การกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม

นายเอกชัย เลิศผดุงวิทย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6788-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF XYLENE BY COMPOSITE MEDIA BIOFILTER

Mr. Ekachai Lertphadungwit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2004
ISBN 974-17-6788-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม
โดย	นายเอกชัย เลิศผดุงวิทย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกชัย เลิศผดุงวิทย์ : การกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม (REMOVAL OF XYLENE BY COMPOSITE MEDIA BIOFILTER) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ , 141 หน้า. ISBN 974-17-6788-9.

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสมโดยทำการทดลอง 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทดลองหาอัตราส่วนของตัวกลางผสมที่เหมาะสมของดินผสมใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติก โดยแปรผันอัตราส่วนผสมดังนี้ 80 :20 60:40 40:60 และ 20:80 โดยปริมาตรพร้อมทั้งเติมเปลือกหอยและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเพื่อเป็นบัฟเฟอร์และเป็นแหล่งจุลินทรีย์ให้กับระบบ โดยควบคุมระดับความชื้นภายในตัวกลางที่ 45 - 60% หลังจากนั้นจะใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองแรกในการศึกษาความสามารถสูงสุดในการกำจัดไซลีน ในการทดลองที่สองโดยแปรผันเวลาเก็บกักที่ 36 60 และ 90 วินาที และใช้ความเข้มข้นของไซลีนในช่วง 50 - 2,000 ppm

ผลการทดลองแรกพบว่าอัตราส่วนผสมของดินผสมใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติกที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนเท่ากับ 96% ความดันลดที่เกิดขึ้นมีค่าระหว่าง 3 - 10 มม.น้ำ ในส่วนของการทดลองที่สองพบว่าความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดเท่ากับ 70 142 และ 194 กรัม/ลบ.ม.- ชม. ที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าหากเดินระบบกรองชีวภาพที่ใช้กำจัดไซลีนสูงกว่าค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการกำจัดไซลีนลดลงจากเดิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2547

4470670421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : BIOFILTER / XYLENE / COMPOSITE MEDIA / SOIL MIXED WITH RAIN TREE LEAVES / PLASTIC WASTE

EKACHAI LERTPHADUNGWIT : REMOVAL OF XYLENE BY COMPOSITE MEDIA BIOFILTER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.WONGPUN LIMPASENI, 141 pp. ISBN 974-17-6788-9.

The objective of this research was to determine the removal of xylene by a composite media biofilter. The study involved two stages. The first stage was to optimize the composition ratio between soil mixed with rain tree leaves and cow manure / plastic waste by varying the proportion at 80:20, 60:40, 40:60 and 20:80 by volume. Crushed sea shell was added to serve as pH buffer and activated sludge was used as source of microbes. The media moisture was controlled at 45 - 60%. The resulting optimum proportion was used in the second stage to examine the maximum elimination capacity of xylene. Three various empty bed retention time, i.e. 36, 60 and 90 seconds, were tested for xylene inlet concentration ranging from 50 to 2,000 ppm.

The first experiment showed that a blend of soil/ plastic waste = 60:40 was superior with respect to xylene removal efficiency of 96%, the pressure drop ranging from 3-10 mm. of water The second experiment revealed that the maximum elimination capacity of xylene obtained were 70, 142 and 194 $gm^{-3}h^{-1}$ for empty bed retention time of 36, 60 and 90 seconds, respectively. Moreover, when the xylene removal biofilter operates at higher than the maximum elimination capacity conditions, the elimination capacity decreases.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Engineering Student's signature……………………………………

Field of study Environmental Engineering Advisor's signature……………………………………

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางรวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความรู้ และการอบรมแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณครูอนันต์ วีระณรงค์ และครูจันทรวรรณ ตันเจริญ รวมถึงธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณกองทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณครูและอาจารย์ที่ผ่านมาทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดา น้าชายและน้องชาย ของผู้วิจัยซึ่งเข้าใจสนับสนุนเงินทุนและให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฏ

สารบัญรูป.....ฏ

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....ฒ

บทที่

1. บทนำ.....1
   1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
   1.2 วัตถุประสงค์.....2
   1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....3
   1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
2. ทฤษฎีและการทบทวนเอกสาร.....4
   2.1 คำจำกัดความของ VOCs และไซลีน.....4
   2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดกลิ่นและ VOCs.....6
      2.2.1 การเผาด้วยความร้อน (Thermal Incineration).....6
      2.2.2 การออกซิเดชั่นด้วยแสง Ultraviolet (UV-Oxidation).....7
      2.2.3 การดูดซับ (Adsorption).....7
      2.2.4 การดูดซึม (Absorption).....8
      2.2.5 การเผาด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incineration).....9
      2.2.6 การแยกด้วยเมมเบรน.....9
      2.2.7 การควบแน่น (Condensation).....10
   2.3 ข้อเปรียบเทียบเทคโนโลยีการควบคุม.....10
   2.4 ลักษณะของการกรองชีวภาพ.....12
   2.5 กลไกการทำงานของการกรองชีวภาพ.....15
      2.5.1 การเคลื่อนที่ของก๊าซ (Gas transfer).....16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.5.2 อัตราการถ่ายเท (Transfer rates) 16
2.5.3 สถานะน้ำ 19
2.5.4 สารมลพิษที่ถูกดูดซับ (Adsorbed contaminants) 20
2.5.5 การย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษ 21
2.6 จลนศาสตร์ (kinetics) 23
2.6.1 สารที่เกิดขึ้น 25
2.6.2 ความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat generation) 27
2.7 หลักเกณฑ์ในการเลือกตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพที่เหมาะสม 29
2.7.1 ปริมาณสารอาหารอนินทรีย์ 29
2.7.2 ปริมาณสารอินทรีย์ 29
2.7.3 สารเติมแต่งทางเคมีและสารเฉื่อยปฏิกิริยา 29
2.7.4 ปริมาณน้ำ 29
2.7.5 พีเอช 30
2.7.6 คุณลักษณะการดูดซับ ความพรุน 30
2.7.7 การยึดเกาะของแบคทีเรีย 30
2.7.8 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ 31
2.7.9 ปัญหาเรื่องกลิ่นจากตัวกลางที่ใช้บรรจุ 31
2.7.10 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลางและอายุการใช้งาน 31
2.7.11 การกำจัดตัวกลางที่หมดอายุการใช้งาน 31
2.8 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ 32
2.8.1 ตัวกลางดิน (Soil Bed) 32
2.8.2 ตัวกลางวัสดุมวลรวม 32
2.8.3 ตัวกลางสารอนินทรีย์ และตัวกลางสังเคราะห์ 32
2.9 จุลชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพ 34
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
2.11 สรุปผลการทบทวนเอกสาร 38

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3. แผนการวิจัยและการดำเนินการทดลอง....................40
3.1 แผนการวิจัย....................40
3.1.1 การทดลองหาอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสม....................40
3.1.2 การทดลองศึกษาเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและความสามารถสูงสุด ในการกำจัดไซลีน....................41
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง....................42
3.3 ขั้นตอนการทดลอง....................45
3.3.1 การเตรียมตัวกลางผสม....................45
3.3.2 การทดสอบของตัวกลางผสม....................48
3.3.3 การบรรจุตัวกลางลงในเครื่องกรองชีวภาพ....................48
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง....................49
3.4.1 การเก็บตัวอย่าง....................49
3.4.2 การวิเคราะห์....................49
3.5 สมการที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพและความสามารถของระบบ....................50
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล....................52
4.1 คุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกใช้....................52
4.2 ผลการทดลองอัตราส่วนของตัวกลางผสมที่เหมาะสม....................55
4.3 ผลการทดลองเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและความสามารถในการกำจัด ก๊าซไซลีนสูงสุด....................
4.3.1 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลาย ทางชีวภาพ....................59
4.3.2 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที....................62
4.3.3 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที....................64
4.3.4 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที....................66
4.3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดและจำนวนวันที่เดินระบบ....................69
4.3.6 ค่าความดันลดที่เกิดขึ้น....................71
4.3.7ค่าความเป็นกรด - ด่าง ภายในชั้นตัวกลาง....................71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.3.8 อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง 72

4.3.9 การทรุดตัวของตัวกลาง 72

4.3.10 ปริมาณอินทรียวัตถุ 74

4.4 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที 75

4.5 ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบซึ่งเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที สามารถกำจัดได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐาน 77

4.6 อันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองชีวภาพ 78

4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา 79

5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 81

5.3 สรุปผลการทดลอง 81

5.4 ข้อเสนอแนะ 82

รายการอ้างอิง 84

บรรณานุกรม 86

ภาคผนวก 88

ภาคผนวก ก ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง 89

ภาคผนวก ข ตัวอย่างรายการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 92

ภาคผนวก ค ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบตั้งแต่นาทีที่ 1 – 180 95

ภาคผนวก ง ผลการทดลองจากอัตราส่วนดินใบก้ามปู/ขยะที่ 20:80 60:40 40:60 และ 80:20 99

ภาคผนวก จ ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 60 90 วินาที และการทดลองซ้ำ 108

ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลาง 129

ภาคผนวก ช เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของไซลีน 137

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 141

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ประมาณการการระบายมลสาร VOC สำหรับปี 1997 2
2.1 ค่ามาตรฐานสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย 5
2.2 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดกลิ่นและ VOCs ที่เกิดขึ้น 14
2.3 คุณสมบัติของตัวกลาง 33
2.4 คุณสมบัติของพลาสติกชนิด Polybutylene Terephthalate 34
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 42
3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบตัวกลางผสมแต่ละชนิด 48
3.3 อัตราส่วนตัวกลางผสมของแต่ละเครื่องกรองชีวภาพ 48
4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ของตัวกลางแต่ละชนิด 52
4.2 ปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีที่พบในดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก 52
4.3 สรุปค่าประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดที่ใช้เป็นเกณฑ์เลือกอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม 58
4.4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณอินทรียวัตถุ 74
4.5 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด (100 ppm) 78
4.6 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบซึ่งเครื่องกรองชีวภาพกำกัดได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 85% 78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ความเข้มข้นและอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับแต่ละวิธีที่ใช้กำจัด VOCs......12
2.2 ภาพเครื่องกรองชีวภาพ......14
2.3 กลไกการทำงานของระบบกรองชีวภาพ......15
2.4 แบบจำลองการถ่ายเทของก๊าซ......17
2.5 การไหลของอากาศในเครื่องกรองชีวภาพ......18
2.6 แบบจำลองทางความคิดรูปแบบต่างๆ ของมวลจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ......23
2.7 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารในเครื่องกรองชีวภาพ......26
3.1 เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ......43
3.2 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซไซลีน......44
3.3 คอลัมน์อคริลิคที่ใช้ในการทดลอง......45
3.4 ดินใบก้ามปู......46
3.5 ปุ๋ยคอก......46
3.6 ขยะพลาสติก......47
3.7 ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน......47
4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 20:80 ที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน 100 ppm......55
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 40:60 ที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน 100 ppm......55
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 60:40 ที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน 100 ppm......56
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 80:20 ที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน 100 ppm......56
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนที่อัตราส่วนการผสมตัวกลางแต่ละชนิด......58
4.6 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 1......59

รูปที่ หน้า

4.7 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 2 60
4.8 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 3 60
4.9 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 4 61
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที....................62
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที....................63
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที....................63
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที....................64
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที....................65
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที....................65
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที....................66
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที....................67
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที....................67
4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที 68
4.20 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที 68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิภาพการกำจัด
ของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 วินาที 69
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิภาพการกำจัด
ของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 60 วินาที 70
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิภาพการกำจัด
ของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 90 วินาที 70
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับ
เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 วินาที 72
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับ
เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 60 วินาที 73
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับ
เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 90 วินาที 73
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและเวลาเก็บกักเมื่อความเข้มข้น
ของก๊าซไซลีนคงที่เท่ากับ 300 ppm 75
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นของก๊าซไซลีน
ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที 76
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นของก๊าซไซลีน
ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที 76
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นของก๊าซไซลีน
ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที 77

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

C_{ads}	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับ
C_G	ความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศ
C_L	ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ
C_L^*	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่สภาวะสมดุล
C_{in}	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ
C_{out}	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ
C_{max}	ค่าความเข้มข้นสูงสุดเมื่อพื้นที่ทั้งหมดถูกใช้งาน
$C\ mol_c\ kg^{-1}$	Centi mole cation per kilogram
H	ค่าคงที่จาก Henry 's constant
K_f	ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich
K_i	inhibition constant
K_L	ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir
K_m	half-saturation constant in Michaelis - Menten
K_{max}	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด
K_s	half - saturation constant
K_t	ค่าคงที่ของอัตราการถ่ายเทต่อหน่วยเวลา
n	ค่าคงที่
Q	อัตราการไหลของอากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

V_f	ปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง
X	ความหนาแน่นของมวลจุลินทรีย์
μ	อัตราการเติบโตจำเพาะ

คำย่อ

CEC	Cation Exchange Capacity
EBRT	Empty Bed Retention Time
EC	Elimination Capacity
K	Potassium
Max	Maximum
N	Nitrogen
OC	Organic Carbon
OM	Organic Matter
P	Phosphorus
RE	Removal Efficiency
VOCs	Volatile Organic Compounds

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) ซึ่งถูกใช้เป็นวัตถุดิบหรือเป็นสารประกอบที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้ง VOCs ที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในครัวเรือน การจราจร ยานพาหนะ การขนส่งทั้งทางบก ทางเรือ ทางอากาศและอื่นๆเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุให้ปริมาณของ VOCs เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 1.1 จึงเป็นเหตุให้ต้องมีการใช้มาตรการหรือวิธีการบำบัด VOCs ปัจจุบันในประเทศไทยอุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้ตัวทำละลาย (Solvent) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นดังเช่นประเทศไทยมีการนำเข้าไซลีนเพิ่มขึ้นจาก 5,136,835 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2521 เป็น 22,050,044 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2547 กรมศุลกากร (2521-2547) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้สารไซลีน ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น หากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมหรือไม่มีระบบบำบัดมลพิษอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงพออาจทำให้สารไซลีนแพร่กระจายสู่บรรยากาศซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่ปฏิบัติงานหรือบุคคลอื่นรอบข้าง รวมไปถึงปัญหาระดับมหภาค เช่น ภาวะหมอกควัน (Smog) และสภาวะโลกร้อน

ระบบกรองชีวภาพ(Biofilter) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดมลพิษอากาศที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ซึ่งในต่างประเทศได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ ไม่มีสารมลพิษชนิดอื่นเกิดขึ้นตามมา การควบคุมดูแลไม่ต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความรู้สูงมากนักและมีประสิทธิภาพสูงเมื่อดำเนินระบบได้อย่างถูกต้องเหมาะสม แต่ในการดำเนินงานระบบกรองชีวภาพที่ผ่านมาประสบปัญหาในเรื่องความดันลดของระบบ การอัดตัวของตัวกลาง (Compaction) การอุดตันเนื่องจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การควบคุมความชื้นของตัวกลางภายในระบบรวมทั้งข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดของระบบกรองชีวภาพสำหรับประเทศไทยยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย การวิจัยนี้จึงเริ่มขึ้นโดยนำขยะพลาสติก (plastic waste) มาผสมรวมกับดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก เปลือกหอย และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของขยะชุมชน พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ว จะมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีอยู่ในปริมาณมากจึงเป็นเหตุผลสำคัญในการนำขยะพลาสติก มาประยุกต์เป็นตัวกลางที่ใช้เพิ่มความพรุน เพื่อลดการอัดตัวของตัวกลางจนเป็นเหตุทำให้เกิดสภาพไร้อากาศภายในชั้นตัวกลาง ส่งผลทำให้อากาศ

ภายในชั้นตัวกลางกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และลดความดันลดที่เกิดขึ้นภายในระบบรวมถึงเป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการช่วยลดปริมาณขยะที่ต้องเก็บขน เพื่อนำไปกำจัดในแต่ละวันต่อไป โดยใช้เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัด VOCs ชนิดไซลีน ความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด(Maximum Elimination Capacity) เวลาเก็บกัก(Empty Bed Retention Time) ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงปัจจัยและพารามิเตอร์ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและวิจัยนี้ไปประยุกต์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ในงานจริงได้

ตารางที่ 1.1 ประมาณการระบายสาร VOC สำหรับปี 1997

ประเภทแหล่งกำเนิด	ปริมาณระบาย (พันตัน/ปี)	เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด
การเผาไหม้เชื้อเพลิง (ไม้) ในบ้านเรือน	527	2.74
สารเคมีและกระบวนการผลิตจากแหล่งเดียวกัน	461	2.40
ปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง	538	2.80
กระบวนการอุตสาหกรรมอื่น	458	2.38
การใช้ตัวทำละลาย	6,483	33.74
การเก็บรักษาและการขนส่ง VOC	1,377	7.17
การกำจัดของเสียและการนำกลับมาใช้ใหม่	449	2.34
ยานพาหนะ	7,660	39.86
ไฟไหม้ป่าและการเผาไหม้เศษไม้	767	3.99
แหล่งอื่นๆ	496	2.99
รวม	19,216	100.00

ที่มา : Hunter, P.and Oyama, S.T. (2000)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ควบคุมการดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพ
2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของขยะพลาสติกที่ใช้ผสมรวมกับตัวกลางชนิดอื่น
3. ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการในการกำจัดไซลีน
4. ศึกษาความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด

5. ศึกษาเวลาเก็บกักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซลีน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดโดยแปรผันเวลาเก็บกักที่ 36 60 90 วินาที และแปรผันความเข้มข้นของไซลีนในช่วง 50 - 2,000 ppm โดยใช้เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

2. สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไซลีน

3. ตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ดินผสมใบก้ามปู ปุ๋ยคอก เปลือกหอย ขยะพลาสติก และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย

4. ศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกใช้ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด - ด่าง ความชื้นภายในของตัวกลาง ค่าความหนาแน่น ค่าความพรุนของตัวกลางและปริมาณธาตุอาหารของตัวกลางเฉพาะดินผสมใบก้ามปู และปุ๋ยคอก

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองถึงอัตราส่วนของดินผสมใบก้ามปู และปุ๋ยคอกกับขยะพลาสติกที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการกำจัดไซลีน ความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด เวลาเก็บกักและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดำเนินงานระบบกรองชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. ทราบถึงวิธีในการดำเนินงานและการควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเครื่องกรองชีวภาพเพื่อควบคุมและดำเนินระบบได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

3. นำวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมายภายในประเทศมาใช้ประโยชน์เป็นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพ

4. เพื่อเป็นการเผยแพร่ระบบกรองชีวภาพให้เป็นที่รู้จักแพร่หลายเพิ่มมากขึ้นนอกเหนือจากวิธีการบำบัดชนิดอื่น

5. เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดไซลีน

6. เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อนำระบบกรองชีวภาพไปประยุกต์กับ VOCs ชนิดอื่น

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนเอกสาร

2.1 คำจำกัดความของ VOCs และไซลีน

Hunter และ Oyama (2000) ให้คำจำกัดความว่า VOCs คือ ของเหลวหรือของแข็งอินทรีย์ซึ่งมีความดันไอที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 0.01 psia (0.0007 atm 70 Pa) และจุดเดือดที่ความดันบรรยากาศสูงจนถึง 260 °C

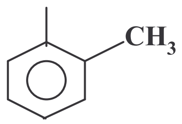
US.EPA ให้คำจำกัดความว่า VOCs คือ สารประกอบของคาร์บอนทุกชนิดซึ่งมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดปฏิกิริยา Photochemical คำจำกัดความนี้ไม่รวมถึงคาร์บอนบริสุทธิ์ คาร์บอเนตคาร์บอน สารประกอบคาร์บอนของแข็งที่มีกลุ่มธาตุที่เป็นโลหะ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์มีพันธะร่วมอยู่ด้วยกับคาร์บอน

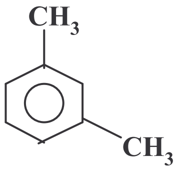
US.EPA (2003) อ้างถึงใน สุโรชา ไซลีนเป็นแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) ในทางการค้าไซลีนจะมีส่วนผสมของไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ คือมี เมตา-ไซลีน (m - Xylene) 40 - 65% พารา-ไซลีน (p - Xylene) และ ออโธ-ไซลีน (o - Xylene) และเอธิลเบนซิน (Ethyl Benzene) อย่างละประมาณ 20% EPA ได้จัดไซลีนอยู่ใน Group D ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มที่เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ และจัดอยู่ใน Class 3 คือเป็นของเหลวไวไฟ ตามระบบการจำแนกสารของ UN (United Nations Classification System)

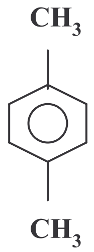
สูตรโมเลกุล	C_8H_{10}
น้ำหนักโมเลกุล	106.17
CAS Registry Number (Mixed Xylene)	1330 - 20 - 7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สูตรโครงสร้าง







ชื่อสารเคมี

o - Xylene	m - Xylene	p - Xylene
ortho - Xylene	meta - Xylene	para - Xylene
1,2 - Dimethylbenzene	1,3 - Dimethylbenzene	1,4 -Dimethylbenzene

CAS Registry Number

95-47-6	108-38-3	106-42-3

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย

ประเทศ	TWA		MAC		STEL	
	ppm	mg/m^3	ppm	mg/m^3	ppm	mg/m^3
บราซิล	78	340	-	-	-	-
สหราชอาณาจักร	100	435	-	-	150	650
ญี่ปุ่น	100	440	-	-	-	-
สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน	-	-	200	870	-	-
สวีเดน	80	350	-	-	100	450
สหรัฐอเมริกา	100	435	-	-	150	655
สหภาพแห่งสาธารณรัฐโซเวียตสังคมนิยม	-	-	50	-	-	-

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2541)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดกลิ่นและ VOCs

Hunter และ Oyama (2000) กลิ่นเกิดจากสารเคมี ดังนั้นในการกำจัดกลิ่นจึงต้องมีการลดความเข้มข้นของสารเคมีนั้นลง ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนรูปสารเคมีที่ก่อให้เกิดกลิ่นเป็นสารอื่นๆที่ไม่มีกลิ่น หรือโดยการดูดจับสารเหล่านั้นไว้มิให้ปะปนไปกับอากาศ ซึ่งเทคโนโลยีในการกำจัดกลิ่นและ VOCs มีหลากหลายวิธีให้เลือกใช้ดังนี้

2.2.1 การเผาด้วยความร้อน (Thermal Incineration)

เตาเผาเป็นอุปกรณ์อย่างง่ายซึ่งวัตถุอินทรีย์ในก๊าซที่เข้าระบบจะถูกทำลายด้วยการเผาไหม้ เตาเผาก๊าซบางครั้งถูกอ้างอิงว่าเป็น " afterburners " โดยเฉพาะถ้าถูกติดตั้งอยู่หลังจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแรกโดยจัดเวลาและอุณหภูมิให้เพียงพอสำหรับสารประกอบเพื่อให้การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ ถ้าการออกแบบและการดำเนินงานถูกต้องเหมาะสม ไอเสียที่ออกมาจากเตาเผาก๊าซจะประกอบด้วย CO_2 และ H_2O เพิ่มเติมด้วยก๊าซเฉื่อยจากบรรยากาศ เช่น ไนโตรเจน เนื่องจากระบบมีประสิทธิภาพการทำลายก๊าซพิษสูง และความสามารถในการทำลายสารประกอบที่มีช่วงกว้างหลายชนิด เตาเผาจึงเป็นอุปกรณ์ควบคุมสารมลพิษที่ใช้กันมาก บางสถานะเตาเผาอาจจะปล่อยไนตรัสออกไซด์ออกมาด้วย ดังนั้นจึงควรนำอุปกรณ์อื่นมาพิจารณาด้วย เพราะว่าที่อุณหภูมิการเผาไหม้อาจจะมี N_2O เกิดขึ้นตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

เตาเผาแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักคือ

1. Thermal Incinerators
2. Catalytic Incinerators

เตาเผาอุณหภูมิสูงต้องอาศัยอุณหภูมิในการดำเนินงานสูงและจะใช้เปลวไฟโดยตรงเพื่อที่จะจุดให้สารมลพิษติดไฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ในช่วง 973 - 1073 K (700° - $800^{\circ}C$) เตาเผาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะดำเนินงานที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 620 - 870 K (340° - 590° C)เตาเผาอุณหภูมิสูงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ให้ประสบผลสำเร็จมีปัจจัยสามชนิดคือ เวลา อุณหภูมิ และความปั่นป่วน เตาเผาต้องมีความเร็วและความปั่นป่วนที่เพียงพอเพื่อที่จะผสมก๊าซที่จะเผาไหม้กับสารมลพิษ มีเอกสารที่แนะนำถึงความยืดหยุ่นระหว่างอุณหภูมิและเวลาเก็บกักที่ต้องการ คือ ถ้าต้องการเวลาเผาไหม้ให้สั้นลง ควรจะใช้อุณหภูมิเผาไหม้ให้สูงขึ้น และถ้าจะใช้อุณหภูมิให้ต่ำลง ควรจะใช้เวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้น

2.2.2 การออกซิเดชั่นด้วยแสง Ultraviolet (UV – Oxidation)

การออกซิเดชั่นด้วยแสง Ultraviolet ใช้เป็นชนิดเดียวกับปฏิกิริยา Photochemical ซึ่งเกิดขึ้นในบรรยากาศ เพื่อช่วยในกระบวนการออกซิเดชั่นสารประกอบอินทรีย์เป็นในรูปของ H_2O และ CO_2 แสงยูวี และตัวออกซิแดนท์ เช่น โอโซน เปอร์ออกไซด์ ไฮดรอกซิล เรดิคัล หรือออกซิเจน เรดิคัล ถูกใช้เพื่อแยกสลาย VOCs ไปเป็น CO_2 และ H_2O ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ถูกกำหนดโดย VOCs ที่จะถูกทำลาย Photocatalytic Oxidation (PCO) จะใช้พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Surface) เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำทางไฟฟ้าซึ่งมีประสิทธิผลใน UV หรือแสงที่ใกล้เคียงกับ UV แหล่งที่มาของแสงยูวี ถ้าไม่เป็นดวงอาทิตย์อาจใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ กระบวนการจะดำเนินงานโดยการดูดซับมลพิษของสารประกอบไปยังพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และหลังจากนั้นการย่อยสลายสารประกอบก็จะเกิดขึ้น คล้ายกันกับ Catalytic Oxidation

องค์ประกอบของก๊าซที่เข้าระบบต้องระบุให้แน่ชัดเพื่อกำหนดระบบ PCO ให้เหมาะสม ในทางเพิ่มเติมเกี่ยวกับอนุภาคสารประกอบที่มีน้ำมันปนเปื้อน หรือสารประกอบ เช่น hexamethyldisilazane มีส่วนทำให้พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาชำรุดเสียหายได้จึงต้องกำจัดก่อนที่จะเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ เทคโนโลยี PCO เหมาะที่สุดสำหรับความเข้มข้นต่ำ (< 1000 ppm) และอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบต่ำถึงปานกลาง (< 576 m^3/min หรือ 20,000 cfm) ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นควรมากขึ้นตามไปด้วย

2.2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีการที่ถูกใช้เพื่อกำจัดสารมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำจากก๊าซที่เข้าระบบโดยการจับสารมลพิษเหล่านั้น ด้วยของแข็งที่มีพื้นที่ผิวจำนวนมาก ของแข็งที่เป็นที่นิยม เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ วัสดุที่เป็นผลึก (Crystalline material) โดยมีความพรุนภายในสูง ซึ่งจะมีพื้นผิวในการดูดซับสารมลพิษด้วยแรงระหว่างโมเลกุล โครงสร้างของความพรุนรวมถึง ความพรุนมาก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 nm) ความพรุนน้อย (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm) และความพรุนขนาดกลาง (อยู่ในช่วงขนาดระหว่างความพรุนน้อยและความพรุนมาก) สำหรับความพรุนน้อย โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถปิดกั้นการเข้าไปถึงพื้นผิวภายใน อัตราการแพร่และการถ่ายเทมวลสารมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารมลพิษจากก๊าซที่เข้าระบบไปสู่พื้นผิวภายนอกของของแข็ง และหลังจากนั้นพื้นผิวภายนอกไปสู่โครงสร้างความพรุน ประสิทธิภาพการกำจัด VOCs จากก๊าซที่เข้าระบบ โดยกระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารมลพิษ ความดัน

อุณหภูมิและความชื้นของก๊าซที่เข้าระบบ รวมถึงโครงสร้างของรูพรุน ปริมาณของพื้นผิวดูดซับ ประสิทธิผลและธรรมชาติของวัสดุ

การดูดซับมี 2 ชนิด คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพ คือ โมเลกุลของสารมลพิษถูกจับยึดแทนที่ในรูพรุนโดยแรงดึงดูดทางกายภาพที่ค่อนข้างจะอ่อนของแรงคู่ควบทางไฟฟ้าและแรงแวน เดอร์ วาล์ว ตามธรรมชาติ แรงเหล่านี้เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เหมือนกันซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการควบแน่นของก๊าซและตามธรรมดาแล้วจะใช้พลังงานต่ำ (1 - 15 kcal/g-mol หรือ 4 - 50 kJ/g-mol)

การดูดซับทางเคมีซึ่งเป็นพันธะทางเคมี พันธะที่ถูกสร้างขึ้นทางเคมีจะแข็งแรงมากกว่า (10 - 100 kcal/g-mol หรือ 40 - 400 kJ/g-mol) และกระบวนการของการฟื้นสภาพการดูดซับจะใช้พลังงานมากขึ้น กระบวนการดูดซับเหมาะอย่างดีสำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40 - 130 และจุดเดือดอยู่ในช่วงประมาณ 290 - 420 K (21° - 150° C) การดูดซับเป็นกระบวนการที่คายความร้อนออกสู่ภายนอก (Exothermic Process) และความร้อนที่เป็นผลมาจากการดูดซับสารมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงสามารถเป็นอันตรายได้ถ้าไม่สลายและควบคุมความร้อนเหล่านั้นอย่างถูกต้องเหมาะสม การใช้วิธีดูดซับในการบำบัดตัวทำละลายที่มีออกซิเจน ตัวอย่างเช่น เมทิล เอทิล คีโตน (MEK) มีความเสี่ยงสูงเนื่องจากเกิดความร้อนในการดูดซับสูงมาก และถ่านกัมมันต์อาจติดไฟได้ หากควบคุมระบบไม่ถูกต้องเหมาะสม

2.2.4 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึม เป็นกระบวนการซึ่งสารมลพิษในก๊าซที่ปนเปื้อนเข้าระบบถูกละลายไปเป็นของเหลว(ตัวทำละลาย) โดยการถ่ายเทมวลสาร แรงผลักดันจากความแตกต่างของความดันย่อยของสารมลพิษในก๊าซที่เข้ามาและความดันไอ (หรือการละลายน้ำ) ขององค์ประกอบที่เหมือนกันในของเหลว ความดันไอต่ำขององค์ประกอบในของเหลวแสดงถึงว่าองค์ประกอบนั้นมีแนวโน้มน้อยมากที่จะหลุดออกมาจากของเหลว ขนาดของระบบการดูดซึมสามารถทำให้เล็กลงได้ โดยใช้ของเหลวซึ่งเกิดปฏิกิริยากับสารมลพิษ กระบวนการนี้ถูกเรียกว่าการดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption) กระบวนการที่ไม่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีแต่ใช้ความสามารถในการละลายน้ำเพื่อกำจัดสารมลพิษเรียกว่าการดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption) โดยธรรมดาแล้วน้ำจะถูกใช้เป็นสาร

