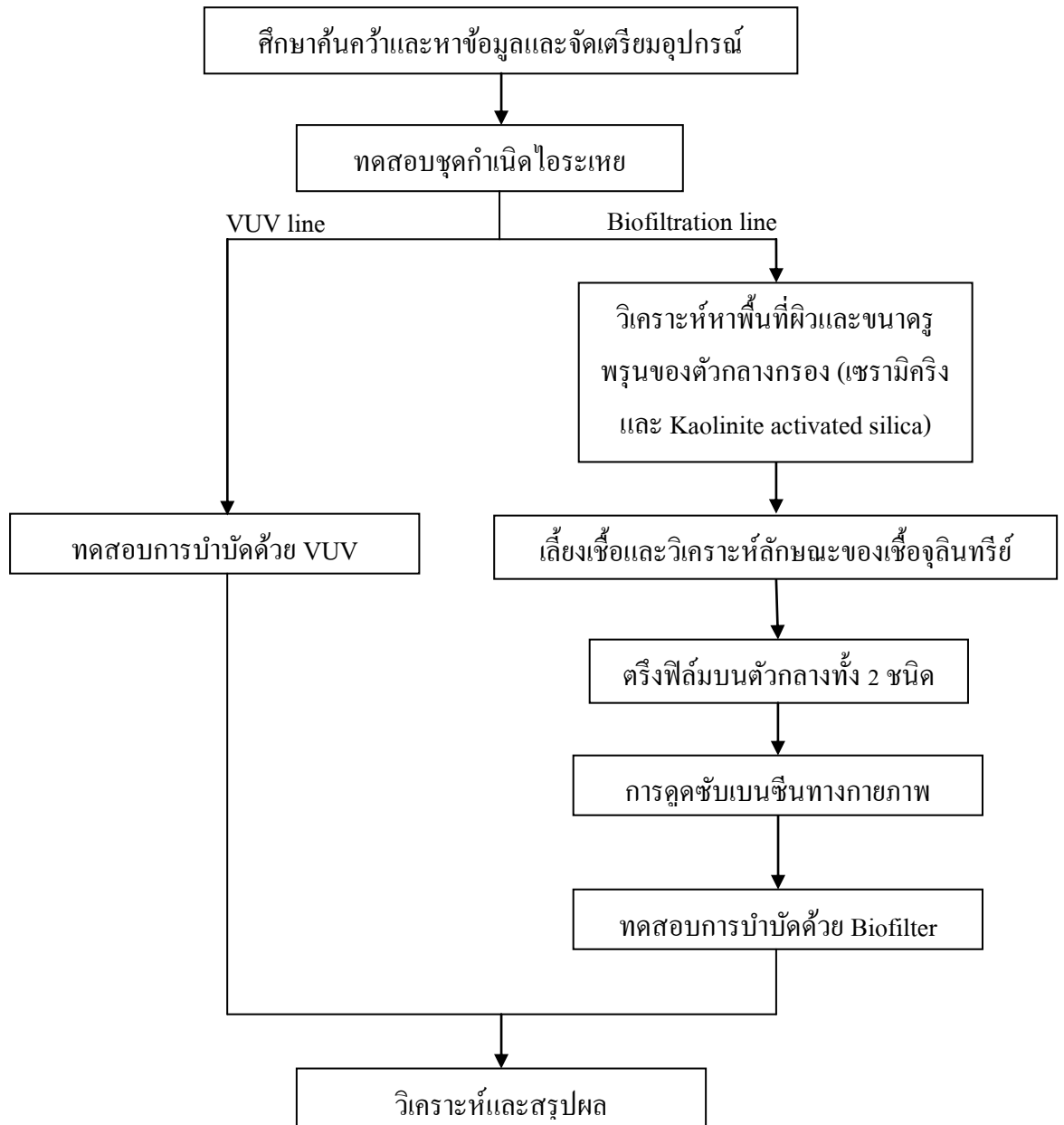
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบการการบำบัดเบนซินด้วยแสงในงานวิจัยอื่นๆ

Concentration (ppm)	RT (min)	Conversion (%)	ชนิดของ ระบบ	reference
15.7	0.08	30 - 80	UV	Hennezel et al. (1998)
50 - 160	2.94	>95%	UV	Wen Wang et al. (2003)
60	6.34	95%	Fluorescent	Lichtin and Sadeghi (1998)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงาน

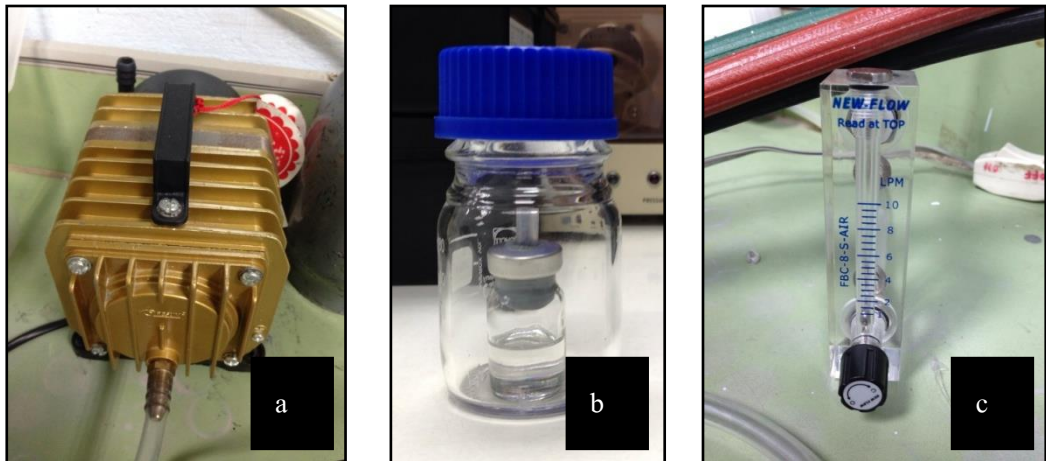
การดำเนินงานภายใต้การศึกษานี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



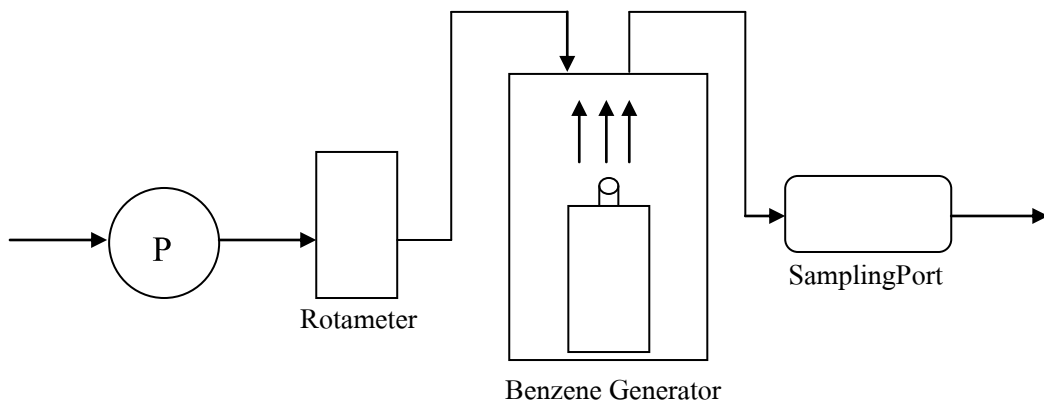
รูปที่ 3.1 แนวทางการดำเนินงาน

3.2 ชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน

ชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน จะใช้ปั๊มเป่าอากาศยี่ห้อ Yamano AP-30 35วัตต์ ความดัน 0.03 เมกกะปาสกาล อัตราการไหล 60 ลิตรต่อนาที เริ่มต้นเมื่อทำการเปิดปั๊ม อากาศส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ทาง ส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกและอีกส่วนหนึ่งจะถูกควบคุมโดยโรตاميเตอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการในช่วง 0–10 ลิตรต่อนาที เมื่อได้อัตราการที่ต้องการแล้วอากาศจะไหลเข้าสู่ขวดDuran ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ภายในบรรจุสารเบนซีนบริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้น 99.8%, CARLO ERBA อยู่ในขวดแช่มนขนาด 10 มิลลิลิตรจากนั้นทำการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเมื่อได้ความเข้มข้นที่ใกล้เคียงที่ต้องการแล้วจะมีการผสมกับอากาศบริสุทธิ์อีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ค่าความเข้มข้นที่ตรงตามที่ต้องการมากขึ้น



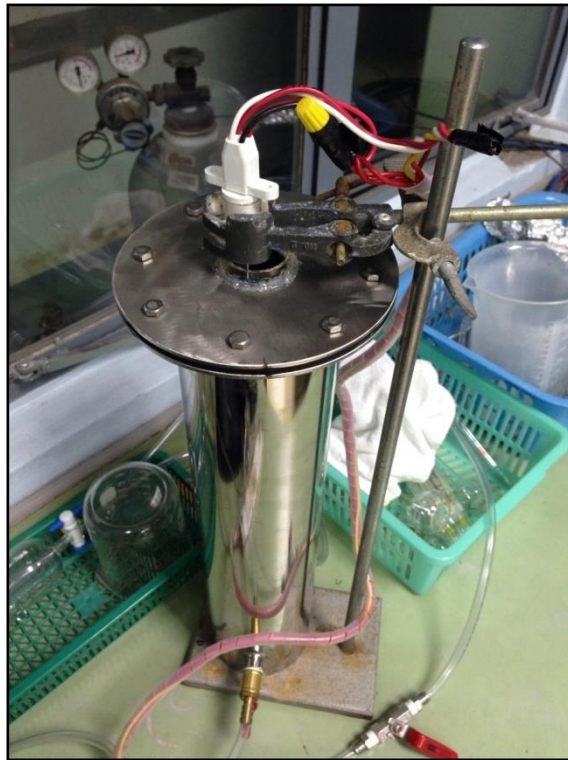
รูปที่ 3.2 (a) ปั๊มเป่าอากาศ, (b) ขวด Duran ขนาด 250 ml, (c) โรตاميเตอร์



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทดลองชุดไอระเหยเบนซีน

3.3 ระบบการบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยแสงแวกคัมอัลตราไวโอเลต

ชุดกำเนิดแสงแวกคัมอัลตราไวโอเลต ปฏิกรณ์ที่ใช้ทำมาจากสแตนเลสสตีล ลักษณะทรงกระบอก มีความสูง 45 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 10 เซนติเมตร มี Effective volume 3.03 ลิตร ตรงกลางของปฏิกรณ์จะมีช่องไว้สำหรับสอดหลอดแวกคัมอัลตราไวโอเลตและมีวาล์วเปิดปิดเพื่อให้อากาศไหลผ่านทั้งด้านบนและด้านล่างปฏิกรณ์ จะใช้ขาตั้งเหล็ก (Stand) ในการยึดจับหลอดแวกคัมอัลตราไวโอเลตหลอดแวกคัมอัลตราไวโอเลตที่นำมาใช้มีกำลังวัตต์เท่ากับ 30 วัตต์ รุ่น GPH383T5/VH/HO ที่สามารถให้ความยาวคลื่นที่ 185 และ 254 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 ชุดปฏิกรณ์บำบัดเบนซีนด้วยแสงแวกคัมอัลตราไวโอเลต

3.4 วิธีการทดสอบการบำบัดด้วยแสงเวกค์อัลตราไวโอเล็ต

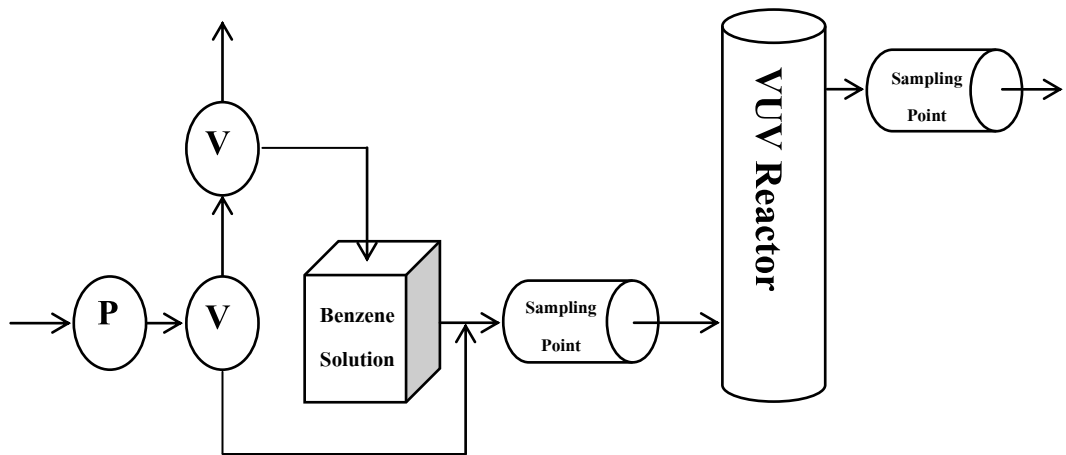
การทดลองจะควบคุมไอรเหยของเบนซีนให้ได้ตามที่ต้องการก่อน ดังหัวข้อที่ 3.1 เมื่อได้ความเข้มข้นของไอรเหยเบนซีนตามที่ต้องการแล้วจะนำไอรเหยเบนซีนที่สร้างได้ไหลผ่านปฏิกรณ์เสตนเลสตีลที่ยังไม่ได้ทำการเปิดระบบ ในขั้นแรกจะทำการตรวจสอบความเข้มข้นของไอรเหยในขาออกของปฏิกรณ์อีกครั้งจนกว่าจะได้ค่าความเข้มข้นที่คงที่ โดยการดึงตัวอย่างไอรเหยเบนซีนจะใช้ Syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างผ่านกระบอกแก้วที่มีจุกยาง (Septum) เพื่อดึงไอรเหยออกมาจากระบบและนำไปฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้น เมื่อความเข้มข้นขาออกปฏิกรณ์คงที่แล้วจึงทำการเปิดหลอดเวกค์อัลตราไวโอเล็ต จากนั้นทำการตรวจสอบความเข้มข้นของไอรเหยเบนซีนที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.4.1 ศึกษาอิทธิพลของการบำบัดเบนซีนโดยดูจากระยะเวลากักพัก

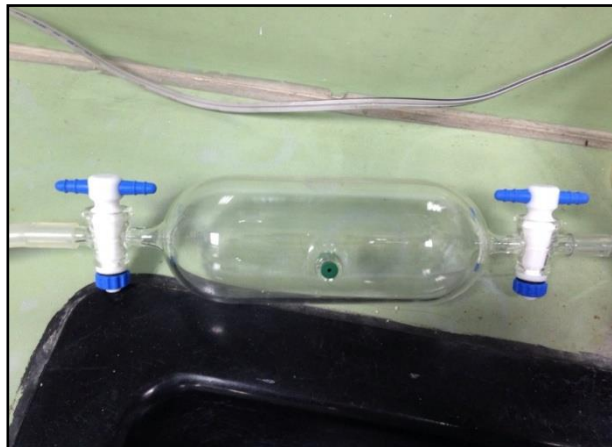
ทำการทดลองโดยควบคุมความเข้มข้นของไอรเหยเบนซีนให้คงที่อยู่ที่ 20 ppm และจะทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักของไอรเหยเบนซีนในปฏิกรณ์ โดยกำหนดระยะเวลาพักอยู่ที่ 0.76-3.03 นาที (เปลี่ยนแปลงโดยปรับอัตราการไหลของไอรเหยเบนซีนก่อนเข้าปฏิกรณ์ในช่วง 1-4 ลิตรต่อนาที)

3.4.2 ศึกษาอิทธิพลของการบำบัดเบนซีนโดยดูจากความเข้มข้นของไอรเหย

ทำการทดลองโดยควบคุมระยะเวลาพักของไอรเหยเบนซีนให้คงที่ที่ 3.03 นาที (อัตราการไหลของไอรเหยเบนซีนเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที) และจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอรเหยเบนซีนอยู่ที่ 20, 60, 110 และ 150 ppm



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดลองชุดบำบัดเบนซีนด้วยแสง



รูปที่ 3.6 ครอบอกแก้วเก็บตัวอย่าง (บน) และไซริงค์ขนาด 1 มิลลิลิตร (ล่าง)

3.5 การบำบัดไอรยะเหยเบนซึนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ (Biofiltration)

3.5.1 ลักษณะของตัวกลาง (Media Characteristic)

ตัวกลางที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ เซรามิกริง และKaolinite Activated Silica เป็นตัวกลางที่จัดอยู่ในประเภทตัวกลางที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ (Synthetic Material) ที่มีลักษณะความพรุนและพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน โดยตัวกลางทั้ง 2 ชนิดจะมีการวัดขนาด (Diameter) และน้ำหนักของตัวกลาง (weight) และจะมีการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางกายภาพได้แก่ ค่าพื้นที่ผิว (Surface Area) ขนาดของรูพรุน (Porosity) ด้วยเครื่อง Quantacrhome รุ่น autosorb – 1



รูปที่ 3.7 เซรามิกริง (Ceramic ring) (ซ้าย) และ Kaolinite Activated Silica (KAS) (ขวา)

3.5.2 เชื้อจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นตะกอนจุลินทรีย์จากระบบ Activated Sludge ของโรงบำบัดน้ำท่วมครุ ซึ่งจุลินทรีย์ที่นำมาใช้จำเป็นต้องนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อดูความเหมาะสมในการย่อยสลายเบนซีน โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์มีดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
pH	pH Meter
COD	Closed Reflux, Titrimetric Method
TKN	Micro-kjeldahl Method
Volatile Suspended Solid	Liquid volatile suspended solid
Benzene vapor	Gas Chromatography

3.5.3 อาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คืออาหารหลักและอาหารเสริม จะใช้เพื่อให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ และสารอาหารยังถูกใช้ในการสเปรย์เข้าไปในหอกรองด้วยในระหว่างช่วงของการทดลอง

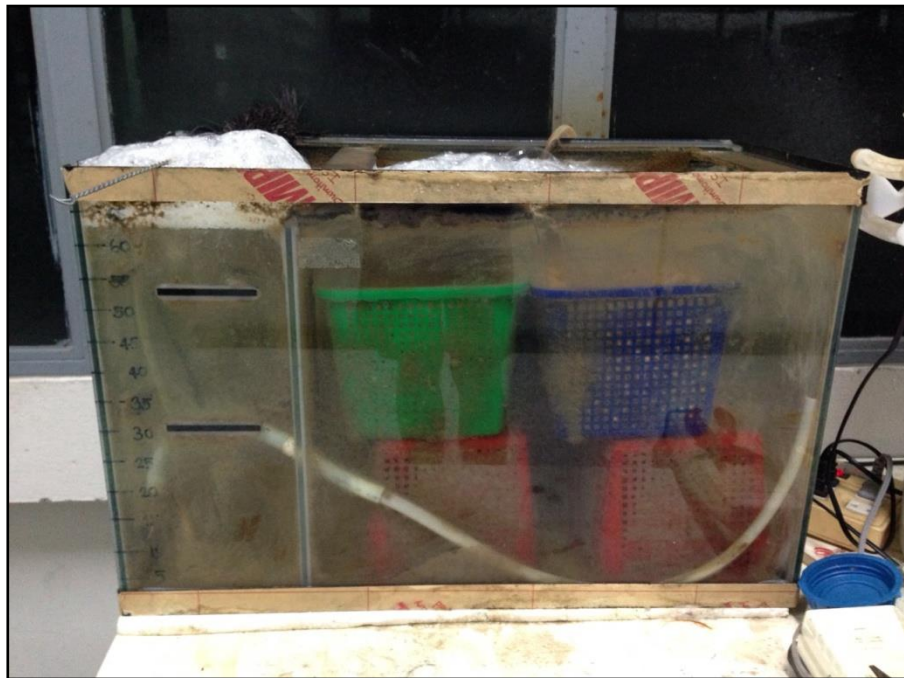
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารอาหาร

(ที่มา: Sene et al., 2002)

องค์ประกอบสารอาหารหลัก	องค์ประกอบสารอาหารเสริม
Carbon Source: $C_{12}H_{22}O_{11}$	Na_2HPO_4 5.0 g
Nitrogen Source: NH_4Cl	KH_2PO_4 4.0 g
	K_2HPO_4 4.0 g
	$(NH_4)_2SO_4$ 1.0 g
	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.34 g
	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.08 g
	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.07 g
	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.002 g
	$MnSO_4 \cdot H_2O$ 0.002 g

3.5.4 การเตรียมเชื้อและการตรึงฟิล์มชีวภาพ

การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จะใช้เชื้อจุลินทรีย์จากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ ของโรงบำบัดน้ำท่วมครุ โดยนำมาเลี้ยงโดยใช้น้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$) เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยเลี้ยงในตู้ปลาขนาด 60 ลิตร ทำการควบคุมค่า COD:N เท่ากับ 20 : 1 และมีการเติมออกซิเจนอยู่ตลอดเวลา จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่า COD ของน้ำขาออก เพื่อติดตามตรวจสอบการย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำการวิเคราะห์ค่า SS และ VSS เพื่อดูปริมาณการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในตู้เลี้ยงเชื้อ เมื่อเลี้ยงจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับการใช้คาร์บอนแล้ว จะทำการตรึงฟิล์มชีวภาพโดยการนำตัวกลางทั้ง 2 ชนิดใส่ลงในตะกร้าพลาสติกขนาด 10 ลิตร ที่มีช่องว่างเพื่อให้จุลินทรีย์สัมผัสกับตัวกลางได้ แหล่งในตู้ที่ทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ โดยจะติดตั้งปั๊มจมน้ำ (Submerge Pump) เพื่อเป็นการวนน้ำในระบบให้จุลินทรีย์ไหลผ่านตัวกลางคล้ายการกรอง จนกระทั่งเกิดฟิล์มชีวภาพเป็นเมือกรอบๆตัวกลาง จากนั้นจึงจะสามารถนำตัวกลางบรรจุเข้าสู่หอกรองเพื่อทำการบำบัดไอระเหยเบนซินต่อไป



รูปที่ 3.8 ตู้เลี้ยงจุลินทรีย์ขนาด 60 ลิตร

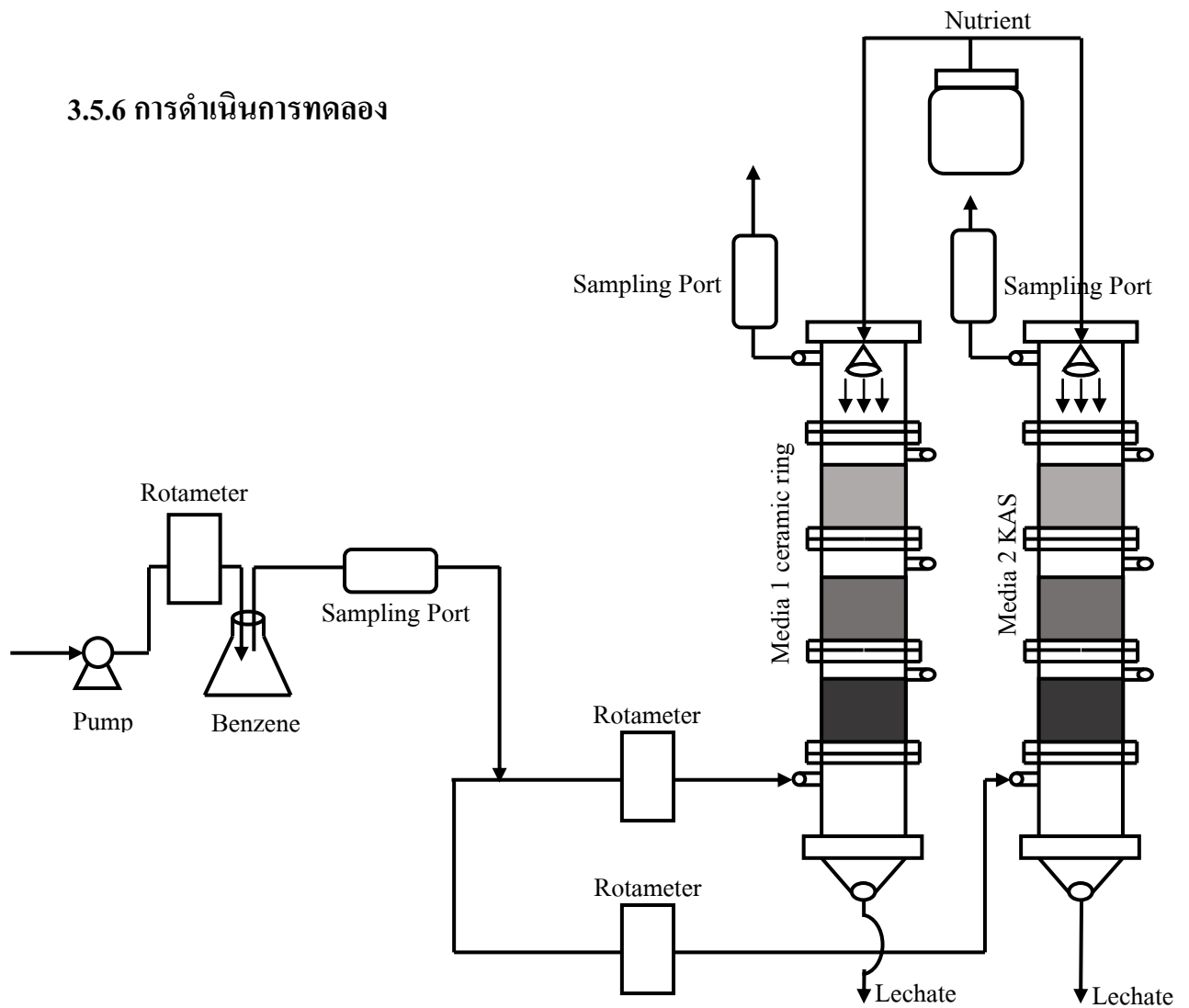
3.5.5 ชุดระบบกรองชีวภาพ

ชุดกรองชีวภาพเป็นระบบกรองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) หอกรองเป็นท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 เซนติเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร โดยหอกรองจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นสูง 22 เซนติเมตร มีแผ่นตาข่ายสแตนเลสเพื่อเป็นตัวแบ่งวัสดุกรองให้อยู่ในแต่ละชั้น ระหว่างชั้นจะมีการปะเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศ และใช้น้ำ 8 ตัวขันปิดรอบงาน ด้านบนจะมีท่อไว้สำหรับการสเปรย์น้ำและสารอาหารและด้านล่างสุดของหอกรองมีท่อไว้สำหรับระบายน้ำชะและมีท่อเก็บตัวอย่างในแต่ละชั้นของหอกรอง



รูปที่ 3.9 หอกรองชีวภาพ

3.5.6 การดำเนินการทดลอง



รูปที่ 3.10 แผนผังการดำเนินการทดลอง

เมื่อเตรียมชุดกำเนิดไอระเหยได้ตามหัวข้อที่ 3.1 แล้วไอระเหยถูกแบ่งออกเป็น 2 ทางในอัตราการไหลและความเข้มข้นที่เท่ากันผ่านหอกรองชีวภาพทั้ง 2 ที่ทำการบรรจุตัวกลางต่างชนิดกัน โดยตัวกลางที่บรรจุในแต่ละชั้นปริมาตรที่เท่ากันชั้นละ 0.6 ลิตร คิดเป็น 42.9% ของปริมาตรในแต่ละชั้น จะควบคุมอัตราการไหลของระเหยเบนซีนเข้าสู่ระบบเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาทีเพื่อให้ได้ค่า EBRT (Empty Bed Residence time) เท่ากับ 1.8 นาที การเดินระบบจะเป็นแบบ Upflow โดยมีการเติมสารอาหารเสริมและความชื้นจากทางด้านบนปฏิกิริยวันละ 50 มิลลิลิตร โดยทำการวัดความเข้มข้นของสารเบนซีนทั้งขาเข้าและออกวันละหนึ่งครั้ง วิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำชะระบบ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยการดึงตัวอย่างออกมาวิเคราะห์จะใช้ Syringe เก็บตัวอย่างออกจากกระบอกแก้ว ทั้งขาเข้าและออก

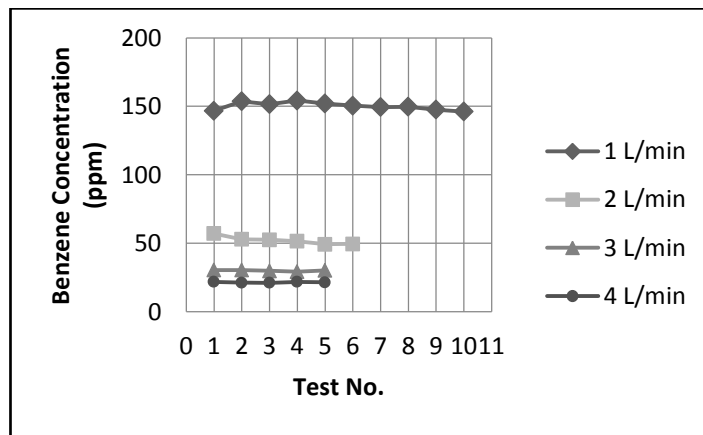
3.6 การวิเคราะห์ไอระเหยเบนซีน

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือรุ่น GC-14BFIDยี่ห้อ Shimadzu ชนิดของคอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบCapillary รุ่น RestekRtx 502.2 กำหนดให้อุณหภูมิ Inject 100, Column 100 และ Detector 150 องศาเซลเซียส โดยการเก็บตัวอย่างจะใช้ Syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร ดึงตัวอย่างออกจากกระบอกแก้วที่มีจุกยาง (Septum) ทำหน้าที่เป็น Sampling port จากนั้นจึงจะนำตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยสำหรับสารเบนซีนแล้ว จะสามารถทราบค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peakarea) ได้ภายในระยะเวลาประมาณ 4 นาที จากนั้นจึงนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ไปแปลงค่าออกมาจากกราฟสแตนด์ดาร์ดของสารเบนซีนอีกทีหนึ่ง (Standard curve) เพื่อเปลี่ยนค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ให้อยู่ในหน่วย ppmอีกครั้งหนึ่ง

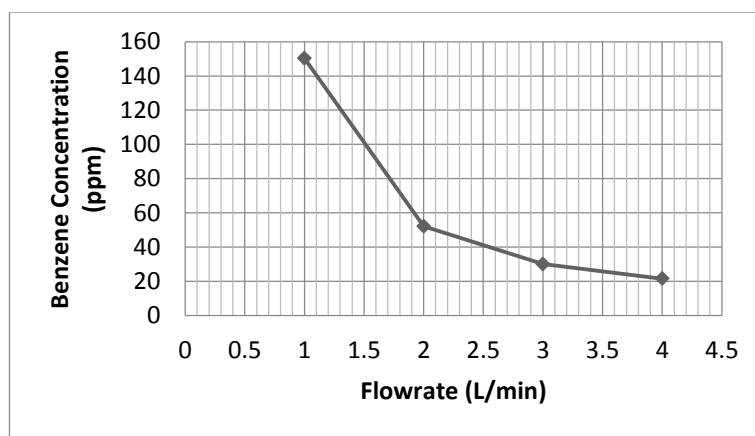
บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน

การทดสอบชุดกำเนิดไอระเหยเบนซีน โดยใช้ขวด Duran ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยภายในขวดจะมีขวดซีรัมขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีการบรรจุสารเบนซีนบริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้น 99.8%, CARLO ERBA อยู่ปริมาณ 9 มิลลิลิตร โดยซีรัมจุกขวดมีการเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร เพื่อให้เป็นช่องทางการระเหยของสารเบนซีน จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านชุดกำเนิดไอระเหยที่สร้างขึ้น จะให้ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนที่แตกต่างกัน เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ผ่านชุดไอระเหยสูงขึ้น จะได้ความเข้มข้นที่ต่ำลง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 (หมายเหตุ Test No. หมายถึง จำนวนครั้งในการวัดความคงที่ของชุดไอระเหยที่ปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง โดย 1 ครั้งห่างกันประมาณ 4-5 นาที)



รูปที่ 4.1 การทดสอบอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านชุดไอระเหยกับความเข้มข้นที่ผลิตได้



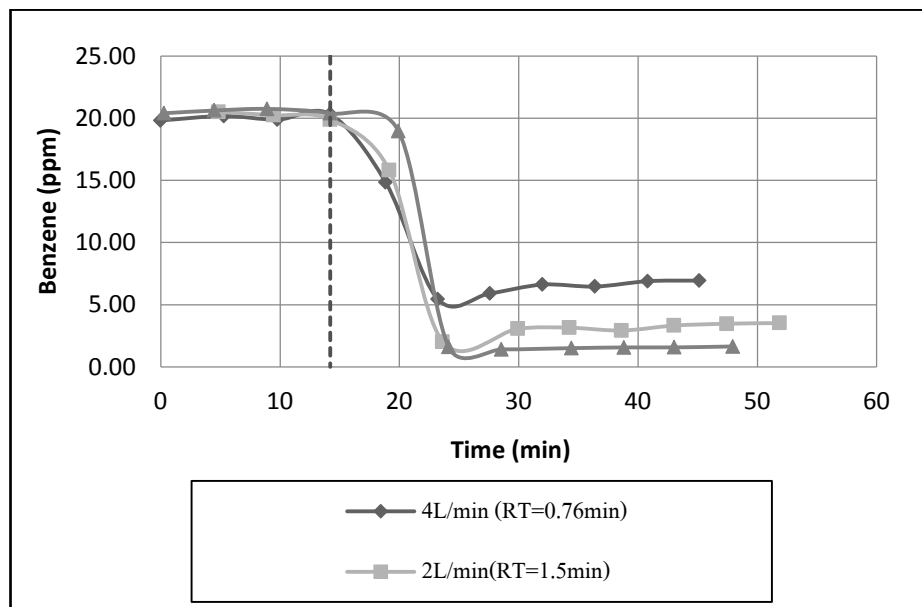
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านชุดไอระเหยกับความเข้มข้นที่ผลิตได้

4.2 การบำบัดเบนซีนด้วยแสงเวกค์มัลตราไวโอเลต

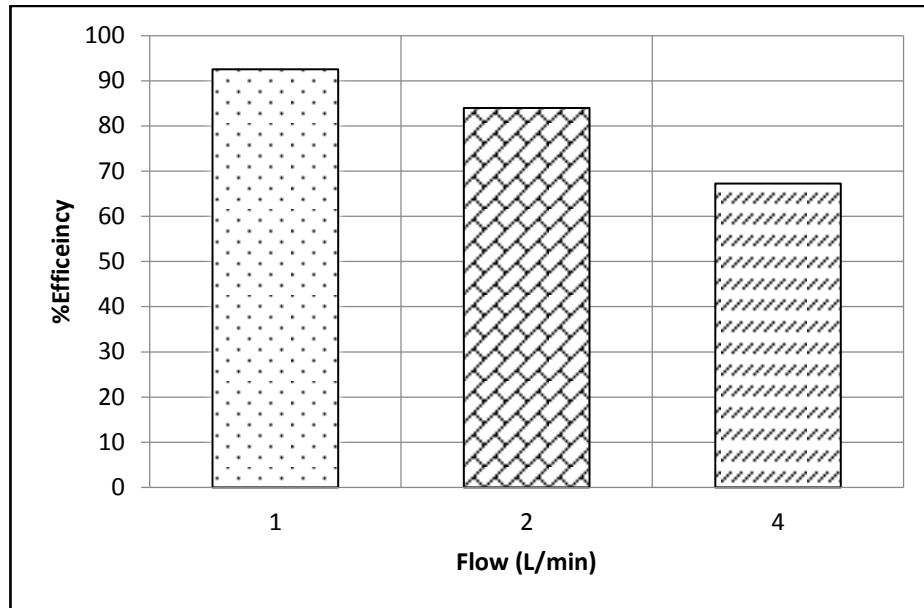
การทดลองการย่อยสลายของไอระเหยเบนซีน จะใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 20 – 150 ppm และค่าอัตราการไหลของไอระเหยอยู่ที่ 1-4 ลิตรต่อนาที ซึ่งจะทำการทดลอง 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะควบคุมความเข้มข้นให้คงที่และทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพัก (เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล) ส่วนที่สองจะควบคุมค่าอัตราการไหลของไอระเหยให้คงที่และทำการเพิ่มความเข้มข้นของไอระเหย