ดูดซึมในบางกรณี น้ำทะเล คลอรีน ไฮโปคลอไรท์ กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไบคาร์บอเนตอาจถูกเติมลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึม ระบบการดูดซึมมีประสิทธิ-ภาพมากกว่า 98% เนื่องจากมันมีประสิทธิภาพสูงจึงถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกำจัดสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่น ข้อเสียอย่างสำคัญของระบบการดูดซึม คือ การดูดซึมจะแก้ปัญหาก๊าซมลพิษที่เข้าระบบโดยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเหลวที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ ดังนั้นปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้นควรจะมีการแก้ไขต่อไป

2.2.5 การเผาด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Incineration)

การเผาด้วยสารเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเช่นเดียวกับเตาเผาที่ใช้อุณหภูมิสูงเตาเผาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำลายสารมลพิษอินทรีย์ด้วยการเผาไหม้เพื่อให้เกิดเป็น CO_2 และ H_2O เตาเผาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะที่มีตระกูลหรือออกไซด์ของโลหะที่เป็นของแข็งเป็นวัสดุที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเองนั้นจะไม่ทำปฏิกิริยา แต่สามารถที่จะทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีเปลวไฟเกิดขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์อย่างแท้จริงของสารมลพิษ และทำให้ NOx แทบจะไม่เกิดขึ้นเลย โดยปกติแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีพื้นที่ผิวสูง เช่น อะลูมินา เตาเผาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำโดยปกติ 620 - 870 K (340^{o}-$590\ ^{o}C$) ถ้าการออกแบบถูกต้องและเหมาะสมแล้วประสิทธิภาพการทำลายสารมลพิษจะใกล้เคียงกับเตาเผาที่ใช้อุณหภูมิสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินงานต่ำเป็นผลให้เกิด NOx น้อยมาก (โดยทั่วไปน้อยกว่า 15 ppm) และการใช้พลังงานเชื้อเพลิงน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ พบเอกสารรายงานว่าใช้เชื้อเพลิงเพียง 1/3 เท่าของเตาเผาที่ใช้อุณหภูมิสูง

การระบุถึงลักษณะองค์ประกอบของก๊าซมลพิษที่จะเข้าระบบทั้งเตาเผาอุณหภูมิสูง และเตาเผาที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นสิ่งที่ควรเอาใจใส่ เพราะสารประกอบบางอย่างจะไปขัดขวางปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การยับยั้งทางเคมีที่ผิวหรือโดยการดูดซึมบริเวณพื้นผิวและทำลายพื้นผิวประสิทธิผล สารประกอบที่ยับยั้งทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็นความเป็นพิษที่กระทำอย่างรวดเร็ว (Fast-acting Poisons) เช่น ฟอสฟอรัส บิสมัท สารหนู พลวง ฟลูออรีน โบรมีนและปรอท และความเป็นพิษที่กระทำอย่างช้า (Slow-acting Poisons) เช่น สังกะสี ตะกั่ว และดีบุก

2.2.6 การแยกด้วยเมมเบรน

กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรนถูกใช้เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์จากก๊าซมลพิษทีเข้าระบบโดยใช้ความแตกต่างความดันย่อยที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านที่มีลักษณะคล้ายแก้วหรือพื้นผิวที่

เป็นยางซึ่งเป็นส่วนประกอบของแผ่นเมมเบรน แผ่นเมมเบรนถูกออกแบบให้โมเลกุลของอากาศหรือโมเลกุลของสารมลพิษผ่านไปได้เท่านั้นเป็นเหตุให้ทางด้านหนึ่งของเมมเบรนเต็มไปด้วยก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นสูง ในระบบทั่วไปจะทำงานโดยการใช้ความดันอัดอากาศที่เข้ามาในระบบเพื่อกำจัดสารมลพิษให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ด้วยการควบแน่นและหลังจากนั้นปล่อยก๊าซที่เหลือผ่านไปยังแผ่นเมมเบรนซึ่งจะยอมให้โมเลกุลสารอินทรีย์เคลื่อนที่ผ่านขณะที่จะกำจัดโมเลกุลของอากาศที่ผ่าน ก๊าซมลพิษจะถูกอัดที่ความดันเกจในช่วง 0.31 - 1.38 MPa (45 - 200 psig) และหลังจากนั้นก๊าซที่เข้าระบบจะผ่านต่อไปยังเครื่องที่ทำให้ก๊าซจับตัวกันเป็นของเหลว (Condenser) จากคอนเดนเซอร์ ก๊าซจะผ่านต่อไปยังระบบเมมเบรนซึ่งจะถูกแยกไปเป็นก๊าซที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำมาก และก๊าซที่ติดค้างบนผิวหน้าของเมมเบรน (Permeate Gas) ที่มีความเข้มข้นของ VOC มากขึ้น Permeate gas จะถูกหมุนเวียนกลับเข้าไปที่คอมเพรสเซอร์อีก องค์ประกอบของก๊าซมลพิษที่จะใช้ระบบเมมเบรนกำจัดควรตรวจสอบคุณลักษณะให้ดีเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเมมเบรนสามารถเข้ากันได้ทางเคมีกับองค์ประกอบของก๊าซมลพิษที่เข้าระบบ ส่งผลทำให้เมมเบรนเสียหายได้ง่าย มีข้อแนะนำว่าควรจะกำจัดอนุภาคมลสารหรือสารประกอบที่มีน้ำมันปนเปื้อนก่อนเข้าระบบเมมเบรน ประสิทธิภาพของเมมเบรนสูงถึง 90 - 99.99 % ระบบเมมเบรนอาจถูกแบ่งได้ตามชนิดของเมมเบรนที่ใช้ว่าเป็น เมมเบรนที่มีลักษณะคล้ายแก้ว เช่น Polyetherimide ซึ่งยอมให้โมเลกุลของอากาศผ่านมากกว่าสารประกอบอินทรีย์ และเมมเบรนที่เป็นยาง เช่นยางธรรมชาติ ซึ่งจะยอมให้สารประกอบอินทรีย์แทรกซึมผ่านมากกว่า ระบบเมมเบรนอาจถูกแบ่งตามการออกแบบของชุดเมมเบรน เช่น Plate and Frame Spiral - Wound Module หรือ Hollow - Fiber เป็นต้น

2.2.7 การควบแน่น (Condensation)

การควบแน่นเป็นการทำให้สารปนเปื้อนกลายเป็นของเหลวโดยทำให้อุณหภูมิต่ำลงทั้งนี้สารประกอบที่จะถูกแยกออกจากสภาวะก๊าซโดยการลดอุณหภูมิลง จนความดันย่อยในกระแสก๊าซเกินกว่าจุดน้ำค้างทำให้กลายสภาพเป็นของเหลว เครื่องควบแน่นที่ใช้ทั่วไปได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกและท่อ (Shell and Tube heat exchanger) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงในการถ่ายเทความร้อนแต่มีขนาดเล็ก

2.3 ข้อเปรียบเทียบเทคโนโลยีการควบคุม

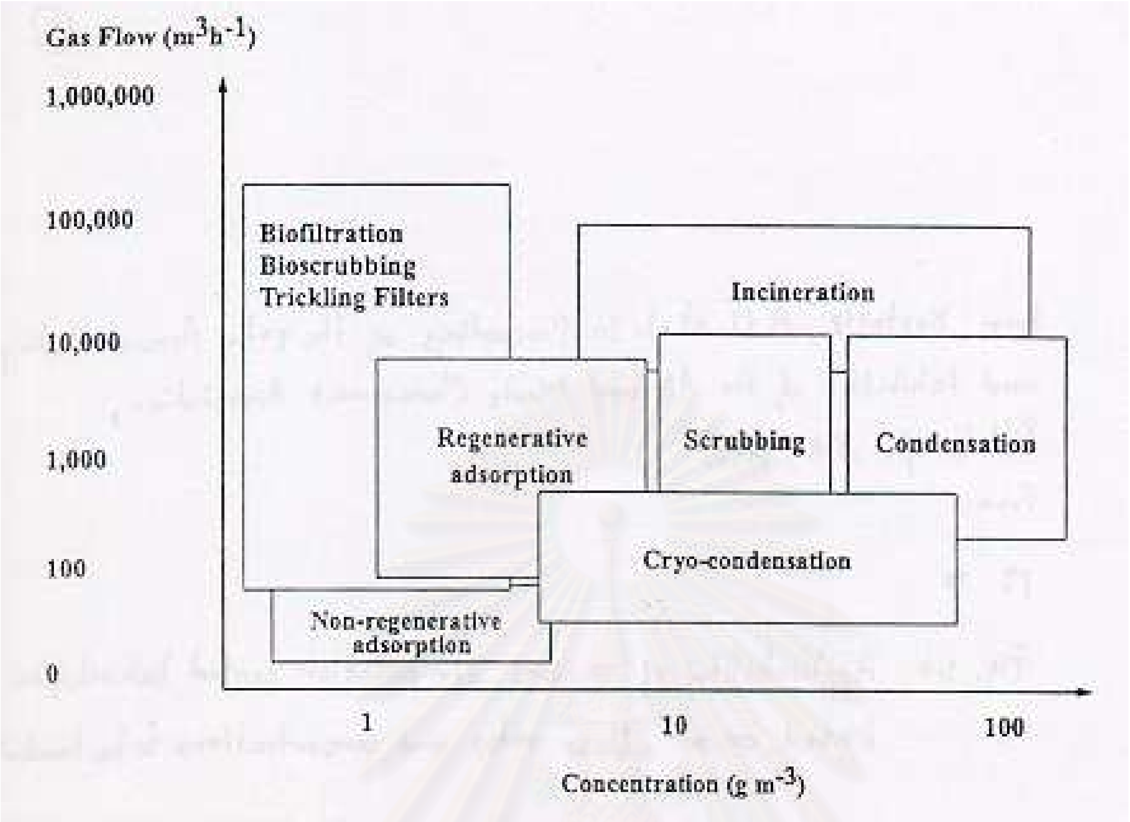
รูปที่ 2.1 แสดงพิสัยของความเข้มข้นและอัตราการไหลซึ่งเหมาะสมกับเทคโนโลยีแต่ละชนิด การเลือกเทคโนโลยีควบคุมที่เหมาะสมจะใช้ข้อมูลดังกล่าวร่วมกับประสิทธิภาพการควบคุมที่

ต้องการและความพร้อมในเรื่องสาธารณูปโภค แรงงาน และเงินลงทุน โดยทั่วไปเมื่อต้องการควบคุม VOCs มักเรื่องการเผาเป็นวิธีแรก การเผาเป็นเทคโนโลยีควบคุมที่มีประสิทธิภาพและปรับเปลี่ยนได้ทุกชนิดของสารมลพิษที่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและอัตราการไหล นอกจากนี้อุปกรณ์การเผาด้วยความร้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถนำความร้อนกลับคืนได้มากกว่า 95% ซึ่งช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการ การเผาด้วยสารเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงเช่นกันโดยใช้เชื้อเพลิงน้อยมากแต่อาจมีปัญหาสิ่งสกปรกอุดตันจากฝุ่นละอองและ fumes โลหะ

อีกเทคนิคหนึ่งซึ่งยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงมากกว่า 99% ในบางกรณีคือ การดูดซับ การดูดซับมีข้อได้เปรียบอีกอย่างคือสามารถนำสารมลพิษกลับมาใช้ได้ใหม่แต่ VOCs บางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมกับการดูดซับและจะต้องใช้ไอน้ำหรือความร้อนในระบบฟื้นฟูสภาพ หากไม่มีระบบฟื้นฟูสภาพสารดูดซับจะเกิดของเสียซึ่งต้องกำจัดต่อไป การกรองแบบชีวภาพจากรายงานพบว่ามีข้อดี คือ ต้นทุนในการก่อสร้างและพลังงานที่ใช้ในการเดินระบบต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่นที่ใช้บำบัด ระบบดำเนินงานที่อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายนอกทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้น รวมไปถึงไม่ต้องกำจัดสารมลพิษอื่นที่เกิดขึ้นตามมาจากการดำเนินงาน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า 90% แต่อาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลาง การควบแน่นมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าเทคโนโลยีอื่นในบางกรณีอาจมีประสิทธิภาพประมาณ 90% เมื่อใช้สารทำความเย็นลดอุณหภูมิของกระแสก๊าซ

การแยกด้วย membrane การบำบัดด้วยแสง ultraviolet และการออกซิเดชั่น ด้วยสารเร่งปฏิกิริยาและโอโซนเป็นเทคโนโลยีใหม่ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาความเหมาะสมในการใช้งานและเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้ในเชิงพาณิชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นและอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับแต่ละวิธีที่ใช้กำจัด VOCs
ที่มา : Devinny , J.S.; Deshusses , M.A. and Webster ,T.S. (1999)

2.4 ลักษณะของการกรองชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นกระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนสภาพสารมลพิษให้กลายเป็นสารประกอบอย่างง่าย ในการควบคุมมลพิษอากาศในขั้นแรกนั้นสารมลพิษจะถูกดูดซึมโดยชั้นฟิล์มของน้ำซึ่งมีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ และจุลินทรีย์เหล่านั้นจะเปลี่ยนสารมลพิษโดยใช้กระบวนการเมตาบอลิซึมเพื่อให้ได้พลังงานและสารอาหารเมื่อ VOCs ถูกบำบัดโดยการย่อยสลายทางชีวภาพ ผลิตผลหลักที่เกิดขึ้นคือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เซลล์จุลินทรีย์ และแร่ธาตุอื่น เครื่องกรองชีวภาพเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับสารมลพิษที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย เช่น โทลูอีน ไซลีน แอลกอฮอล์ บิวทานอล ฟอร์มัลดีไฮด์ ไตรเมทิลามีน อะซีตัล-ดีไฮด์และกรดบิวไทริค เครื่องกรองชีวภาพสามารถดำเนินงานร่วมกับกระบวนการบำบัดชนิดอื่นเช่น การดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon Adsorption) หรือการควบแน่น (Condensation) เพื่อใช้กำจัดก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงได้

เครื่องกรองชีวภาพชนิดธรรมดาที่ใช้ในด้านมลพิษอากาศประกอบด้วยห้องควบคุมความชื้น (Humidification Chamber) และเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ในทางเพิ่มเติมอาจจะมีเครื่องเก็บอนุภาคเพื่อใช้กำจัดของแข็งต่างๆจากก๊าซที่เข้าระบบ มิฉะนั้นอนุภาคเหล่านี้อาจจะไปอุดตันตัวกลางและขวางกั้นการ

กระจายตัวของก๊าซได้ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นของแข็งปกติที่ใช้ เช่น ปุ๋ยหมัก (Compost) ดินหรือดินตะกอนเลน (Peat) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสำหรับให้จุลินทรีย์สามารถอยู่อาศัยได้ บางครั้งอาจใช้ตัวกลางที่เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งราคาแพงกว่า แต่จะมีความต้านทานต่อการถูกบดอัดด้วยน้ำหนักของตัวกลาง และช่วยรักษาสภาพความพรุนของตัวกลาง ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ระดับความชื้นตลอดทั่วทั้งตัวกลางจะต้องรักษาให้อยู่ในระดับเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดการแห้ง และการแตกร้าว (Cracking) ของตัวกลาง แต่ต้องต่ำเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการไหลเป็นช่องของของเหลว (liquid Channeling) ซึ่งจะเกิดเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีก๊าซออกซิเจนอยู่ (Anaerobic Zones) ส่งผลให้จุลชีพในระบบซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นชนิดใช้อากาศ (Aerobic Bacteria) ย่อยสลายสารมลพิษได้ลดลง โดยปกติความชื้นที่เหมาะสมภายในชั้นตัวกลางประมาณ 35 - 60% สำหรับเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางเพื่อกำจัด H_2S และ VOCs ในขณะตัวกลางที่เป็นสารอนินทรีย์ความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 40 - 50%

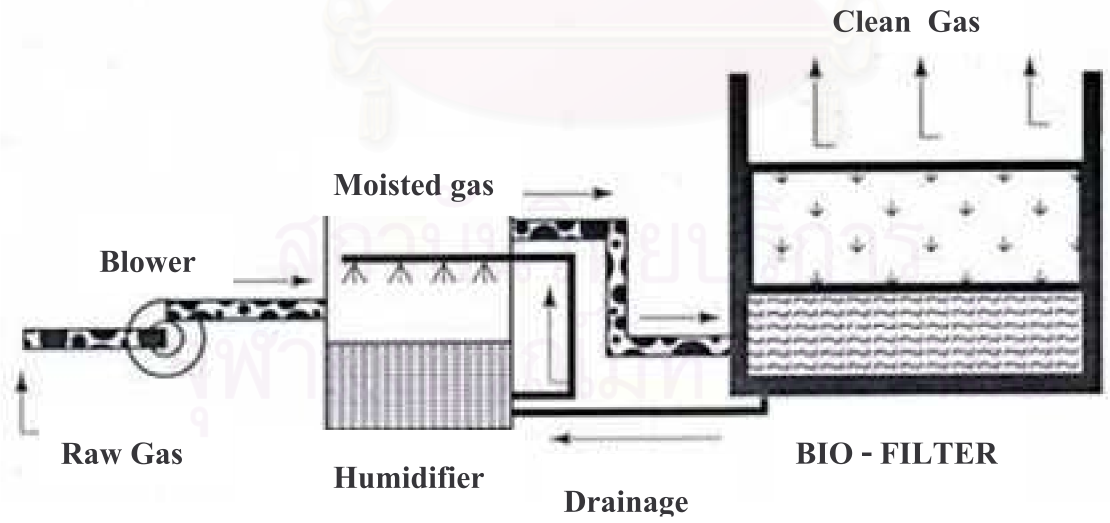
การกรองชีวภาพ (Biofiltration) มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 80 - 99% ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารมลพิษ ประสิทธิภาพการกำจัด VOCs ของก๊าซที่เข้าระบบโดยการบวนการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซที่เข้าระบบและตัวกลาง ระดับความชื้นและความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง อุณหภูมิของก๊าซที่เข้าระบบ ชนิดของสารมลพิษและความเข้มข้นที่เข้าระบบ อัตราภาระบรรทุกของเครื่องกรองชีวภาพ ปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง รวมถึงธาตุอาหารเสริมในปริมาณที่เหมาะสมของตัวกลางที่เลือกใช้ และลักษณะทางกายภาพที่เฉพาะเจาะจงของสารมลพิษแต่ละชนิด ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญ เช่น ค่าคงที่ของเฮนรี่ ความสามารถในการละลายน้ำ น้ำหนักโมเลกุล และการมีโครงสร้างพันธะที่ซับซ้อนซึ่งขัดขวางจุลินทรีย์มิให้ทำการย่อยสลายได้โดยง่ายหรือโมเลกุลของสารมลพิษที่ย่อยสลายยาก เช่น มีคลอรีนหรือซัลเฟอร์ผสมอยู่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดกลิ่น และ VOCs ที่เกิดขึ้น

กระบวนการทางเภสัชกรรม
กระบวนการทำเสถียรก้อนแข็งสำหรับฝังกลบ
โรงงานหลอมสกัด
กระบวนการผลิตทางเคมี
โรงพิมพ์
โรงงานที่ทำให้เกิดกลิ่นต่างๆ
การอบเมล็ดกาแฟและโกโก้
การบำบัดกลิ่นที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสีย
กระบวนการผลิตและเคลือบสี
การทำปุ๋ยหมัก
กระบวนการผลิตอาหาร
การทำปศุสัตว์
โรงงานหลอมโลหะ

ที่มา : Hunter, P.and Oyama, S.T. (2000)

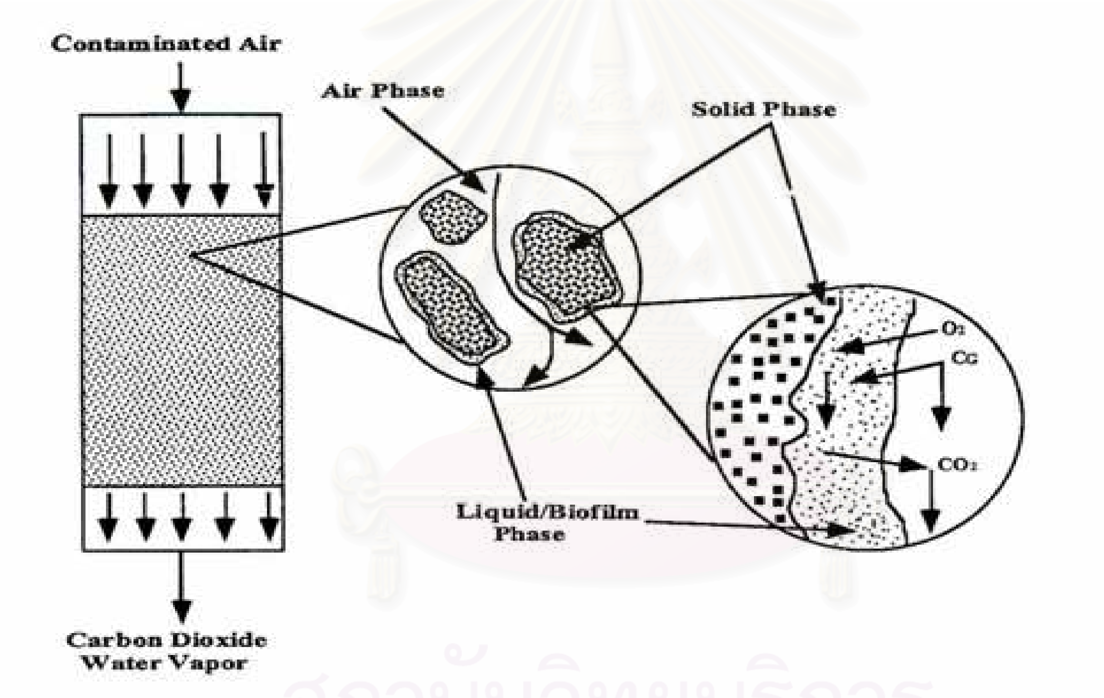


รูปที่ 2.2 ภาพเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Schnelle , K.B., and Brown , C.A. (2002)

2.5 กลไกการทำงานของระบบกรองชีวภาพ

กระบวนการกรองชีวภาพประกอบด้วยตัวกลางที่มีความพรุน โดยพื้นผิวของตัวกลางจะมีน้ำและจุลินทรีย์ล้อมรอบ การกำจัดมลพิษอากาศเริ่มต้นด้วยการถ่ายเทของสารมลพิษจากสถานะอากาศไปสู่สถานะน้ำ สารมลพิษที่ละลายน้ำจะถูกการแพร่และการพัดพา (Advection) เข้าสู่ฟิล์มชีวภาพของจุลินทรีย์ โดยที่สารมลพิษจะถูกปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งผลิตผลที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แร่ธาตุ และมวลชีวภาพ (Biomass) ความเข้าใจในแต่ละกลไกการทำงานของระบบส่งผลทำให้สามารถดำเนินงานและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องเหมาะสม แต่ละกลไกประกอบด้วย การเคลื่อนที่ของก๊าซ อัตราการถ่ายเท สถานะน้ำ สารมลพิษที่ถูกดูดซับการย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษ และสารที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของระบบกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny , J.S.; Deshusses , M.A., and Webster , T.S. (1999)

2.5.1 การเคลื่อนที่ของก๊าซ (Gas transfer)

สภาวะสมดุล (Equilibrium) การเคลื่อนที่ของสารมลพิษจากสถานะอากาศไปสู่สถานะน้ำ ณ สภาวะสมดุล ความสามารถในการละลายน้ำของสารมลพิษในน้ำจะเป็นอัตราส่วนกับความเข้มข้นในอากาศ อธิบายโดยใช้กฎของเฮนรี่ (Henry 's law) ดังนี้

$$C_G = HC_L$$

ในขณะที่ C_G = ความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศ (atm หรือ g/L_{air})

C_L = ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ (mol/L_{water})

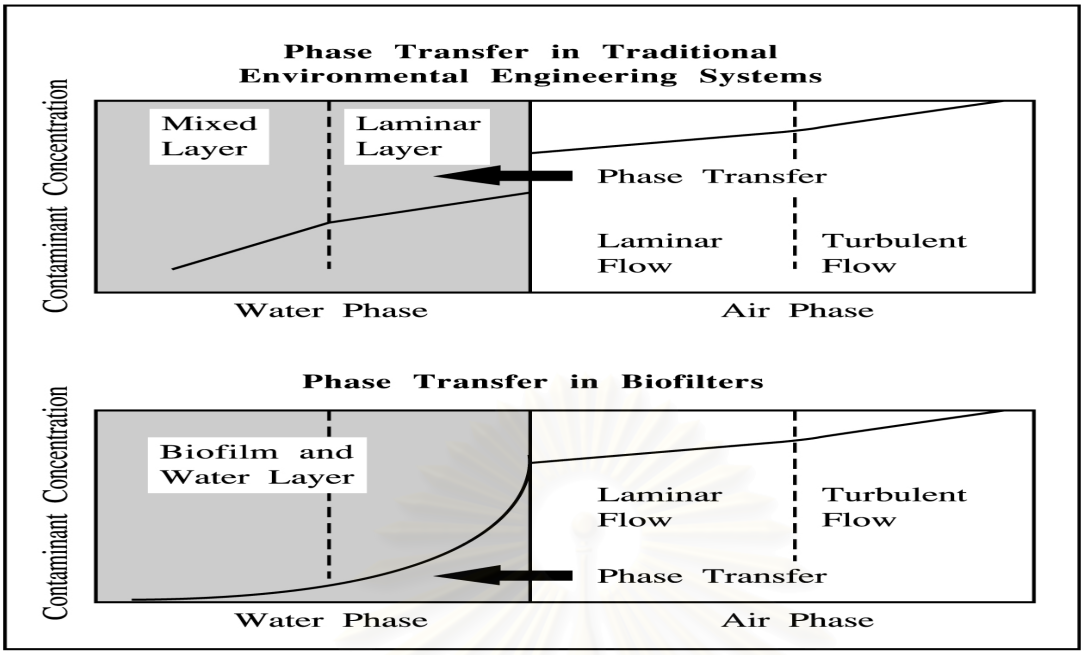
H = ค่าคงที่ของ Henry 's law (atm.L/mol หรือ $(g/L_{air}) / (g/L_{water})$)

สารมลพิษที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่ (Henry 's Constant) สูงจะถูกกำจัดด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพยากและต้องใช้เวลาเก็บกักนานกว่าสารมลพิษที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่น้อยกว่า

2.5.2 อัตราการถ่ายเท (Transfer rates)

การถ่ายเทมวลจากอากาศไปสู่น้ำของสารมลพิษมีความสำคัญมาก ถ้าอากาศเสียไหลผ่านเครื่องกรองชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบกรองชีวภาพมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ อัตราการถ่ายเทจากสถานะอากาศไปสู่สถานะน้ำ สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองการถ่ายเทเป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4

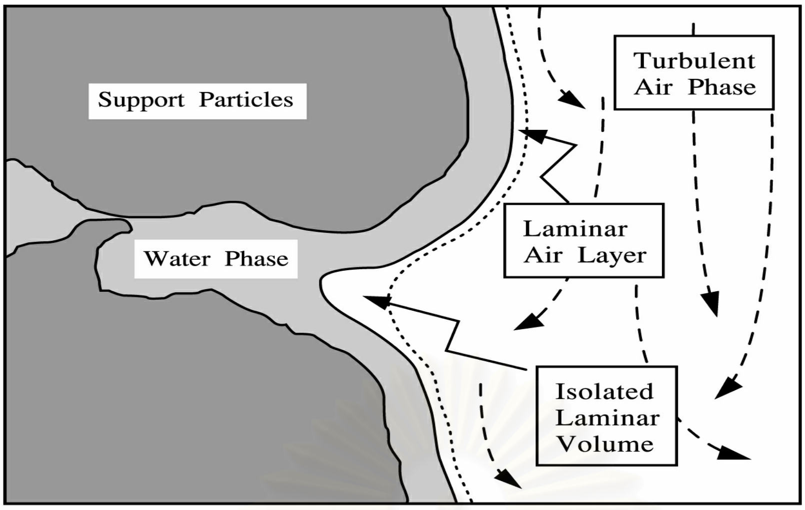
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการถ่ายเทของก๊าซ

ที่มา : Devinny และคณะ (1999)

การย่อยสลายสารมลพิษในสถานะน้ำทำให้สารมลพิษมีความเข้มข้นลดลง เพื่อว่าการถ่ายเทจะเกิดขึ้นจากอากาศที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำในเฟสน้ำ ที่อัตราการไหลของอากาศสูงจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อว่าสารมลพิษจะได้เคลื่อนย้ายโดยอาศัยการพัดพา (Advection) และการแพร่ (Eddy Diffusion) ซึ่งรวมกันเรียกว่า การพา (Convection) ในช่วงเชื่อมต่อของสถานะอากาศและน้ำ การไหลของอากาศจะเป็นแบบราบเรียบ เพื่อว่าการแพร่เชิงโมเลกุล (Molecular Diffusion) จะเป็นกลไกการเคลื่อนที่เพียงกลไกเดียว เพราะว่าการแพร่เชิงโมเลกุลจะช้ากว่าการพา ซึ่งสามารถเป็นปัจจัยอัตราจำกัด (Rate-limiting Factor) สำหรับการถ่ายเทมวลสารไปถึงจุลินทรีย์ ในกรณีของสารมลพิษที่ละลายน้ำได้ดีแต่อัตราการไหลของอากาศในเครื่องกรองชีวภาพจะรวดเร็วมาก ดังนั้นชั้นความราบเรียบจะถือว่าบางมาก เพราะกระบวนการอื่นจะเกิดขึ้นช้าโดยกรณีส่วนใหญ่การเคลื่อนที่ในชั้นนี้จะไม่เป็นตัวจำกัด อย่างไรก็ตามรูปร่างพื้นที่ผิวน้ำ (Water Surface) ในเครื่องกรองชีวภาพที่มีความผิดปกติสูง เช่น มีรูโพรงเกิดขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดการขัดขวางการเทถ่ายของอากาศที่ไหลแบบราบเรียบ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การไหลของอากาศในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny และคณะ (1999)

ในระบบทั่วไปที่ต้องการการถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซและของเหลว ชั้นน้ำแบบราบเรียบในสถานะน้ำอาจจะเป็นปัจจัยจำกัดการถ่ายเทอย่างช้าไม่ว่าจะเป็นสารมลพิษหรือออกซิเจนไปยังสถานะน้ำที่มีปริมาณมากจะเป็นจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารประกอบที่มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงๆ ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า "Liquid phase control" เพราะว่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเป็นตัวจำกัดอัตราการถ่ายเทของสาร ในเครื่องกรองชีวภาพจะไม่มีสถานะการไหลปั่นป่วนเกิดขึ้นเพราะว่าน้ำที่อยู่ในระบบจะไม่เคลื่อนที่ (Stationary) โดยแท้จริงแล้วน้ำที่อยู่ในระบบจะอยู่ในรูปของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (Water - saturated biofilm) การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจุลินทรีย์จะถูกขัดขวางโดยเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดมากขึ้น