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพัก

การทดลองนี้เป็นการควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนให้มีค่าคงที่ที่ 20 ppm โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพัก ใช้อัตราการไหลของไอระเหยเท่ากับ 1, 2 และ 4 ลิตรต่อนาที (ระยะเวลาพัก 3.03, 1.5 และ 0.76 นาที ตามลำดับ) การทดลองเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อค่าความเข้มข้นจากชุดกำเนิดไอระเหยที่ได้กำหนดไว้ที่ 20 ppm เริ่มนิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจะเริ่มทำการเปิดระบบการบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยแสงเวกค์มัลตราไวโอเลต โดยสังเกตได้ว่าความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนมีค่าลดลงภายในระยะเวลาประมาณ 10 นาทีและจากนั้นจะเริ่มมีค่าความเข้มข้นที่คงที่ ไม่ลดลงไปอีก และพบว่าเมื่อระยะเวลาพักไอระเหยเบนซีนในปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยเบนซีนจะสูงขึ้นดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการย่อยสลายเบนซีน เมื่อความเข้มข้นคงที่ 20 ppm ในอัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนต่างๆ (ระยะเวลาพัก 3.03 – 0.76 นาที)



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายเบนซีน เมื่อความเข้มข้นคงที่ 20 ppm อัตราการไหลของไอระเหยเบนซีน 1, 2 และ 4 ลิตรต่อนาที (ระยะเวลาพัก 3.03, 1.52 และ 0.76 นาที)

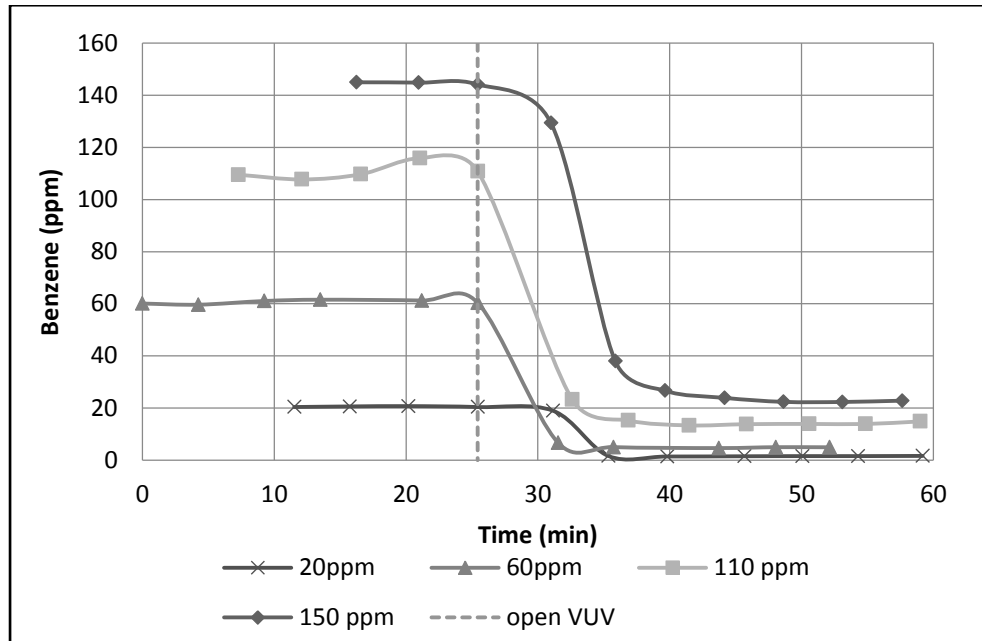
จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าเมื่อระยะเวลาพักไอระเหยเบนซีนมีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยเบนซีนจะมีค่าสูงขึ้น เป็นเพราะค่าการสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีค่าแตกต่างกัน โดยคำนวณค่าการสารอินทรีย์จาก

$$\text{Loading} = (Q \times C) / V$$

ซึ่งที่อัตราการไหล 1, 2 และ 4 ลิตรต่อนาที (RT = 3.03, 1.5 และ 0.76 นาที) คิดเป็นค่า Loading rate ได้เท่ากับ 1.276, 2.552 และ 5.104 $\text{g/m}^3\text{-h}$ จะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาพักมีค่าสูงขึ้นค่าการสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีค่าน้อยลง ระบบจึงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยที่ระยะเวลาพัก 0.76, 1.5 และ 3.03 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 67.26, 83.96 และ 92.52% ตามลำดับดังรูปที่ 4.4

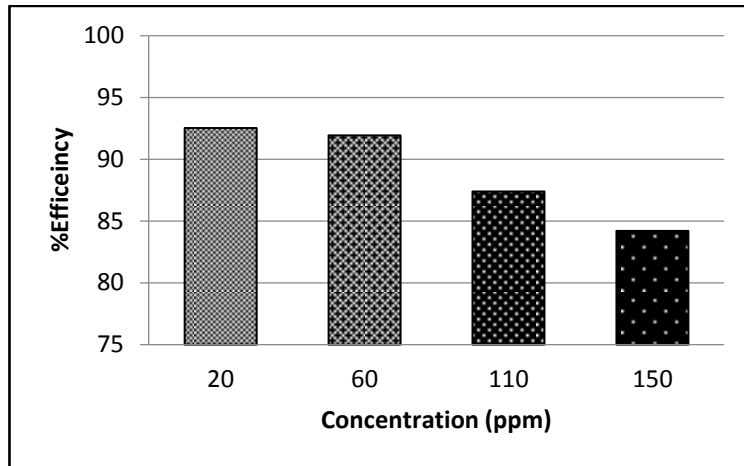
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นโดยระยะเวลาพักกักกัก

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการควบคุมระยะเวลาให้คงที่ที่ 3.03 นาที (อัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที) โดยทำการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนตั้งแต่ 20 – 150 ppm การทดลองจะรอให้ความเข้มข้นที่ชุดไอระเหยสร้างได้ตามที่กำหนดหนึ่งเสี้ยวก่อน จึงเริ่มทำการเปิดระบบแวกคัมอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการย่อยสลายเบนซีนที่ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน 20-150 ppm และอัตราการไหลคงที่ 1 ลิตรต่อนาที (ระยะเวลาพักกัก 3.03 นาที)

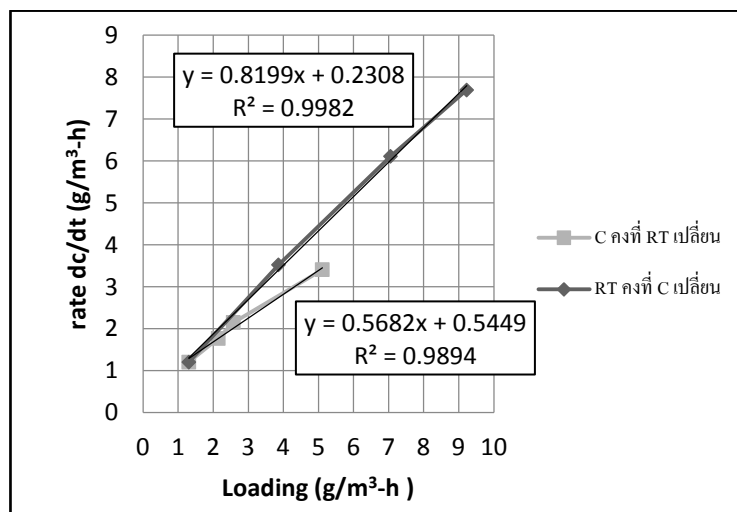
จากการทดลองในส่วนนี้พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงโดยที่ความเข้มข้น 20, 60, 110 และ 150 ppm ได้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 92.52, 91.92, 87.39 และ 84.20% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าการระเหยอินทรีย์ในระบบที่สูงขึ้นทำให้ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพลดลง โดยคิดเป็นค่าการระเหยอินทรีย์ที่เข้าเท่ากับ 1.310, 3.871, 7.064 และ 9.230 g/m^3 -h ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายเบนซีน เมื่ออัตราการไหลของไอระเหยเบนซีนคงที่ 1 ลิตรต่อนาทีในช่วงความเข้มข้นไอระเหยเบนซีน 20-150 ppm

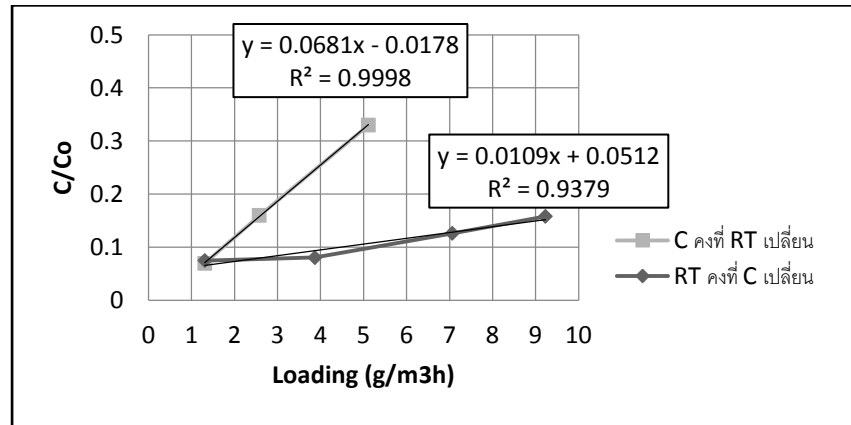
4.2.3 การเปรียบเทียบอิทธิพลของระยะเวลาพักและระดับความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงอัตราการย่อยสลายเบนซีนของการเปลี่ยนแปลงตัวแปร 2 ชนิด (ระยะเวลาพักพักและระดับความเข้มข้น) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าภาระสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะพบว่าที่ค่าภาระสารอินทรีย์ที่เท่ากัน การทดลอง โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นจะประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า โดยสามารถสามารถสังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันมากกว่า หรือสังเกตจากค่าภาระสารอินทรีย์ในช่วง 4 หรือ 5 g/m^3-h จะเห็นได้ชัดว่า เส้นกราฟที่ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นนั้นอยู่สูงกว่าเส้นกราฟที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักพัก และที่ค่าภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ $9.23 g/m^3-h$ (RT=3.03 นาที, 144.7 ppm) มีอัตราการย่อยสลายเบนซีนเท่ากับ $7.69 g/m^3-h$ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 84.20%



รูปที่ 4.7 อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ต

ถึงแม้การบำบัดโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า แต่รูปที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่กักจะส่งผลต่อประสิทธิภาพบำบัดมากกว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันมากกว่า จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความระยะเวลาที่กักมีมากกว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของไอระเหยเบนซิน

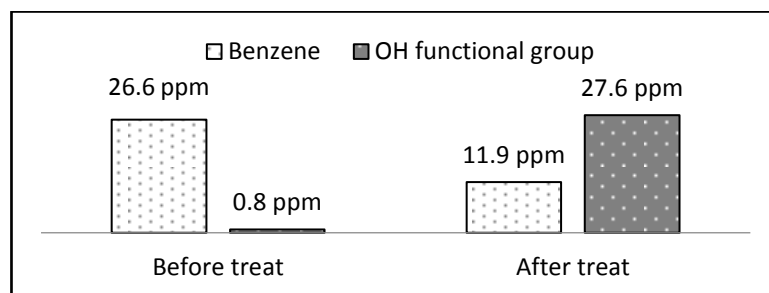


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการย่อยสลายระหว่างระยะเวลาที่กักและระดับความเข้มข้น

4.2.4 การเปลี่ยนรูปของเบนซินหลังผ่านการบำบัด

เมื่อทำการบำบัดไอระเหยเบนซินแล้วได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนรูปของเบนซินโดยใช้เครื่อง FTIR ตรวจสอบสารประกอบอื่นๆ เมื่อทำการบำบัดด้วยแสงเวคัมอัลตราไวโอเล็ตแล้วพบว่ามีการประกอบกลุ่มแอลกอฮอล์ ที่มี Hydroxyl Group ติดอยู่เกิดขึ้นภายหลังการบำบัด โดยมีความเข้มข้น 27.6 ppm ดังรูปที่ 4.9

ตามทฤษฎีแล้วเมื่อเบนซินทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลแล้วจะเปลี่ยนรูปไปเป็น Phenol และ Nitrobenzene เป็นหลัก ตามหัวข้อที่ 2.6 และจะมีสารตัวกลาง (intermediate) ได้แก่ 1,4-benzoquinone and hydroquinone. (Hennezel et al., 1998)



รูปที่ 4.9 สัดส่วนของเบนซินและหมู่ไฮดรอกซิลก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี

4.3 การบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ

4.3.1 การหาขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของ Ceramic ring และ Kaolinite silica

ตัวกลางทั้ง 2 ชนิดที่นำมาใช้ในการตรึงฟิล์มชีวภาพครั้งนี้ มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยจะทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโอโรเซเหเบนซินว่าเมื่อตรึงฟิล์มลักษณะเดียวกันแล้ว ตัวกลางชนิดใดจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโอโรเซเหเบนซินได้ดีกว่ากัน โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

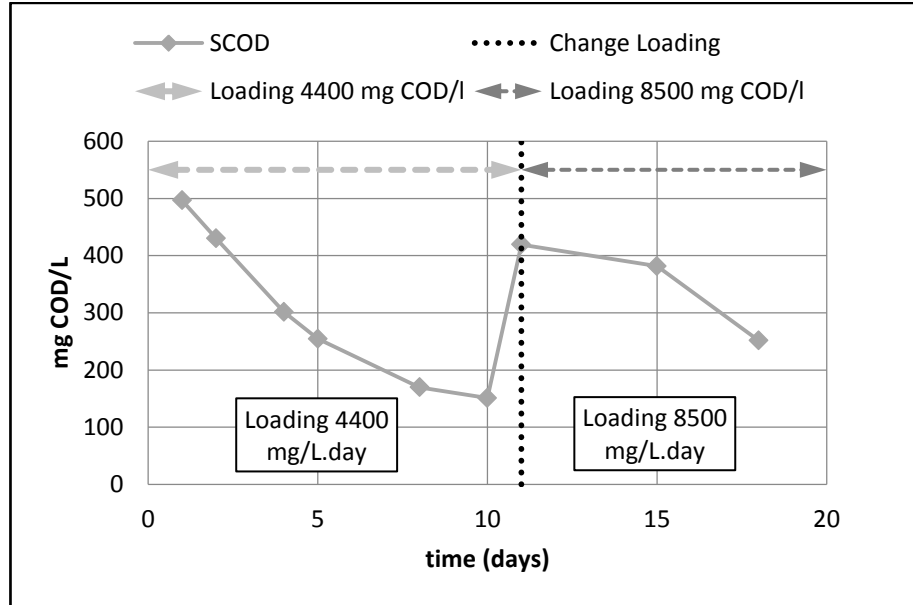
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิว

Type	Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (cc/g)	Pore Diameter (Å)	Micro Pore Volume (cc/g)	Mesopore Volume + Macropore Volume (cc/g)
Ceramic ring	1.23	0.0029	93.00	0.00019	0.0027
Kaolinite silica	14.22	0.1582	444.90	0.00580	0.1524

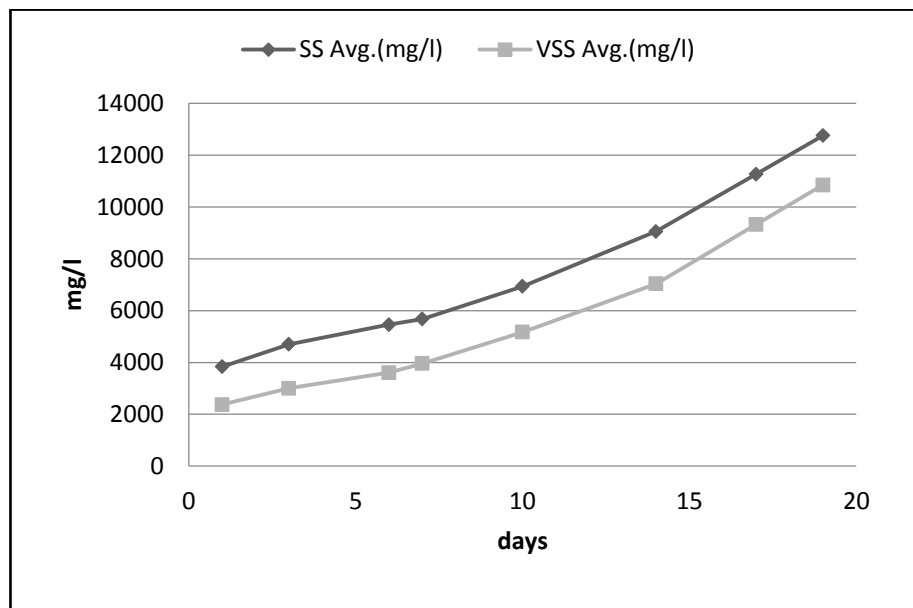
จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวในงานวิจัยอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อยู่ที่ 500-1500 m²/g (บุญรักษา กาญจนวรวณิชย์, 2552) และพื้นที่ผิวของของดินเผามวลเบาอยู่ที่ 164.90 m²/g (ชลันดา กุ่มวงษ์, 2554) จะเห็นว่าตัวกลางทั้ง 2 ตัวที่นำมาใช้มีพื้นที่ผิวที่น้อยมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น