การถ่ายเทมวลสารระหว่างสถานะ (จากอากาศไปสู่น้ำ) ใช้สมมติฐานว่าจะเกิดขึ้นที่อัตราหนึ่งซึ่งเป็นสัดส่วนกับระดับซึ่งความเข้มข้นในน้ำต่ำกว่าค่าสมดุล ตามทฤษฎีของ two-film อัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างสถานะสามารถคำนวณได้โดยใช้ความเข้มข้นปริมาณที่มากในสถานะของเหลว (หรืออากาศ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม (Overall mass transfer coefficients)

$$\frac{dC_L}{dt} = k_t (C_L^{*} - C_L) = k_t [(C_G/H) - C_L]$$

โดยที่ C_L = ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ

C_L^* = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่สภาวะสมดุล

t = เวลา

k_t = ค่าคงที่ของอัตราการถ่ายเทต่อหน่วยเวลา = $k_L a$

a = พื้นที่ระหว่างผิวหน้าที่ติดกัน

k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวมขึ้นอยู่กับแรงผลักดันโดยรวมในของเหลว

ค่าคงที่ในสมการขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด สารประกอบต่างชนิดกันจะมีอัตราค่าคงที่ที่แตกต่างกันแต่ที่เป็นปัจจัยมูลฐานคือ อัตราส่วนพื้นที่ระหว่างผิวหน้าที่ติดกันและปริมาตรการถ่ายเทจะเกิดขึ้นตลอดพื้นผิวและปัจจัยอื่นถูกทำให้คงที่ จำนวนของมวลสารที่ถูกถ่ายเทจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนพื้นผิวที่มีอยู่ มวลของสารมลพิษที่สูญหายจากอากาศที่เข้าระบบก็เป็นเช่นเดียวกับมวลที่ได้รับจากน้ำ แต่ผลของความเข้มข้นจะแตกต่างกันเพราะปริมาตรของสถานะอากาศและน้ำต่างกัน ดังสมการ

$$\frac{dC_G}{dt} = -k_t \frac{V_L}{V_G} \left(C_L^* - C_L \right)$$

โดยที่ V_L = ปริมาตรของสารมลพิษในสถานะน้ำ

V_G = ปริมาตรของสารมลพิษในสถานะอากาศ

แบบจำลองนี้สมมติว่าอัตราการถ่ายเทมวลสารมีความสม่ำเสมอตลอดเวลาทั่วพื้นที่ระหว่างผิวหน้าของอากาศและน้ำ (ค่า k_t ถูกสมมติให้คงที่) ในสภาพความเป็นจริงภาวะนั้นอาจจะมีความแตกต่างอย่างสำคัญ

2.5.3 สถานะน้ำ

ในเครื่องกรองชีวภาพเฟสน้ำจะสันนิษฐานว่าอยู่นิ่งกับที่ (Stationary) จะไม่เคลื่อนที่เหมือนกับระบบ Biotrickling filters ในบางครั้งอาจจะมีการเคลื่อนที่ของน้ำลงสู่ชั้นล่าง เนื่องจากการควบแน่นของก๊าซกลายเป็นหยดน้ำ หรือการเติมน้ำให้กับระบบมากจนเกินไป แต่อัตราการไหลจะเกิดขึ้นช้า ซึ่งผู้ดำเนินงานควรหมั่นสังเกตเพื่อลดไม่ให้เกิดน้ำชะ (leachate) การเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นแบบราบเรียบมากกว่าปั่นป่วนภายใต้สภาวะเช่นนี้ การแพร่จะเป็นวิธีการสำคัญซึ่งสารมลพิษจะเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่งในน้ำ ความเข้มข้นของสารมลพิษจะมีค่ามากขึ้นบริเวณผิวหน้า

ของชั้นน้ำ การย่อยสลายทางชีวภาพในเฟสน้ำหรือชั้นฟิล์มจุลินทรีย์และการดูดซับบริเวณผิวของตัวกลางจะค่อยๆจมตัวลง ขณะที่สารมลพิษจะแพร่ไปยังตัวกลางและผลผลิตที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะแพร่ออกสู่ภายนอก ส่วนผลผลิตที่มีความดันไอสูงจะถูกถ่ายเทไปสู่อากาศภายนอกต่อไป

การแพร่ในน้ำหรือชั้นฟิล์มจุลินทรีย์จะมีอัตราที่ช้ากว่าการแพร่ในอากาศ และมีความเป็นไปได้ว่าเกิดการยับยั้งการเคลื่อนที่ในเฟสน้ำ ความเข้มข้นของสารมลพิษจะถูกทำให้หมดไปที่บริเวณส่วนล่างของชั้นน้ำ ซึ่งอาจจะเกิดการสภาพไร้ก๊าซออกซิเจนและผลิตผลระหว่างกระบวนการเมทาบอลิซึมที่เกิดขึ้นอาจสะสมอยู่ภายใน การออกแบบและการใช้แบบจำลองของเครื่องกรองชีวภาพนั้นควรคำนึงถึงความจริงที่ว่าโดยส่วนใหญ่การย่อยสลายสารมลพิษจะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์

2.5.4 สารมลพิษที่ถูกดูดซับ (Adsorbed contaminants)

การถ่ายเทของสารมลพิษจากอากาศไปสู่น้ำ และตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพเป็นขั้นตอนเบื้องต้นในการบำบัด และบางครั้งจะถูกเรียกว่าเป็นการดูดซับหรือการสลายตัว (dissolution) โมเลกุลของสารมลพิษจะถูกละลายโดยง่ายในน้ำ แต่บางครั้งสารมลพิษอาจจะถูกดูดซับบนผิวหน้าของตัวกลาง การย่อยสลายโดยเซลล์จุลินทรีย์ การดูดซับบนผิวหน้าของฟิล์มจุลินทรีย์ การดูดซึมภายในฟิล์มจุลินทรีย์หรือตัวกลาง หรือการสะสมที่ผิวหน้าของน้ำ สำหรับสารมลพิษที่สามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี เช่น เอทานอลจะใช้รูปแบบของการละลายน้ำเป็นกลไกหลักในการกำจัดสารมลพิษ สำหรับสารมลพิษที่ไม่ละลายน้ำ กลไกสำคัญที่ใช้กำจัดสารมลพิษคือ การดูดซับบนผิวของตัวกลางและการดูดซึมภายในสารอินทรีย์

หลักการของการดูดซับในเครื่องกรองชีวภาพมีความเข้าใจกลไกการทำงานอยู่น้อย แต่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพ อัตราส่วนของสารมลพิษทั้งหมดที่อยู่ในเฟสน้ำและตัวกลางต่อปริมาณอัตราการไหลของอากาศใช้คำนวณหาเวลาเก็บกักของสารมลพิษในเครื่องกรองชีวภาพ เป้าหมายโดยทั่วไปของการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพคือเพื่อให้ประสบผลสำเร็จในการกำจัดความเข้มข้นของสารมลพิษที่เป็นไปได้มากที่สุดด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

การดูดซับบนตัวกลางได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในด้านการบำบัดน้ำเสีย และการบำบัดทางชีวภาพด้วยตัวกลางดิน (soil bioremediation) แบบจำลองการดูดซับ 2 แบบ ณ สภาวะสมดุล ถูกนำมาใช้กันมาก แบบจำลองของ Freundlich ใช้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ของการดูดซับไม่ถูกจำกัดและปริมาณของสารมลพิษที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะน้ำ

$$C_{ads} = k_f C_L^{1/n}$$

ในขณะที่ C_{ads} = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับ

C_L = ความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะน้ำ

n = ค่าคงที่

k_f = ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich

รูปแบบเบื้องต้นโดยส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองจะมีลักษณะเชิงเส้นตรง (n = 1) แต่บางครั้งอาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะกับแบบจำลองได้โดยการปรับค่า n (แต่โดยทั่วไปจะมีค่าใกล้ 1) แบบจำลองนี้มีสมมติฐานที่ว่า ความสามารถในการดูดซับนั้นไม่ถูกจำกัดโดยมากเกินกว่าในช่วงความสัมพันธ์ที่จะนำไปใช้งานนั่นก็คือ การเพิ่มความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะน้ำจะทำให้ปริมาณของสารมลพิษที่ถูกดูดซับมากขึ้น

สำหรับแบบจำลองอื่นจะสมมติว่าการดูดซับจะเกิดเฉพาะที่ และแต่ละพื้นที่จะเกิดได้กับโมเลกุลของสารมลพิษชนิดเดียวเท่านั้น แบบจำลองของ Langmuir สามารถคำนวณได้โดยมีการสมมติว่าสมดุลเคมีระหว่างค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ละลายกับความเข้มข้นที่ถูกดูดซับและจำนวนที่จำกัดของพื้นที่ดังสมการ

$$C_{ads} = \frac{C_{max}C_L}{K_L + C_L}$$

โดยที่ k_L = ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir

C_{max} = ค่าความเข้มข้นสูงสุดเมื่อพื้นที่ทั้งหมดถูกใช้งาน

2.5.5 การย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษ

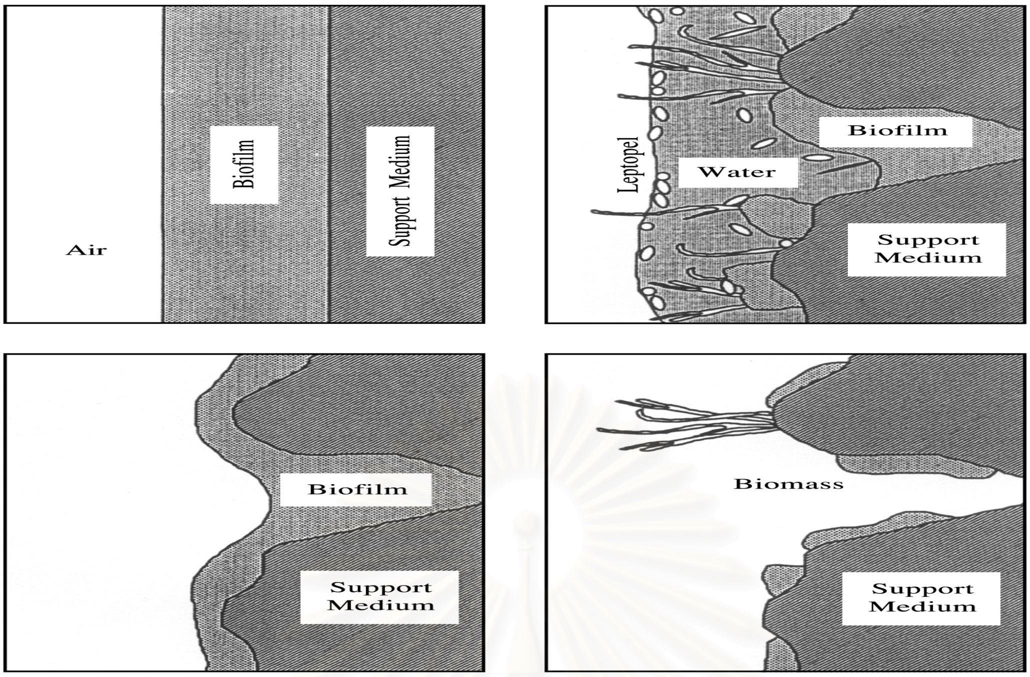
2.5.5.1 ฟิล์มจุลินทรีย์ (The biofilm)

กลไกสำคัญที่ใช้กำจัดสารมลพิษคือชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ซึ่งชั้นฟิล์มจุลินทรีย์นี้เป็นมวลของเซลล์จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนพื้นผิวของตัวกลางและเป็นตัวทำให้เกิดกิจกรรมการเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้เป็นผลิตผลที่มีอันตรายน้อยลง การดำเนินงานให้เครื่องกรองชีวภาพประสบความสำเร็จนั้นจุลินทรีย์เหล่านี้ต้องมีประสิทธิผลมาก ถ้าอัตราการเปลี่ยนรูปสารมลพิษเร็วขึ้นจะทำ

ให้เครื่องกรองชีวภาพมีขนาดเล็กลงได้ และมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูกลงและขนาดของเครื่องกรองชีวภาพเป็นตัวตัดสินถึงการประสบผลสำเร็จในด้านเศรษฐศาสตร์

โครงสร้างของชั้นจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้งานจริงยังมีความเข้าใจกันอยู่น้อยและเป็นหัวข้อที่ต้องทำการศึกษาอยู่ต่อไป การสังเกตจากระยะทางพบว่ามวลจุลินทรีย์จะเป็นฟิล์มบางที่รอยต่อระหว่างตัวกลางและก๊าซ การดำเนินงานให้เครื่องกรองชีวภาพประสบผลดี ควรจะมีความหนาของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ประมาณตั้งแต่ 1- 5 มม. และเครื่องกรองชีวภาพจะทำงานไม่ดีถ้าชั้นจุลินทรีย์มีความหนาถึง 2 ซม. เมื่อมองในระดับกล้องจุลทรรศน์จะพบว่ามีหลายหลากโครงสร้างของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ที่มีทางเป็นไปได้ และมีความเป็นไปได้ถึงตัวกลางที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพต่างกันจะมีความแตกต่างกันของชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ ชั้นฟิล์มจุลินทรีย์จะราบเรียบเป็นชั้นที่เป็นระเบียบสม่ำเสมอเท่ากันมีจุลินทรีย์ตรึงอยู่ใน Polysaccharide Gel ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำ แต่มีหลักฐานว่ามันอาจเป็นช่องที่เจาะทะลุซึ่งยอมให้น้ำที่มีมวลจุลินทรีย์ที่จับตัวกันเป็นก้อนไหลผ่านไปได้ และอาจจะมีน้ำอยู่รอบนอกเพื่อให้จุลินทรีย์ที่ว่ายน้ำได้ (Swimming Organisms) เจริญเติบโต โดยที่อาจจะมีสปีชีร์ที่เป็นเส้นใย (Filamentous species) โผล่ออกมาเหนือน้ำ แบคทีเรียและราเป็นจุลชีพหลักที่ใช้ย่อยสลายสารมลพิษภายในเครื่องกรองชีวภาพ โดยจุลชีพทั้งสองชนิดมีขนาดเล็กทำให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรส่งผลทำให้สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้อย่างรวดเร็ว แบคทีเรียมีขนาดที่เล็กกว่าและมีความรวดเร็วในการย่อยสลายสารมลพิษมากกว่ารา โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ความชื้นภายในชั้นตัวกลางสูง รวมถึงความเป็นกรด – ด่างภายในชั้นตัวกลางที่มีความเป็นกลาง ขณะที่ความชื้นภายในชั้นตัวกลางลดลงหรือตัวกลางมีสภาพเป็นกรดมากขึ้นจะทำให้ราเพิ่มจำนวนมากขึ้นซึ่งราสามารถย่อยสลายโมเลกุลของสารประกอบที่มีความซับซ้อนได้ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแบคทีเรีย แต่ราก็มีข้อเสียคือ หากราเจริญเติบโตมากเกินไปอาจไปเชื่อมประสานช่องว่างภายในชั้นตัวกลางทำให้ค่าความดันลดของระบบเพิ่มสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แบบจำลองทางความคิดรูปแบบต่างๆของมวลจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny และคณะ (1999)

2.6 จลนศาสตร์ (kinetics)

การย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองชีวภาพนั้นมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพที่ใช้ดินเป็นตัวกลางหรือการบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียโดยจลนศาสตร์การย่อยสลายสารมลพิษจะประยุกต์แบบจำลองของสมการ Michaelis – Menten

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{k_{max}C_L}{k_s + C_L}$$

โดยที่ C_L = ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ (mol / L)

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

k_s = half – saturation constant (mol / L)

เมื่อค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำสูงกว่าค่า k_s อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีค่าเท่ากับ k_{max} และไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของมลพิษ (การย่อยสลายเป็นแบบ Zero-order) และเมื่อค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำต่ำกว่าค่า k_s อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีค่า

เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ การย่อยสลายเป็นแบบจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง (First - order) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจลนศาสตร์จะเป็นแบบจลนศาสตร์อันดับศูนย์(Zero - order) บริเวณทางเข้าของเครื่องกรองชีวภาพซึ่งมีค่าความเข้มข้นของสารมลพิษสูงและจลนศาสตร์จะเป็นแบบ First - order เมื่อมีค่าความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ

การใช้ความสัมพันธ์ของ Michaelis - Menten สำหรับเซลล์จุลินทรีย์ทั้งหมดโดยสันนิษฐานว่าจำนวนของจุลินทรีย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือค่าของ k_{max} และ k_s ไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไรก็ตามมวลจุลชีพจะมีการปรับตัวเมื่อสารมลพิษเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพ เพราะการย่อยสลายของสารมลพิษเป็นผลมาจากกิจกรรมของเซลล์จุลินทรีย์ (Microbial activity) จลนศาสตร์ของการย่อยสลายสารมลพิษจะมีค่าใกล้เคียงกับจลนศาสตร์ของการเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์ และการเจริญเติบโตเป็นสัดส่วนกับขนาดของจุลชีพ (Microbial population) ดังสมการ

$$dX / dt = \mu x$$

โดยที่ x = ความหนาแน่นของมวลจุลินทรีย์ (mg / L)

μ = อัตราการเติบโตจำเพาะ (S^{-1})

ค่าการเจริญเติบโตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษที่มีอยู่และถูกใช้โดยจุลินทรีย์
ดังสมการ

$$\mu = (\mu_{max} . C_L) / (K_m + C_L)$$

ค่าความสัมพันธ์ของโมโนด (monod) อธิบายถึงอัตราของมวลชีวภาพที่คาดว่าจะเติบโต ดังนั้นการที่สารมลพิษถูกย่อยสลายโดย first – order ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำและเป็นแบบ zero-order ที่ช่วงความเข้มข้นสูง อัตราการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นต่ำ และอัตราการเจริญเติบโตจะมีค่าคงที่ในช่วงความเข้มข้นสูง

ในกรณีที่สารมลพิษมีค่าความเข้มข้นที่สูงมาก อาจเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตได้ ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการของ Haldane ดังนี้

$$\mu = (\mu_{max} . C_L) / [K_s + C_L + (C_L^2 / K_i)]$$

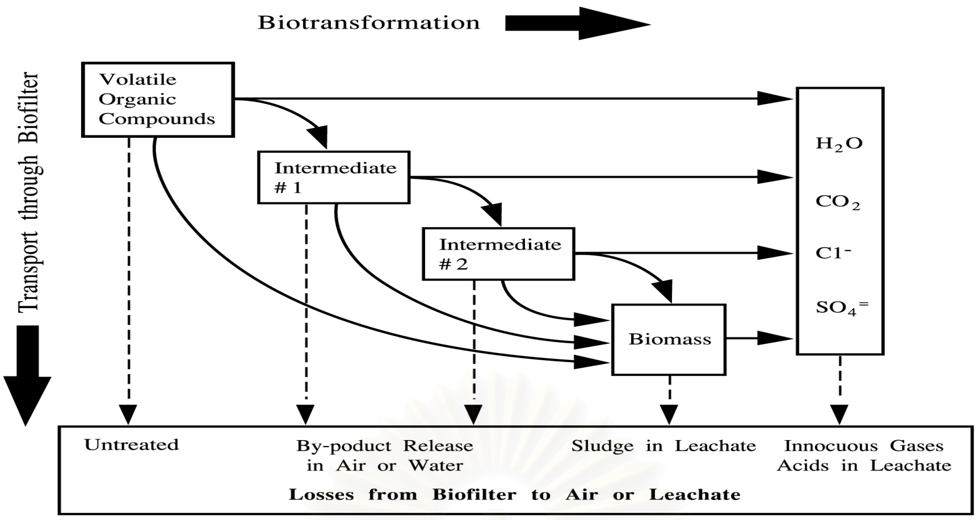
โดยที่ K_i = Inhibition constant

Alexander (1994) อธิบายถึงเหตุผลของสมการจลนศาสตร์เหล่านี้และสมการอื่นที่เกี่ยวข้องสำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพในดินว่าทำไมในการใช้งานจริงค่าจลนศาสตร์เหล่านี้ถึงได้แตกต่างจากหลักเกณฑ์ข้างต้น โดยสรุปเหตุผลดังนี้

1) อาจจะมีตัวต้านทานการแพร่เกิดขึ้น
2) สารมลพิษอาจจะถูกดูดซับในตัวกลาง
3) จุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษอาจได้รับการช่วยเหลือหรือถูกขัดขวางโดยสารประกอบอื่นที่มีอยู่
4) สารอาหารอนินทรีย์หรือออกซิเจนจะเป็นตัวจำกัดการย่อยสลายมากกว่าสารมลพิษ
5) ความหลากหลายของสปีชีร์ ค่าคงที่การย่อยสลายที่แตกต่าง
6) เกิดผู้ล่าซึ่งอาจจะจำกัดจำนวนของแบคทีเรีย
7) เซลล์จุลินทรีย์อาจจะรวมตัวกันโดยไปกักกันซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์
8) ระยะเวลาการปรับตัวของจุลินทรีย์เป็นสิ่งจำเป็น

2.6.1 สารที่เกิดขึ้น

สารมลพิษที่เข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพไม่ว่าจะเป็น VOCs หรือสารประกอบอนินทรีย์เช่นไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือแอมโมเนีย สารเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนรูปเป็น CO_2, H_2O, SO_4^{2-} และ NO_3^- โดยเซลล์จุลินทรีย์ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการเคลื่อนที่ของสารในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny และคณะ (1999)

ในอีกทางหนึ่งสารประกอบอาจจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สอง และผ่านไปยังเซลล์จุลินทรีย์ตัวอื่นๆ สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนและย่อยสลายได้ยากจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารที่แตกต่างกันหลายชนิดโดยเซลล์จุลินทรีย์ที่มีหลากหลายสปีชีร์ ส่วนสารประกอบที่เป็นผลิตผลในระหว่างการเปลี่ยนรูปที่มีความดันไอสูงอาจจะผ่านไปโดยมิได้รับการบำบัด ขณะที่สารประกอบอื่นที่ทนต่อการย่อยสลาย ได้สามารถสะสมอยู่ในเครื่องกรองชีวภาพ หรืออาจถูกล้างออกมากับน้ำชะ (Leachate)ได้

Devinny, cited in Fucich (1997) ได้ศึกษาการบำบัดคาร์บอนไดซัลไฟด์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ พบว่าผลิตผลในระหว่างการเปลี่ยนรูป (Intermediate product) คือ คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) จะหลุดลอดโดยไม่ผ่านการบำบัดถ้าเราดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพไม่ถูกวิธี

Devinny และ Hodge (1995) พบว่ามีเอทิล อะซีเตด และกรดอะซีติกเกิดขึ้นจากเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้อัตราภาระสารมลพิษชนิดเอทานอลมากเกินไป

Ottengraf และ Konings (1991) พบว่าสารคาร์บอนบางตัวในสารมลพิษสามารถรวมตัวเป็นมวลจุลินทรีย์และจะถูกย่อยสลายเมื่อมันตายและถูกกินเป็นอาหารโดยเซลล์จุลินทรีย์ตัวอื่น มวลจุลินทรีย์อาจจะหลุดออกมากับอัตราการไหลของอากาศและน้ำชะ แต่ก็ถือว่าน้อยมากเมื่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปรียบเทียบกับจำนวนที่อยู่ในเครื่องกรองชีวภาพ การสะสมของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะถูกดูดซับอยู่ภายในตัวกลางหรือถูกละลายในน้ำ

เมื่อเครื่องกรองชีวภาพเข้าสู่ภาวะคงที่ (Steady state) จุลินทรีย์ ในระบบจะเจริญเติบโตและลดจำนวนลงในปริมาณที่สมดุลกัน ในเครื่องกรองชีวภาพที่ดำเนินงานด้วยค่าภาระบรรทุกสารมลพิษต่ำจะประสบความสำเร็จ การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพจะเกิดขึ้นเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนรูปทางกายภาพ เพื่อว่าธาตุต่างๆที่มีอยู่ในสารมลพิษจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแร่ธาตุ (mineral products) การควบคุมมวลจุลินทรีย์ที่ภาวะคงที่เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ถ้าเกิดการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการอุดตันในเครื่องกรองชีวภาพได้ บางกรณีผู้ดำเนินงานอาจจะจำกัดการเจริญเติบโตของมวลจุลินทรีย์โดยการให้สารอาหารกับระบบน้อยลง อย่างไรก็ตามเครื่องกรองชีวภาพจำนวนมากที่ใช้กำจัดสารประกอบที่ย่อยสลายได้ในช่วงความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของมวลจุลินทรีย์มากขึ้น โดยอาจจะใช้วิธีการควบคุมความดันลดที่เกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลาง ด้วยวิธี การคลุกเคล้าตัวกลาง (medium mixing) หรือการบรรจุตัวกลางใหม่ลงไป (Repacking)

ในขณะที่สารประกอบถูกเปลี่ยนรูป เราสามารถทำสมดุลมวลของสารได้โดยพิจารณาจากจำนวนคาร์บอนที่เข้าระบบจะต้องเท่ากับจำนวนคาร์บอนที่สะสมในอยู่ภายระบบรวมกับจำนวนคาร์บอนที่ถูกกำจัดออกจากระบบ การวัดสมดุลของคาร์บอนสามารถใช้บ่งบอกถึงอัตราการสะสมของมวลจุลินทรีย์ในระบบได้ คือถ้าจำนวนคาร์บอนที่เข้าเครื่องกรองชีวภาพไม่สมดุลกับจำนวนคาร์บอนที่ออกจากระบบเป็นไปได้ว่าจะเกิดเป็นมวลจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือเกิดผลิตผลอื่น และในกรณีของการเปลี่ยนรูปหลายขั้นตอน การทำให้เกิดสภาวะคงที่เป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อทำให้แต่ละขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นที่อัตราเดียวกัน ถ้าการใส่เข้าระบบมากเกินกว่าการปล่อยออกจากระบบสำหรับทุกการสะสมใดๆจะทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบเพิ่มสูงขึ้น ในการศึกษาการกำจัดเอทานอลด้วยเครื่องกรองชีวภาพของ Devinny และ Hodge (1995) ใช้อัตราการป้อนเอทานอลที่สูงทำให้เกิดการสะสมตัวของสารมัธยันตร์ (Intermediate) และมวลจุลินทรีย์ เพราะว่าหนึ่งในสารมัธยันตร์จะเป็นกรดอะซีติก การสะสมตัวของกรดนี้เป็นเหตุให้ค่า pH ของตัวกลางลดลงซึ่งทำให้กระบวนการเมทาบอลิซึมเกิดช้ามากขึ้น ทำให้เกิดกรดสะสมมากขึ้น โดยเป็นเหตุทำให้เครื่องกรองชีวภาพล้มเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.2 ความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat generation)

การออกซิเดชั่น (Oxidation) สารประกอบอินทรีย์ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในขณะที่มีการกล่าวถึงกันโดยทั่วไปว่าจุลินทรีย์ใช้พลังงาน เพราะจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนพลังงานทางเคมีเป็นความร้อนสำหรับสารมลพิษบางชนิดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น การออกซิเดชั่นที่สมบูรณ์จาก 1 กรัมของเอทานอลใน 1 m^3 ของอากาศแห้งเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 20 C^O เป็น 38 C^O เพราะว่าอุณหภูมิจะวัดได้ง่ายมาก และมีความถูกต้องสูง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นตัววัดอัตราการย่อยสลาย (Degradative activity) อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายชนิดที่จะต้องคำนึงถึงในการคำนวณสมดุลความร้อน และในระบบที่การดำเนินงานยังไม่ถึงสภาวะคงที่ การย่อยสลายทางชีวภาพจะมีผลทำให้อุณหภูมิในเครื่องกรองชีวภาพสูงขึ้น และตัวกลางกับวัสดุที่ใช้ทำเครื่องกรองชีวภาพสามารถดูดซึมพลังงานได้ โดยสามารถคำนวณจากมวลของสาร ค่าความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป แต่ถ้าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วทำให้ค่าอุณหภูมิของตัวกลางกับภาชนะที่ใช้บรรจุไม่เปลี่ยนแปลง ค่าตัวแปรนี้ก็จะไม่นำมาพิจารณาแต่ถึงอย่างไรก็ตามถ้าเครื่องกรองชีวภาพมีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกับสภาวะแวดล้อมค่าความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านผนังของระบบได้ ซึ่งในการทดลองสามารถลดผลกระทบจากสิ่งนี้ได้โดยการติดฉนวนกันความร้อนที่ผนัง

สำหรับเครื่องกรองชีวภาพขนาดใหญ่มีค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อยมาก การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังไม่มีผลมากนัก ซึ่งเมื่อทำการควบคุมตัวแปรแล้วเราสามารถวัดค่าความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายได้ 2 รูปแบบคือ น้ำที่ระเหยออกจากชั้นตัวกลางและค่าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากระบบจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่เข้าระบบ ถ้าอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นขณะผ่านเครื่องกรองชีวภาพ โดยทั้งอากาศก่อนเข้าและออกจากเครื่อกรองชีวภาพมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% แล้วจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอเกิดขึ้นทั้งนี้เพราะว่าปริมาณน้ำของอากาศที่มีอุณหภูมิสูงมีมากกว่า ในกรณีที่อากาศก่อนเข้ามีค่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 100% ต้องมีการเติมน้ำให้กับตัวกลางจนกระทั่งอากาศที่ออกจากเครื่องกรองชีวภาพมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%

ปริมาณความร้อนของอากาศสามารถใช้คำนวณจำนวนพลังงานที่ใช้ทำให้อากาศมีความร้อนโดยผลรวมของค่าความร้อนของการระเหยรวมกับค่าความร้อนที่ทำให้อากาศมีความร้อนเพิ่มขึ้นจะเท่ากับจำนวนความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งในที่สุดแล้วค่าความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของการเผาไหม้สารมลพิษที่กำจัด เพื่อคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ถูกย่อยสลายไป ดังนั้นการคำนวณค่าสมดุลความร้อนสามารถประมาณอัตราของมวลจุลชีพที่สะสมในเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งอาจจะไม่สะดวกและถูกต้องมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดมวลจุลชีพที่สะสมอยู่ภายในเครื่องกรองชีวภาพโดยตรง

2.7 หลักเกณฑ์ในการเลือกตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพที่เหมาะสม

2.7.1 ปริมาณสารอาหารอนินทรีย์

ประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม และซัลเฟตในปริมาณที่สูง เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการก่อให้เกิดจุลินทรีย์ที่หนาแน่น ในเวลานี้มีข้อมูลน้อยมากเกี่ยวกับปริมาณสารอาหารและวัฏจักรการให้สารอาหารของระบบเครื่องกรองชีวภาพ โดยทั่วไปแล้วจะมีแต่เพียงการเติมสารอาหาร โดยใช้การสเปรย์น้ำที่มีสารอาหารลงบนตัวกลางแต่ใช้เพียงแค่ตอนเริ่มต้นของการเดินระบบเท่านั้น อย่างไรก็ตามในบางกรณีจะมีการเติมสารอาหารในระหว่างการดำเนินงานด้วย โดยทั่วไปสำหรับตัวกลางที่ใช้ปุ๋ยหมัก การเติมสารอาหารในช่วงเริ่มต้นจะเป็นดังนี้ N : P : K อยู่ในช่วง 0.4 : 0.15 : 0.15% โดยน้ำหนัก

2.7.2 ปริมาณสารอินทรีย์

ในหลายกรณีเครื่องกรองชีวภาพจะใช้กำจัดมลพิษแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนหรือการหยุดทำงานในช่วงสุดสัปดาห์ กากชีวภาพของแข็งที่เหลืออยู่และสารอินทรีย์ที่ดูดซึมได้อื่นๆ ที่มีอยู่ยกตัวอย่าง เช่น ในปุ๋ยหมักจะเป็นแหล่งอาหารอีกทางหนึ่งสำหรับจุลินทรีย์ที่จะนำไปใช้