4.3.2 การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

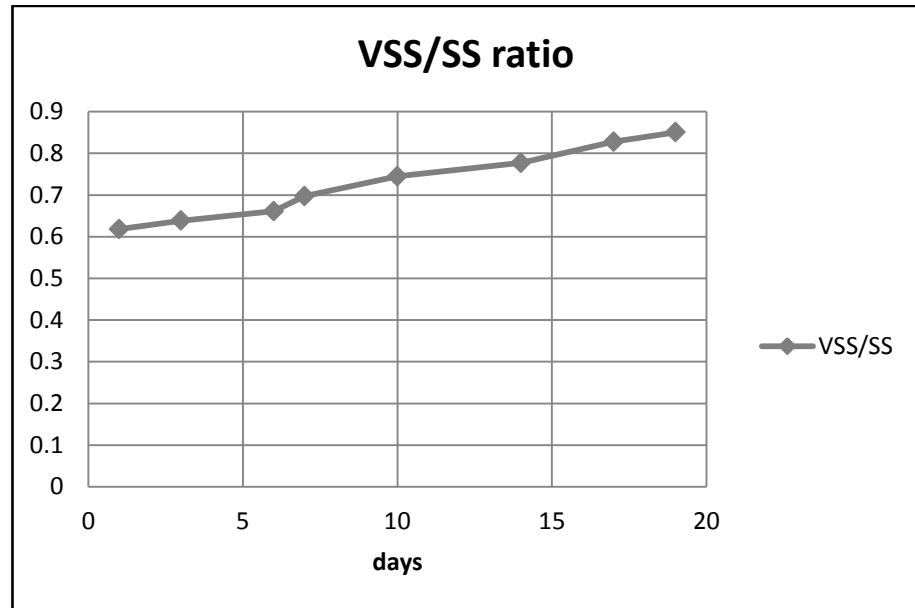
การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จะใช้เชื้อจุลินทรีย์จากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ ของโรงบำบัดน้ำทุ่งครุ โดยนำมาเลี้ยงโดยใช้น้ำตาลซูโครส (C₁₂H₂₂O₁₁) เป็นแหล่งคาร์บอน แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยควบคุมค่า COD:N เท่ากับ 20 : 1 การใช้น้ำตาลซูโครสแทนที่การใช้เบนซินนั้น เนื่องจากเบนซินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้น้อย ระบายได้ง่ายและเป็นสารก่อมะเร็ง จึงต้องทำการปรับสภาพของจุลินทรีย์โดยใช้โอโรเซเหเบนซินในหอกรองชีวภาพแทน หลังจากการเลี้ยงเชื้อและตรึงฟิล์มชีวภาพเรียบร้อยแล้ว โดยผลการย่อยสลายอินทรีย์ละลายน้ำของเชื้อจุลินทรีย์ และปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.10 - 4.12



รูปที่ 4.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำขาออกของถังเลี้ยงเชื้อ



รูปที่ 4.11 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อ



รูปที่4.12 อัตราส่วน VSS/SS

4.3.3 การตรึงฟิล์มชีวภาพ

หลังจากทำการทดสอบการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลา 20 วันในปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตรพบว่า เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีตามสูตรอาหารหลักและอาหารรองดังกล่าว จึงได้ทำการย้ายปฏิกรณ์เป็นขนาด 60 ลิตร เพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอต่อการใส่ตัวกลางเพื่อเริ่มทำการตรึงฟิล์ม ดังรูปที่ 4.4 โดยแบ่งเชื้อจุลินทรีย์จากปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตร จำนวน 10 ลิตร โดยควบคุมค่า COD : N ให้เท่ากับ 20 : 1 เช่นเดิม ภายหลังจากการตรึงฟิล์มเป็นเวลา 3 สัปดาห์ สังเกตได้ว่าบนผิวของตัวกลางทั้ง 2 ชนิดเริ่มมีไบโอฟิล์มเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.13 - 4.14





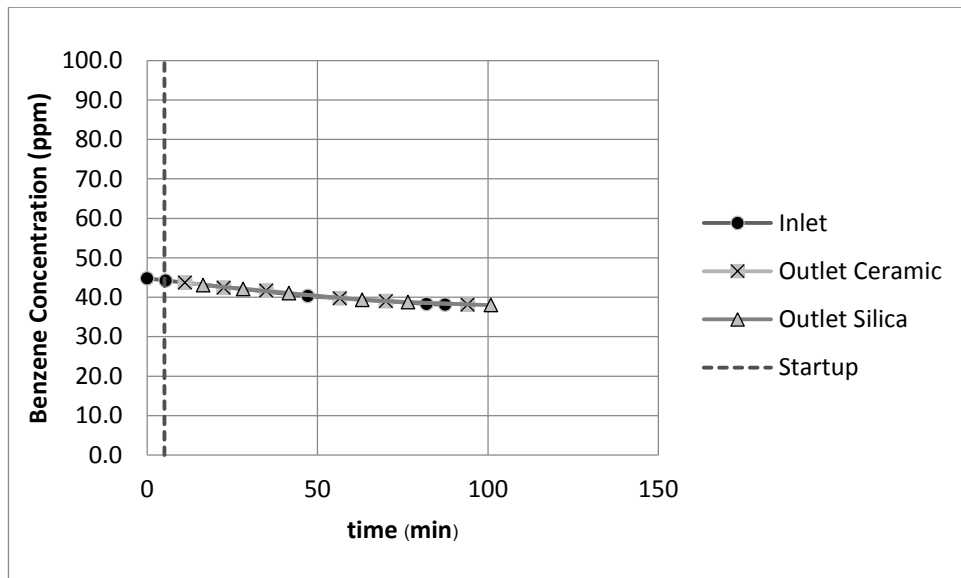
รูปที่ 4.13 (A.) ปฏิกรณ์ที่ใช้ตรึงฟิล์มขนาด 60 ลิตร (B.) ตัวกลางที่ใช้ในการตรึงฟิล์ม (ซ่าย Kaolinite silica, ขาว Ceramic ring)



รูปที่ 4.14 การเกิดฟิล์มชีวภาพบนตัวกลาง (ซ่าย Kaolinite Silica, ขาว Ceramic ring)

4.3.4 การทดสอบการดูดซับทางกายภาพของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด

เนื่องจากการบำบัดทางชีวภาพในกระบวนการกรองชีวภาพนั้น มีการใช้ตัวกลางที่มีรูพรุนเพื่อเป็นที่อยู่อาศัยของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการบำบัดมลพิษในช่วงแรกของการเริ่มระบบนั้น จะเป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพของตัวกลางร่วมกับการบำบัดที่เป็นผลมาจากการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ จนกระทั่งผ่านไประยะเวลาหนึ่งเมื่อตัวกลางอิ่มตัวด้วยสารมลพิษจนไม่สามารถดูดซับทางกายภาพได้อีก ระบบจึงจะเข้าสู่การบำบัดโดยเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว โดยการทดสอบทางกายภาพนั้นจะใช้ตัวกลางเปล่าที่ไม่ได้ทำการตรึงด้วยเชื้อจุลินทรีย์และให้ความชื้นเหมือนกันกับชุดทดลองที่มีการตรึงเชื้อจุลินทรีย์

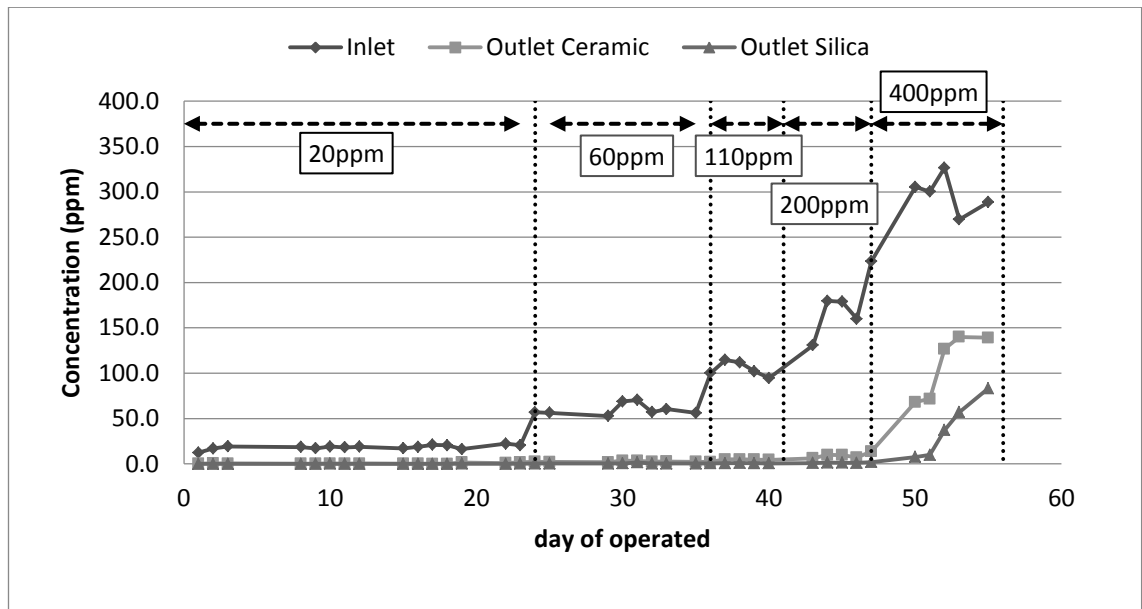


รูปที่ 4.15 การทดสอบการบำบัดทางกายภาพของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด

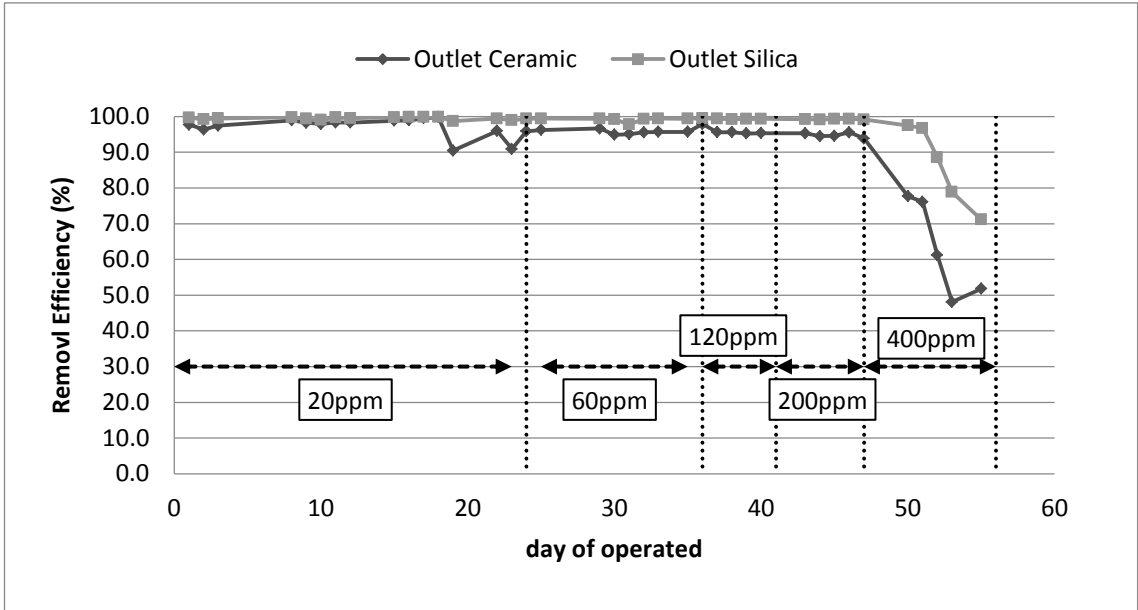
ผลการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มทำการปล่อยไอระเหยเบนซีน (ความเข้มข้น 40 ppm อัตราการไหลของไอระเหย 1.5 ลิตร/นาที) เข้าสู่ชุดทดสอบการดูดซับทางกายภาพ จนกระทั่งเต็มไอระเหยเต็มปฏิกรณ์แล้ว วัดความเข้มข้นขาออกทันทีพบว่า ความเข้มข้นขาออกของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด มีค่าเท่ากับความเข้มข้นขาเข้าภายในเวลาไม่กี่นาที ไม่สามารถดูดซับไอระเหยเบนซีนต่อไปได้อีกดังรูปที่ 4.15 แสดงว่าตัวกลางทั้ง 2 ชนิด เซรามิกริง (Ceramic ring) และ kaolinite activated silica (KAS) อิ่มตัวด้วยไอระเหยเบนซีนในระยะเวลาสั้นๆหรือดูดซับได้น้อยเนื่องจากพื้นที่ผิวที่น้อยมากเพียง 1.23 m³/g (Ceramic ring) และ 14.22 m²/g (KAS) กล่าวได้ว่าการบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ (ชุดที่มีการตรึงฟิล์มจุลินทรีย์) นั้น เป็นการบำบัดด้วยเชื้อจุลินทรีย์ตั้งแต่ช่วงการเริ่มต้นการทดลอง

4.3.5 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ

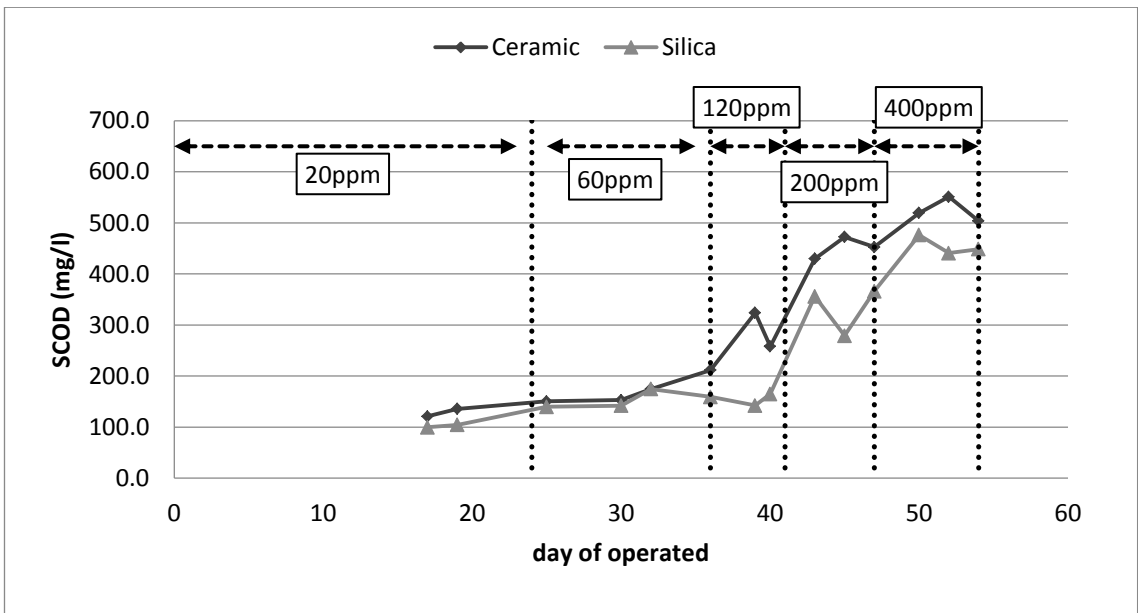
จากรูปที่ 4.16 - 4.19 พบว่าการบำบัดไอระเหยเบนซีนในช่วงความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนในช่วง 20 ไปจนถึง 200 ppm หอกรองชีวภาพจากตัวกลางทั้ง 2 ชนิด สามารถบำบัดไอระเหยเบนซีนได้โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 95% โดยหอกรองที่บรรจุ KAS จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยและจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงความเข้มข้น 400 ppm จากค่าภาระสารอินทรีย์ที่สูงมากเกินทำให้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วโดยกระบวนการกรองชีวภาพที่ใช้ Ceramic ring ลดลงถึง 48.1% และ KAS ลดลงถึง 71.1% ดังรูปที่ 4.16



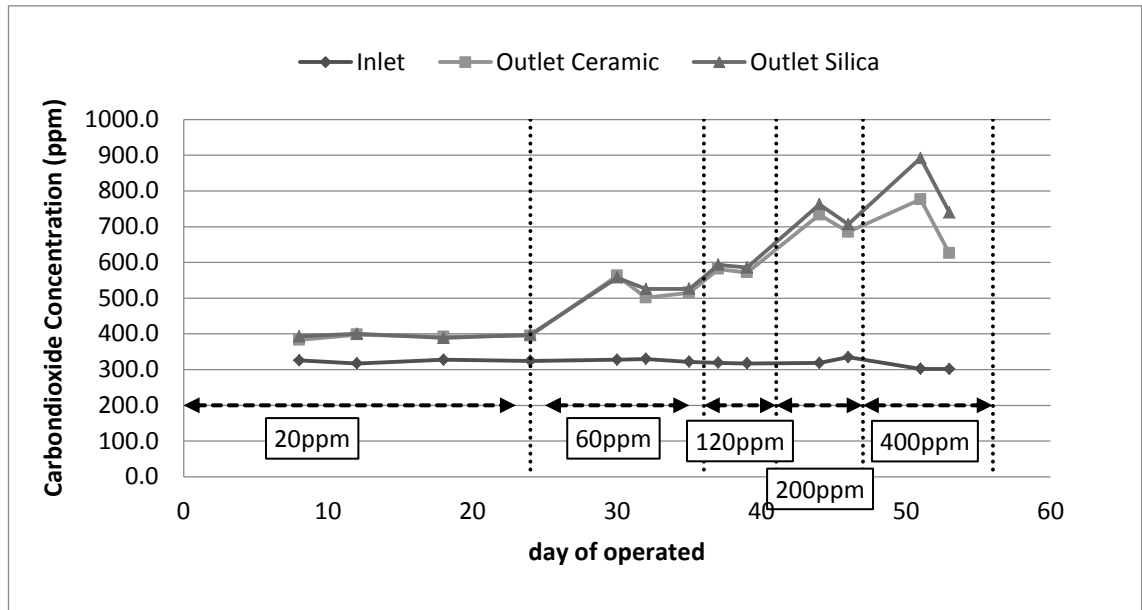
รูปที่ 4.16 การบำบัดไอระเหยเบนซีนที่ค่าภาระสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยเบนซีนที่ค่าภาระสารอินทรีย์ต่างๆ



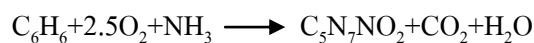
รูปที่ 4.18 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำชะจากกระบวนการกรองชีวภาพ



รูปที่ 4.19 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากกระบวนการกรองชีวภาพ

นอกจากนี้การตรวจสอบปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำชะหดรองยังพบว่าปริมาณค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในระบบมีค่าสูงขึ้นตามค่าการระสารอินทรีย์หรือความเข้มข้นที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากการละลายน้ำบางส่วนของเบนซินและกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยจากความเข้มข้น 20, 60, 120, 200 และ 400 ppm มีค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำชะหดรองเฉลี่ยของ Ceramic ring เท่ากับ 128.27, 159.24, 264.27, 451.47 และ 524.59 mg/l ตามลำดับ และ KAS เท่ากับ 101.96, 152.02, 155.35, 333.58 และ 455.08 mg/l ตามลำดับดังรูปที่ 4.18

เมื่อจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพย่อยสลายเบนซินแล้วจะเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปของสารชีวมวล ในที่นี้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นไปตามสมการ