2.7.3 สารเติมแต่งทางเคมีและสารเฉื่อยปฏิกิริยา

สารเฉื่อยปฏิกิริยา (Inert additives) จะถูกเติมลงไปเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ เช่นเพื่อป้องกันการอัดตัวและความดันลดที่จะเกิดขึ้นภายในระบบ สารเฉื่อยปฏิกิริยาที่ใส่เข้าไป เช่น เม็ดโพลีสไตรีน เศษไม้ เปลือกไม้ ลูกแก้วกลม ชิ้นส่วนยางรถยนต์และอื่นๆวัตถุประสงค์อื่นคือเพื่อรักษาระดับพีเอชให้เหมาะสมและระดับสารอาหารในถังปฏิกรณ์ Yang และ Allen (1994) ได้ศึกษาการเติมหินปูนและเปลือกหอยเพื่อใช้ป้องกันสภาพที่เกิดกรดในตัวกลาง

2.7.4 ปริมาณน้ำ

ตัวกลางควรมีความสามารถในการกักเก็บน้ำอยู่ภายในเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้ โดยทั่วไปตัวกลางที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water – holding capacity) สูงเป็นสิ่งที่ปรารถนา และตัวกลางที่เป็นสารอินทรีย์จะมีปริมาณน้ำประมาณ 40 - 80% โดยน้ำหนัก ปุ๋ยหมักบางชนิดเมื่อเริ่มต้นสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ (Hydrophilic) สามารถเปลี่ยนเป็นกักเก็บน้ำไว้ไม่ได้ (Hydrophobic) เมื่อมันแห้งลักษณะเช่นนี้การทำให้มันเปียกอีกครั้งทำได้ยาก ขณะนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาถึงวิธีในการเลือกวัสดุที่ไม่มีคุณลักษณะเช่นนี้

2.7.5 พีเอช

เมื่อพิจารณาถึงการย่อยสลายทางชีวภาพแล้วพีเอช ที่มีเป็นกลางมีความเหมาะสม ปกติแล้วค่า พีเอช ของวัสดุที่นำมาเป็นตัวกลางควรอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 ถึงแม้ว่าในบางกรณีการบำบัดสารประกอบที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบจะทำให้พีเอช ลดต่ำประมาณ 2 ถึง 4 แต่ประสิทธิภาพการกำจัดก็มิได้ลดลง

2.7.6 คุณลักษณะการดูดซับ ความพรุน

การดูดซับของสารมลพิษไปยังตัวกลางรวมทั้งการดูดซึมในช่องว่างของน้ำ และฟิล์มชีวภาพรวมถึงการดูดซับทางกายภาพลงบนชั้นของตัวกลาง ตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพที่เหมาะสมควรจะมีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษได้เพียงพอสำหรับการบำบัดสารมลพิษต่อไป ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบมีความผันแปร กระบวนการดูดซับสารมลพิษไปยังตัวกลางควรจะมีบทบาทสำคัญเพื่อลดความเข้มข้นที่สูงให้เจือจางน้อยลง

โดยส่วนมากแล้วตัวกลางกรองที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันควรจะมีความพรุนหรือปริมาตรช่องว่างประมาณ 40 ถึง 80 % เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าอากาศจะเคลื่อนที่ได้ดีและความดันลดที่เกิดขึ้นน้อยลง การบรรจุตัวกลางควรจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากสำหรับให้จุลินทรีย์อาศัยอยู่ได้และการถ่ายเทสารมลพิษเกิดขึ้นได้

2.7.7 การยึดเกาะของแบคทีเรีย

ตัวกลางวัสดุที่ใช้ควรจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรีย งานวิจัยบ่งชี้ว่าตัวกลางควรมีผิวขรุขระ ความพรุนและเก็บกักน้ำไว้ได้ สามารถทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ พื้นที่ผิวขรุขระเป็นสิ่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันจุลินทรีย์จากแรงเฉือนทางชลศาสตร์ (Hydraulic shear) สำหรับตัวกลางที่เป็นวัสดุสังเคราะห์บางครั้งอาจมีการใช้สารเคมีทำการชะล้าง เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเมือกจุลินทรีย์ (Slime growth)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.8 คุณสมบัติทางกลศาสตร์

โครงสร้างของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางกรองควรจะใช้ได้นานพอสมควร ไม่เกิดการอุดตันหรือการหดตัวของชั้นสารกรองด้านล่างเนื่องจากการย่อยสลายของวัสดุตัวกลาง ทนต่อการบดอัด วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางที่อยู่ด้านล่างควรจะสามารถทนทานต่อการรับน้ำหนักวัสดุที่อยู่ด้านบนได้ ตัวกลางที่ใช้ปุ๋ยหมักควรมีความหนาแน่นน้อยอยู่ในช่วง 300 ถึง 500 kg/m^3 ซึ่งถูกบดอัดได้ง่ายทำให้ถูกจำกัดความลึกของชั้นตัวกลางประมาณ 1 ถึง 1.5 เมตร ขณะที่ตัวกลางพลาสติกอาจมีความลึกได้ถึง 5 เมตรความลึกที่มากขึ้นเป็นสิ่งที่ปรารถนาเพราะว่าหมายถึงว่าถังปฏิกรณ์จะมีปริมาตรมากขึ้นสามารถทำให้ก่อสร้างในพื้นที่จำกัดได้ ความหนาแน่นของตัวกลางน้อยนั้นดี เพราะหมายถึงโครงสร้างของถังปฏิกรณ์จะได้มีน้ำหนักน้อยทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถูกลง

2.7.9 ปัญหาเรื่องกลิ่นจากตัวกลางที่ใช้บรรจุ

เพราะว่าวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้จะประกอบไปด้วยวัสดุอินทรีย์และมวลจุลินทรีย์ซึ่งอาจจะมีกลิ่นที่อยู่ภายในวัสดุ โดยปกติค่าของกลิ่นที่ออกมาจากระบบคือ 20 ถึง 100 OU/m^3 ดังนั้นจึงไม่แนะนำให้ใช้เครื่องกรองชีวภาพบำบัดมลพิษอากาศภายในอาคารที่ไม่ระบายอากาศออกสู่ภายนอก

2.7.10 ค่าใช้จ่ายของวัสดุตัวกลางและอายุการใช้งาน

วัสดุตัวกลางที่ใช้ควรจะสามารถใช้งานได้ 2 ถึง 4 ปี ก่อนจะถึงเวลากำจัด และราคาค่าวัสดุตัวกลางควรจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในด้านอื่นรวมถึงค่าใช้จ่ายในด้านการดำเนินงานควรจะต่ำ การเปลี่ยนตัวกลางใหม่เป็นสิ่งจำเป็นเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดต่ำลงกว่าค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อค่าความดันลดสูงมาก

2.7.11 การกำจัดตัวกลางที่หมดอายุการใช้งาน

วัสดุตัวกลางที่ใช้แล้วไม่ควรที่จะเป็นขยะอันตรายและควรที่จะกำจัดได้ด้วยวิธีที่โดยง่ายเสียค่าใช้จ่ายน้อย เช่น การถมที่เพื่อการปศุสัตว์ (land Farming)

2.8 ชนิดของตัวกลางที่ใช้

คุณสมบัติของตัวกลางนับเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของตัวกลางประกอบด้วย ความพรุน ความสามารถในการอัดตัว

(Degree of Compaction) ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water Retention Capacity) และความสามารถในการเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ สามารถแบ่งชนิดของตัวกลางได้ดังต่อไปนี้

2.8.1 ตัวกลางดิน (Soil Bed)

ดินนับเป็นตัวกลางแบบแรกที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ ดินที่มีความเหมาะสมที่สุดจะใช้ในระบบกำจัดกลิ่นหรือสาร VOCs เป็นดินประเภท Loam ส่วนดินเหนียวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ (Carlson และ Leiser 1996)

2.8.2 ตัวกลางวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวม เช่น ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางที่นิยมใช้ในเครื่องกรองชีวภาพเนื่องจากเป็นวัสดุราคาถูก และยังมีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่ในตัวแล้วและยังมีสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณมาก วัสดุมวลรวมยังมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีและมีความพรุนทำให้อากาศถ่ายเทได้ดีแต่วัสดุมวลรวมก็มีข้อเสียคือเป็นวัสดุที่สลายตัวได้ตามธรรมชาติทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวกลางใหม่อยู่เรื่อยๆ

2.8.3 ตัวกลางสารอนินทรีย์และตัวกลางสังเคราะห์

สารอนินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพได้แก่ถ่านกัมมันต์ระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์จะมีข้อดีกว่าระบบที่ใช้วัสดุมวลรวมในแง่อายุการใช้งานของตัวกลาง และมีประ-สิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าทำให้สามารถลดขนาดของระบบลงได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียที่สำคัญของระบบที่ใช้สารอนินทรีย์หรือตัวกลางสังเคราะห์ คือราคาที่ค่อนข้างสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของตัวกลาง

คุณลักษณะ	ตัวกลางแต่ละชนิด					
	Compost	**Peat**	**Soil**	**Activated Carbon**	**Synthetic Material**	**Composite Material**
จำนวนจุลินทรีย์ที่เจริญเติบ	สูง	ต่ำ - ปานกลาง	สูง	-	-	ปานกลาง - สูง
พื้นที่ผิวสัมผัส	ปานกลาง	สูง	ต่ำ - ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง
อากาศซึมผ่าน	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง - สูง	สูงมาก	สูง
สารอาหาร	สูง	ปานกลาง - สูง	สูง	-	-	สูง
ความสามารถในการดูดซับสารมลพิษ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-สูง	ไม่มี-สูง	ปานกลาง - สูง
อายุการใช้งาน	2 - 4 ปี	2 - 4 ปี	มากกว่า 30 ปี	มากกว่า 5 ปี	มากกว่า 15 ปี	มากกว่า 4 ปี
ราคา	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลาง - สูง	สูงมาก	ต่ำ
การใช้งานทั่วๆ ไป	ง่ายคุ้มค่าต่อการลงทุน	ปานกลางมีปัญหาในการควบคุมน้ำ	เหมาะกับระบบที่มีค่าภาระบรรทุกต่ำๆ	ต้องเติมสารอาหารที่จำเป็นและมีราคาแพง	ใช้กับ Biotrickling filter หรือ Prototype	ง่ายและค่าลงทุนเริ่มต้นต่ำ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Devinny และคณะ (1999)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของพลาสติกชนิด Polybutylene Terephthalate

Chemical Resistance		**Mechanical Properties**	
Acids – dilute	Good	Elongation at break(%)	250
Alcohols	Good	Hardness – Rockwell	M70
Alkalis	Poor – Good	Tensile modulus (GPa)	2
Aromatic hydrocarbons	Good	Tensile strength (MPa)	50
Greases and Oils	Good	Izod impact strength ($J.m^{-1}$)	60
Ketones	Good	Shrinkage @ 100^0C (%)	3

ที่มา : Goodfellow , (n.d.)

2.9 จุลชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพ

หลักการที่สำคัญของระบบเครื่องกรองชีวภาพ คือการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบที่มีหน้าที่เปลี่ยนรูปสารมลพิษที่อันตรายมาก เป็นสารที่มีความเป็นพิษน้อยลงโดยต้องรักษาสภาพแวดล้อมของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุดซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีตามที่ได้ออกแบบไว้ จุลชีพที่สำคัญในระบบก็คือแบคทีเรียและเชื้อรา โดยแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและย่อยสลายสารมลพิษได้เร็วกว่าเชื้อราในสภาพ ค่าพีเอช ใกล้กับความเป็นกลางและมีค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลางเหมาะสม แต่ถ้า ค่าพีเอชลดลงและความชื้นภายในชั้นตัวกลางเริ่มแห้งเชื้อรามีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าโดยทั่วไประบบจะใช้การย่อยสลายของแบคทีเรียเพราะว่าแบคทีเรียมีขนาดเล็กทำให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface to volume ratio) มากกว่าเชื้อราซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยส่งผลทำให้ระบบมีค่าความดันลดสูงขึ้นเพราะว่าเส้นใยของเชื้อราจะไปขัดขวางการไหลของอากาศและเป็นตัวทำให้อณูภาคของระบบเชื่อมติดกัน แต่รามีข้อดีคือสามารถย่อยสลายสารมลพิษที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนได้

จุลินทรีย์ที่มีส่วนในการกำจัด VOCs จะเป็นจุลินทรีย์ประเภท Heterotrophic bacteria ซึ่งใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน ตัวอย่างเช่น Pseudomonas Actinomycete และ Nocardia จุลินทรีย์เหล่านี้มักจะมีอยู่แล้วในตัวกลางที่เป็นวัสดุธรรมชาติ แต่ก็ควรมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเช่น การเติมตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เป็นต้น

ชั้นฟิล์มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการขับถ่าย Polysaccharide gel ของจุลินทรีย์ออกมาแล้วเกาะติดตามผิวของของแข็ง โดยน้ำที่อยู่ในชั้นฟิล์มจะอยู่กับที่เมื่อมลพิษเข้ามาในระบบก็จะเกิดการ

เคลื่อนที่แบบ Molecular Diffusion ซึ่งก่อนจะให้ระบบทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ควรจะมีเวลาให้จุลชีพได้ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมและชนิดของสารมลพิษที่จะย่อยสลายเสียก่อน โดยทั่วๆไปจะใช้เวลาประมาณ 2 - 3 วัน หรือ 2 - 3 สัปดาห์

ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพจะเป็นแบบ Plug Flow คือความเข้มข้นของสารมลพิษจะลดลงเมื่ออากาศผ่านระบบ ดังนั้นความเข้มข้นของสารมลพิษจึงมีค่าสูงบริเวณทางเข้าและจะค่อยลดลงบริเวณทางออก ซึ่งลักษณะของจุลินทรีย์ก็จะเป็นไปตามนี้เช่นกัน โดยที่การเจริญเติบโตมากขึ้นของมวลจุลินทรีย์บริเวณที่อากาศเข้า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันภายในชั้นตัวกลางได้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิชุดา มณีรัตน์ (2538) ศึกษาปริมาณสารเคมีเป็นพิษที่ปนเปื้อนจากขยะและสิ่งแวดล้อมในเม็ดพลาสติกรีไซคลิ่ง พบว่าปริมาณของตะกั่ว แคดเมียม และปรอท โดยเฉลี่ยในพลาสติกชนิดโพลิเอทธิลีน เท่ากับ 143.15 55.0 และ 311.03 ppm ตามลำดับ

กรมควบคุมมลพิษ (2544) ได้ว่าจ้างบริษัทโปรเกรสเทคโนโลยีคอนซัลแท็นส จำกัด เพื่อปฏิบัติงานตามโครงการสำรวจวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและเศรษฐกิจของประเทศไทย ในชื่อโครงการวิจัยเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ) เพื่อกำจัดกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสียและโรงงานปลาป่น ผลการศึกษาพบว่าโรงบำบัดน้ำเสีย กลิ่นที่เป็นปัญหาสำคัญคือ H_2S และ CH_3SH วัสดุตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย ปุ๋ยคอก : กาบมะพร้าว : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ 20 : 75 : 5% โดยปริมาตรและมีการเติมปูนขาวเพื่อรักษาสภาพความเป็นกลางของ pH ของระบบที่ 10 % โดยน้ำหนักรวมของส่วนประกอบตัวกลาง ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ 99 % และเวลาในการกักเก็บที่เหมาะสมประมาณ 30 – 40 วินาที Loading rate ที่เหมาะสมในการกำจัด H_2S และ CH_3SH มีค่าเท่ากับ 30 $g.H_2S/m^3$- hr และ 64 $g.CH_3SH/m^3$- hr ตามลำดับ โรงงานปลาป่น กลิ่นที่เป็นปัญหาสำคัญคือ NH_3 วัสดุตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย ปุ๋ยคอก : กาบมะพร้าว : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ 20 : 75 : 5 % โดยปริมาตรระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ 80% และเวลาในการกักเก็บที่เหมาะสม ประมาณ 50 - 60 วินาที Loading rate ที่เหมาะสมในการกำจัด NH_3 มีค่าเท่ากับ 10 $g.NH_3/m^3$- hr ตามลำดับ

เจตนา จิรวัชรเดช (2544) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) โดยระบบ EAPS โดยใช้ตัวกลางดิน 3 ชนิดคือ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และดินสีดา ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ NO_2 ของระบบ EAPS มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 100 % ที่ค่าความเข้มข้น NO_2 1-1.5 ppm ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ NO มีค่าเฉลี่ยประมาณ 20 – 40 % ค่าความดันลดของระบบจะเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากการบดอัดของดินตัวกลาง ค่าพีเอชของดินลดลงหลังผ่านการทดสอบ และเพิ่มขึ้นหลังจากการหยุดการทดสอบ และ ขอบเขตเวลาในการทดสอบยังไม่สามารถทำให้เกิดกระบวนการทางชีวภาพในระบบ

กรมควบคุมมลพิษและสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาฯ (2546) ศึกษาการบำบัดกลิ่นจากระบบบำบัดน้ำเสียของศูนย์กีฬามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และโรงงานอุตสาหกรรมผสมปุ๋ยด้วยเครื่องกรองชีวภาพ พบว่าปัญหากลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสีย คือไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ตัวกลางที่ประกอบด้วยกาบมะพร้าว 75% ปุ๋ยคอก 20% และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย 5% นอกจากนี้ได้เติมปูนขาว 10% ของน้ำหนักรวมของตัวกลาง โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 95 – 100 % ส่วนปัญหากลิ่นจากโรงงานอุตสาหกรรมคือ แอมโมเนียโดยที่อัตราการไหลของอากาศประมาณ 4,000 ลบ.ม.ต่อวัน และความเข้มข้นของแอมโมเนียประมาณ 40 ppm ขณะที่ตัวกลางและอัตราส่วนที่ใช้คงเดิมพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 90%

เสริมศักดิ์ ทั่งมั่งมี (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ 1. ตัวกลางประเภทวัสดุมวลรวมประกอบด้วย ปุ๋ยหมัก เศษไม้ ปูนขาวและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย 2. ตัวกลางประเภทวัสดุสังเคราะห์ประกอบด้วย เซรามิก ตะกอนและปูนขาว เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดของตัวกลางแต่ละชนิดพบว่าตัวกลางประเภทวัสดุมวลรวมที่อัตราส่วนปุ๋ยหมัก : เศษไม้ : ตะกอน จากโรงบำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วน 70:20:10 โดยปริมาตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอีนสูงสุดเท่ากับ 97.21 เปอร์เซ็นต์ และเวลาในการเก็บกักเพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอีนอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 50 วินาที

สุโรชา พูลสวัสดิ์ (2546) ศึกษาการกำจัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ 2 ชุดคือ ชุดที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบ และชุดที่มีตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าว โดยผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกในอัตราส่วน 75:5:20 พบว่าชุดทดลองที่ใช้แกลบเป็นตัวกลางหลัก เมื่อชุดทดลองนี้มีเวลาเก็บกักมากกว่า 80 วินาที และช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนเท่ากับ 20 - 200 ppm ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าระหว่าง 92 - 100% ในขณะที่เวลาเก็บกัก 80 วินาที และช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนเท่ากับ 200 - 1,200 ppm ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าระหว่าง 7 - 30% และชุดทดลองที่ใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลัก เมื่อชุดทดลองนี้มีเวลาเก็บกักมากกว่า 65 วินาที และช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนเท่ากับ 20 - 200 ppm ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าระหว่าง 93 - 100% ในขณะที่เวลาเก็บกัก 65 วินาที และช่วงความเข้มข้น

ของก๊าซไซลีนเท่ากับ 200 - 1,200 ppm ประ-สิทธิภาพการกำจัดมีค่าระหว่าง 10 - 25% โดยที่ความสามารถสูงสุดในการกำจัดไอของไซลีนของ
ชุดทดลองที่ใช้แกลบและกาบมะพร้าวมีค่าเท่ากับ 20.30 และ 28.44 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ตามลำดับ

Chou และ Cheng (1997) ทำการวิจัยหาวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพโดยทำการผสมระหว่างปุ๋ยคอกจากสุกรหรือปุ๋ยคอกจากวัวและเศษใบเฟิร์น รำข้าวสาลี และเปลือกชานอ้อย พบว่าการผสมปุ๋ยคอกจากสุกรและเศษใบเฟิร์นในอัตราส่วน 9 : 1 โดยน้ำหนักแล้วทำให้สามารถบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนด้วยเมทธิล เอทธิล คีโตนและโทลูอีน สมบูรณ์มากที่สุดเนื่องจากปุ๋ยคอกจากสุกรมีปริมาณไนโตรเจนและคาร์บอนสูงกว่าปุ๋ยคอกจากวัว รวมถึงค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลางที่มีความคงตัว และความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ได้ของตัวกลาง

Hwang และ Tang (1997) ทำการวิจัยถึงจลนศาสตร์ของเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กำจัดโทลูอีน ซึ่งทำการวิจัยโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ 3 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ใช้วัสดุตัวกลางผสมดังนี้ 1. ปุ๋ยหมักและแกลบ 2. ปุ๋ยหมักและ diatomaceous earth 3.ปุ๋ยหมักและGranular Activated Carbon (GAC) โดยใช้ความเข้มข้นของโทลูอีนที่เข้าระบบแปรผันจาก 0.053 ถึง 5.81 g/m^3 และความเร็วที่ผิวหน้าของก๊าซอยู่ในช่วง 0.12 ถึง 1.61 cm/s พบว่าเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กำจัดสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยเช่นโทลูอีน ไม่ควรดำเนินงานที่อัตราการไหลของก๊าซมาก และที่เวลาเก็บกักน้อยเนื่องจากการจำกัดของการถ่ายเทมวลสารในระบบ

Ergas และ Switzenbaum (1999) ศึกษาคุณสมบัติพิเศษเฉพาะของปุ๋ยหมักที่ใช้เป็นตัวกลางในระบบกรองชีวภาพ 3 ชนิดประกอบด้วย ปุ๋ยหมักจาก biosolid ปุ๋ยหมักขยะจากสนามหญ้าคือใบไม้ ใบหญ้า เปลือกไม้ และปุ๋ยหมักจากมูลม้าผสมฟางข้าว พบว่าปุ๋ยหมักที่ทำจากมูลม้าผสมฟางข้าว ในช่วงต้นมีการทำงานของจุลชีพสูงและใช้เวลาในการปรับตัวของจุลชีพสั้น แต่ตัวกลางที่ดีที่สุดคือ ปุ๋ยหมักขยะจากสนามหญ้าเนื่องจากมีเสถียรภาพที่สุด

Johannes และคณะ (2000) สร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ปุ๋ยหมักจากเปลือกไม้สน เพื่อกำจัดโทลูอีนโดยใช้ฟังก์ชันของเวลาเก็บกัก อัตราภาระและความสูงของชั้นตัวกลาง พบว่าเวลาเก็บกักที่มากกว่า 0.32 นาที อัตราภาระที่ต่ำกว่า 42 $g/m^3/hr$ และความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 1 เมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีนมากกว่า 90 %

Jorio และคณะ (2000) ศึกษาอิทธิพลอัตราการไหลของอากาศและความเข้มข้นของไอ-ระเหยไซลีนในระบบกรองชีวภาพ โดยทำการแปรผันอัตราการไหลของอากาศที่ 0.4 0.7 และ1.0 ลบ.ม./ชม. และแปรผันความเข้มข้นของไซลีนจาก 0.2 ถึง 4 ก./ลบ.ม. พบว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.4 ลบ.ม./ชม. ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนสูงที่สุด โดยใช้เวลาเก็บกักที่ 157 วินาที และความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงที่สุดเท่ากับ 67 52 และ 41 ก./ลบ.ชม. ที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.4 0.7 และ 1 ลบ./ชม. ตามลำดับ

Aitor และคณะ (2001) ทำการวิจัยหาค่าประสิทธิภาพการกำจัด VOCs สูงสุด (ECmax) โดยระบบเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ดินตะกอนเลน (peat) เป็นตัวกลางในการบำบัด VOCs ที่ผสมรวม 3 ประเภท คือ Oxygenated Aromatic และ Chlorinated พบว่า ECmax มีค่าประมาณเท่ากับ 120 gVOCs/m^3 peat/hr

Feranado และคณะ (2001) ทำการวิจัยถึงผลกระทบของการเจริญเติบโตของมวลจุลินทรีย์ที่มีผลต่อความดันลดในเครื่องกรองชีวภาพโดยใช้วัสดุตัวกลาง 2 ชนิด คือ เศษไม้และเม็ดกลมเฉื่อยปฏิกิริยาที่มีรูพรุนภายใน (Nova Inert) ทำการบำบัดเมทานอลที่อัตราภาระบรรทุก 100 - 150 g.methanol/m^3 bed/h. พบว่าค่าความดันลดของเศษไม้มีค่าเท่ากับ 265 และ Nova Inert มีค่าเท่ากับ 550 มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ

Shim และคณะ (2004) ทำการวิจัยถึงความสามารถในการกำจัด VOCs รวมชนิด Benzene Toluene และ Xylene (BTX) โดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ Polyurethane Foam เป็นตัวกลางโดยทำการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลาย BTX พบว่าความสามารถในการกำจัด BTX มีค่าเท่ากับ 50 90 และ 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

2.11 สรุปผลการทบทวนเอกสาร

ผลการทบทวนเอกสารพบว่ากระบวนการกรองชีวภาพสามารถกำจัด VOCs ชนิดไซลีนได้ โดยประสิทธิภาพ และความสามารถในการกำจัดไซลีนขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังนี้ เวลาเก็บกัก ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ และชนิดของตัวกลางที่เลือกใช้ ผลการทดลองจากเอกสารที่ผ่านมาพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ และเวลาเก็บกักคือ เมื่อความ

เข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบน้อย (20 - 300 ppm) โดยที่เวลาเก็บกักของระบบสูงขึ้น (มากกว่า 65 วินาที) ส่งผลให้ประสิทธิภาพ และความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงขึ้น แต่ถ้าชนิดของตัวกลางที่เลือกใช้ไม่เหมาะสม เช่น ความสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้น้อย การมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ปริมาณสารอาหารในตัวกลางไม่เพียงพอ และความพรุนของตัวกลางน้อย เป็นต้น ถึงแม้จะดำเนินงานที่ความเข้มข้นของสารมลพิษน้อย และที่เวลาเก็บกักของระบบสูงขึ้น โดยคุณสมบัติของตัวกลางเช่นนี้ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดลดลง ซึ่งปัจจัยสำคัญเหล่านี้ต้องควบคุม รวมถึงดำเนินงานให้ถูกต้องเหมาะสม จึงเป็นสาเหตุสำคัญให้การวิจัยนี้คำนึงถึงปัจจัยของเวลาเก็บกัก ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ และชนิดของตัวกลางเพื่อใช้ออกแบบการทดลองของเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการวิจัยและการดำเนินการทดลอง

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 การทดลองคือ (1) การทดลองหาอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสมของดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติก (2) การทดลองศึกษาเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและความสามารถสูงสุดในการกำจัดไซลีน การวิจัยครั้งนี้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 การทดลองหาอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสม

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนการผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติกที่เหมาะสม เพื่อนำอัตราส่วนของตัวกลางผสมที่เหมาะสมไปดำเนินการทดลองในหัวข้อ 3.1.2 ต่อไป ค่าตัวแปรต่างๆที่พิจารณาในการทดลองมีดังนี้

ตัวแปรคงที่

1) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน : 100 ppm
2) ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง : 6 - 8
3) ค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลาง : 45 – 60%
4) เวลาเก็บกัก : 36 วินาที

ตัวแปรอิสระ

1) อัตราส่วนการผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติก 4 ค่าคือ : 80:20 60:40 40:60 และ 20:80

ตัวแปรตาม

1) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนบริเวณทางเข้า
2) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนบริเวณทางออก
3) ประสิทธิภาพการกำจัด
4) อัตราส่วนการผสม
5) ความดันลดที่เกิดขึ้น

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6) การทรุดตัวของตัวกลาง

7) อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง

3.1.2 การทดลองศึกษาเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและความสามารถสูงสุดในการกำจัดไซลีน

การทดลองนี้มีวัตถุเพื่อศึกษาเวลาเก็บกักที่เหมาะสม และความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด โดยใช้อัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.1.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่พิจารณาในการทดลองมีดังนี้

ตัวแปรคงที่

1) อัตราส่วนการผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติกเท่ากับ : 60:40

2) ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง : 45 - 60 %

3) ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง : 6 – 8

ตัวแปรอิสระ

1) เวลาเก็บกัก : 36 60 และ 90 วินาที

2) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน : 50 - 2,000 ppm

ตัวแปรตาม

1) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนบริเวณทางเข้า

2) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนบริเวณทางออก

3) ประสิทธิภาพการกำจัด

4) ความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด

5) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6) ความเข้มข้นและเวลาเก็บกักของก๊าซไซลีนที่เหมาะสม

7) ความดันลดที่เกิดขึ้น

8) การทรุดตัวของตัวกลาง

9) อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

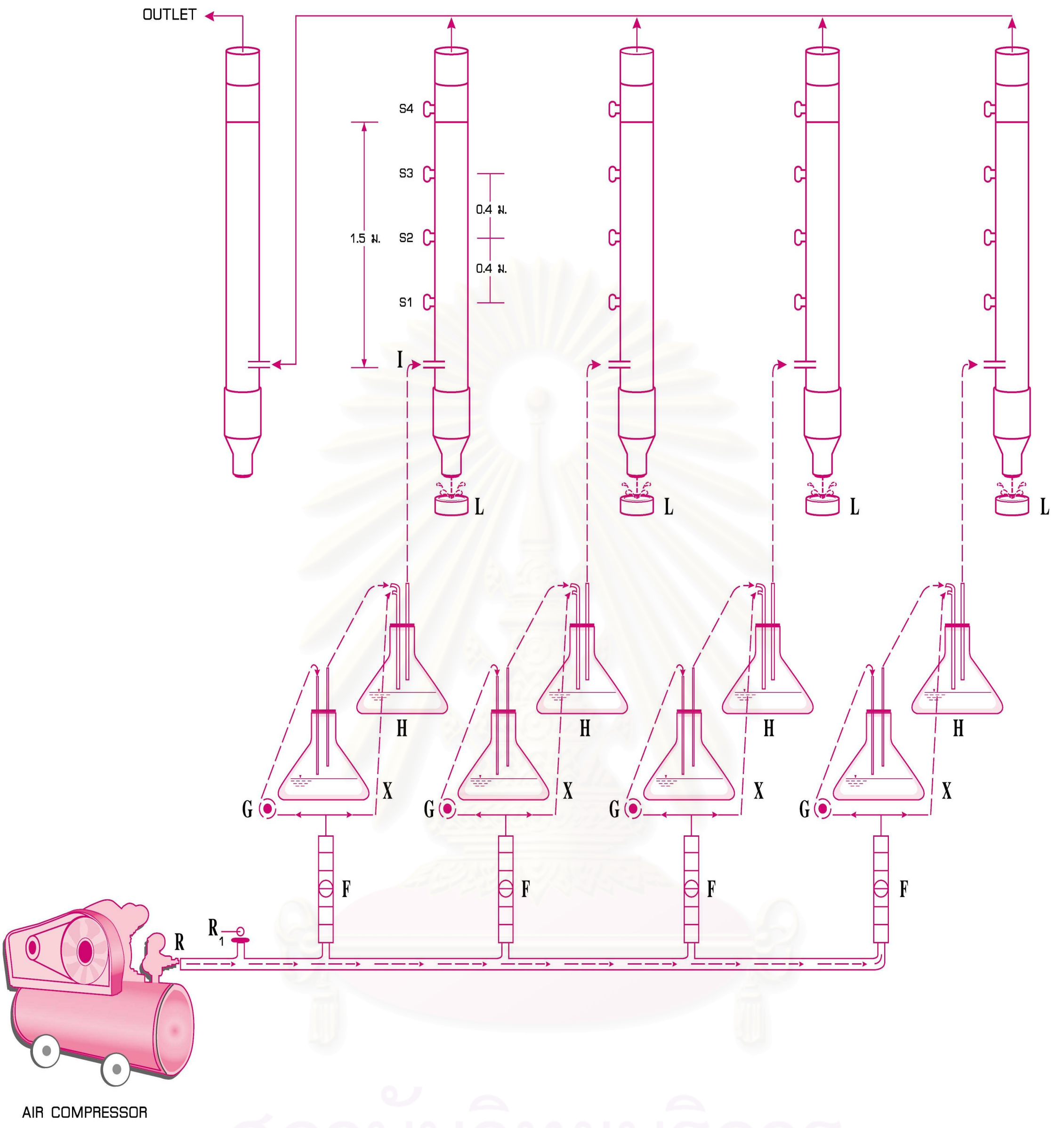
การวิจัยนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประกอบเป็นชุดเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการดังนี้

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย	จุดตรวจ
ปั๊มอัดอากาศ	เป็นแหล่งจ่ายอากาศอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ป้อนก๊าซไซลีนเข้าสู่เครื่องกรองชีวภาพ	-
เครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดพกพา	วัดค่าความเข้มข้นของไอระเหยไซลีนที่เข้าและออกจากเครื่องกรองชีวภาพ	I และ S4
โฟลมิเตอร์	วัดอัตราการไหลของอากาศ	F
วาล์วชนิดเกตวาล์ว	ใช้ปรับอัตราการไหลของอากาศ	G
ไฮโกรมิเตอร์	วัดความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องกรองชีวภาพ	I
พีเอชมิเตอร์	วัดความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง	S1 S2 และ S3
เครื่องวัดความชื้น	วัดความชื้นภายในชั้นตัวกลาง	S1 S2 และ S3
เครื่องวัดอุณหภูมิ	วัดอุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง	S1 S2 และ S3
เครื่องวัดความดัน	วัดความดันลดที่เกิดขึ้น	I และ S2
เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	วัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น	I และ S4
เตาอบ	วัดปริมาณน้ำภายในตัวกลาง	-
เตาเผา	วัดปริมาณอินทรียวัตถุของดินใบก้ามปู	-

ชุดเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการดังรูป 3.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

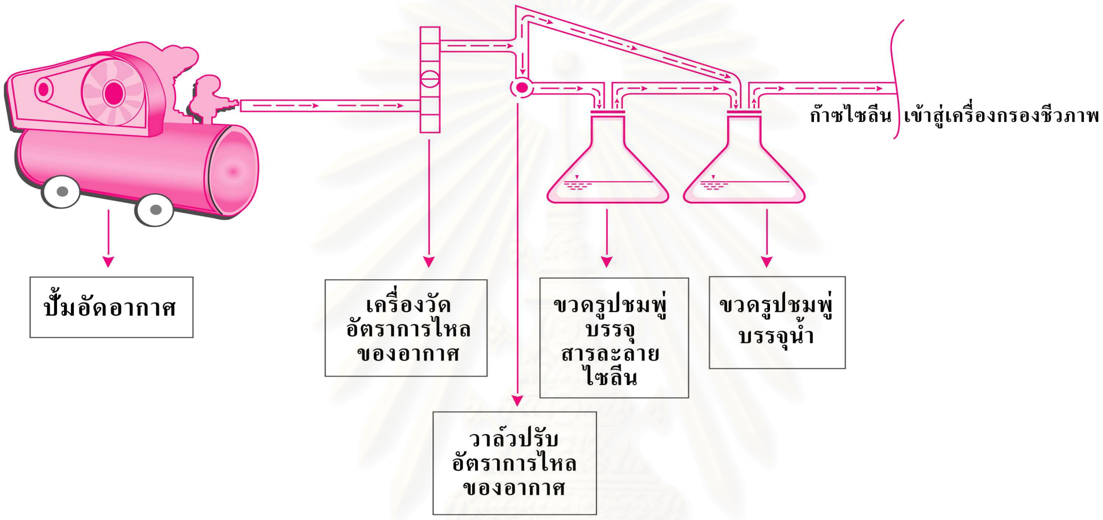
สัญลักษณ์

R	ตัวควบคุมอัตราการไหล	L	น้ำชะที่เกิดขึ้น
R_1	วาล์วปรับอัตราการไหลส่วนเกิน	F	เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
X	ขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายไซลีน	I,S4	ทางเข้าและทางออกของก๊าซไซลีน
G	วาล์วปรับเพิ่ม - ลดอัตราการไหล	S1-S3	จุดควบคุมพารามิเตอร์
H	ขวดรูปชมพู่ที่บรรจุน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบป้อนไอระเหยไซลีน

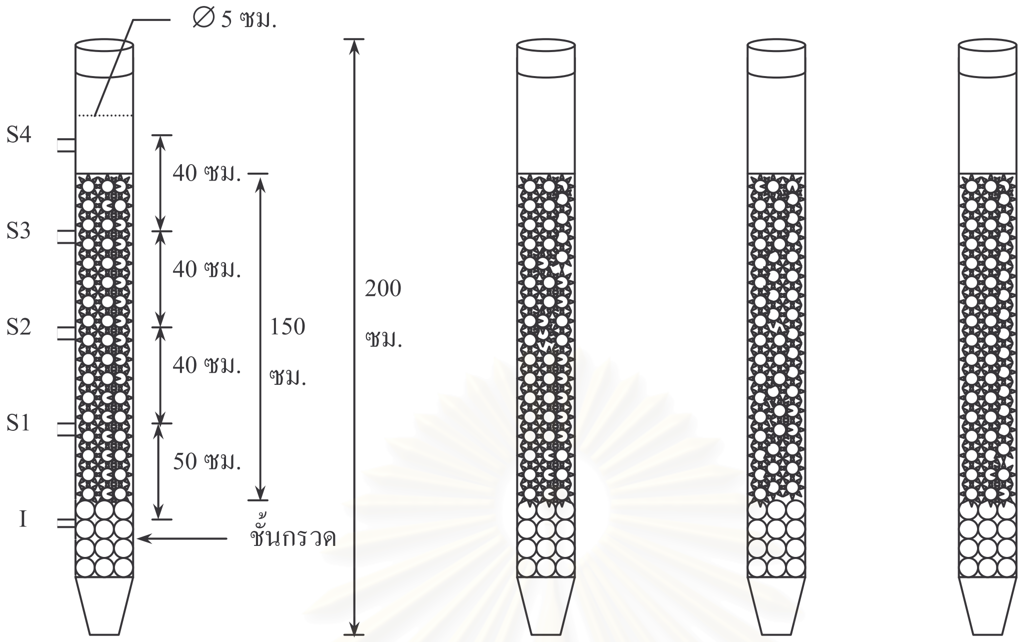
สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ คือ ไซลีน เตรียมได้จากการใช้ปั๊มอัดอากาศเป็นแหล่งจ่ายอากาศอย่างต่อเนื่องซึ่งถูกควบคุมด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลและวาล์วปรับอัตราการไหลก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ขวดแก้วรูปชมพู่ 2 ใบโดยที่ขวดแรกบรรจุสารละลายไซลีนปริมาตร 200 ลบ.ซม. และขวดที่สองบรรจุน้ำอยู่ภายในปริมาตร 200 ลบ.ซม. โดยสามารถควบคุมความเข้มข้นของก๊าซไซลีนได้จากวาล์วปรับอัตราการไหล



รูปที่ 3.2 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซไซลีน

ชุดเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องกรองชีวภาพทำด้วยอครีลิคใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ความสูง 200 ซม. คอลัมน์อครีลิคเจาะรูที่ความสูง 50 90 130 และ 170 ซม. ดังรูปที่ 3.3 จุด I ใช้ป้อนก๊าซไซลีนเข้าระบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ซม. ช่อง S1-S3 ใช้ตรวจวัดค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลาง อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง และค่าความเป็นกรด – ด่างภายในชั้นตัวกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. โดยช่อง S4 ใช้ควบคุมระดับความชื้นภายในชั้นตัวกลางที่ตำแหน่งบนสุด และตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่ออกจากระบบ



รูปที่ 3.3 คอลัมน์อครีลิคที่ใช้ในการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวกลางผสม

ตัวกลางผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก ขยะพลาสติก เปลือกหอย และตะกอนที่ผ่านการรีดตะกอนขั้นสุดท้ายจากโรงบำบัดน้ำเสียโดยตัวกลางแต่ละชนิดมีคุณลักษณะดังนี้

ดินใบก้ามปู เป็นตัวกลางหลักที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะคือ เป็นดินร่วนที่ผสมกับใบก้ามปูที่ผ่านการหมักเพื่อเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ในการวิจัยนี้ใช้ดินใบก้ามปูที่ผลิตในจังหวัดลพบุรี

รูปที่ 3.4 ดินใบก้ามปู

ปุ๋ยคอก ใช้ปุ๋ยคอกที่ได้จากมูลโคเพื่อใช้เป็นแหล่งสารอาหารสำหรับจุลชีพในระบบ หากมีการหยุดเดินระบบเนื่องจากวันหยุดสุดสัปดาห์หรือการซ่อมแซมระบบ โดยเติมปุ๋ยคอก 10% โดยปริมาตรสำหรับทุกเครื่องกรองชีวภาพ

สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ 3.5 ปุ๋ยคอก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขยะพลาสติกได้จากการนำขวดพลาสติก (ขวดสีขาวขุ่น) ที่ใช้บรรจุน้ำดื่มมาตัดให้มีขนาดความกว้าง 2 ซม. และความยาว 4 ซม. โดยใช้กรรไกรตัดแบ่งเป็นฝอยตลอดความยาวทั้งด้านบนและล่าง หลังจากนั้นม้วนเข้าหากันแล้วใช้ลวดรัดบริเวณกึ่งกลาง เพื่อใช้เป็นตัวเพิ่มความพรุนและป้องกันการอัดตัวของตัวกลางดินใบก้ามปู

รูปที่ 3.6 ขยะพลาสติก

ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นแหล่งกำเนิดของจุลชีพ ในงานวิจัยนี้ใช้ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยา เพื่อให้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดได้เร็วขึ้น ปริมาตรที่เติมคือ 5% โดยปริมาตรของตัวกลางที่ผสมกันทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ 3.7 ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รวมทั้งเปลือกหอยซึ่งทำหน้าที่รักษาความเป็นกลางให้กับระบบเพื่อให้ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลางอยู่ในช่วงที่เป็นกลางซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพในระบบ ปริมาตรที่เติมคือ 5 %โดยปริมาตรของตัวกลางที่ผสมกันทั้งหมด

3.3.2 การทดสอบของตัวกลางผสม

เมื่อจัดเตรียมตัวกลางผสมแต่ละชนิดแล้วนำมาทดสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบตัวกลางผสมแต่ละชนิด

พารามิเตอร์	ตัวกลางผสมที่ใช้ทดสอบ
ค่าความเป็นกรด - ด่าง	ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
ค่าความชื้นภายในตัวกลาง	ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
ค่าความหนาแน่น	ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก ขยะพลาสติก และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
ค่าความพรุน	ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก ขยะพลาสติก และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
ค่าปริมาณสารอาหาร	ดินใบก้ามปู และปุ๋ยคอก
ค่าปริมาณอินทรียวัตถุ	ดินใบก้ามปู และปุ๋ยคอก

หมายเหตุ : วิธีการทดสอบดูที่ภาคผนวก

3.3.3 การบรรจุตัวกลางลงในเครื่องกรองชีวภาพ

เมื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวกลางผสมแต่ละชนิดแล้วจึงนำตัวกลางมาผสมกันในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 หลังจากนั้นเติมน้ำและใช้เครื่องวัดความชื้น วัดความชื้นภายในชั้นตัวกลางให้มีค่าประมาณ 50%

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนตัวกลางผสมของแต่ละเครื่องกรองชีวภาพ

อัตราส่วนการผสม	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร		
	ดินใบก้ามปู	ปุ๋ยคอก	ขยะพลาสติก
80:20	70	10	20
60:40	50	10	40
40:60	30	10	60
20:80	10	10	80

หมายเหตุ : เติมเปลือกหอยและตะกอนจุลินทรีย์ชนิดละ 5%

3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.1 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดพกพา อ่านค่าความเข้มข้นของไซลีนในหน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm) โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 30 นาที และใช้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไซลีนจากช่วงเวลาดังกล่าว สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่จุดเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ

3.4.2 การวิเคราะห์

3.4.2.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไซลีน

ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซไซลีนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดพกพา ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มข้น ณ บริเวณจุดที่ทำการทดลอง

3.4.2.2 ความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง

ใช้เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลางระบบ Electrode เพื่อปรับค่าความเป็นกรด - ด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพในระบบ

3.4.2.3 ความดันลดที่เกิดขึ้น

ความดันลดที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นได้จากการอัดตัวของตัวกลาง การเติมน้ำเพื่อรักษาความชื้นภายในชั้นตัวกลาง หรือการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของจุลชีพในระบบทำให้ไปกักกันการเคลื่อนที่ของอากาศโดยใช้เครื่องวัดความดัน (Pressure Indicator) ทำการวัดความแตกต่างระหว่างความดัน ณ ตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ

3.4.2.4 ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง

ใช้เครื่องวัดความชื้นภายในชั้นตัวกลาง โดยควบคุมความชื้นภายในชั้นตัวกลางให้อยู่ในระดับคงที่ประมาณ 60% ก่อนที่จะเริ่มเดินเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งความชื้นในระดับนี้เหมาะสำหรับจุลชีพภายในเครื่องกรองชีวภาพที่จะดำรงชีวิตอยู่ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2.5 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องกรองชีวภาพ

ทำการวัดโดยใช้เครื่องไฮโกรมิเตอร์ วัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องกรองชีวภาพ

3.4.2.6 การวัดอุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง

ทำการวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล วัดอุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ

3.4.2.7 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าเครื่องกรองชีวภาพ และหลังออกจากเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อใช้ประเมินความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนของระบบ

3.4.2.8 ปริมาณอินทรียวัตถุ

ทำการวัดปริมาณอินทรียวัตถุที่มีอยู่ของตัวกลางดินใบก้ามปู โดยทำการวัดปริมาณอินทรียวัตถุก่อนและภายหลังการทดลองเสร็จสิ้น

3.5 สมการที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพและความสามารถของระบบ

เวลาเก็บกัก (Empty Bed Retention Time; EBRT) คือ เวลาเก็บกักเฉลี่ยของสารมลพิษที่อยู่ในเครื่องกรองชีวภาพ คำนวณโดยคิดว่าไม่มีตัวกลางอยู่ภายในเครื่องกรองซึ่งเวลาเก็บกักที่คำนวณได้นี้จะมากกว่าเวลาเก็บกักจริงของอากาศที่อยู่ภายในเครื่องกรองชีวภาพ

$$EBRT = \frac{V_f}{Q}$$

เมื่อ V_f = ปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง (ลบ.ม.)

Q = อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม. / ชม.)

อัตราภาระบรรทุก (Mass Loading Rate) คือ ปริมาณของสารมลพิษที่เข้าไปในเครื่องกรองชีวภาพ หน่วยที่ใช้คือ กรัมต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

$$\text{mass loading rate} = \frac{Q \times C_{in}}{V_f}$$

เมื่อ C_{in} = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ (ก./ลบ.ม.)

ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency) คือ สัดส่วนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของสารมลพิษที่ถูกกำจัดด้วยเครื่องกรองชีวภาพ

$$\text{Removal Efficiency (RE)} = \left[\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}\right] \times 100$$

เมื่อ RE = ประสิทธิภาพการกำจัด (%)

C_{out} = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ (ก./ลบ.ม.)

ความสามารถในการกำจัด (Elimination Capacity) คือ ปริมาณของสารมลพิษที่ถูกกำจัดโดยในเครื่องกรองชีวภาพหน่วยที่ใช้คือ กรัมต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ

$$\text{Elimination Capacity} = \frac{(C_{in} - C_{out}) \times Q}{V_f}$$

หรือ Elimination Capacity = Mass Loading x RE

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 คุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกใช้

การดำเนินการวิจัยนี้เลือกใช้ตัวกลางผสมดังนี้ ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก เปลือกหอย และตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยได้เลือกศึกษาคุณลักษณะต่างๆของตัวกลางตามความเหมาะสมในการนำมาใช้งานสำหรับเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีผลการทดลองดังนี้(รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.1 – ฉ.8)

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ของตัวกลางแต่ละชนิด

พารามิเตอร์	ดินใบก้ามปู	ปุ๋ยคอก	ขยะพลาสติก	ตะกอนจุลินทรีย์
พีเอช	6.9 ± 0.1	7.1 ± 0.1	-	6.9 ± 0.06
ความชื้นของตัวกลาง (%)	5.69 ± 0.17	10.95 ± 0.48	-	76.52 ± 0.74
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.634 ± 0.04	0.306 ± 0.01	0.101 ± 0.002	0.813 ± 0.02
ความพรุน (%)	53.6 ± 3.62	64.8 ± 1.53	87.9 ± 0.33	19.5 ± 0.81
ปริมาณอินทรียวัตถุ(%)	6.62 ± 0.20	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีที่พบในดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก

วัสดุ	ไนโตรเจน (N)	ฟอสฟอรัส (P)	โพแทสเซียม (K)	CEC ($c\ mol_c\ kg^{-1}$)	OC (%)	OM (%)	C/N Ratio
ดินใบก้ามปู	0.49%	184 ppm	506 ppm	34.6	6.54	11.28	13.3
ปุ๋ยคอก	0.91%	0.29%	0.60%	-	18.09	31.13	19.9

หมายเหตุ CEC = Cation Exchange Capacity OC = Organic Carbon

OM = Organic Matter C/N = Carbon / Nitrogen

$c\ mol_c\ kg^{-1}$ = centi mole cation per kilogram ppm = parts per million

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) มีผลต่อการดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพเพราะจุลชีพจะเจริญได้ดีในสภาพที่เป็นกรดอ่อนๆจนถึงกลาง และด่างอ่อนๆ ผลการทดลองพบว่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลางที่เลือกใช้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพในระบบ

ค่าความชื้นของตัวกลาง (Water Content) ค่าความชื้นของตัวกลางในระดับที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 - 40% ผลการทดลองพบว่าดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต้องมีการเติมน้ำเพื่อให้ค่าความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพราะความชื้นหรือน้ำจำเป็นต่อการเจริญเติบโต การดำรงชีวิต และกิจกรรมของจุลชีพในระบบ

ค่าความหนาแน่น (Density) ตัวกลางที่มีความหนาแน่นสูงมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่ใช้รองรับน้ำหนักของวัสดุตัวกลาง ต้องมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย และนอกจากนั้นพบว่าเมื่อก่อสร้างระบบในพื้นที่จำกัดทำให้เครื่องกรองชีวภาพมีปริมาตรของตัวกลางได้จำกัดเพื่อป้องกันการอัดตัวทำให้เกิดสภาพไร้อากาศภายในชั้นตัวกลาง จะส่งผลทำให้จุลชีพที่สามารถย่อยสลายสารมลพิษ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นจุลชีพที่ต้องการอากาศ ผลการทดลองพบว่าตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นน้อยทำให้สามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ค่าความพรุน (Porosity) เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าอากาศที่ปนเปื้อนก๊าซมลพิษจะเคลื่อนที่ได้แบบตามกัน (Plug Flow) และค่าความดันลดที่เกิดขึ้นต่ำ ค่าความพรุนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40 - 80% ผลการทดลองพบว่าตัวกลางที่ใช้คือ ดินใบก้ามปู ปุ๋ยคอก และขยะพลาสติกมีค่าความพรุนอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ปริมาณธาตุอาหารของดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก การเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลชีพต้องการธาตุอาหารในปริมาณที่เหมาะสมและควรมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมประมาณ 0.4 0.15 และ 0.15%โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าปริมาณธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่พบในดินใบก้ามปูมีปริมาณต่ำกว่าค่าที่แนะนำ ต่างจากปุ๋ยคอกซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารทั้งสามชนิดมากกว่าจึงเป็นเหตุผลที่ต้องผสมปุ๋ยคอกรวมกับดินใบก้ามปู

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N Ratio) จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพเป็นตัวหลักสำคัญในการย่อยสลายสารมลพิษ จุลินทรีย์ต้องการธาตุคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโตและต้องการไนโตรเจนเพื่อการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 - 50 ผลการทดลองพบว่าดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกมีค่า C/N Ratio ในช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 13.3 และ19.9 ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถเพิ่มขึ้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ หลังจากที่เดินระบบ เพราะจุลินทรีย์จะใช้แหล่งคาร์บอนจากสารมลพิษคือ ไซลีน

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารหลักที่มีประจุบวก ตัวกลางดินเพียงชนิดเดียวที่ไม่ผสมกับปุ๋ยหมักอย่างอื่นโดยส่วนใหญ่พบว่าจะมีปริมาณธาตุอาหารหลักที่มีประจุบวก เช่นโพแทสเซียมในปริมาณที่น้อยมาก แต่ถ้าดินที่ผสมกับปุ๋ยหมักชนิดอื่น เช่น ใบก้ามปูทำให้ดินมีความสามารถที่จะแลกเปลี่ยนหรือดูดซับธาตุอาหารหลักที่มีประจุบวกไว้ในดินได้ดี ผลการทดลองพบว่าดินใบก้ามปูมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 34.6 c mol $_c$ kg^{-1} ซึ่งมากกว่า 30 c mol $_c$ kg^{-1} แสดงให้เห็นว่าดินใบก้ามปูสามารถที่จะแลกเปลี่ยนธาตุโพแทสเซียมกับปุ๋ยคอก และนำมาไว้ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารหลักสำหรับจุลินทรีย์ในระบบได้

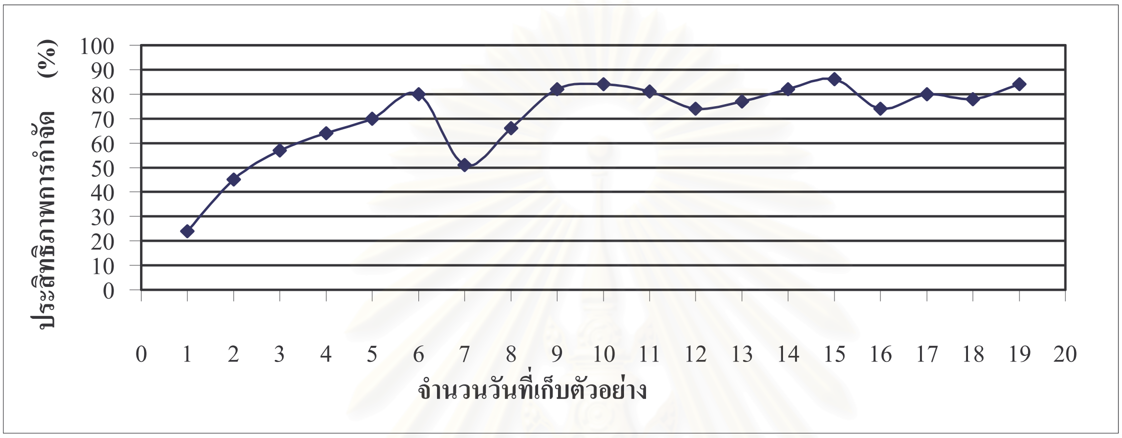
ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic Matter) เป็นค่าที่สามารถใช้แสดงถึงปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินใบก้ามปูโดยถ้ามีค่ามากกว่า 4.5% ทิพวรรณ (2547)อธิบายได้ว่ามีปริมาณอินทรียวัตถุสูงมาก ซึ่งส่งผลถึงปริมาณจุลินทรีย์ในระบบสูงตามไปด้วย ผลการทดลองพบว่าดินใบก้ามปูมีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 6.62% แสดงให้เห็นว่าดินใบก้ามปูมีปริมาณจุลินทรีย์ในระบบสูงโดยสามารถทำการย่อยสลายสารมลพิษได้ แต่ต้องมีระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ในระบบ และใช้อัตราภาระบรรทุกที่เข้าระบบน้อยในช่วงเริ่มต้นประมาณ 1 สัปดาห์

สรุป คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางแต่ละชนิดที่เลือกใช้ มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยสามารถเสริมสร้างและปรับปรุงข้อดี - ข้อเสียของตัวกลางแต่ละชนิดได้ดี เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าสามารถควบคุมและดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

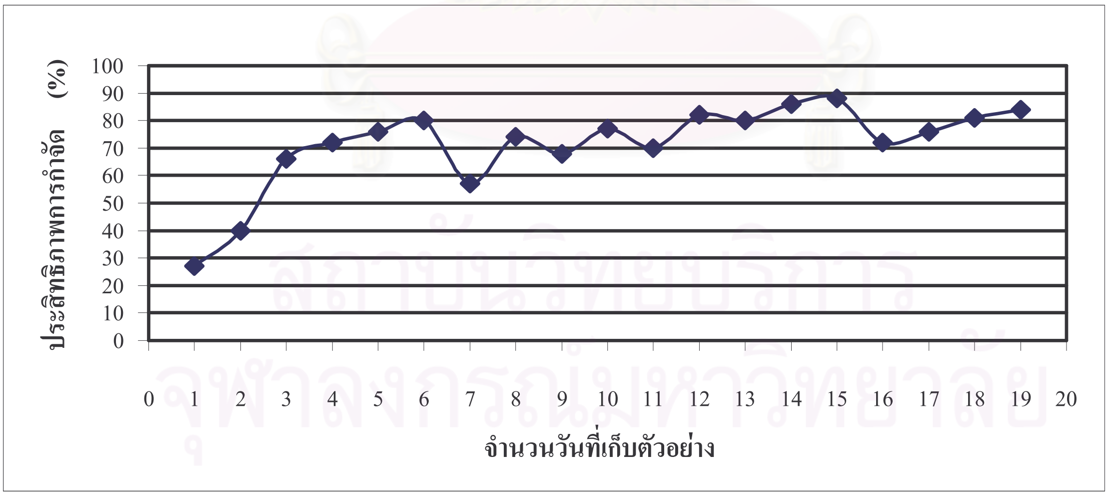
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดลองอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสม

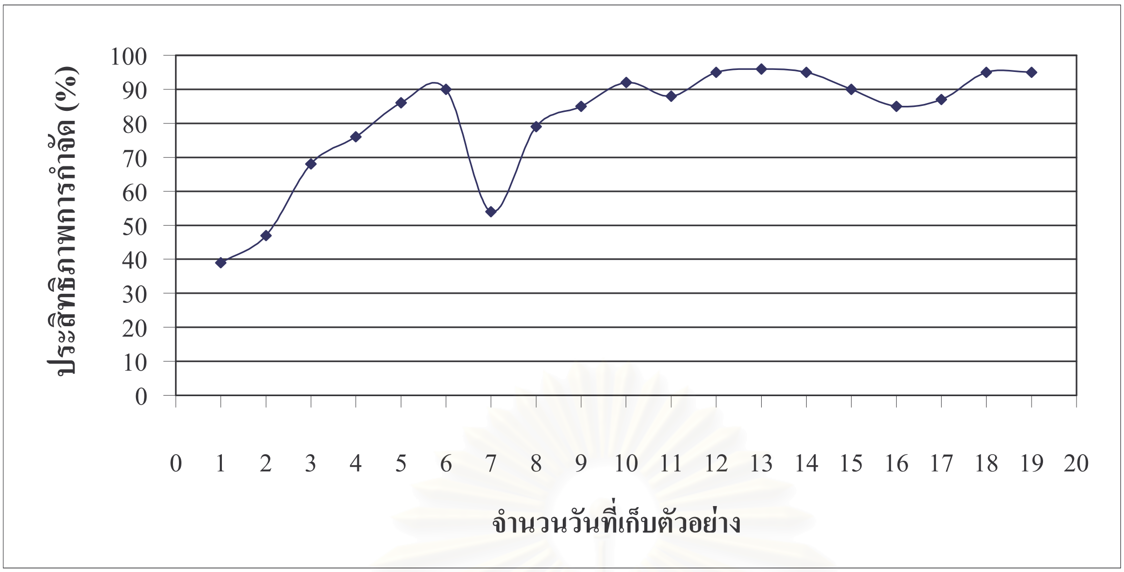
การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเลือกอัตราส่วนการผสมตัวกลาง (ดินใบก้ามปูต่อขยะ) ที่เหมาะสม โดยพิจารณาผลของประสิทธิภาพการกำจัด ความสามารถในการกำจัด การควบคุมความชื้นภายในชั้นตัวกลาง และความดันลดที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4.1 4.2 4.3 และ4.4 (รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง.1 - ง.4)



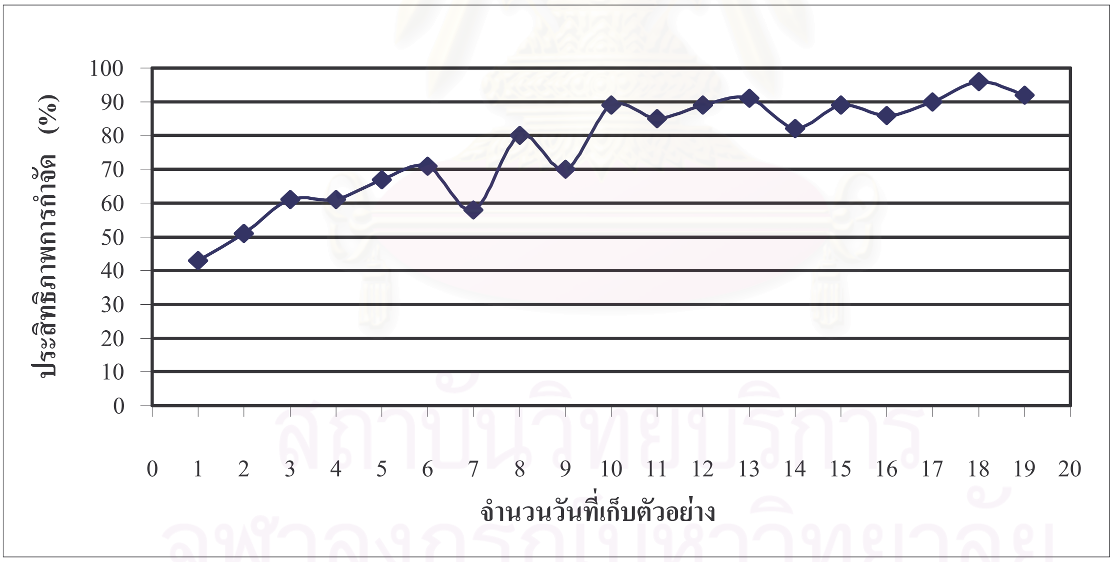
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 20:80 ที่ความเข้มของก๊าซไซลีน 100 ppm



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 40:60 ที่ความเข้มของก๊าซไซลีน 100 ppm



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 60:40 ที่ความเข้มของก๊าซไซลีน 100 ppm