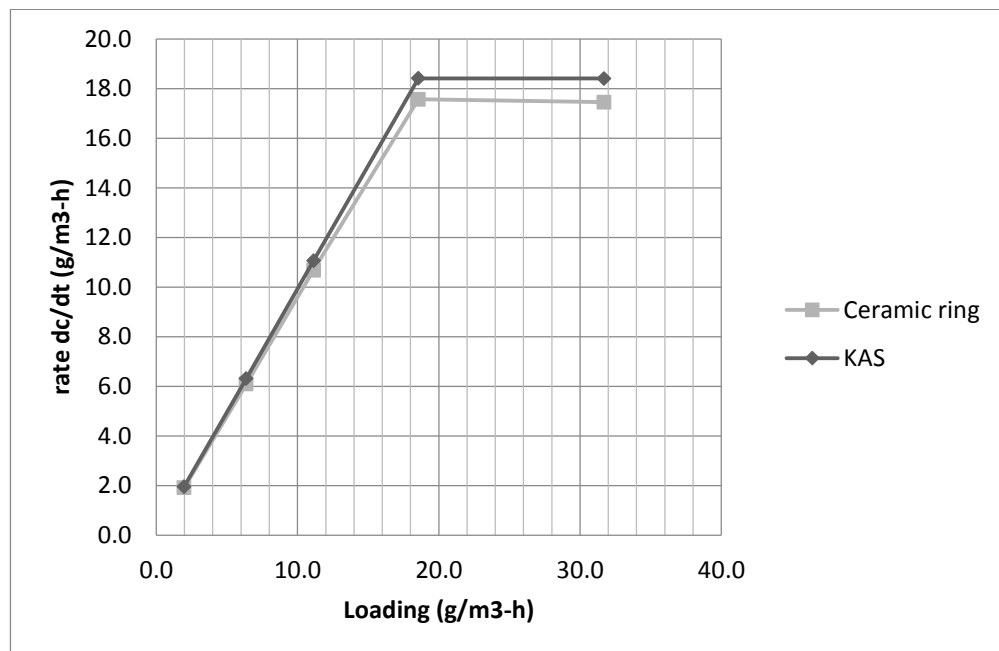


ค่า Yield ของ CO_2 จะมีค่าเท่ากับ 0.56 g CO_2 /g Benzene ในช่วงการระสารอินทรีย์ 20, 60, 120, 200 และ 400 ppm จะคิดเป็นปริมาณ Benzene ได้เท่ากับ 91.87, 275.62, 551.23, 918.72 และ 1837.44 mg benzene/day ดังนั้นจะค่า CO_2 ตามทฤษฎีจะได้เท่ากับ 51.45, 154.34, 308.69, 514.48 และ 1028.97 mg CO_2 /day หรือ 28.6, 85.8, 171.5, 285.9 และ 571.8 ppm ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระบบผลิตได้นั้นมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น เป็นไปตามค่าการระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น โดยจากความเข้มข้นของเบนซินที่ 20, 60, 120, 200 และ 400 มีค่าการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เฉลี่ยของ Ceramic ring เท่ากับ 68.4, 199.9, 258.5, 382.4 และ 399.0 ppm ตามลำดับ และ KAS เท่ากับ 71.2, 209.8, 271.3, 407.7 และ 513.9 ppm ตามลำดับดังรูปที่ 4.19

4.3.6 อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพจากตัวกลาง 2 ชนิด

อัตราการย่อยสลายเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ โดยการใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ Ceramic ring และ KAS (Kaolinite Activted Silica) จากรูปที่ 4.20 พบว่าอัตราการย่อยสลายจากตัวกลางทั้ง 2 ชนิดมีความใกล้เคียงกัน โดยระบบกรองที่ใช้ KAS เป็นตัวกลางจะใช้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าระบบกรองที่ใช้ Ceramic ring เป็นตัวกลางเล็กน้อย โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าภาระสารอินทรีย์ไปจนถึง ประมาณ $18 \text{ g/m}^3\text{-h}$ ระบบจะไม่สามารถบำบัดไอระเหยเบนซีนได้สูงกวานี้ กล่าวได้ว่าเป็นค่าภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ระบบสามารถบำบัดได้ (Maximum Loading) หรือที่เรียกว่าค่า Elimination capacity (EC) ซึ่งระบบกรองที่ใช้ KAS เป็นตัวกลางในระบบมีค่า EC เท่ากับ $18.41 \text{ g/m}^3\text{-h}$ และระบบกรองที่ใช้ Ceramic ring เป็นตัวกลางมีค่า EC เท่ากับ $17.56 \text{ g/m}^3\text{-h}$



รูปที่ 4.20 อัตราการย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพ

4.3.7 ลักษณะของตัวกลางทั้ง 2 ชนิดก่อนและหลังการบำบัด

จากตารางที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัดไอรยะเบนซีน โดยจะพบว่า KAS จะสามารถเก็บความชื้นได้ดีกว่าโดยมีความชื้นอยู่ที่ 38-40 % ซึ่งมีค่ามากกว่า Ceramic ring ที่มีความชื้นอยู่ที่ 27-29 % อยู่ประมาณ 10%

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของตัวกลาง ความชื้น และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัด

ชนิดตัวกลาง	การบำบัด	รอบ	บอหนอเทเบ (หรือ) (บด) (กรัม) เบนเดแทน	ปริมาณน้ำ (กรัม)	ความชื้น (%)	อนุเมเบ (กรัม)	อเบเบเบ (กรัม)	เบเบเดแทน (กรัม)	เบเบเด %	สัดส่วน (กรัม เซลล์/กรัม ตัวกลาง)
ceramic ring	ก่อนบำบัด		1.8999	0.5530	28.97	0.0075	1.3393	0.39	0.00395	
		หลังบำบัด	3	1.8556	0.5027	27.10	0.0150	1.3380	0.81	0.00808
	หลังบำบัด	2	1.9088	0.5226	27.34	0.0173	1.3690	0.90	0.00906	
		1	1.8321	0.5016	27.54	0.0166	1.3139	0.91	0.00906	
KAS	ก่อนบำบัด		0.4506	0.1747	38.76	0.0035	0.2725	0.78	0.00777	
		หลังบำบัด	3	0.4506	0.1792	39.76	0.0036	0.2678	0.80	0.00799
	หลังบำบัด	2	0.4581	0.1776	38.76	0.0049	0.2757	1.06	0.01070	
		1	0.4550	0.1784	39.26	0.0059	0.2707	1.29	0.01297	

หมายเหตุ น้ำหนักของตัวกลางเป็นค่าเฉลี่ยจาก 10 ตัวอย่าง

ชั้น 1 ขอหออกรอนับจากชั้นล่างสุด (การไหลของไอรยะเบนซีนเป็นแบบ Upflow)

ส่วนปริมาณเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางก่อนการบำบัดพบว่า KAS สามารถกักเก็บเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าโดยมีค่าอยู่ที่ 0.00777 กรัมเซลล์/กรัม KAS ส่วน Ceramic ring มีค่าอยู่ที่ 0.00395 กรัมเซลล์/กรัม Ceramic ring และภายหลังการบำบัดยังพบอีกว่าการเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์ในแต่ละชั้นของหออกรอนมีค่าเพิ่มขึ้นที่แตกต่างกัน ซึ่งชั้นที่หนึ่งของหออกรอนเซลล์ของจุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุดและลดหลั่นลงมา เมื่อชั้นขออกรอนสูงขึ้น โดย Ceramic ring เพิ่มขึ้นจากเดิม 57%, 56% และ 51% ตามลำดับ และ KAS เพิ่มขึ้นจากเดิม 40%, 26% และ 2.6% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเชื้อในชั้นแรกจะเพิ่มมากที่สุดเหมือนกันกับตัวกลางทั้ง 2 ชนิด ซึ่งปริมาณเชื้อที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ชั้นที่ 1 เกิดจากการได้รับสารอาหาร (เบนซีน) เป็นชั้นแรก เบนซีนบางส่วนถูกย่อยสลายไปในชั้นกรองแรกทำให้ใน

ชั้นกรองต่อไปจึงได้รับสารอาหารในปริมาณที่น้อยกว่าจึงมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าจากการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์จะเห็นว่าถึงแม้ Ceramic ring จะมีความสามารถในการกักเก็บเชื้อจุลินทรีย์และความชื้นได้น้อยกว่า KAS แต่ Ceramic กลับมีการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่สูงกว่า

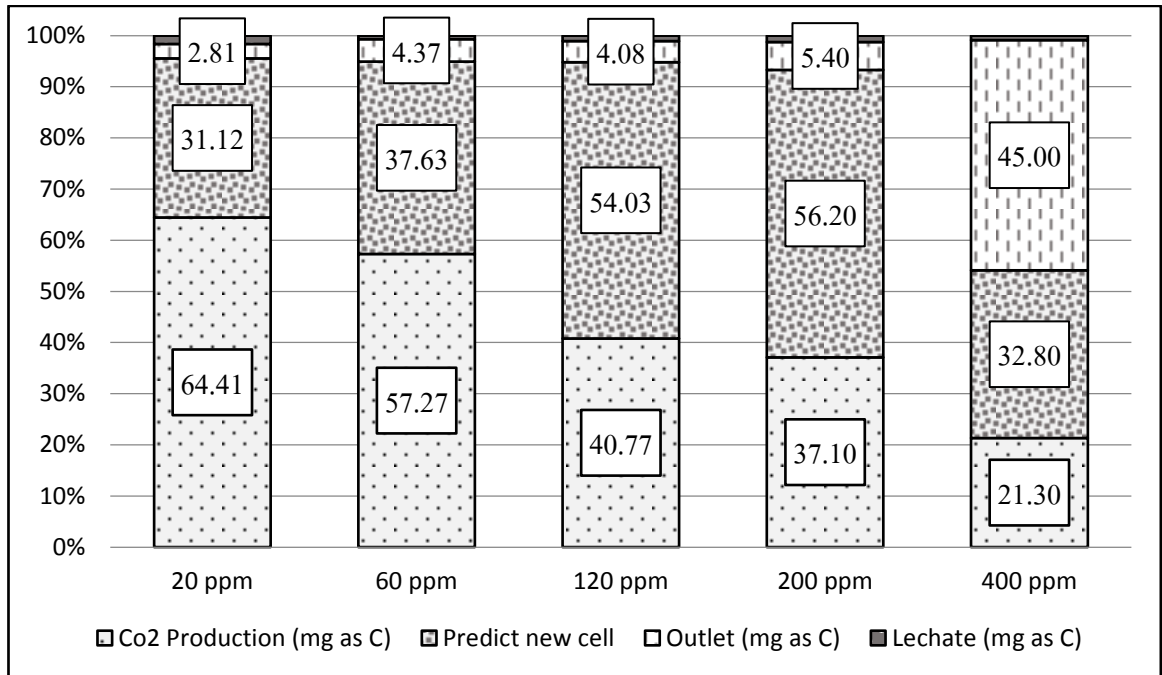
ในการทดลองนี้การติดตามการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในหอกรองทำได้แต่ก่อนและหลังการบำบัด เนื่องจากมีข้อจำกัดของระบบบำบัดหลายข้อด้วยกัน เช่น ตัวกลางที่นำมาวิเคราะห์ด้วยการเผา จะไม่สามารถนำกลับไปใช้ต่อในระบบได้อีก และการนำตัวกลางไปวิเคราะห์ในแต่ละครั้งจะทำให้ปริมาณตัวกลางลดน้อยลง อีกทั้งการประกอบเข้าออกอุปกรณ์มีความยุ่งยากและใช้เวลานาน จึงทำให้การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเซลล์ในตัวกลางทำได้ยาก

4.3.8 สมดุลมวลภายในระบบ

เมื่อกระบวนการบำบัดเกิดขึ้นในระบบการกรองชีวภาพ ปริมาณสารอินทรีย์ (โอระเหยเบนซิน) จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้สำหรับกิจกรรมภายในเซลล์เพื่อการเจริญเติบโตของเชื้อในหอกรองและเปลี่ยนรูปแบบซินให้กลายเป็นสารชีวมวล (Biomass) ซึ่งในที่นี้ก็คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ตารางที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงสมดุลมวลโดยถูกจัดทำให้อยู่ในรูปแบบของมวลคาร์บอน โดยจากการทดลองในแต่ละช่วงความเข้มข้นต่างๆ มีสัดส่วนของคาร์บอนแตกต่างกันไป โดยการเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 21.30-64.41% การระเหยของเบนซิน 0.90-1.66 % และการเกิดเป็นเซลล์ใหม่ 31.12-56.20% (ค่าจากการคำนวณ) ดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.3 สมดุลปริมาณคาร์บอนในระบบกรองชีวภาพ

Test No.	20 ppm	60 ppm	120 ppm	200 ppm	400 ppm
Inlet (mg as C)	78.3	253.9	443.9	740.1	1264
Outlet (mg as C)	2.2	11.1	18.1	39.6	568.2
CO ₂ Production (mg as C)	50.5	145.4	181	274.6	268.8
Lechate (mg as C)	1.3	1.86	4.95	10	12
Predict new cell (mg as C)	24.3	95.54	239.85	415.9	415



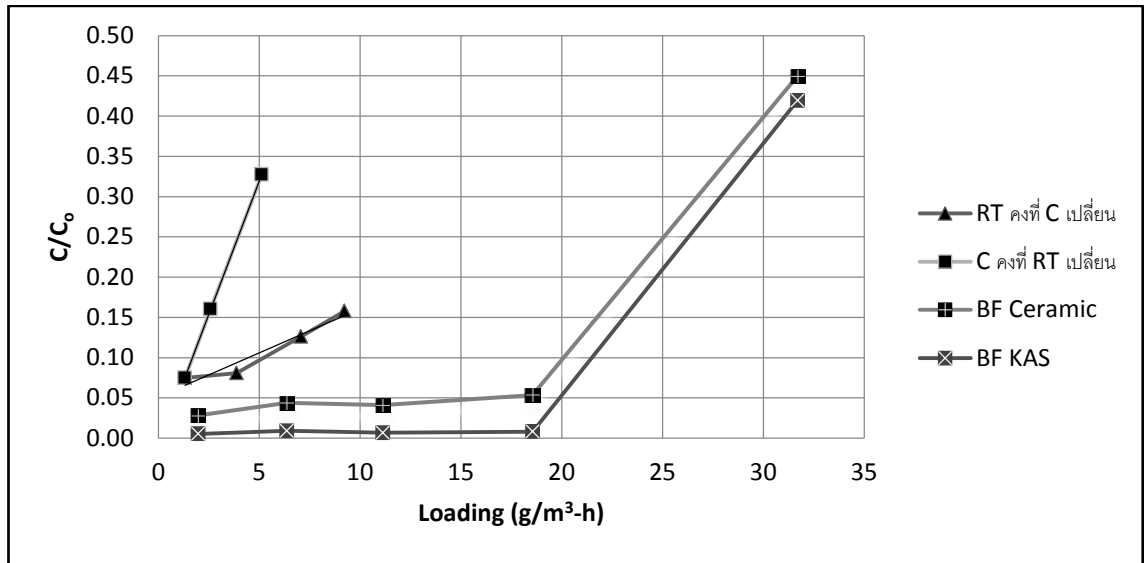
รูปที่ 4.21 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงสารเบนซีนไปในรูปแบบต่างๆ

4.3.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดจากทั้ง 2 ระบบ

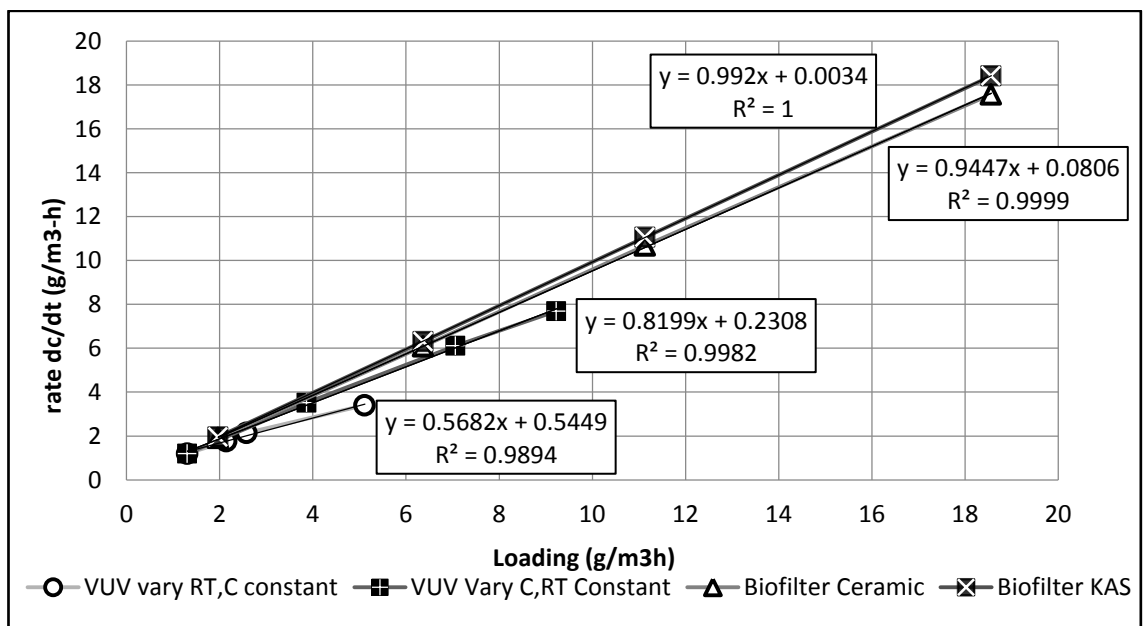
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการระสารอินทรีย์ของการบำบัดด้วยกระบวนการแวกคัมอัตราไวโอเลตพบว่า อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักในขณะที่ระยะเวลาพักคงที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นในขณะที่ความเข้มข้นคงที่

ส่วนการบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพพบว่า ตัวกลางทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่มากกว่า 90% ในช่วงความค่าการระสารอินทรีย์ประมาณ 0 - 21 g/m³-h และประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงต่ำกว่า 90% เมื่อค่าการระสารอินทรีย์สูงขึ้น โดยตัวกลาง KAS ที่มีความพรุน พื้นที่ผิว และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่สูงกว่า Ceramic ring จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่กว่าเพียง 4.6% โดยสามารถแบกรับค่าสารอินทรีย์สูงสุดเท่ากับ 17.56 g/m³-h (Ceramic ring) และ 18.41 g/m³-h (KAS)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของทั้ง 2 ระบบพบว่า การบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพสามารถแบกรับค่าการระสารอินทรีย์ของไอระเหยเบนซีนได้สูงกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการแวกคัมอัตราไวโอเลต ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าการสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการบำบัด



รูปที่ 4.23 อัตราการย่อยสลายเบนซีนด้วยแสงและกระบวนการกรองชีวภาพ

จากรูปที่ 4.22 สำหรับกระบวนการบำบัดด้วยแสงแควคัมอัลตราไวโอเล็ตจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่พิกนั้นมีส่งผลต่อการบำบัดมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน และเมื่อทำการเปรียบเทียบระบบบำบัดทั้ง 2 ระบบที่ระยะเวลาที่พิกและความเข้มข้นที่เท่ากัน (1.8 นาที, 20 ppm) พบว่า ระบบบำบัดด้วยกระบวนการแควคัมอัลตราไวโอเล็ตให้อัตราการย่อยสลายเบนซีนเท่ากับ 1.77 g/m³-h (ค่าจากการคำนวณ) ระบบบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพให้อัตราการย่อยสลายสารเบนซีนอยู่ที่ 1.91g/m³-h Ceramic-BF และ 1.96 g/m³-h KAS-BF ซึ่งมากกว่าระบบวิยวูวอยู่ 7.3 % และ 9.7 % ตามลำดับดังรูปที่ 4.23

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆการบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ ยังมีค่า Elimination Capacity ที่ต่ำกว่าหลายๆงานวิจัยอยู่ 8.41-46.01% ส่วนกระบวนการบำบัดด้วยแสงยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพและVUVกับงานวิจัยอื่นๆ

Medium	Elimination capacity (g/m ³ -h)	ชนิดของระบบ	reference
Ceramic ring & KAS	18.41	Biofilter	งานวิจัยนี้
Sucarcane	3.8	Biofilter	L.sene etal.(2002)
Activated carbon	20.1	Biofilter	Jong-O Kim (2003)
Powdered compost	24.8	Biofilter	Zilli et al.(2005)
polyurethane	30-40	Biofilter	Eun-lee etal.(2009)
LECA (soil)	34.1	Biofilter	ชลันดา คุ่มวงษ์(2011)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการการบำบัดเบนซีนด้วยแสงในงานวิจัยอื่นๆ

Concentration (ppm)	RT (min)	Conversion (%)	ชนิดของ ระบบ	reference
20 - 150	0.76 – 3.03	67.3 – 92.52	VUV	งานวิจัยนี้
15.7	0.08	30 - 80	UV	Olga d’Hennezel et al. (1998)
50 - 160	2.94	>95%	UV	Wen Wang et al. (2003)
60	6.34	95%	Fluorescent	Norman N. Lichtin (1998)

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ตสามารถย่อยสลายไอรอะเหยเบนซีนในช่วงความเข้มข้น 20-150 ppm ได้ในระยะเวลาประมาณ 10-15 นาที โดยระยะเวลาพักตั้งแต่ 0.76-3.03 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ 67.3-92.5%
2. ประสิทธิภาพการบำบัดไอรอะเหยเบนซีนด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ตแปรผันตรงกับระยะเวลาพักและแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นของไอรอะเหยเบนซีนและอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพักส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอรอะเหยเบนซีน
3. จากการวิเคราะห์ BET Kaolinite activated silica มีค่าพื้นที่ผิวและ Pore Volume มากกว่า Ceramic ring โดย Kaolinite activated silica (KAS) มี Surface area เท่ากับ $14.22 \text{ m}^2/\text{g}$ และ Pore Volume เท่ากับ 0.1582 cc/g ส่วน Ceramic ring มี Surface area เท่ากับ $1.23 \text{ m}^2/\text{g}$ และ Pore Volume เท่ากับ 0.0029 cc/g จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในตัวกลางได้ดีกว่า
4. กระบวนการกรองชีวภาพที่ใช้ Kaolinite activated silica (KAS) เป็นตัวกลางในระบบให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้ Ceramic ring โดยที่ค่าภาระสารอินทรีย์ $21.27 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง}$ ประสิทธิภาพการบำบัดไอรอะเหยเบนซีนของ KAS เท่ากับ 99.20% และ Ceramic ring เท่ากับ 94.75% โดยค่าภาระสารอินทรีย์สูงสุดเท่ากับ $17.56 \text{ g/m}^3\text{-h}$ Ceramic ring และ $18.41 \text{ g/m}^3\text{-h}$ KAS มากกว่าอยู่ 4.6%
5. กระบวนการกรองชีวภาพสามารถรับค่าภาระสารอินทรีย์ได้สูงกว่ากระบวนการแวกคัม อัลตราไวโอเล็ต โดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดไอรอะเหยเบนซีนเท่ากับ 90% กระบวนการกรองชีวภาพ (BF) สามารถรับค่าภาระสารอินทรีย์ได้เท่ากับ $28.99 \text{ g/m}^3\text{-h}$ (KAS) และ $22.86 \text{ g/m}^3\text{-h}$ (Ceramic ring) ส่วนกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ต (VUV) เท่ากับ $1.63 \text{ g/m}^3\text{-h}$ (RT-Effect) และ $5.14 \text{ g/m}^3\text{-h}$ (Conc.-Effect)
6. เมื่อเปรียบเทียบระบบบำบัดทั้ง 2 ระบบที่ระยะเวลาพักและความเข้มข้นที่เท่ากัน (1.8 นาที, 20ppm) พบว่า ระบบบำบัดด้วยกระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเล็ตให้ประสิทธิภาพการบำบัด 86.70% แต่ระบบบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเท่ากับ 97.41% (Ceramic ring) และ 99.47% (KAS)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวกลางที่นำมาใช้เปรียบเทียบค่าความพรุนและพื้นที่ผิวมีเพียง 2 ตัวอย่าง ควรมีการเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นๆเพิ่มเติม
2. การวัดความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนควรใช้อุปกรณ์ที่มีการวัดแบบต่อเนื่อง เพื่อข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้นและสามารถเห็นการช่วงเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ, 2550, มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง [Online], Available:

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html [25 เมษายน 2557].

กรมควบคุมมลพิษและสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [Online], Available:

http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm [25 เมษายน 2557].

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552, คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง เบนซีน (Benzene), หน้า 1-20

กฤษณา ชูติมา, 2541, รู้ไว้ใช้ว่า ประสาทวิทยาศาสตร์ [Online], Available:

<http://www.school.net.th/library/create-web/10000/science/10000-2732.html> [25 เมษายน 2557].

คณิต กฤษณังกูร, 2548, แก๊สโครมาโตกราฟฟี, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์งานเอกสารการพิมพ์ สจข., 221 หน้า.

ชลันดา คุ่มวงษ์, 2554, การกำจัดเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 64 หน้า.

ทวีสิน นาวารัตน์, 2553, “เบนซีน: มหันตภัยร้ายที่คุณอาจคาดไม่ถึง”, วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 59-67.

ธนสร ต้นศฤงฆาร, 2548, “ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อม”, วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, หน้า 43-48.

นภาพร พานิช และคณะ, 2553, ตำราระบบบำบัดมลพิษในอากาศ, ศูนย์บริการวิชาการแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2552, **ถ่านปลุกฤทธิ**, [Online], Available:

http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1606
[25 เมษายน 2557].

พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555, **คู่มือการเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ**, หน้า 5-20.

วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2555, **Benzene**, [Online], Available:

http://www.summacheeva.org/index_thaitox_benzene.htm [21 พฤษภาคม 2557].

สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, อาทิตย์ รังสีสันติวานนท์, 2547, “การกำจัดสารปนเปื้อนเบนซินในอากาศโดยกระบวนการไบโอฟิลเตรชัน”, **วิศวกรรมสาร ม.ช.** ปีที่ 31 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม – กันยายน 2547, หน้า 289-298.

สุนันทา วิบูลย์จันทร์, 2548, **เคมีอินทรีย์**, โครงการเอกสารวิชาการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, พิมพ์ครั้งที่ 9, หน้า 163-184.

อุดม กักผล, โสภณ เรืองสำราญ และอมร เพชรสม, 2537, **อินทรีย์เคมี 1**, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 5, หน้า 216-281.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2007, **Toxicological Profile for Benzene**, pp. 259-265.

Castanas, M.K.E., 2008, “Human Health Effects of Air Pollution”, **Environmental Pollution**, Vol. 151, pp. 362-367.

Deviny, J., Deshusses, M. and Webster, T. 1999, “**Biofiltration for Air Pollution Control**”,

Eisenreich S.J., Looney B.B. And Thornton J.D. 1981. “Airborne Organic Contaminants in The Great Lakes Ecosystem”. **Environmental Science & Technology**, Vol.15, pp. 30-38.

Gasmet Company, 2014, **Gasmet™ DX4015**[Online], Available:

http://www.gasmet.fi/products/flir_gas_analyzers/on-site_%28portable%29/gasmet_dx4015

Hennezel, O.D., Pichat, P., Ollis, D.F., 1998, “Benzene and Toluene Gas Phase Photocatalytic Degradation Over H₂O Pretreated TiO₂: By Products and Mechanisms”, **Journal of Photochemistry and Photobiology A**, Vol. Chemistry 118, pp. 197-204.

Khan, F.I. and Ghoshal, A.K., 2000, “Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol.13, pp. 527–545.

Kim, J., 2003, “Degradation of Benzene and Ethylene in Biofilters”, **Process Biochemistry**, Vol. 39, pp. 447-453.

Lee, E., Ryu, H.W. and Cho, K., 2009, “Removal of Benzene and Toluene in Polyurethane Biofilter Immobilized with Rhodococcus sp. EH831 Under Transient Loading”, **Bioresource Technology**, Vol.100, pp. 5656–5663.

Lichtin, N.N. and Sadeghi, M., 1998, “Oxidative Photocatalytic Degradation of Benzene Vapor Over TiO₂”, **Journal of Photochemistry and Photobiology A**, Vol. Chemistry 113, pp. 81-88.

Lyman W.J., 1982, “**Handbook of Chemical Property Estimation Methods**”, McGraw-Hill, New York.

Moussavi, G. and Mohseni, M., 2007, “Using UV Pretreatment to Enhance Biofiltration of Mixture of Aromatic VOCs”, **Journal of Hazardous Materials**, Vol.141, pp. 59-66.

Neilson, A.H., 1999, **Organic Chemicals: An Environmental Perspective**, CRC Press; Rev Sub edition Publisher, pp. 481-484.

Oppenlander, T., 2003, “**Photochemical Purification of Water and air**”, Wiley-VCH:Weinheim, Germany.

Pate C.T., Atkinson R. and Pitts J.N.Jr., 1976, "The Gas Phase Reaction of O₃ with A Series of Aromatic Hydrocarbons". **Journal of Environmental Science Health**, Vol. 2, pp. 1-10.

Sene, L., Converti, A., Felipe, M.G.A. and Zilli, M., 2002, "Sucarcane Bagasse as Alternative Packing Material for Biofiltration of Benzene Polluted Gaseous Stream: A Preliminary Study", **Bioresource Technology**, Vol. 83, pp. 153-157.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D., 2003, **Wastewater Engineering, 4th ed. Treatment and Reuse**, McGraw-Hill International Edition, USA pp. 563-571.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1998, **Toxicological Review of Benzene**, p. 2.

U.S. Environmental Protection Agency EPA, 2010, **BTEX Definition** [Online], Available: <http://toxics.usgs.gov/definitions/btex.html> [2014, May 21].

Wang, C., Xi,J., Hu, H. and Yao,Y., 2009, "Advantages of Combined UV Photodegradation and Biofiltration Processes to Treat Gaseous Chlorobenzene", **Journal of Hazardous Materials**, Vol.171, pp. 1120-125.

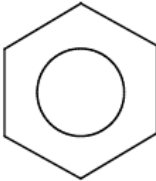
Wang, W., Chiang, L.W. and Ku.Y., 2003, "Decomposition of Benzene in Air Streams by UV/TiO₂ Process", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. B101, pp. 133-146.

Zilli, M., Guarino, C., Daffonchio, D., Borin, S. and Converti, A., 2005, "Laboratory-Scale Experiments with A Powdered Compost Biofilter Treating Benzene Polluted Air" **Process Biochemistry**, Vol.40, pp. 203-204.

ภาคผนวก ก

สารเบนซีน

สารเบนซีนมีคุณลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพดังนี้

ชื่อสามัญ	:	Benzene
CASRN	:	71-43-2
ชื่อเคมี	:	Benzene
สูตรโมเลกุล	:	C_6H_6 (C 92.55%, H 7.75%)
สูตรโครงสร้าง	:	
น้ำหนักโมเลกุล	:	78.11 g/mole
Conversion factor	:	$1 \text{ mg/m}^3 = 0.31 \text{ ppm}$
จุดเยือกแข็ง	:	$5.5 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดเดือด	:	$80.1 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดวาบไฟ	:	$-11 \text{ }^\circ\text{C}$ (Close up)
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง	:	$632.5 \text{ }^\circ\text{C}$
ช่วงความเข้มข้นที่ติดไฟได้	:	1.3 – 7.1% (ในอากาศ)
ความดันไอที่ 25°C	:	90.76 mmHg
ความหนาแน่นไอ	:	2.7 (อากาศ=1)
การละลายน้ำ	:	1.718 กรัมต่อลิตรที่ $25 \text{ }^\circ\text{C}$
ความถ่วงจำเพาะ	:	0.8765 ที่ $20 \text{ }^\circ\text{C}$

ภาคผนวก ข
ผลการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
20 ppm	1	0	58521.8	20.39798	off
		4.205	59151.5	20.61746	
		8.656	59514.0	20.74381	
		13.919	58484.6	20.38501	on
		19.641	54404.2	18.96277	
		23.844	4594.1	1.60129	
		28.295	4042.4	1.40899	
		34.156	4321.8	1.50638	
		38.547	4484.1	1.56295	
		42.776	4491.5	1.56553	
47.677	4704.4	1.63974			

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
20 ppm	2	0	58787.2	20.49048	off
		4.629	58074.8	20.24217	
		9.364	57074.8	19.89362	
		14.308	45407.3	15.82687	on
		18.8	5798.3	2.02102	
		25.104	8795.4	3.06567	
		29.404	9043.1	3.15200	
		33.796	8385.4	2.92276	
		38.19	9524.4	3.31976	
		42.613	9951.2	3.46853	
47.038	10108.5	3.52335			

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นไอระเหย 20 ppm อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
20 ppm	4	0	56853.5	19.81649	off
		5.302	57880.2	20.17435	
		9.781	57045.2	19.88330	
		14.198	58267.3	20.30927	
		18.848	42578.9	14.84102	on
		23.234	15586.5	5.43273	
		27.591	16950.4	5.90812	
		31.993	18982.9	6.61656	
		36.388	18524.8	6.45688	
		40.814	19771.0	6.89125	
		45.14	19912.9	6.94071	

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นไอระเหย 60 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
60 ppm	1	0	172438.7	60.10411	off
		4.246	171148.5	59.65441	
		9.245	175225.1	61.07532	
		13.489	176620.8	61.56180	
		21.189	175735.2	61.25312	
		25.432	173253.7	60.38818	on
		31.525	19327.9	6.73681	
		35.736	14387.9	5.01495	
		43.716	13336.0	4.64831	
		48.055	14312.0	4.98850	
		52.114	14201.6	4.95002	

ตารางที่ ข.5 ความเข้มข้นไอระเหย 110 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
110 ppm	1	0	314242.2	109.53022	off
		4.814	309023.3	107.71115	
		9.289	314685.2	109.68463	
		13.785	332417.3	115.86521	
		18.167	317917.1	110.81112	on
		25.333	66886.6	23.31356	
		29.589	43804.8	15.26832	
		34.192	38305.8	13.35162	
		38.545	39637.6	13.81582	
		43.298	39911.7	13.91136	
47.575	39818.9	13.87902			

ตารางที่ ข.6 ความเข้มข้นไอระเหย 150 ppm อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที

Concentration	Flow (L/min)	Time of operated	Peakarea	ppm	VUV status
150 ppm	1	0.000	415956.7	144.98316	off
		4.729	415589.6	144.85521	
		9.205	413612.8	144.16619	on
		14.773	371058.7	129.33381	
		19.646	108959.1	37.97808	
		23.416	76526.4	26.67354	
		27.937	68581.8	23.90443	
		32.397	64175.5	22.36860	
		36.871	64079.2	22.33503	
		41.417	65503.6	22.83151	

ตารางที่ ข.7 ชุดการทดสอบทางกายภาพของตัวกลาง 2 ชนิด (Ceramic ring และ KAS)

time	peak area	ppm	Inlet	Outlet Ceramic	Outlet KAS
4.6	128519.1	44.79578	44.79578		
10.1	126891.3	44.22841	44.22841		
51.8	125407.8	43.71133		43.71133	
86.6	123651.1	43.09902			43.09902
92.1	121678.9	42.41161		42.41161	
15.7	120833.5	42.11694			42.11694
27.1	119601.9	41.68766		41.68766	
39.6	117621.4	40.99735			40.99735
61.2	115557.1	40.27783	40.27783		
74.7	113919.7	39.70711		39.70711	
98.7	112864.9	39.33946			39.33946
21.1	111900.5	39.00331		39.00331	
32.8	111102.5	38.72517			38.72517
46.2	109910.7	38.30976	38.30976		
67.8	109281.1	38.09031	38.09031		
81.2	109378.7	38.12433		38.12433	
105.5	109007.7	37.99502			37.99502

ตารางที่ ข.8 การบำบัดไอระเหยเบนซินด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ