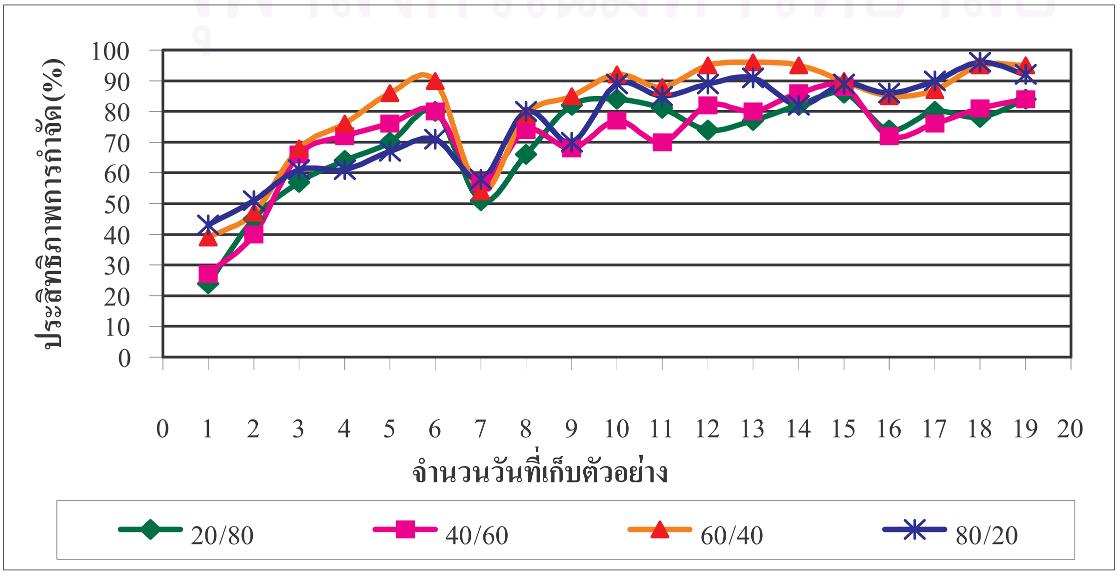
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 80:20 ที่ความเข้มของก๊าซไซลีน 100 ppm

รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 อธิบายถึงการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพได้ว่าเมื่อเริ่มต้นเดินเครื่องกรองชีวภาพในช่วงเริ่มต้นกลไกหลักของระบบที่ใช้กำจัดก๊าซไซลีนคือ การดูดติดผิวและการดูดซับภายในชั้นตัวกลางซึ่งตัวกลางที่ใช้ต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นที่อยู่อาศัย เมื่อพิจารณาอัตราส่วนดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติกที่ 20:80 และ40:60 พบว่ามีพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์อาศัยอยู่น้อยกว่า ส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลายก๊าซไซลีนน้อยกว่าทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้อยเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วน 60:40 และ 80:20

ปริมาณน้ำที่เติมเพื่อรักษาระดับความชื้นภายในชั้นตัวกลางให้เท่ากับขณะเริ่มต้นคือ 60%เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกสู่ภายนอกระบบ (Exothermic Reaction) ซึ่งมีผลโดยตรงทำให้ความชื้นภายในชั้นตัวกลางที่ควบคุมไว้เท่ากับ 60% จะลดลงเรื่อยๆหากไม่มีการเติมน้ำเพื่อชดเชยน้ำที่สูญเสียไปกับปฏิกิริยาการคายความร้อน ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่มีดินใบก้ามปูผสมน้อยคือ 40:60 และ20:80 ใช้ปริมาณน้ำที่เติมโดยเฉลี่ยต่อวันมากเท่ากับ 128 และ 140 มิลลิลิตร โดยอัตราส่วนผสมที่มีดินใบก้ามปูผสมมากคือ 80:20 และ60:40 ใช้ปริมาณน้ำที่เติมโดยเฉลี่ยต่อวันน้อยเท่ากับ 62 และ 39 มิลลิลิตร รวมถึงค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลางตลอดทั่วทั้งความสูงของเครื่องกรองชีวภาพมีความสม่ำเสมอเท่ากันและถูกต้องมากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่มีดินใบก้ามปูผสมน้อย

ความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าใช้จ่ายในเรื่องกำลังไฟฟ้าสำหรับการอัดอากาศผ่านชั้นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพ โดยค่าความดันลดที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของขนาดอนุภาคของตัวกลาง ความหนาแน่น ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง เวลาเก็บกัก ความลึกของชั้นตัวกลาง ความเร็วที่ผิวหน้า และภาระบรรทุกของระบบ (รายละเอียดของผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ง.1 - ง. 4) พบว่าการผสมตัวกลางที่อัตราส่วนการผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติก 80:20 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 36 มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร ขณะที่อัตราส่วนการผสมที่ 20:80 40:60 และ 60:40 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 25 14 และ 10 มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไซลีนที่อัตราส่วนการผสมตัวกลางแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดที่ใช้เป็นเกณฑ์เลือกอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	อัตราส่วนผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติก			
	20:80	**40:60**	**60:40**	**80:20**
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	24 - 86	27 - 88	39 - 96	43 – 96
ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)	36.7	38.3	42.0	41.1
ปริมาณน้ำที่เติมเพื่อควบคุมความชื้นภายในชั้นตัวกลางให้เท่ากับ 60 % โดยเฉลี่ยต่อวัน (มิลลิลิตร)	140	128	62	39
ความดันลดที่เกิดขึ้น (มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร)	8 - 25	6 - 14	3 - 10	6 - 36

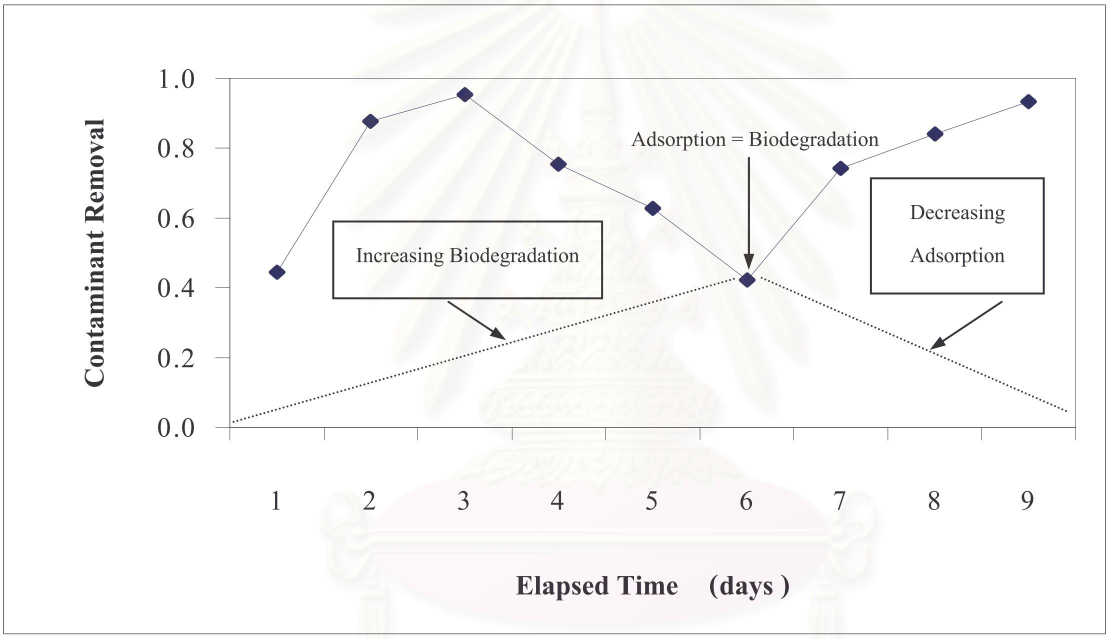
สรุป พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเพื่อเดินเครื่องกรองชีวภาพคือ ประสิทธิภาพการกำจัด ความสามารถในการกำจัด การควบคุมระดับความชื้นภายในชั้นตัวกลาง และความดันลดภายในระบบที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 จากพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงเลือกอัตราส่วนดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก ต่อขยะพลาสติกที่ 60:40 เพื่อใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

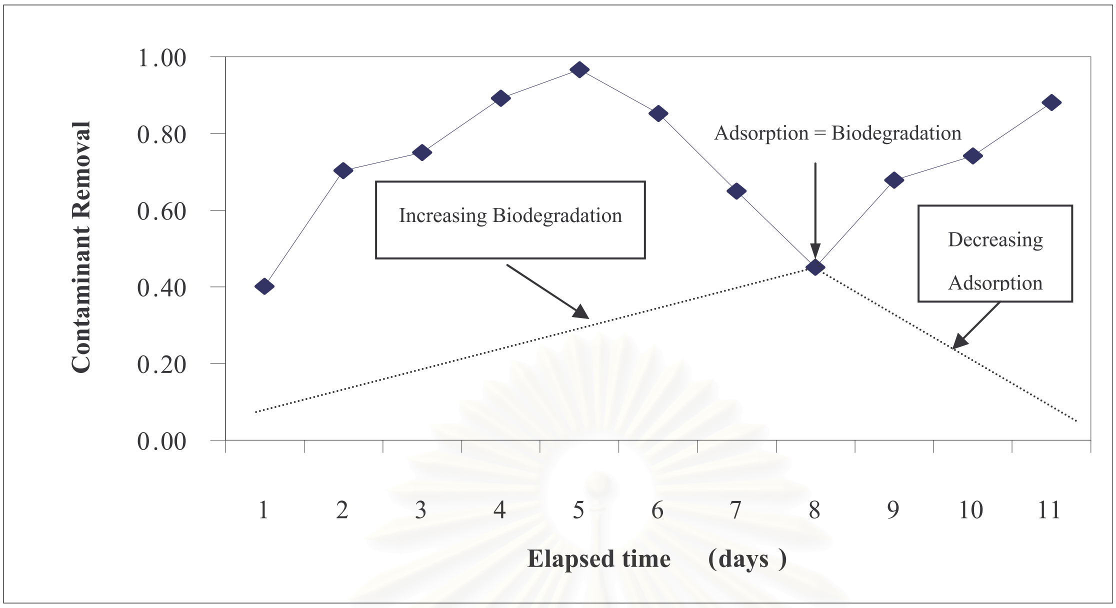
4.3 ผลการทดลองเวลาเก็บกักที่เหมาะสมและความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนสูงสุด

4.3.1 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

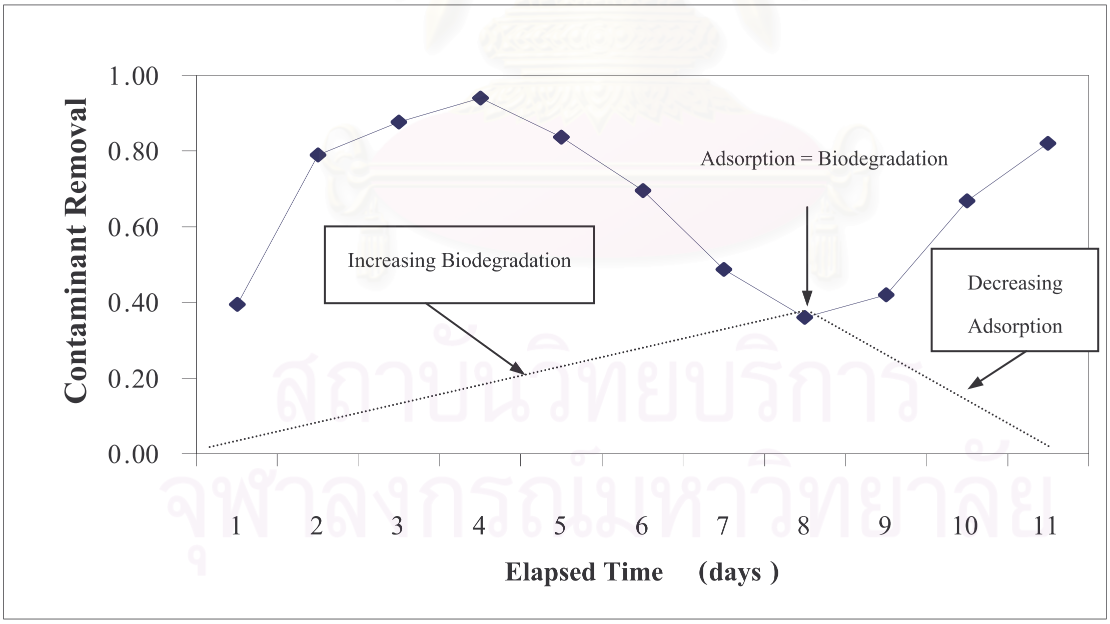
นำอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 มาทดสอบระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ในระบบจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่เดินระบบ และ Contaminant Removal คือ สัดส่วนการกำจัดสารมลพิษ ([ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ - ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่ออกจากระบบ]/ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ) แสดงดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1 - จ.4)



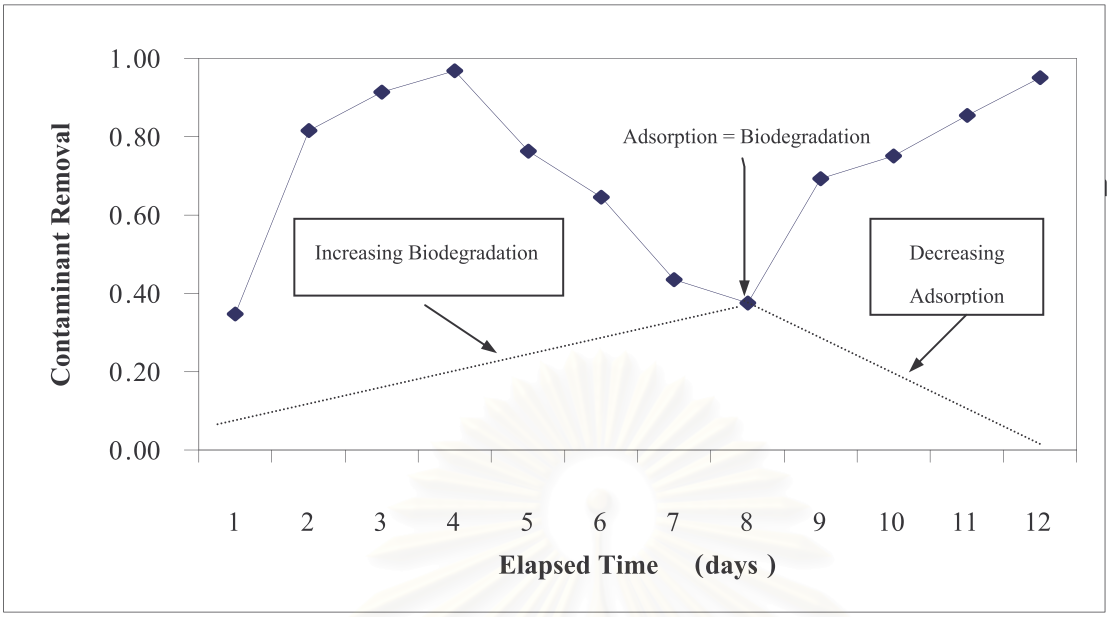
รูปที่ 4.6 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 1



รูปที่ 4.7 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 2



รูปที่ 4.8 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 3

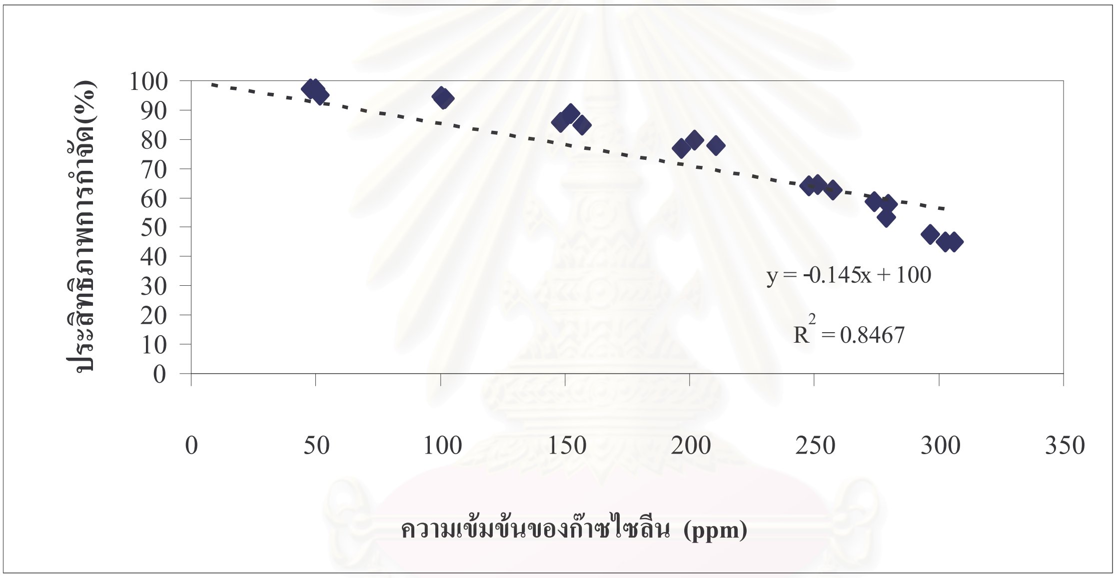


รูปที่ 4.9 ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 4

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 อธิบายถึงระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพของแต่ละชุดทดลองใช้ในการปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อกำจัดก๊าซไซลีนในช่วงวันที่ 1 - 5 1 - 7 1 - 7 และ 1 - 7 ของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ กลไกหลักในการกำจัดก๊าซไซลีนคือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) โดยที่สารมลพิษจะถูกดูดซับภายในพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลาง และตั้งแต่วันที่ 6 8 8 และ 8 ของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ กระบวนการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุด และทำให้กลไกหลักที่ใช้กำจัดก๊าซไซลีนคือ กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ระยะเวลาการปรับตัวที่แตกต่างกันของเครื่องกรองชีวภาพชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 3 และ 4 อาจเกิดขึ้นจากการคลุกเคล้า และบรรจุตัวกลางไม่สม่ำเสมอทำให้ระยะเวลาการปรับตัวต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาระยะเวลาที่เกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่าเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ Devinny และคณะ (1999) พบว่าสำหรับเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปจะใช้เวลาในการปรับตัว 2 - 3 วัน 2 - 3 สัปดาห์ หรือ 1 - 2 เดือน เนื่องจากการเติมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมถึงตัวกลางดิน ใบก้ามปูซึ่งมีปริมาณจุลินทรีย์สูง

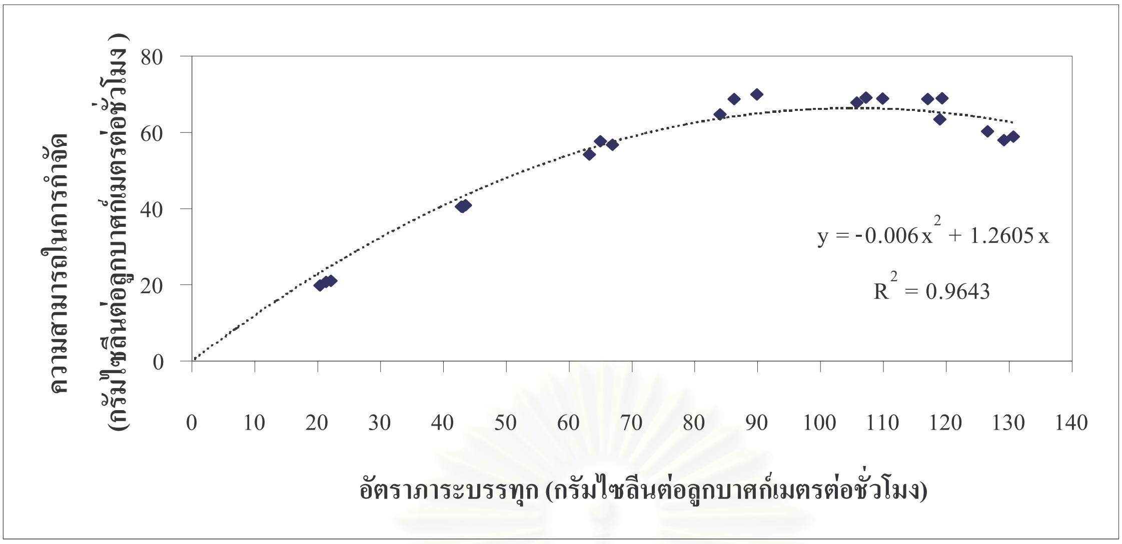
4.3.2 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที

การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้พิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนอยู่ในช่วง 50 - 300 ppm และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น(ผลต่างความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ณ จุดที่ก๊าซไซลีนออกจากเครื่องกรองชีวภาพกับความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ณ จุดที่ก๊าซไซลีนเข้าเครื่องกรองชีวภาพ) รูปที่ 4.10 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ รูปที่ 4.11 คือ ความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีน และรูปที่ 4.12 คือ ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1)

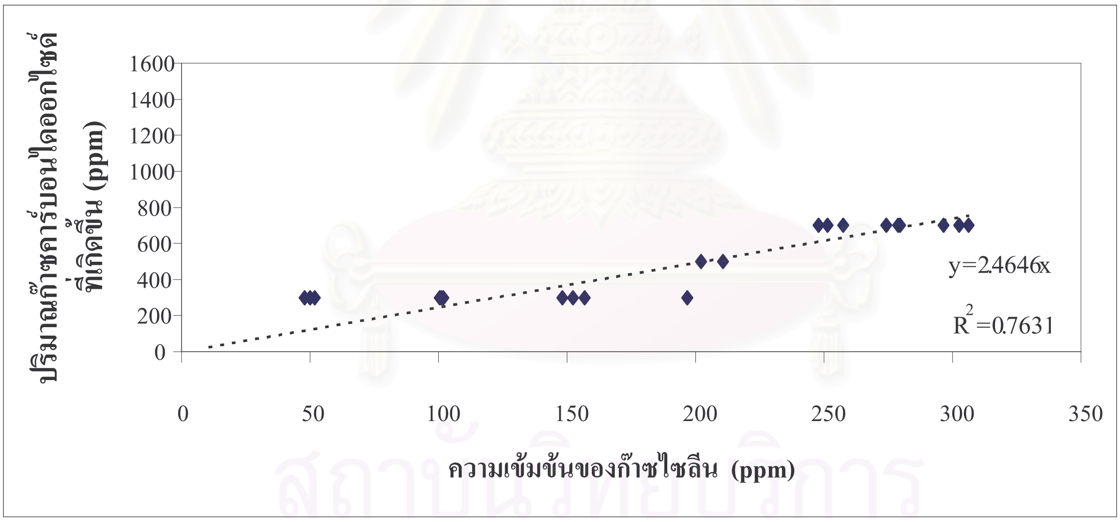


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที



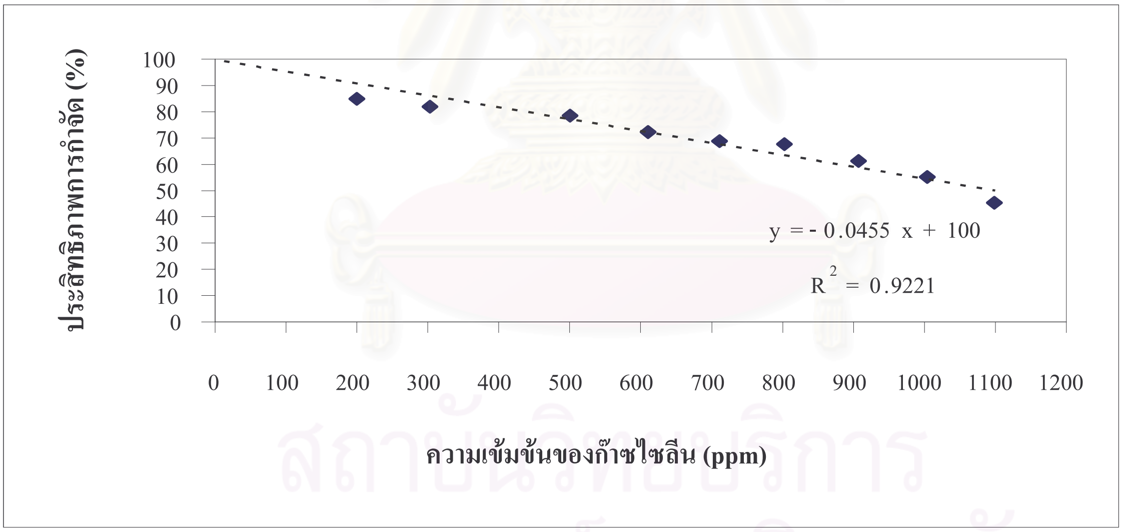
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที

ผลการทดลองในรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 พบว่าที่เวลาเก็บกัก 36 วินาทีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 50 - 300 ppm มีค่าประมาณเท่ากับ 98 - 50% และความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 70 ก./ลบ.ม.- ชม. (เมื่อพิจารณาจากปริมาณก๊าซ

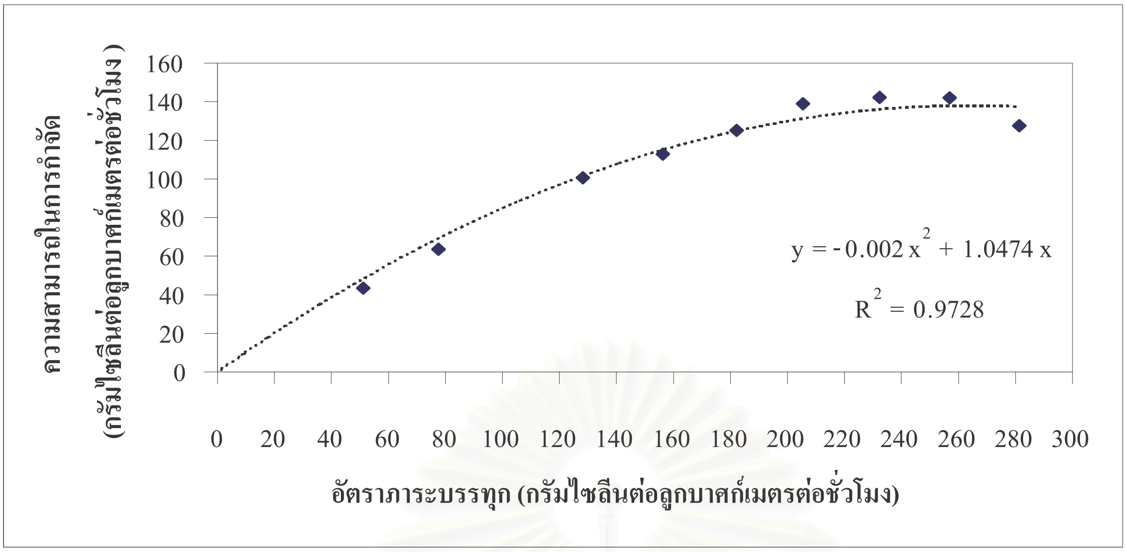
คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น) พบว่าเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการทดลองตัวกลางดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอกมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์อยู่ภายในตัวกลางทำให้จุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายคาร์บอนอินทรีย์และก๊าซไซลีน ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมากกว่าค่าทางทฤษฎีเท่ากับ [(300-154)/300]*100 = 49% แต่ภายหลังจากการเดินระบบปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของตัวกลางจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งหมดสิ้น ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาจากหลักปริมาณสมมูล (Stoichiometry) เพียงอย่างเดียว

4.3.3 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที

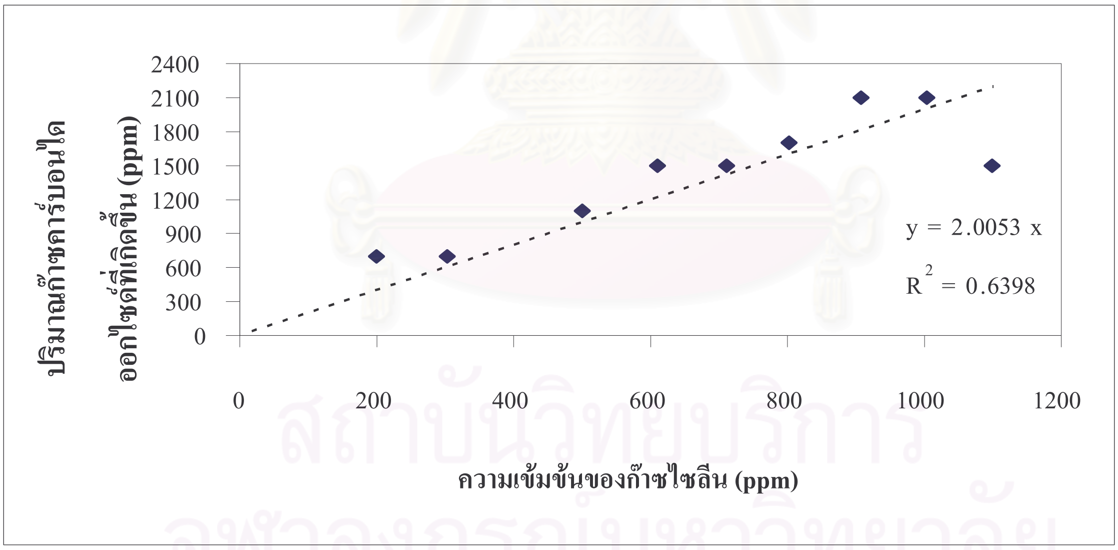
การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้พิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนอยู่ในช่วง 200 - 1,100 ppm และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.13 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ รูปที่ 4.14 คือ ความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีน และรูปที่ 4.15 คือ ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.2)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที



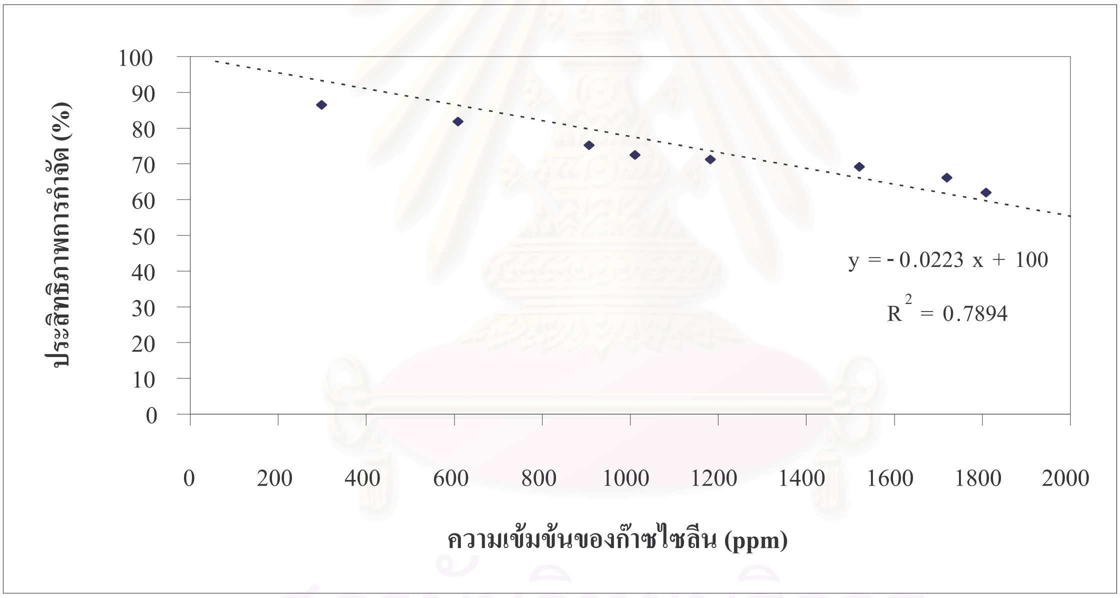
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

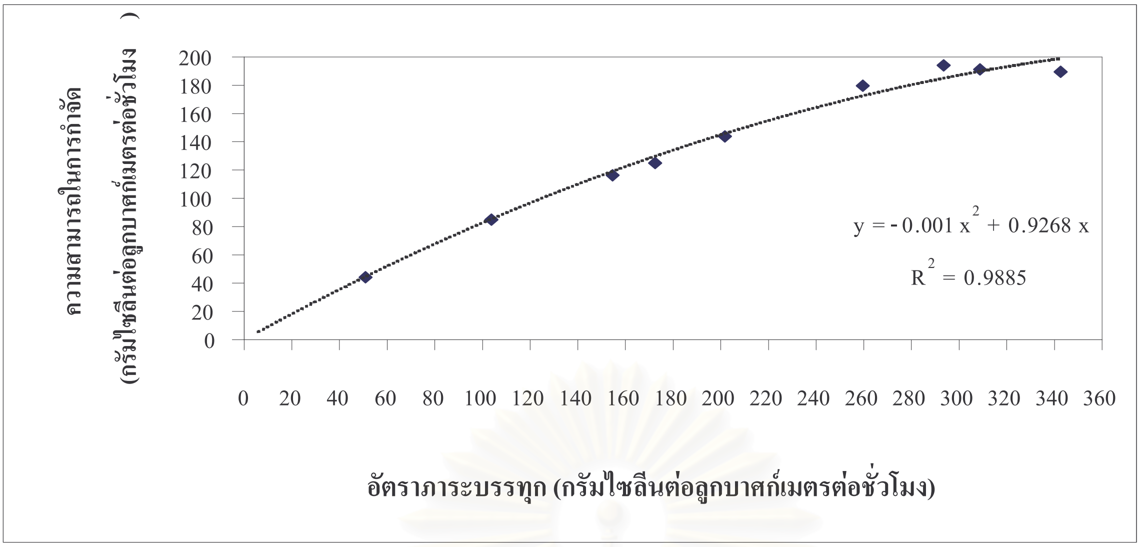
ผลการทดลองในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 พบว่าที่เวลาเก็บกัก 60 วินาทีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 - 1,100 ppm มีค่าประมาณเท่ากับ 85 - 45% และความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 142 ก./ลบ.ม.- ชม.

4.3.4 ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที

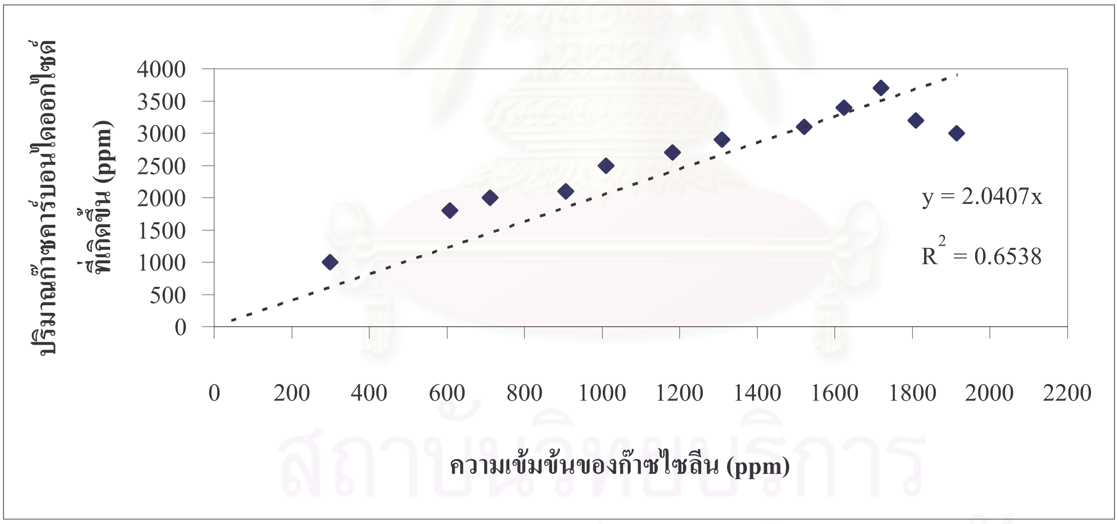
การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้พิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดที่ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนอยู่ในช่วง 300 - 2,000 ppm และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.16 คือประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ รูปที่ 4.17 คือความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีน และรูปที่ 4.18 คือ ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.3)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที

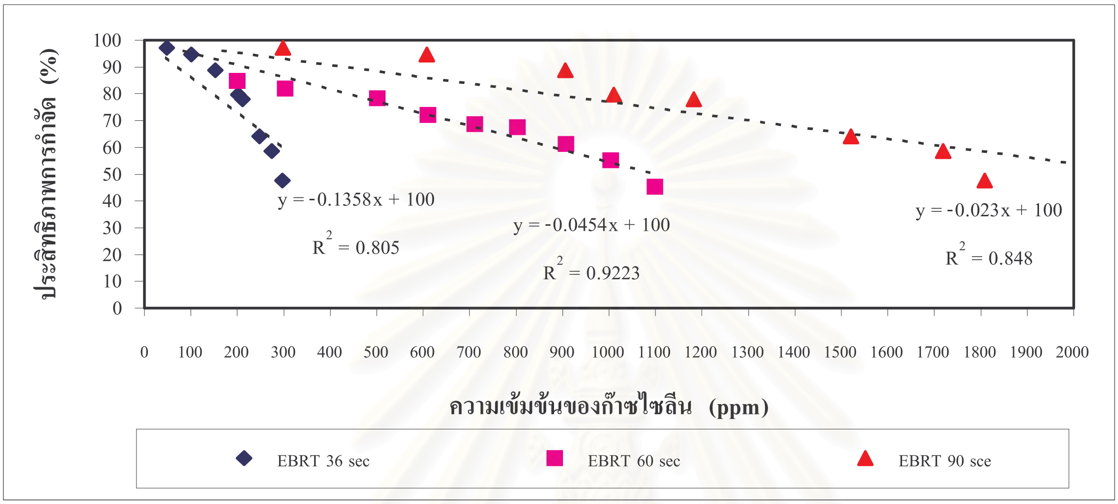


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและอัตราภาระบรรทุกไซลีน ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที

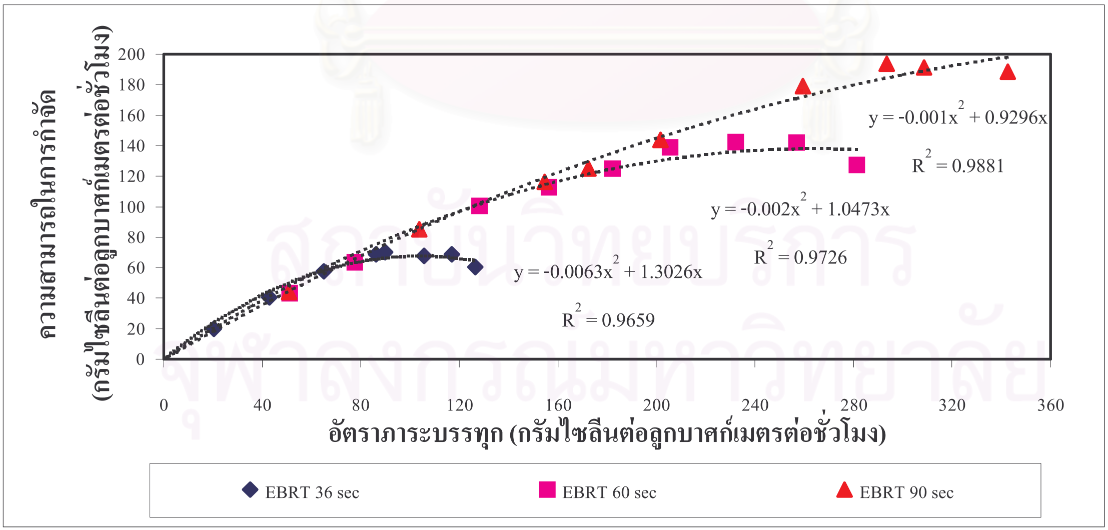


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที

ผลการทดลองในรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 พบว่าที่เวลาเก็บกัก 90 วินาทีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 300 - 2,000 ppm มีค่าประมาณเท่ากับ 86 - 52% และความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 194 ก./ลบ.ม.- ชม. โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบสูงมากกว่า 1,700 ppm เป็นต้นไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมถึงความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนลดลงจากเดิม



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที

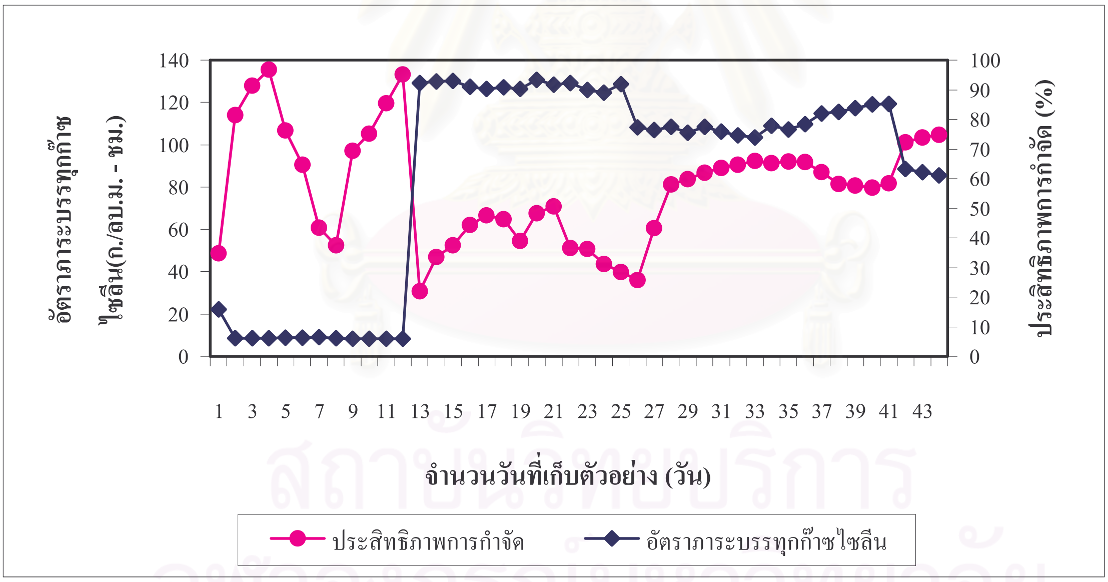


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที

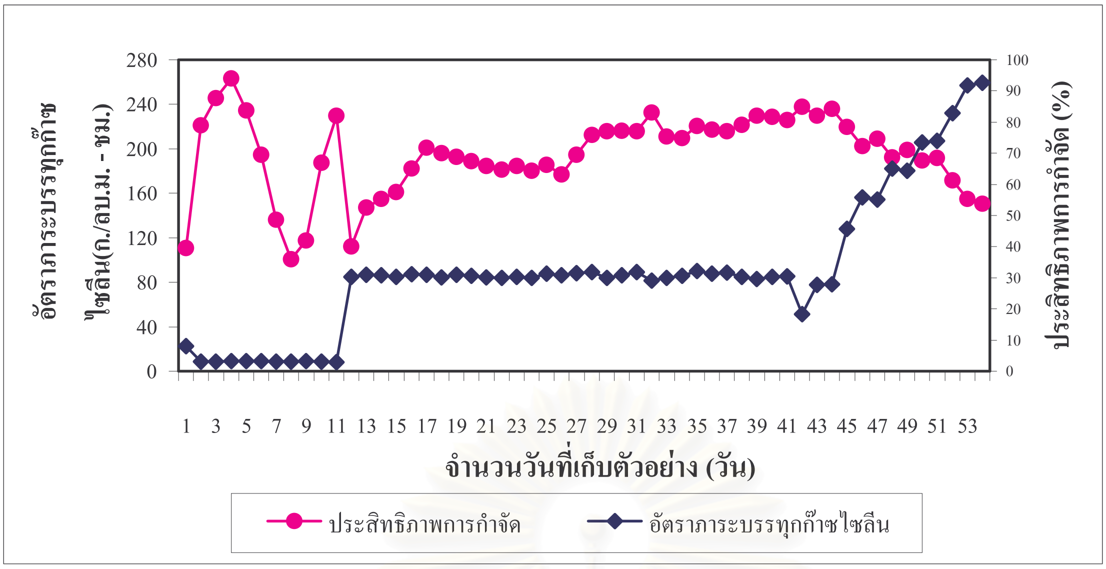
สรุป ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.20 พบว่าที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 60 และ 90 วินาที ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนสูงสุดเท่ากับ 70 142 และ 194 ก./ลบ.ม.- ชม. ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 และ 60 วินาทีเป็นเวลาเก็บกักที่ทำให้ก๊าซไซลีนมีเวลาในการแพร่เข้าสู่ฟิล์มชีวภาพได้น้อยกว่าเวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที ซึ่งเวลาเก็บกักที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้ก๊าซไซลีนสามารถแพร่เข้าสู่ฟิล์มชีวภาพที่อยู่ใกล้ชิดกับวัสดุตัวกลาง และจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายก๊าซไซลีนได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่ถูกจำกัดด้วยเวลาในการทำปฏิกิริยา

4.3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดและจำนวนวันที่เดินระบบ

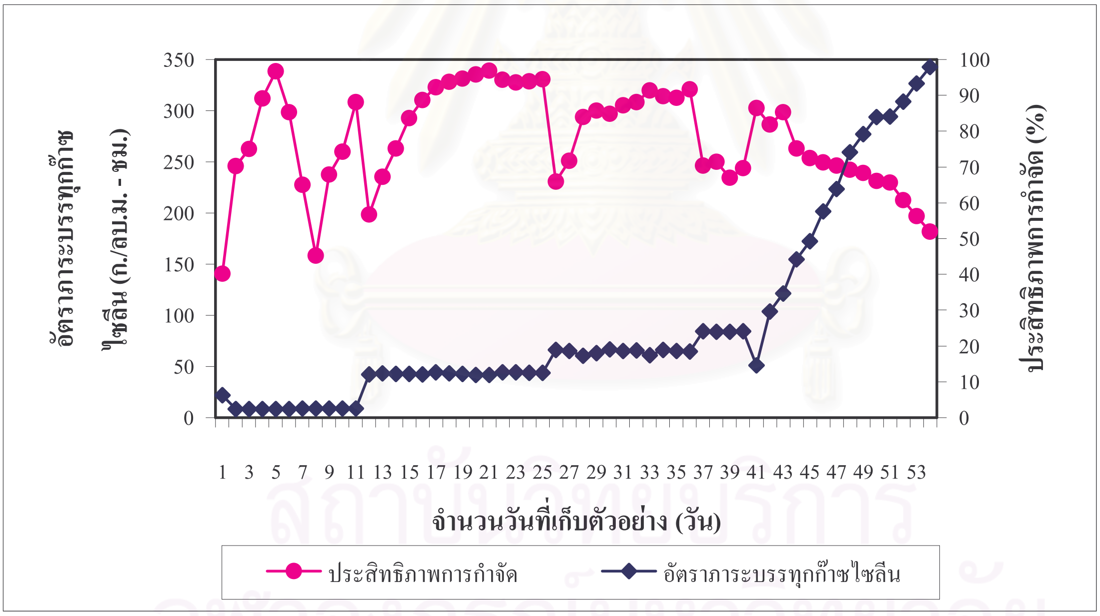
การวิเคราะห์ผลการทดลองนี้พิจารณาจากภาระบรรทุกก๊าซไซลีนที่เข้าระบบประสิทธิ-ภาพการกำจัด และจำนวนวันที่เดินระบบ รูปที่ 4.21 4.22 และ 4.23 คือ อัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิภาพการกำจัดของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที จากการดำเนินการทดลองเป็นเวลา 50 60 และ 60 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิการกำจัดของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 วินาที



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิการกำจัดของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 60 วินาที



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนและประสิทธิการกำจัดของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 90 วินาที

ผลการทดลองพบว่าภายหลังจากที่เครื่องกรองชีวภาพใช้เวลาในการปรับตัวจนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว ระบบยังต้องใช้เวลาในการปรับตัวเพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อม และอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 - 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลอง รูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.23 เมื่อดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพที่อัตราภาระบรรทุกน้อยกว่าค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 70 142 และ 194 ก./ลบ.ม. - ชม. ของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาทีตามลำดับ ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสูง แต่เมื่อดำเนินงานโดยใช้อัตราภาระบรรทุกเท่ากับ 130 180 และ 230 ก./ลบ.ม.- ชม. ซึ่งมากกว่าค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดของเครื่องกรองชีวภาพ ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดประมาณเท่ากับ 70% และเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกก๊าซไซลีนให้กับทุกเครื่องกรองชีวภาพต่อไปอีก ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่า 50%

4.3.6 ค่าความดันลดที่เกิดขึ้น

ภายหลังดำเนินการทดลองที่ 1 พบว่า ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบมีสาเหตุมาจากความชื้นภายในชั้นตัวกลางที่มากเกินไป และอัตราส่วนการผสมที่มีดินใบก้ามปูในสัดส่วนสูง มีแนวโน้มทำให้ความดันลดของระบบเพิ่มสูงขึ้น และหลังจากดำเนินการทดลองที่ 2 พบว่าความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบมีสาเหตุมาจากเวลาเก็บกักของระบบคือ เมื่อเวลาเก็บกักของระบบที่เพิ่มขึ้นจาก 36 60 และ 90 วินาที ทำให้ค่าความดันลดของระบบเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 22 36 และ 44 มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1 - จ.3) เนื่องจากความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนที่เพิ่มสูงขึ้น จากผลของเวลาเก็บกักที่มากขึ้นส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเพิ่มขึ้น Jorio และคณะ (2000) ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ในระบบเพิ่มมากขึ้นทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้ไปกักกันและขัดขวางหรือไปเชื่อมประสานช่องว่างภายในวัสดุตัวกลางส่งผลให้อากาศภายในเครื่องกรองชีวภาพเคลื่อนที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความสูงของตัวกลาง

4.3.7 ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลาง

ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลางที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาทีอยู่ในช่วง 6.7 - 7.4 6.6 - 7.6 และ 6.3 - 7.5 ตามลำดับ (รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1 - จ.3) โดยการลดลงของค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลางมีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนคือ ค่าความสามารถในการกำจัดที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยปริมาณก๊าซ

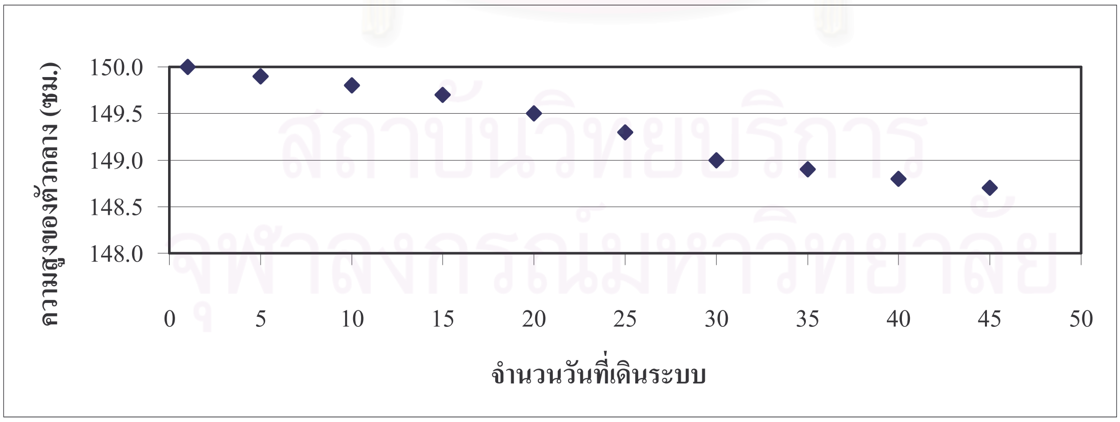
ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนจะละลายภายในชั้นตัวกลางที่มีความชื้นโดยอยู่ในรูปของ HCO_3^- H_2CO_3 และ CO_3^{2-} ซึ่งจะมีผลโดยตรงทำให้ค่าความเป็นกรด – ด่างภายในชั้นตัวกลางลดลงจนกระทั่งต่ำกว่า 6 หากไม่มีการเติมบัฟเฟอร์ให้กับระบบ แต่จากการเติมเปลือกหอยให้กับระบบมีส่วนช่วยทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชั้นตัวกลางอยู่ในช่วง 6 - 8 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ

4.3.8 อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง

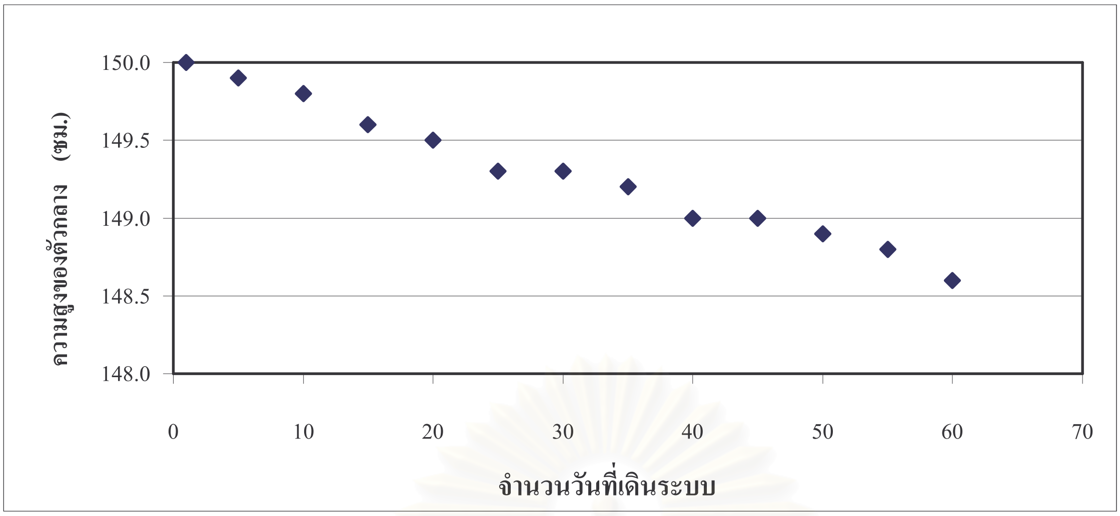
ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางที่เวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที อยู่ในช่วง 28.9 - 32.5 28.8 - 32.9 และ 28.9 - 33.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1 - จ.3) โดยอุณหภูมิที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 20 - 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ในระบบเจริญเติบโตได้ดีทำให้กิจกรรมการย่อยสลายสารมลพิษมากขึ้น

4.3.9 การทรุดตัวของตัวกลาง

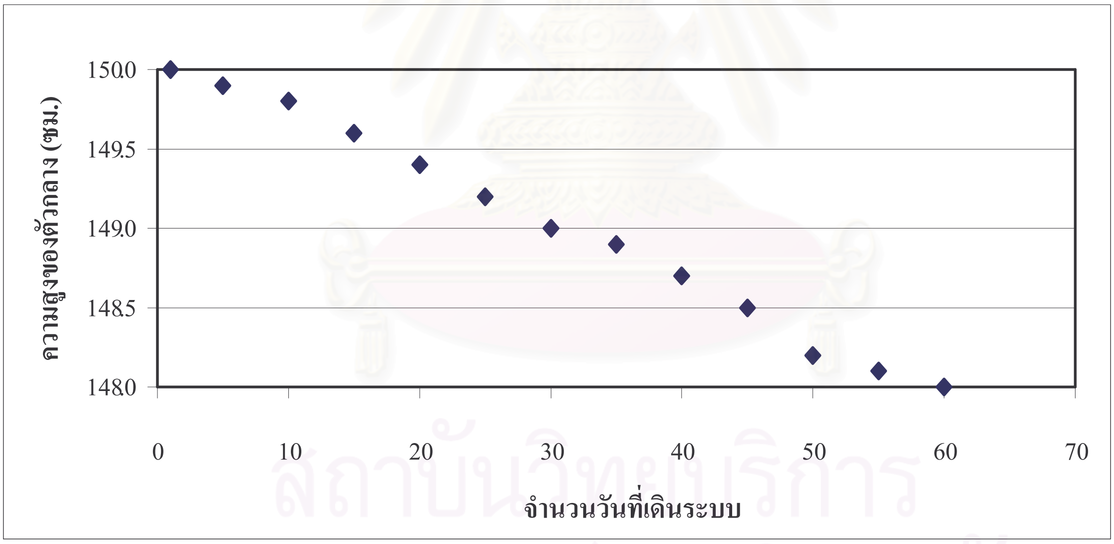
ภายหลังดำเนินการทดลองที่ 1 พบว่า ค่าการทรุดตัวของตัวกลางที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากความชื้นภายในชั้นตัวกลางที่มากเกินไป และอัตราส่วนการผสมที่มีดินใบก้ามปูในสัดส่วนสูง มีแนวโน้มทำให้การทรุดตัวสูงขึ้น และหลังจากดำเนินการทดลองที่ 2 พบว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากเวลาเก็บกักของระบบคือ เมื่อเวลาเก็บกักของระบบที่เพิ่มขึ้นจาก 36 60 และ 90 วินาทีส่งผลให้การทรุดตัวของตัวกลางเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.24 – 4.26 (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.1 – จ.3)



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 วินาที



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 60 วินาที



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวกลางและจำนวนวันที่เดินระบบสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 90 วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.26 พบว่าการทรุดตัวของตัวกลางสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที เกิดขึ้นเท่ากับ 1.3 1.5 และ 2.0 ซม.ตามลำดับ ค่าการทรุดตัวที่ต่างกันเพราะเวลาเก็บกักที่มากขึ้นทำให้การย่อยสลายก๊าซไซลีนสมบูรณ์มากขึ้น และเกิดจุลินทรีย์ในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งในขณะที่หยุดเดินระบบจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์จากดินใบก้ามปู และปุ๋ยคอกเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารส่งผลให้เกิดการสลายตัวของตัวกลาง จึงเป็นเหตุให้เกิดการทรุดตัวของตัวกลาง โดยค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดถือว่าน้อยมากโดยส่งผลให้เวลาเก็บกักภายในเครื่องกรองเปลี่ยนแปลงจาก 36 60 และ 90 วินาที เป็น 35 58 และ 87 วินาที ตามลำดับ

4.3.10 ปริมาณอินทรียวัตถุ

หลักจากสิ้นสุดการทดลองได้นำตัวกลางดินไปทดสอบปริมาณอินทรียวัตถุที่มีอยู่ภายในชั้นตัวกลางด้วยวิธีการเผาไหม้ตัวอย่างตัวกลางดินที่ตำแหน่งความสูง 0.5 0.9 1.3 และ 1.5 เมตรตามลำดับ (รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.6)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณอินทรียวัตถุ

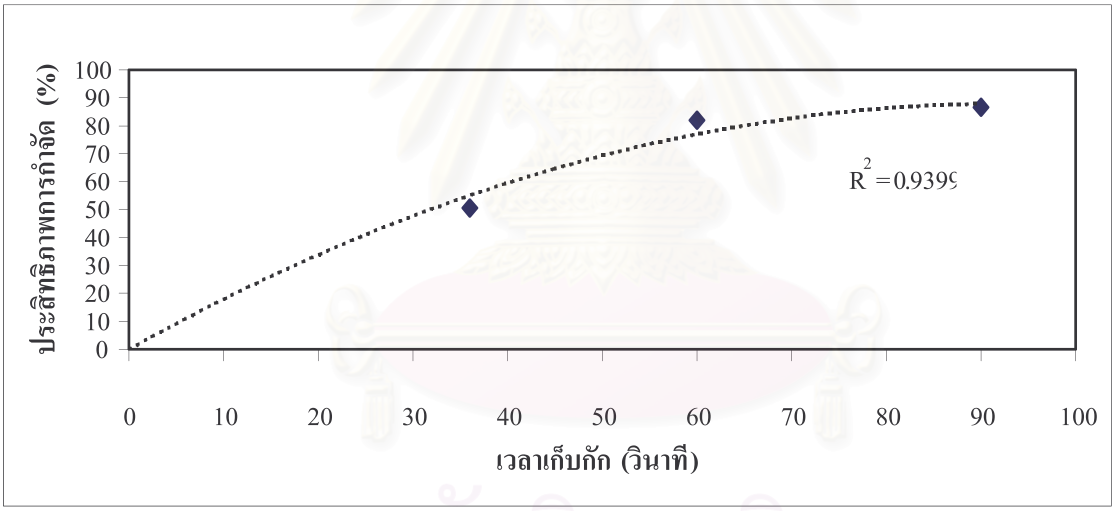
ตัวกลางที่ตำแหน่งความสูง (เมตร)	% ปริมาณอินทรียวัตถุ
0.5	6.35 ± 0.34
0.9	5.00 ± 0.40
1.3	2.75 ± 0.32
1.5	1.23 ± 0.21

ผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณอินทรียวัตถุมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง 0.5 0.9 1.3 และ 1.5 เมตรตามลำดับ (จากตำแหน่งที่ก๊าซไซลีนเข้าเครื่องกรองชีวภาพ) โดยสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนคือ ที่ตำแหน่งความสูง 0.5 0.9 1.3 และ 1.5 เมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนมีค่าประมาณเท่ากับ 50% 30% 20% และ 10% ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับค่าปริมาณอินทรียวัตถุที่สามารถใช้แสดงถึงความหนาแน่นของจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในเครื่องกรองชีวภาพ โดยที่จะมีจำนวนมากบริเวณทางเข้าของก๊าซไซลีนคือ ที่ตำแหน่งความสูง 0.5 และ 0.9 เมตร ขณะที่จะมีจำนวนน้อยลงเมื่ออยู่ห่างไกลจากแหล่งสารอินทรีย์คือที่ตำแหน่ง 1.3 เมตร โดยที่ตำแหน่งความสูง 1.5 เมตร ซึ่งเป็นจุดบนสุดของตัวกลางมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อย

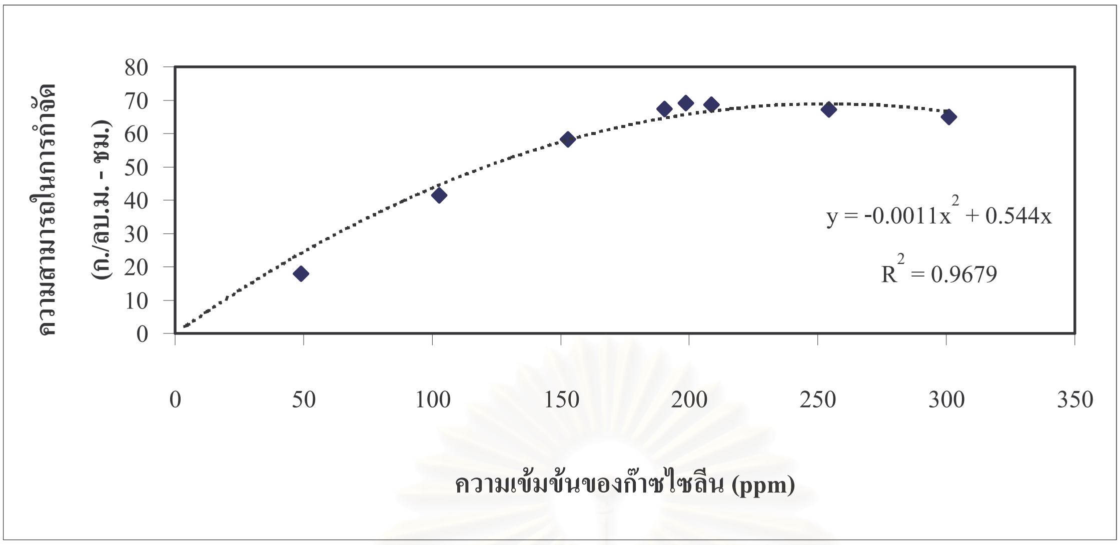
(ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.4) ซึ่งมาจากเหตุผลดังกล่าวหรืออาจเกิดจากการเติมน้ำเพื่อควบคุมความชื้นภายในชั้นตัวกลางให้คงที่เท่ากับ 45 – 60 % ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เติมจากด้านบนชะละลายจุลินทรีย์ในระบบให้มาอยู่รวมกันบริเวณด้านล่างของเครื่องกรองชีวภาพส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งอื่น ด้วยเหตุผลสำคัญนี้ในการดำเนินระบบกรองชีวภาพควรติดตามตรวจสอบค่าความชื้นภายในชั้นตัวกลาง ค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นและปริมาณสารอาหารบริเวณที่ตำแหน่งความสูงไม่เกิน 1 เมตรเป็นอย่างมากเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงตลอดเวลาที่เดินระบบ