Biofilter for benzene removal (flow 1L/min)											
Batch No.	day	day No.	Peakarea inlet	inlet (ppm)	Peakareaoutlet ceramic	outlet ceramic (ppm)	Efficiency (%)	Peakarea outlet Silica	outlet Silica (ppm)	Efficiency (%)	Remark
20 ppm	1/20/2014	1	35637.3	12.4	818.3	0.3	97.7	132.1	0.0	99.6	
	1/21/2014	2	48769.0	17.0	1775.3	0.6	96.4	375.5	0.1	99.2	
	1/22/2014	3	55152.4	19.2	1407.7	0.5	97.4	299.9	0.1	99.5	
	1/27/2014	8	53363.4	18.6	583.8	0.2	98.9	124.3	0.0	99.8	
	1/28/2014	9	49346.8	17.2	869.7	0.3	98.2	286.1	0.1	99.4	
	1/29/2014	10	54797.9	19.1	1159.6	0.4	97.9	558.5	0.2	99.0	
	1/30/2014	11	52502.7	18.3	873.4	0.3	98.3	154.1	0.1	99.7	
	1/31/2014	12	54224.1	18.9	934.5	0.3	98.3	271.3	0.1	99.5	
	2/3/2014	15	49115.1	17.1	581.6	0.2	98.8	111.3	0.0	99.8	
	2/4/2014	16	53937.2	18.8	588.7	0.2	98.9	107.6	0.0	99.8	
	2/5/2014	17	60535.9	21.1	287.3	0.1	99.5	98.2	0.0	99.8	
	2/6/2014	18	58698.7	20.5	121.2	0.0	99.8	87.6	0.0	99.9	
	2/7/2014	19	46767.9	16.3	4474.3	1.6	90.4	618.0	0.2	98.7	

ตารางที่ ข.8 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ(ต่อ)

Biofilter for benzene removal (flow 1L/min)											
Batch No.	day	day No.	Peakarea inlet	inlet (ppm)	Peakareaoutlet ceramic	outlet ceramic (ppm)	Efficiency (%)	Peakarea outlet Silica	outlet Silica (ppm)	Efficiency (%)	Remark
20ppm	2/10/2014	22	63714.4	22.2	2568.7	0.9	96.0	378.5	0.1	99.4	
	2/11/2014	23	58962.0	20.6	5359.9	1.9	90.9	610.0	0.2	99.0	
60 ppm	2/12/2014	24	163031.3	56.8	6714.1	2.3	95.9	1057.3	0.4	99.4	
	2/13/2014	25	161583.5	56.3	6137.3	2.1	96.2	1001.0	0.3	99.4	
	2/17/2014	29	151583.5	52.8	5137.3	1.8	96.6	1001.0	0.3	99.3	
	2/18/2014	30	197560.6	68.9	10151.1	3.5	94.9	1566.7	0.5	99.2	
	2/19/2014	31	202246.6	70.5	9987.5	3.5	95.1	4555.4	1.6	97.7	
	2/20/2014	32	163701.8	57.1	7257.6	2.5	95.6	1120.2	0.4	99.3	
	2/21/2014	33	173537.3	60.5	7528.2	2.6	95.7	1016.7	0.4	99.4	
2/23/2014	35	161185	56.2	6974.8	2.4	95.7	1040.2	0.4	99.4		

ตารางที่ ข.8 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ(ต่อ)

Biofilter for benzene removal (flow 1L/min)											
Batch No.	day	day No.	Peakarea inlet	inlet (ppm)	Peakarea outlet ceramic	outlet ceramic (ppm)	Efficiency (%)	Peakarea outlet Silica	outlet Silica (ppm)	Efficiency (%)	Remark
120 ppm	2/24/2014	36	287221.2	100.1	6037.2	2.1	97.9	1499.3	0.5	99.5	
	2/25/2014	37	328549.2	114.5	14441.2	5.0	95.6	2169.1	0.8	99.3	
	2/26/2014	38	321255.7	112.0	14119.3	4.9	95.6	2534.2	0.9	99.2	
	2/27/2014	39	292972.0	102.1	14020.5	4.9	95.2	2105.1	0.7	99.3	
	2/28/2014	40	271778.0	94.7	12695.5	4.4	95.3	1866.0	0.7	99.3	
200 ppm	3/3/2014	43	375344.9	130.8	17714.8	6.2	95.3	2929.4	1.0	99.2	
	3/4/2014	44	515823	179.8	28576.1	10.0	94.5	4447.6	1.6	99.1	
	3/5/2014	45	512850.3	178.8	27794.5	9.7	94.6	3847.3	1.3	99.2	
	3/6/2014	46	458905.4	160.0	20412.8	7.1	95.6	3230.3	1.1	99.3	
	3/7/2014	47	640841	223.4	39310.3	13.7	93.9	5701.3	2.0	99.1	

ตารางที่ ข.8 การบำบัดไอระเหยเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ(ต่อ)

Biofilter for benzene removal (flow 1L/min)											
Batch No.	day	day No.	Peakarea inlet	inlet (ppm)	Peakarea outlet ceramic	outlet ceramic (ppm)	Efficiency (%)	Peakarea outlet Silica	outlet Silica (ppm)	Efficiency (%)	Remark
Highload 400-500 ppm	3/10/2014	50	876135.1	305.4	195461.4	68.1	77.7	22143.2	7.7	97.5	
	3/11/2014	51	861528.5	300.3	205670.3	71.7	76.1	28406	9.9	96.7	
	3/12/2014	52	937027.4	326.6	363579.7	126.7	61.2	107093.3	37.3	88.6	
	3/13/2014	53	773418	269.6	401616	140.0	48.1	163675.2	57.0	78.8	
	3/15/2014	55	828016.7	288.6	399101.3	139.1	51.8	239061.1	83.3	71.1	

ตารางที่ ข.9 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้

Biofilter for benzene removal (flow 1L/min)										
Batch No.	day	day No.	Peakarea inlet	ppm inlet	Peakareaoutlet ceramic	ppm outlet ceramic	% Production	Peakarea outlet Silica	ppm outlet Silica	% Production
20 ppm	1/27/2014	8	107521.3	325.7	151276.1	383.3	17.7	158654.2	393.1	20.7
	1/31/2014	12	101235.1	317.4	162354.9	397.9	25.4	164212.6	400.4	26.2
	2/6/2014	18	108987.7	327.6	157986.2	392.2	19.7	155213.9	388.5	18.6
	2/12/2014	24	106522.4	324.3	160123.5	395.0	21.8	162354.8	397.9	22.7
60 ppm	2/18/2014	30	109165.8	327.8	287425.7	562.8	71.7	283161.2	557.2	70.0
	2/22/2014	32	110647.9	329.8	240721.5	501.2	52.0	259157.3	525.5	59.4
	2/23/2014	35	104579.2	321.8	251243.2	515.1	60.1	259423.7	525.9	63.4
120 ppm	2/25/2014	37	102543.5	319.1	301795.0	581.7	82.3	310502.4	593.2	85.9
	2/27/2014	39	101165.1	317.3	294141.3	571.7	80.2	304778.0	585.7	84.6
200 ppm	3/4/2014	44	102314.2	318.8	416975.6	733.6	130.1	439027.1	762.6	139.2
	3/6/2014	46	114495.6	334.8	379993.1	684.8	104.5	396415.9	706.5	111.0
Highload 400-500 ppm	3/11/2014	51	89760.1	302.2	449456.2	776.4	156.9	537076.0	891.9	195.1
	3/13/2014	53	89349.8	301.7	334985.6	625.5	107.3	421682.0	739.8	145.2

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ

SCOD of Lechate														
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark		
20 ppm	2/5/2014	17	A-1	blank	0	6.60	6.60	6.75	0.0889		blank			
			A-2	blank	0	6.60								
			179	Ceramic	5	5.75	67.56				120.89		120.89	
			183	Ceramic	5	5.75					120.89			
			186	Silica	5	5.90					99.56		99.56	
			460	Silica	5	5.90					99.56			
			185	Nutrient	5	6.10					71.11		67.56	check COD
			177	Nutrient	5	6.15					64.00		inlet	
	2/7/2014	19	A-1	blank	0	6.45	6.45	6.90	0.0870		blank			
			A-2	blank	0	6.45								
			179	Ceramic	5	5.50	132.17				135.65			
			186	Ceramic	5	5.45	139.13							
			460	Silica	5	5.65	111.30				104.35			
			183	Silica	5	5.75	97.39							

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate												
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark
60 ppm	2/13/2014	25	A-1	blank	0	5.70	5.68	6.70	0.0896		blank	
			A-2	blank	0	5.65						
			460	Ceramic	5	4.65				146.87	150.45	
			177	Ceramic	5	4.60				154.03		
			185	Silica	5	4.70				139.70	139.70	
			183	Silica	5	4.70				139.70		
	2/18/2014	30	A-1	blank	0	5.60	5.60	6.60	0.0909		blank	
			A-2	blank	0	5.60						
			177	Ceramic	5	4.65				138.18	152.73	
			179	Ceramic	5	4.45				167.27		
			183	Silica	5	4.65				138.18	141.82	
			185	Silica	5	4.60				145.45		

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate												
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark
60 ppm	2/20/2014	32	A-1	blank	0	5.80	5.80	6.60	0.0909	174.55	blank	
			A-2	blank	0	5.80						
			186	Ceramic	5	4.60	174.55					
			183	Ceramic	5	4.60						
			179	Silica	5	4.60						
			185	Silica	5	4.60						

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate													
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark	
120 ppm	2/24/2014	36	A-1	blank	0	5.90	5.90	6.70	0.0896		blank		
			A-2	blank	0	5.90							
			183	Ceramic	5	4.40	68.06				214.93		211.34
			179	Ceramic	5	4.45					207.76		
			185	Silica	5	4.78					160.48		
			186	Silica	5	4.80					157.61		
			177	Nutrient	5	5.40					71.64		
			460	Nutrient	5	5.45					64.48		
	2/27/2014	39	A-1	blank	0	6.70	6.65	6.75	0.0889		blank		
			A-2	blank	0	6.60							
			179	Ceramic	5	4.40	320.00				323.56		
			183	Ceramic	5	4.35	327.11						
			460	Silica	5	5.60	149.33						
			185	Silica	5	5.70	135.11						

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate													
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark	
120 ppm	2/28/2014	40	A-1	blank	0	6.40	6.40	6.70	0.0896		blank		
			A-2	blank	0	6.40							
			177	Ceramic	5	4.60					257.91		257.91
			179	Ceramic	5	4.60					257.91		
			183	Silica	5	5.30					157.61		164.78
			185	Silica	5	5.20	171.94						

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate												
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark
200 ppm	3/3/2014	43		blank	0	6.80	6.80	6.20	0.0968			
				blank	0	6.80						
				Ceramic	5	4.05				425.81	429.68	
				Ceramic	5	4.00	433.55					
				Silica	5	4.50	356.13			356.13		
				Silica	5	4.50	356.13					
	3/5/2014	45	A-1	blank	0	6.90	6.90	6.20	0.0968			
			A-2	blank	0	6.90						
			184	Ceramic	5	3.90				464.52	472.26	
			183	Ceramic	5	3.80	480.00					
			460	Silica	5	5.10	278.71			278.71		
			179	Silica	5	5.10	278.71					
			185	Nutrient	5	6.25	100.65			104.52	check COD inlet	
			466	Nutrient	5	6.20	108.39					

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate												
Batch No.	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark
200 ppm	3/7/2014	47		blank	0	6.85	6.83	6.10	0.0984			
				blank	0	6.80						
				Ceramic	5	3.90				460.33	452.46	
				Ceramic	5	4.00				444.59		
				Silica	5	4.50				365.90	365.90	
				Silica	5	4.50				365.90		
Highload	3/10/2014	50	186	blank	0	6.60	6.60	6.10	0.0984			
			182	blank	0	6.60						
			177	Ceramic	5	3.30				519.34	519.34	
			187	Ceramic	5	3.30				519.34		
			180	Silica	5	3.55				480.00	476.07	
			181	Silica	5	3.60				472.13		

ตารางที่ ข.10 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำชะหอกรองชีวภาพ (ต่อ)

SCOD of Lechate												
Batch. No	day	day No.	No.	Detail	ml.sample	ml.titrant		Std.FAS	M=	SCOD	AVG.	Remark
High Load	3/12/2014	52	A-1	blank	0	6.00	5.95	6.10	0.0984	550.82	550.82	
			A-2	blank	0	5.90						
			460	Ceramic	2.5	4.20						
			466	Ceramic	2.5	4.20						
			184	Silica	2.5	4.60	424.92					
			185	Silica	2.5	4.50	456.39					
	3/14/2014	54	A-1	blank	0	6.10	6.13	6.10	0.0984	511.48	503.61	
			A-2	blank	0	6.15						
			186	Ceramic	2.5	4.50						
			177	Ceramic	2.5	4.55						
			180	Silica	2.5	4.70	448.52					
			181	Silica	2.5	4.70	448.52					

ตารางที่ ข.11 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางก่อนการบำบัด

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อนการบำบัดด้วยไธอะเฮนเบนซีน (ก่อนบรรจุเข้าห่อกรอง)												
Type of Media	No.	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ถ้วยเปล่า(กรัม)	ถ้วย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ(กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
ceramic ring	1	61	14.3492	16.2922	15.7155	15.7069	1.9430	0.5767	29.68	0.0086	1.3577	0.44
	2	62	14.1079	16.1749	15.4789	15.4679	2.0670	0.6960	33.67	0.0110	1.3600	0.53
	3	63	13.5561	15.3965	14.9230	14.9185	1.8404	0.4735	25.73	0.0045	1.3624	0.24
	4	64	13.5484	15.4067	14.8632	14.8567	1.8583	0.5435	29.25	0.0065	1.3083	0.35
	5	65	14.4065	16.4141	15.7275	15.7167	2.0076	0.6866	34.20	0.0108	1.3102	0.54
	6	66	14.3525	16.2093	15.6602	15.6517	1.8568	0.5491	29.57	0.0085	1.2992	0.46
	7	67	13.9509	15.7700	15.2837	15.2778	1.8191	0.4863	26.73	0.0059	1.3269	0.32
	8	68	14.6585	16.4148	15.9939	15.9899	1.7563	0.4209	23.97	0.0040	1.3314	0.23
	9	69	13.1730	15.0489	14.5356	14.5278	1.8759	0.5133	27.36	0.0078	1.3548	0.42
	10	70	11.0632	13.0374	12.4533	12.4456	1.9742	0.5841	29.59	0.0077	1.3824	0.39
Average							1.8999	0.5530	28.97	0.0075	1.3393	0.39

ตารางที่ ข.11 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางก่อนการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อนการบำบัดด้วยไอรยะเหยเบนซิน (ก่อนบรรจุเข้าหอกรอง)												
Type of Media	No.	นน. ถ้วย (กรัม)	นน. ถ้วยเปล่า(กรัม)	ถ้วย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน. ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน. ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
alumina silica	1	71	13.8740	14.3269	14.1542	14.1523	0.4529	0.1727	38.13	0.0019	0.2783	0.42
	2	72	11.9017	12.3506	12.1789	12.1758	0.4489	0.1717	38.25	0.0031	0.2741	0.69
	3	73	14.4953	14.9307	14.7630	14.7609	0.4354	0.1677	38.52	0.0021	0.2656	0.48
	4	74	12.9112	13.3657	13.1930	13.1900	0.4545	0.1727	38.00	0.0030	0.2788	0.66
	5	75	13.0025	13.4419	13.2670	13.2620	0.4394	0.1749	39.80	0.0050	0.2595	1.14
	6	76	12.9819	13.4447	13.2653	13.2622	0.4628	0.1794	38.76	0.0031	0.2803	0.67
	7	77	13.6201	14.0716	13.8951	13.8889	0.4515	0.1765	39.09	0.0062	0.2688	1.37
	8	78	13.5359	13.9848	13.8083	13.8046	0.4489	0.1765	39.32	0.0037	0.2687	0.82
	9	79	10.2908	10.7405	10.5645	10.5611	0.4497	0.1760	39.14	0.0034	0.2703	0.76
	10	80	13.5962	14.0584	13.8799	13.8763	0.4622	0.1785	38.62	0.0036	0.2801	0.78
Average							0.4506	0.1747	38.76	0.0035	0.2725	0.78

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยไอรยะเบนซีน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถ้ำย (กรัม)	นน.ถ้ำยเปล่า(กรัม)	ถ้ำย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
Ceramic ring	3	1	13.8896	15.7104	15.2254	15.2111	1.8208	0.4850	26.64	0.0143	1.3215	0.79
		2	13.8430	15.7711	15.2673	15.2527	1.9281	0.5038	26.13	0.0146	1.4097	0.76
		3	13.3701	15.2842	14.7774	14.7613	1.9141	0.5068	26.48	0.0161	1.3912	0.84
		4	14.1866	16.0019	15.5013	15.4872	1.8153	0.5006	27.58	0.0141	1.3006	0.78
		5	13.1480	14.9709	14.4543	14.4393	1.8229	0.5166	28.34	0.0150	1.2913	0.82
		6	13.5613	15.3930	14.8707	14.8550	1.8317	0.5223	28.51	0.0157	1.2937	0.86
		7	12.2906	14.1407	13.6512	13.6377	1.8501	0.4895	26.46	0.0135	1.3471	0.73
		8	13.7456	15.5994	15.0999	15.0834	1.8538	0.4995	26.94	0.0165	1.3378	0.89
		9	13.4218	15.3093	14.7876	14.7711	1.8875	0.5217	27.64	0.0165	1.3493	0.87
		10	14.1103	15.9424	15.4613	15.4478	1.8321	0.4811	26.26	0.0135	1.3375	0.74
	Average							1.8556	0.5027	27.10	0.0150	1.3380

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยโอโรเซเหยเบนซิน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ถ้วยเปล่า(กรัม)	ถ้วย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน. ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน. ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
Ceramic ring	2	11	10.3574	12.2814	11.7495	11.7284	1.9240	0.5319	27.65	0.0211	1.3710	1.10
		12	13.6073	15.5469	14.9708	14.9497	1.9396	0.5761	29.70	0.0211	1.3424	1.09
		13	12.3733	14.2149	13.7683	13.7553	1.8416	0.4466	24.25	0.0130	1.3820	0.71
		14	15.5048	17.3588	16.8615	16.8458	1.8540	0.4973	26.82	0.0157	1.3410	0.85
		15	10.3159	12.2253	11.7065	11.6890	1.9094	0.5188	27.17	0.0175	1.3731	0.92
		16	13.4096	15.3839	14.8466	14.8290	1.9743	0.5373	27.21	0.0176	1.4194	0.89
		17	13.3471	15.1969	14.7274	14.7143	1.8498	0.4695	25.38	0.0131	1.3672	0.71
		18	14.0388	15.9605	15.3882	15.3705	1.9217	0.5723	29.78	0.0177	1.3317	0.92
		19	13.4560	15.3667	14.8853	14.8702	1.9107	0.4814	25.19	0.0151	1.4142	0.79
		20	13.3144	15.2772	14.6829	14.6622	1.9628	0.5943	30.28	0.0207	1.3478	1.05
		Average							1.9088	0.5226	27.34	0.0173

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยไฮระเหยเบนซิน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ถ้วยเปล่า(กรัม)	ถ้วย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
Ceramic ring	1	21	12.8008	14.6984	14.2038	14.1872	1.8976	0.4946	26.06	0.0166	1.3864	0.87
		22	13.7026	15.5543	15.1062	15.0925	1.8517	0.4481	24.20	0.0137	1.3899	0.74
		23	14.0858	15.9375	15.4039	15.3843	1.8517	0.5336	28.82	0.0196	1.2985	1.06
		24	14.2662	16.1787	15.6426	15.6237	1.9125	0.5361	28.03	0.0189	1.3575	0.99
		25	14.5930	16.4561	16.0005	15.9867	1.8631	0.4556	24.45	0.0138	1.3937	0.74
		26	14.5930	15.9789	15.5071	15.4923	1.3859	0.4718	34.04	0.0148	0.8993	1.07
		27	15.0513	16.9289	16.4166	16.4003	1.8776	0.5123	27.28	0.0163	1.3490	0.87
		28	14.0295	15.8929	15.4187	15.4057	1.8634	0.4742	25.45	0.0130	1.3762	0.70
		29	15.4938	17.4443	16.8795	16.8591	1.9505	0.5648	28.96	0.0204	1.3653	1.05
		30	14.2854	16.1524	15.6274	15.6083	1.8670	0.5250	28.12	0.0191	1.3229	1.02
		Average							1.8321	0.5016	27.54	0.0166

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยไฮอะเชอเบนซิน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถ้าย (กรัม)	นน.ถ้ายเปล่า(กรัม)	ถ้าย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
KAS	3	41	13.4712	13.9249	13.7499	13.7478	0.4537	0.1750	38.57	0.0021	0.2766	0.46
		42	14.4759	14.9377	14.7505	14.7480	0.4618	0.1872	40.54	0.0025	0.2721	0.54
		43	12.9743	13.4327	13.2551	13.2510	0.4584	0.1776	38.74	0.0041	0.2767	0.89
		44	13.8425	14.2970	14.1036	14.1009	0.4545	0.1934	42.55	0.0027	0.2584	0.59
		45	13.4441	13.8688	13.7014	13.6972	0.4247	0.1674	39.42	0.0042	0.2531	0.99
		46	14.1215	14.5628	14.3885	14.3858	0.4413	0.1743	39.50	0.0027	0.2643	0.61
		47	13.6977	14.1553	13.9753	13.9703	0.4576	0.1800	39.34	0.0050	0.2726	1.09
		48	14.0201	14.4684	14.2929	14.2886	0.4483	0.1755	39.15	0.0043	0.2685	0.96
		49	13.7311	14.1849	14.0053	14.0015	0.4538	0.1796	39.58	0.0038	0.2704	0.84
		50	13.6449	14.0972	13.9153	13.9105	0.4523	0.1819	40.22	0.0048	0.2656	1.06
		Average							0.4506	0.1792	39.76	0.0036

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยไฮอะเทคเบนซิน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ถ้วยเปล่า(กรัม)	ถ้วย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
KAS	2	31	13.8411	14.2962	14.1158	14.1103	0.4551	0.1804	39.64	0.0055	0.2692	1.21
		32	14.3504	14.8218	14.6418	14.6371	0.4714	0.1800	38.18	0.0047	0.2867	1.00
		33	12.9371	13.3880	13.2141	13.2086	0.4509	0.1739	38.57	0.0055	0.2715	1.22
		34	13.3865	13.8398	13.6676	13.6621	0.4533	0.1722	37.99	0.0055	0.2756	1.21
		35	14.5100	14.9518	14.7825	14.7776	0.4418	0.1693	38.32	0.0049	0.2676	1.11
		36	13.4541	13.9176	13.7341	13.7292	0.4635	0.1835	39.59	0.0049	0.2751	1.06
		37	13.8252	14.2851	14.1099	14.1063	0.4599	0.1752	38.10	0.0036	0.2811	0.78
		38	14.3519	14.8175	14.6359	14.6313	0.4656	0.1816	39.00	0.0046	0.2794	0.99
		39	12.7740	13.2351	13.0549	13.0507	0.4611	0.1802	39.08	0.0042	0.2767	0.91
		40	14.0287	14.4869	14.3077	14.3024	0.4582	0.1792	39.11	0.0053	0.2737	1.16
		Average							0.4581	0.1776	38.76	0.0049

ตารางที่ ข.12 ปริมาณความชื้นและเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางหลังการบำบัด (ต่อ)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หลังการบำบัดด้วยไฮอะเทคเบนซิน (หลังจากที่บำบัดใน Load สุดท้ายแล้ว)												
Type of Media	ชั้นกรองที่ (นับจากล่าง)	นน.ถัวย (กรัม)	นน.ถัวยเปล่า(กรัม)	ถัวย+ตัวกลาง (กรัม)	หลังอบ (กรัม)	หลังเผา (กรัม)	นน.ตัวกลางเปียก(กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)	Water content(%)	ปริมาณเชื้อ (กรัม)	นน.ตัวกลางแห้ง(กรัม)	% เชื้อบนตัวกลาง
KAS	1	51	13.5798	14.0292	13.8530	13.8472	0.4494	0.1762	39.21	0.0058	0.2674	1.29
		52	13.5837	14.0024	13.8240	13.8176	0.4187	0.1784	42.61	0.0064	0.2339	1.53
		53	11.7669	12.2570	12.0741	12.0678	0.4901	0.1829	37.32	0.0063	0.3009	1.29
		54	12.0356	12.4979	12.3133	12.3077	0.4623	0.1846	39.93	0.0056	0.2721	1.21
		55	11.8435	12.3092	12.1337	12.1284	0.4657	0.1755	37.69	0.0053	0.2849	1.14
		56	10.2913	10.7309	10.5582	10.5522	0.4396	0.1727	39.29	0.0060	0.2609	1.36
		57	12.9116	13.3720	13.1880	13.1817	0.4604	0.1840	39.97	0.0063	0.2701	1.37
		58	11.9869	12.4296	12.2592	12.2540	0.4427	0.1704	38.49	0.0052	0.2671	1.17
		59	13.0030	13.4710	13.2872	13.2812	0.4680	0.1838	39.27	0.0060	0.2782	1.28
		60	14.2496	14.7026	14.5267	14.5210	0.4530	0.1759	38.83	0.0057	0.2714	1.26
		Average							0.4550	0.1784	39.26	0.0059

ตารางที่ ข.13 ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยง่าย

วันที่	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง (mL.)	หมายเลขกระดวย กรอง	น้ำหนักกระดวย กรอง(กรัม)	น้ำหนักกระดวยกรองอบแล้ว (กรัม)	น้ำหนักกระดวยกรองเผาแล้ว (กรัม)	SS (mg/l)	VSS(mg/l)
24/8/56	10	S-6	0.0925	0.1321	0.1080	3960	2410
	10	P-1	0.0930	0.1301	0.1068	3710	2330
26/8/56	5	18	0.0950	0.1175	0.1026	4500	2980
	5	9	0.0949	0.1194	0.1043	4900	3020
29/8/56	5	14	0.0902	0.1181	0.1000	5580	3620
	5	10	0.0930	0.1197	0.1017	5340	3600
30/8/56	5	22	0.0950	0.1232	0.1036	5640	3920
	5	11	0.0923	0.1209	0.1009	5720	4000
2/9/1956	5	B-7	0.0879	0.1224	0.0967	6900	5140
	5	G-6	0.0877	0.1226	0.0966	6980	5200
6/9/1956	5	7	0.0878	0.1328	0.0976	9000	7040
	5	5	0.0875	0.1331	0.0979	9120	7040
9/9/1956	5	64	0.0884	0.1442	0.0976	11160	9320
	5	81	0.0876	0.1445	0.0978	11380	9340
11/9/1956	5	81	0.0873	0.1513	0.097	12800	10860
	5	64	0.0875	0.1511	0.0969	12720	10840

ตารางที่ ข.14 สัดส่วน VSS/SS

วันที่ทดลอง	วันที่	SS Avg.(mg/l)	VSS Avg.(mg/l)	VSS/SS
24/8/56	1	3835	2370	0.617992177
26/8/56	3	4700	3000	0.638297872
29/8/56	6	5460	3610	0.661172161
30/8/56	7	5680	3960	0.697183099
2/9/1956	10	6940	5170	0.744956772
6/9/1956	14	9060	7040	0.777041943
9/9/1956	17	11270	9330	0.827861579
11/9/1956	19	12760	10850	0.85031348

ตารางที่ ข.15 ค่าความพรุนและพื้นที่ผิวของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด (BET)

Type	Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (cc/g)	Pore Diameter (Å)	Micro Pore Volume (cc/g)	Mesopore Volume + Macropore Volume (cc/g)
Ceramic ring	1.23	0.0029	93.00	0.00019	0.0027
Kaolinite Alumina Silica	14.22	0.1582	444.90	0.00580	0.1524

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
26/8/56	177	blank	0.0	10.0	6.00	6.00		
	185	blank	0.0	10.0	6.00			
	178	SCOD	3.0	7.0	3.85	4.08	496.77	
	182	SCOD	3.0	7.0	4.30			
	186	FOOD	0.5	9.5	3.20	3.15	4412.90	
	179	FOOD	0.5	9.5	3.10			
		Std.1			6.20	6.20		
		Std.2			6.20			
		M of FAS		0.097				

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
27/8/56	A-2	blank	0.0	10.0	6.00	6.00		
	179	blank	0.0	10.0	6.00			
	185	SCOD	2.0	8.0	5.00	4.90	425.81	
	182	SCOD	4.0	6.0	5.90	3.75	435.48	
	181	SCOD	8.0	2.0	5.45	1.55	430.65	
	180	SCOD	10.0	0.0	0.45	0.45	429.68	
	183	SCOD	10.0	0.0	0.45			
	184	Food	0.1		5.45	5.43	4451.61	
	460	Food	0.1		5.40			
		Std.1			6.20	6.20		
		Std.2			6.20			
	M of FAS		0.097					

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
29/8/56	A-1	blank	0.0	10.0	6.35	6.33	301.54	
	A-2	blank	0.0	10.0	6.30			
	187	SCOD	3.0	7.0	5.10	5.10		
	184	SCOD	3.0	7.0	5.10	6.50		
		Std.1			6.50			
		Std.2			6.50			
		M of FAS		0.092				
30/8/56	A-1	blank	0.0	10.0	6.40	6.35	254.55	
	A-2	blank	0.0	10.0	6.30			
	187	SCOD	3.0	7.0	5.30	5.30		
	184	SCOD	3.0	7.0	5.30	6.60		
		Std.1			6.60			
		Std.2			6.60			
		M of FAS		0.091				

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark	
2/9/1956	177	blank	0.0	10.0	6.30	6.30		COD Tap water check	
	178	blank	0.0	10.0	6.30				
	179	SCOD	3.0	7.0	5.60	5.60			169.70
	180	SCOD	3.0	7.0	5.60				
	181	FOOD	0.5	9.5	3.40	3.45			4145.45
	186	FOOD	0.5	9.5	3.50				
	467	Tapwater	5.0	5.0	6.30	6.30			0.00
	460	Tapwater	5.0	5.0	6.30				
		Std.1			6.60	6.60			
		Std.2			6.60				
	M of FAS		0.091						

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
4/9/1956 increase loading	A-1	blank	0.0	10.0	6.40	6.38	150.82	COD food check
	A-2	blank	0.0	10.0	6.35			
	177	SCOD	3.0	7.0	5.80	5.80		
	178	SCOD	3.0	7.0	5.80			
	179	FOOD	0.3	9.7	3.10	3.13	8524.59	
	180	FOOD	0.3	9.7	3.15			
		Std.1			6.10	6.10		
		Std.2			6.10			
		M of FAS		0.098				

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
5/9/1956	184	blank	0.0	10.0	6.30	6.30	419.35	
	186	blank	0.0	10.0	6.30			
	187	SCOD	3.0	7.0	4.70	4.68		
	181	SCOD	3.0	7.0	4.65			
		Std.1			6.20	6.20		
		Std.2			6.20			
		M of FAS	0.097					
9/9/1956	A-1	blank	0.0	10.0	6.55	6.55	381.54	
	A-2	blank	0.0	10.0	6.55			
	466	SCOD	3.0	7.0	5.00	5.00		
	460	SCOD	3.0	7.0	5.00			
		Std.1			6.50	6.50		
		Std.2			6.50			
		M of FAS	0.092					

ตารางที่ ข.16 ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยงจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	หมายเลข หลอด	Type	ml.sample	ml.distill water	ml.titrant	Avg.ml.titrant	COD (mg/l)	Remark
12/9/1956	176	blank	0.0	10.0	6.55	6.58	251.43	
	182	blank	0.0	10.0	6.60			
	183	SCOD	3.0	7.0	5.45	5.48		
	185	SCOD	3.0	7.0	5.50			
		Std.1			7.00	7.00		
		Std.2			7.00			
		M of FAS		0.086				

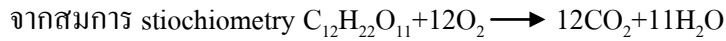
ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

- การเตรียมสารอาหารในการเลี้ยงจุลินทรีย์ (COD and Nitrogen in nutrient)

ตัวอย่าง ปริมาณการใช้น้ำตาลทราย (Sucrose)

หากต้องการค่า COD เท่ากับ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร



มวลโมเลกุลของน้ำตาลทราย $C_{12}H_{22}O_{11} = (12 \times 12) + (1 \times 22) + (16 \times 11) = 342$ กรัมต่อโมล

$$COD = (O_2) / (C_{12}H_{22}O_{11}) = (12 \times 32) / (342) = 1.12 \text{ กรัมออกซิเจนต่อกรัมซูโครส}$$

∴ หากต้องการ COD = 2000 mg ต้องใช้น้ำตาลซูโครส 1786 มิลลิกรัม หรือ 1.79 กรัม

ใช้ซูโครส 1.79 กรัมผสมลงในน้ำ 1 ลิตร จะได้ COD = 2000 mg/l

หากต้องการสัดส่วน COD:N = 20:1 (2000:100)



$$N = (14) / (53.5) = 0.26 \text{ กรัมไนโตรเจนต่อกรัมแอมโมเนียมคลอไรด์}$$

∴ หากต้องการ N = 100 mg ต้องใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ 382 มิลลิกรัม หรือ 0.38 กรัม

- การคำนวณค่า SS/VSS (MLSS/MLVSS)

$$SS = ((\text{นน.กระดาศกรองหลังอบ } 105^\circ\text{C} - \text{นน.กระดาศกรอง}) / \text{ปริมาตรตัวอย่าง}) \times 10^6$$

$$VSS = ((\text{นน.กระดาศกรองหลังเผา } 550^\circ\text{C} - \text{นน.กระดาศกรองหลังอบ } 105^\circ\text{C}) / \text{ปริมาตรตัวอย่าง}) \times 10^6$$

ตัวอย่าง นน.กระดาศกรองเปล่า 0.0950 กรัม, นน.กระดาศกรองหลังการอบ 0.1175 กรัม และ นน.กระดาศกรองหลังการเผา 0.1026 กรัม ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร

$$SS = ((0.1175 - 0.0950) / 5) \times 10^6 = 4500 \text{ mg/l}$$

$$VSS = ((0.1026 - 0.1175) / 5) \times 10^6 = 2980 \text{ mg/l}$$

- การหาปริมาตรชั้นกรอง (Volume of Biofilter)

$$V_f = \pi r^2 h$$

ตัวอย่าง ปฏิกรณ์ 1 ชั้น สูง 22 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร

$$V_f = \pi \times (0.045^2) \times 0.22 = 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ หรือเท่ากับ } 1.4 \text{ ลิตร}$$

- ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency : RE)

$$RE = ((C_{in} - C_{out}) / C_{in}) \times 100$$

ตัวอย่าง ความเข้มข้นขาเข้าปฏิกรณ์ (inlet) = 50 ppm

ความเข้มข้นขาออกปฏิกรณ์ (outlet) = 5 ppm

$$RE = ((50 - 5) / 50) \times 100 = 90\%$$

- อัตราการบรรทุกต่อปริมาตร (Volumetric Loading Rate)

$$IL = (Q \times C_{in}) / V_f$$

ตัวอย่าง ความเข้มข้นเบนซีน 20 ppm หรือ 63.8 mg/m³

อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1 L/min หรือ 0.06 m³/h

ปริมาตรของตัวกลางในปฏิกรณ์เท่ากับ 1.8 L หรือ 0.0018 m³

$$\text{ดังนั้น } IL = (Q \times C_{in}) / V_f = (0.06 \times 63.8) / 0.0018 = 2126.67 \text{ mg/m}^3 \text{ h} = 2.13 \text{ g/m}^3 \text{ -h}$$

- **ระยะเวลาที่กักพัก (Empty Bed Retention time : EBRT)**

$$EBRT = V_f / Q$$

โดยที่ EBRT = Empty Bed Retention time

V_f = ปริมาตรของตัวกลาง

Q = อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านตัวกลาง

ตัวอย่าง EBRT = 1.8 ลิตร/ลิตรต่อนาที

$$EBRT = 1.8 \text{ นาที}$$

- **การแปลงหน่วย ppm และ mg/m^3 (Conversion factor) (only gaseous form)**

In air 25°C

$$\text{mg/m}^3 = (\text{ppm}) \times (\text{molecular weight of the compound}) / (24.45)$$

ตัวอย่าง $\text{mg/m}^3 = (1) \times (78) / (24.45) = 3.19 \text{ mg/m}^3$

หรือ เบนซีน 1 ppm = 3.19 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายเอกพันธุ์ วรรณิช
วัน เดือน ปีเกิด	24 ธันวาคม 2532
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนประจักษ์พระนครศรีอยุธยา พ.ศ. 2547
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ลพบุรี พ.ศ. 2550
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2554
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	เอกพันธุ์ วรรณิช และ ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล, 2556, “การบำบัดไอระเหยเบนซินด้วยกระบวนการแวกคัม อัลตราไวโอเลต”, การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13, หน้า 183-184.