4.4 ความเข้มข้นวิกฤตของก๊าซไซลีนสำหรับเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที

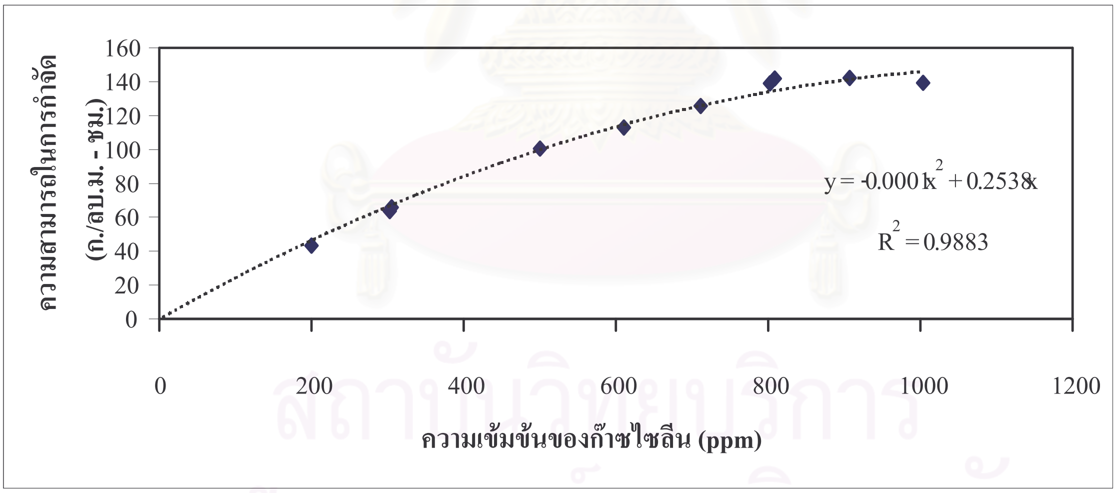
ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพชนิดนี้เป็นฟังก์ชันของเวลาเก็บกักและความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบดังแสดงในรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.30



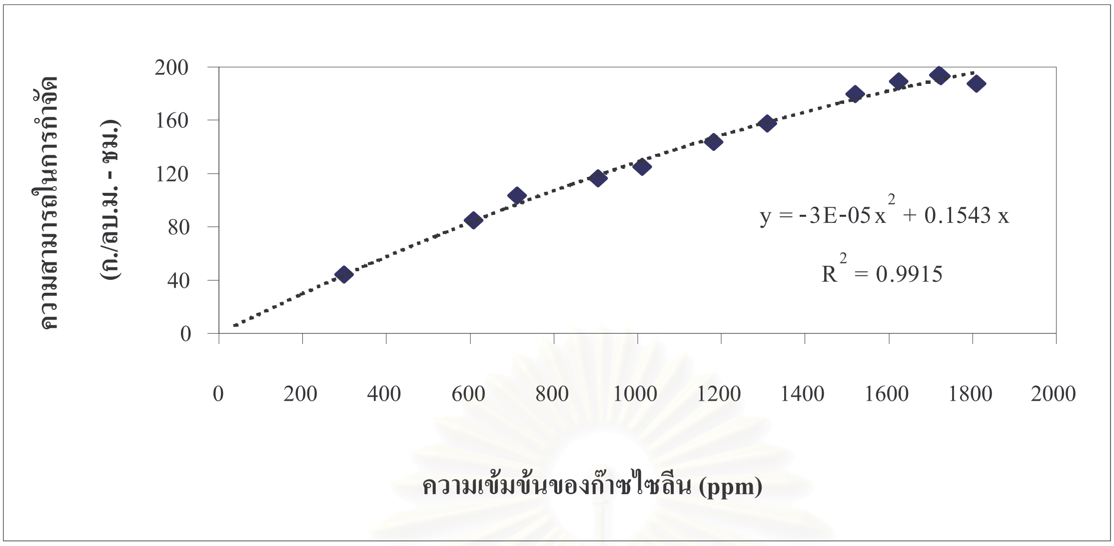
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและเวลาเก็บกักเมื่อความเข้มข้นของก๊าซไซลีนคงที่เท่ากับ 300 ppm



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นวิกฤตของก๊าซไซลีน ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 วินาที



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นวิกฤตของก๊าซไซลีน ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 วินาที



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดและความเข้มข้นวิกฤตของก๊าซไซลีน ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 90 วินาที

ผลการทดลองในรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.30 พบว่าความเข้มข้นวิกฤตของก๊าซไซลีนที่ทำให้เครื่องกรองชีวภาพนี้สามารถกำจัดก๊าซไซลีนได้มากที่สุดสำหรับเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาที มีค่าเท่ากับ200 900 และ 1,700 ppm ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นที่เครื่องกรองชีวภาพชนิดนี้สามารถกำจัดได้นี้สอดคล้องกับรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นของก๊าซมลพิษชนิดที่เป็น VOCs โดยทั่วไปที่ใช้วิธีการกำจัดด้วยเครื่องกรองชีวภาพไม่ควรมากกว่า 2,000 ppm เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงมากกว่านี้ส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบได้

4.5 ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบซึ่งเครื่องกรองที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาทีสามารถกำจัดได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐาน

ค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการทำงานของกรมแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม อ้างถึงในการควบคุมมลพิษ (2541) ได้กำหนดค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของไซลีนในบรรยากาศของการทำงานในสถานประกอบการโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานโดยปกติ ไม่ควรเกิน 100 พีพีเอ็ม หรือ 435 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดของ

เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลากัก 36 60 และ 90 วินาที สามารถสรุปค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด(100 ppm)

เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก (วินาที)	ช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่ระบบสามารถกำจัดได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐาน
36	ไม่มากกว่า 250 ppm
60	ไม่มากกว่า 500 ppm
90	ไม่มากกว่า 700 ppm

การพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีกำจัดสารมลพิษนอกเหนือจากพิจารณาต้นทุนในการก่อสร้างระบบความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดที่มากกว่า 85 % เป็นสิ่งสำคัญเพื่อเป็นที่ยอมรับได้ว่าระบบที่ใช้กำจัดมีประสิทธิภาพและความสามารถเพียงพอ ตารางที่ 4.6 แสดงช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนสำหรับเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ 90 วินาทีสามารถกำจัดได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 85 %

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบซึ่งเครื่องกรองชีวภาพกำจัดได้โดยมีประ สิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 85 %

เครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก (วินาที)	ช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่ระบบสามารถกำจัดได้
36	ไม่มากกว่า 200 ppm
60	ไม่มากกว่า 600 ppm
90	ไม่มากกว่า 900 ppm

และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนของเครื่องกรองชีวภาพที่มีเวลาเก็บกัก 36 60 และ90วินาที โดยความเข้มข้นที่เข้าระบบในช่วง 200 – 300 600 – 1,100 และ 900 – 2,000 ppm พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการกำจัดประมาณเท่ากับ 53 – 83% 50 – 75% และ 51 – 82% ตามลำดับ

4.6 อันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองชีวภาพ

อันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพมีความสำคัญสำหรับการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพ อันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 1) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ คือ ประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษและเวลาเก็บกัก 2) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง คือ ประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับเวลาเก็บกักเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองดังรูป 4.19 ถึงรูปที่ 4.20 พบว่าการย่อยสลายก๊าซไซลีนเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์สำหรับเวลาเก็บกัก 36 วินาที โดยช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนไม่มากกว่า 200 ppm สำหรับเวลาเก็บกัก 60 วินาที ช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนไม่มากกว่า 900 ppm สำหรับเวลาเก็บกัก 90 วินาที ช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนไม่มากกว่า 1,700 ppm เพราะช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่มากกว่าความเข้มข้นวิกฤตสำหรับแต่ละเวลาเก็บกักส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดก๊าซไซลีนลดลงจากเดิม และทำให้ไม่สามารถบ่งชี้ถึงอันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา

ผลการทดลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาดังนี้

1) ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่ใช้ในการทดลองที่ระบบสามารถกำจัดได้เท่ากับ 1,700 ppm โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ Hunter และ Oyama (2000) คือ สารมลพิษที่เป็นVOCs สามารถใช้กระบวนการกรองชีวภาพกำจัดได้ โดยช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม ไม่ควรมากกว่า 2,000 ppm ซึ่งความเข้มข้นที่สูงมากกว่านี้การกำจัดด้วยวิธีการอื่น เช่น Absorption Condensation หรือ Incineration มีความเหมาะสมมากกว่าเมื่อพิจารณาจากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

2) ความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุด (EC_{max}) จากงานวิจัยที่ผ่านมามีค่าอยู่ในช่วง 15 – 200 กรัมไซลีนต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง Shim และคณะ (2004) จากการวิจัยพบว่ามีค่าเท่ากับ 194 ก./ ลบ.ม.- ชม. เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการทดลองพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางโดยงานวิจัยที่ผ่านมาของต่างประเทศส่วนใหญ่อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางอยู่ระหว่าง 10 - 25 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 28 – 34 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้เป็นช่วงที่เหมาะสมโดยทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ตามสมการของอารีเนียส (Arrhenius Equation) รวมถึงชนิดของตัวกลางที่เลือกใช้ส่งผลต่อการความสามารถในการกำจัดไซลีน ข้อด้อยของตัวกลางที่เลือกใช้จากการวิจัยที่

ผ่านมา เช่น ตัวกลางที่เป็นดินเหนียว แกลบ และอื่นๆ คือมีปริมาณจุลชีพและสารอาหารในระบบน้อย การอัดตัวกันแน่นภายในชั้นตัวกลางจนเกิดสภาพไร้อากาศ การทรุดตัวและสลายตัวของตัวกลางทำให้ปริมาตรของระบบที่ออกแบบไว้ลดลงจากเดิมส่งผลให้เวลาเก็บกักของระบบสั้นลง ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยและความไม่สามารถในการกักเก็บน้ำภายในตัวกลางไว้ได้ ทำให้จุลชีพไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยได้ทำการปรับปรุงตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านี้

3) ความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของเครื่องกรองชีวภาพลดลง ค่าความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ขนาดอนุภาคของตัวกลาง ลักษณะของตัวกลางที่มีความพรุนน้อย และอัตราภาระบรรทุกของสารมลพิษ ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0 – 265 มิลลิเมตรของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร จากการทดลองพบว่าค่าความดันลดสูงสุดของระบบที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงเท่ากับ 3 - 40 มม.ของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสมขยะพลาสติกมีส่วนช่วยทำให้ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นของระบบลดน้อยลง Devinny และคณะ (1999) แนะนำว่าความดันลดที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองชีวภาพไม่ควรมากกว่า 100 มม. ของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร หากค่าความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นควรหาวิธีในการแก้ปัญหาความดันลดที่เกิดขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในเรื่องการกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสมในครั้งนี้สามารถสรุปผลงานวิจัยและมีข้อเสนอแนะเพื่อที่จะทำการศึกษาและวิจัยต่อไปดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอัตราส่วนการผสมตัวกลางที่เหมาะสมและเวลาเก็บกักรวมถึงความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม สามารถสรุปเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

1) การทดลองพบว่าอัตราส่วนการผสมดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก กับขยะพลาสติก เท่ากับ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไซลีนที่ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 100 ppm มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 96 % และความดันลดที่เกิดขึ้นน้อยในช่วง 3 - 10 มม.ของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสม 20:80 40:60 และ 80:20

2) ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการทดลองพบว่าค่าการทรุดตัวมากที่สุดของตัวกลางมีค่าประมาณเท่ากับ 3 และ 2 เซ็นติเมตร สำหรับการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ตามลำดับ โดยความดันลดที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 40 มม.ของน้ำต่อความลึกของตัวกลาง 1 เมตร

3) ที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบในช่วง 50 - 300 ppmระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 53 - 96 % ที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบในช่วง 50 - 1,100 ppm ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 50 - 98 % ที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที ความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบในช่วง 50 - 2,000 ppm ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 51 - 99 %

4) ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 60 และ 90 วินาที ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 85 % คือไม่มากกว่า 200 600 และ 900 ppm ตามลำดับ

5) ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 60 และ 90 วินาที ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไซลีนที่เหมาะสมในการดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพควรมีค่าไม่มากกว่า 200 900 และ 1,700 ppm ตามลำดับ

6) ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 36 60 และ 90 วินาที ความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดเท่ากับ 70 142 และ194 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

7) ความสามารถในการกำจัดไซลีนที่เพิ่มขึ้นพิจารณาได้จากประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อแปรผันความเข้มข้นและอัตราการไหลของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบ

8) การดำเนินงานของเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กำจัดไซลีนควรออกแบบให้มีเวลาเก็บกักอย่างน้อยเท่ากับ 90 วินาที เพราะจะทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงมากกว่า 85 %(ในช่วงความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบไม่มากกว่า 900 ppm)รวมถึงค่าความสามารถในการกำจัดที่สูง

9) เมื่อดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กำจัดไซลีนสูงมากกว่าค่าความสามารถสูงสุดที่เครื่องกรองชีวภาพมีความสามารถที่จะกำจัดได้ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดไซลีนลดลงจากเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาค่าความสามารถในการกำจัดไซลีนสูงสุดได้พบข้อที่น่าสนใจอีกหลายประการและข้อเสนอแนะสำหรับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานระบบเพื่อทำการศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

1) ทดลองเดินเครื่องกรองชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงมากกว่า 1,500 ppm เพื่อหาวิธีในการป้องกันและแก้ปัญหาความดันลดและประสิทธิภาพการกำจัดที่ลดลง

2) เมื่อดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพและพบปัญหาในเรื่องความดันลดของระบบ ที่เกิดขึ้นสามารถแก้ปัญหาโดยการทำช่องเปิดที่ทางเข้าและตักตัวอย่างตัวกลางความลึกประมาณ 5 เซ็นติเมตรแล้วนำไปใส่กลับคืนที่ด้านบนของเครื่องกรองเพื่อให้ความสูงของตัวกลางคงเดิม หรือให้ทิศทางของอากาศเข้าตรงข้ามกับที่เดินระบบ(เปลี่ยนจาก upflow เป็น downflow) เป็นต้น

3) ทำการทดลองเปรียบเทียบหรือการทดลองร่วมกันระหว่างกระบวนการกรองชีวภาพกับกระบวนการบำบัดชนิดอื่นเช่น biotrickling filters หรือ bioscrubbers

4) ศึกษาผลของปัจจัยชนิดอื่นที่มีผลต่อการดำเนินงานเครื่องกรองชีวภาพเช่น อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิที่สูงมากขึ้น

5) ศึกษาตัวกลางชนิดอื่น เช่น ปุ๋ยหมัก โดยทำการทดลองปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ชนิดอื่น ปุ๋ยหมักจากวัชพืช ปุ๋ยหมักจากขยะชุมชนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพจากกำจัดก๊าซไซลีน

6) ศึกษาตัวกลางวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ภายในท้องถิ่น เช่น เปลือกชานอ้อย ฟางข้าว แกลบและอื่นๆ โดยนำมาผสมรวมกับตัวกลางดินเพื่อใช้บำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดไซลีนหรือชนิดอื่น

7) ศึกษาความสามารถในการกำจัด VOCs รวมจากตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการใช้งานจริงของโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้ VOCs ชนิดต่างๆรวมกัน เช่น BTEX

8) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสูงสุดของ VOCs ชนิดอื่น เช่น เบนซีน อะซีโตน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กำจัด VOCs เหล่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ. กรม และสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547. โครงการสาธิตเทคโนโลยีการบำบัดกลิ่นจากระบบบำบัดน้ำเสียและโรงงานอุตสาหกรรม.[CD-ROM]

ควบคุมมลพิษ. กรม. 2544. โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ). รายงานฉบับสมบูรณ์

ควบคุมมลพิษ. กรม. 2544. ไซลีน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : อินทิเกรเต็ด โปรโมชันเทคโนโลยี.

เจตนา จิรวัชรเดช. 2544. ประสิทธิภาพการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยใช้ระบบบำบัดด้วยดิน (อี เอ พี เอส). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิชุดา มณีรัตน์. 2538. สารเคมีเป็นพิษที่ปนเปื้อนจากขยะและสิ่งแวดล้อมในเม็ดพลาสติกรีไซคลิ่ง วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาปิโตรเคมี - โพลิเมอร์ (สหสาขา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์. 2547. ปุ๋ยหมัก ดินหมัก และปุ๋ยน้ำชีวภาพ : เพื่อการปรับปรุงดินโดยวิธีเกษตรธรรมชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 2 . กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์

ศุลกากร. กรม. 2521-2547. ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศของไทย 2521-2547. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงการคลัง

สุโรชา พูลสวัสดิ์. 2546. การกำจัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสริมศักดิ์ ทั่งมั่งมี. 2546. ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอีนโดยเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. New York: Academic Press.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Methods for Moisture,Ash, and Organic Matter of Peat and Other Soils.D420-D4914.Annual book of ASTM standards. Vol.04.04 section 4 : 280-281

Carlson, D.A., and Leiser, C.P. 1996. Soil beds for the control of sewage odors. Journal of Water Pollution Control Federation 38(5) : 829-840.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chou, M-S., and Cheng, W-H. 1997. Screening of biofiltration material for VOC treatment. Journal of the Air & Waste Management Association 47 (6) : 674-681

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

Devinny, J.S., and Hodge, D.S. 1995. Formation of acidic and toxic intermediates in overloaded ethanol biofilters. Journal of the Air & Waste Management Association 45 (2) : 125-133

Fernando, M-S., Brent, E.S., and Allen, D.G. 2001. Effects of biomass growth on gas pressure drop. Journal of Environmental Engineering 6 : 388-396

Goodfellow. (n.d.). Polybuthylene Terephthalate(PBT) Properties and Application [Online]. Available From : http://www.Azom.com/details.asp [2005,February 19]

Hodge, D.S., and Devinny, J.S. 1995. Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration [online]. Available From : http://www.trgbiofilter.com/modeling.htm [2002 , November 11]

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

Hwang, S-J., and Tang, H-M. 1997. Kinetic behavior of the Toluene biofiltration process. Journal of the Air & Waste Management Association 47 (6) : 664-673

Jorio, H., Bibeau, L., Viel, G., and Heitz, M. 2000. Effect of Gas Flow Rate and Inlet Concentration on Xylene Vapors Biofiltration Performance. Chemical Engineering Journal 76 : 209-221

Ottengraf, S.P.P. and Konnings, J.H.G. 1991.Emission of microorganisms from biofilters. Bioprocess Engineering 7 : 89-97.

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

Shim E-H., Cho K - S., and Ryu H.W. 2004. Effect of MTBE on the Degradation of Benzene Toluene and Xylene Gases [Online]. Available From : http://www.cleanairnet.org/article.htm [2005,February 19]

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

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

มูลนิธิมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. ความรู้เรื่องดินและปุ๋ย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รุ่ง ฤทธิญาณ. 2543. การศึกษาระบบกำจัดไอระเหยไซลีน โดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชั่นสามสถานะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วรรณนา ภาณุวัฒน์สุข. 2545. วิศวกรรมชีวสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ภาษาอังกฤษ

Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J-C. and Fanlo, J-L. 2001. Biofiltration of a mixture of Volatile Organic Compound.Journal of the Air & Waste Management Association 51 (12) : 1662-1670.

Arulneyam, D., and Swaminathan,T. 2000. Biodegradation of Ethanol Vapor in a Biofilter. Bioprocess Engineering 22 : 209-221

Deshusses, M., Johnson, C.T., and Leson, G. 1999. Biofiltration of High Loads of Ethyl Acetate in the Presence of Toluene. Journal of the Air & Waste Management Association 49(8) : 973-979

Durham, D.R., Marshall, L.C., Miller, J.C., and Chmurny, A.B. 1994. Characterization of inorganic biocarries that moderate system upsets during fixed-film biotreatment process. Applied and Environment Microbiology 60 (9) : 3329-3338

Grego, J., Quinlan, C., Streevett.K., and Ketcham, M. 1999. VOC Elimination in a Compost Biofilter Using a Previously Acclimated Bacterial Innoculum. Journal of the Air & Waste Management Association 49 (5) : 544-553.

Kabel, R.L., and Heinsohn , R.J. 1999. Source and Control of Air Pollution. New Jersey:Prentice-Hall.

Leson, G. and Winner, A.M. 1991.Biofiltration:An innovative air pollution control technology for VOC emissions. Journal of the Air & Waste Management Association 41 (8) : 1045-1054

Mohseni, M., and Allen, D.G. 1999. Transient Performance of Biofilters Treating Mixtures of Hydrophilic and Hydrophobic Volatile Organic Compounds. . Journal of the Air & Waste Management Association 49 (12) : 1434-1441.

Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. Methods of Soil Analysis. 2 nd ed. Wisconsin : The American Society of Agronomy.

Rafson , H.J. 1998. Odor and VOC Control Handbook. New York:Macgraw-Hill.

Watts, R.J. 1998. Hazardous Wastes:Sources,Pathway,Receptors. USA : John Wiley&Sons.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของตัวกลาง

1) การทดสอบค่าความเป็นกรด - ด่าง อ้างอิง Hodge and Devinny (1995)

1. ตักตัวอย่างใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 10 ml.
2. เติมน้ำกลั่นลงในกระบอกตวงที่ใส่ตัวอย่างไว้ให้ท่วมพอดี
3. ใช้กระดาษพาราฟิล์มปิดกระบอกตวงเพื่อป้องกันก๊าซ CO_2 ในบรรยากาศละลายลงไป
4. ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง และใช้เครื่องมือวัดความเป็นกรด - ด่าง

2) การทดสอบค่าคามชื้นของตัวกลาง อ้างอิง ASTM D420 – D4914

1. จดบันทึกน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องละเอียด 2 ตำแหน่ง
2. ผสมตัวอย่างให้เข้ากันและตักตัวอย่าง อย่างน้อย 50 กรัมลงในถ้วยกระเบื้อง
3. บดตัวอย่างไม่ให้จับตัวกันเป็นก้อน และปิดด้วยกระดาษฟอยล์อลูมิเนียมชั่งน้ำหนักเป็น A
4. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 16 ชั่วโมง และนำไปอบต่ออีก 1 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักเป็น B

$$\text{ความชื้น (\%)} = (A-B)x100/A$$

3) การทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวกลาง อ้างอิง Hodge and Devinny (1995)

1. ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงขนาด 100 ml.ละเอียด 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเป็น X_0
2. ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่ต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้ว กระแทกก้นกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่ตรงกับปริมาตรที่ต้องการ
3. บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงเป็น X_1

$$\text{ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)} = (X_1 - X_0)/\text{ปริมาตรกระบอกตวง}$$

4) การทดสอบค่าความพรุนของตัวกลาง อ้างอิง Hodge and Devinny (1995)

1. ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml.จนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่ต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้ว กระแทกก้นกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่ตรงกับปริมาตรที่ต้องการ
2. บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงเป็น X_1
3. เติมน้ำลงในกระบอกตวงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในตัวกลาง โดยการกระแทกก้นกระบอกตวง
4. เมื่อน้ำลงไปแทนที่ช่องว่างจนถึงปริมาตรที่ต้องการแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็น X_2

$$\text{ความพรุน (\%)} = (X_2 - X_1) / (\text{ความหนาแน่นของน้ำ/ปริมาตรของตัวกลาง})$$

5) การหาปริมาณเถ้า อ้างอิง ASTM D420 – D4914

1. นำตัวอย่างในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านขั้นตอนการหาค่าความชื้น จะนำมาบางส่วนหรือทั้งหมดก็ได้ บันทึกน้ำหนักเป็น B
2. เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่
3. ปิดฝาถ้วยกระเบื้องด้วยกระดาษฟอยล์อลูมิเนียม ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักเป็น C

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)}_{\text{(wet basis)}} = (Cx100)/B$$

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)}_{\text{(dry basis)}} = (Cx100)/B \times (100 - \%M)/100$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น

6) การหาปริมาณอินทรียวัตถุ อ้างอิง ASTM D420 – D4914

$$\text{ปริมาณอินทรียวัตถุ(\%)} = 100 - \text{ปริมาณเถ้า}_{\text{(wet basis)}}$$

$$\text{ปริมาณอินทรียวัตถุ(\%)} = (100 - \text{ปริมาณเถ้า})*(100 - \%M)/100_{\text{(dry basis)}}$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการคำนวณ

แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (d)	=	0.05 m.
ความสูงของตัวกลาง (h)	=	1.50 m.
ปริมาตรของตัวกลาง	=	$(\pi d^2 / 4) \cdot h$
	=	0.003 m^3

อัตราภาระบรรทุก (Mass loading) ของระบบ

เช่น ความเข้มข้นของ Xylene ที่เข้าระบบ = 300 ppm

แปลงหน่วยความเข้มข้น ppm ให้อยู่ในรูป g/m^3 (air) โดยใช้สมการ

$$g/m^3 = \frac{\text{ppm x molecular weight (g/mol)}}{0.0821 \times 303 \times 1000}$$

มวลโมเลกุลของไซลีน = 106.16 g/mol

ดังนั้น

Mass concentration ของ xylene = 1.28 g/m^3 (air)

คำนวณหาเวลาเก็บกัก (EBRT) ตามขนาดของ Biofilter ที่เลือกใช้

$$\text{EBRT} = \text{Media volume / Qair}$$

$$= [\,0.003\ m^3 / 0.3(m^3/hr)\,]$$

$$= 36\ \text{sec}$$

คำนวณหาอัตราภาระบรรทุกของระบบจากสมการ

$$\text{Mass loading (volumetric)} = \frac{\text{Mass concentration } (g/m^3) \times 3{,}600 \text{ (sec/hr)}}{\text{EBRT (sec)}}$$

Xylene mass loading ของระบบ = 128.0 g./m^3-hr

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency ; RE)

$$RE = \left[\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}\right] \times 100$$

เช่น ความเข้มข้นของไซลีนที่ออกจากระบบ = 148.6 ppm

$$RE = \left[\frac{300 - 148.6}{300}\right] \times 100$$

$$= 50.5\ \%$$

การคำนวณหาความสามารถในการกำจัดสารมลพิษ (Elimination Capacity ; EC)

$$EC = \text{Mass Loading} \times RE$$

$$= 128 \times 0.505$$

$$= 64.6\ \text{g.(Xylene)} / m^3 - hr$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบตั้งแต่นาทีที่ 1 – 180

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบตั้งแต่นาทีที่ 1 – 180

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
1	99.8
2	96.7
3	97.3
4	97.9
5	98.1
6	97.9
7	97.9
8	98.1
9	97.7
10	97.9
11	97.4
12	98.0
13	97.4
14	98.7
15	98.1
16	99.4
17	99.1
18	99.1
19	99.1
20	99.9

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
21	98.7
22	99.3
23	99.7
24	100.1
25	99.4
26	99.2
27	100.0
28	99.0
29	98.9
30	98.0
31	99.5
32	99.9
33	100.8
34	100.2
35	100.5
36	100.2
37	99.6
38	98.5
39	98.0
40	97.0

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
41	97.1
42	97.4
43	97.7
44	97.1
45	95.2
46	96.8
47	95.3
48	96.1
49	98.3
50	98.0
51	98.1
52	98.7
53	99.0
54	99.8
55	100.4
56	101.1
57	100.7
58	100.5
59	100.6
60	100.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบตั้งแต่นาทีที่ 1 – 180 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
61	100.6
62	100.8
63	100.1
64	100.6
65	100.2
66	99.0
67	99.3
68	100.2
69	98.8
70	99.3
71	98.7
72	99.1
73	100.0
74	100.4
75	100.1
76	100.2
77	99.6
78	99.7
79	99.9
80	98.9

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
81	99.5
82	99.0
83	98.3
84	98.0
85	98.0
86	97.3
87	96.6
88	96.4
89	97.0
90	96.5
91	96.9
92	97.6
93	98.3
94	97.8
95	97.5
96	96.9
97	97.6
98	98.1
99	98.5
100	98.6

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
101	98.8
102	99.4
103	99.2
104	99.0
105	98.3
106	98.7
107	98.0
108	98.2
109	97.7
110	99.0
111	98.8
112	98.2
113	97.9
114	98.4
115	98.6
116	97.9
117	98.6
118	97.7
119	97.7
120	98.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซไซลีนที่เข้าระบบตั้งแต่นาทีที่ 1 – 180 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
121	97.5
122	97.5
123	98.0
124	97.1
125	96.8
126	96.4
127	95.8
128	95.3
129	95.3
130	95.3
131	95.2
132	96.0
133	95.8
134	95.4
135	95.5
136	95.6
137	95.6
138	94.9
139	95.3
140	95.2

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
141	94.9
142	95.0
143	94.9
144	95.1
145	94.6
146	95.5
147	95.6
148	95.5
149	94.7
150	95.3
151	94.9
152	94.1
153	94.2
154	94.6
155	95.1
156	94.9
157	95.3
158	95.4
159	95.7
160	95.4

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)
161	94.9
162	93.9
163	95.2
164	94.9
165	94.8
166	94.4
167	94.6
168	94.7
169	94.3
170	95.2
171	95.6
172	95.2
173	94.9
174	95.1
175	94.2
176	94.8
177	94.2
178	94.5
179	94.3
180	94.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองจากอัตราส่วนดินใบก้ามปู / ขยะที่ 20:80 60:40 40:60 และ 80:20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 1 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 20:80

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
11-Aug-47	1	5	36	7	7.1	7.2	28.4	28.5	28.7	64	58	50	-	8
16-Aug-47	5	5	36	7	7	7.1	27.2	27.3	27.5	64	60	50	-	8
17-Aug-47	6	5	36	7	7	7	30.6	30.4	30.7	58	56	50	0.3	10
18-Aug-47	7	5	36	7	6.9	7.1	30.4	30.5	30.3	60	58	54	0.4	12
19-Aug-47	8	5	36	6.9	6.9	7	30.8	30.9	31.2	54	52	50	0.5	14
20-Aug-47	9	5	36	6.9	7.1	7.1	29.4	29.8	29.9	62	58	60	0.6	15
23-Aug-47	12	5	36	7	7.1	7.1	29.6	29.9	30.1	66	60	54	0.6	16
24-Aug-47	13	5	36	7.1	7.2	7.1	30.8	30.9	31.1	64	62	56	0.7	18
25-Aug-47	14	5	36	7.1	7	7.1	32.2	32.4	32.6	62	60	60	0.8	20
26-Aug-47	15	5	36	7.1	7	7.1	32.2	32.3	32.5	60	56	50	0.9	21
30-Aug-47	19	5	36	7	6.9	7	30.9	30.8	30.9	66	60	58	0.9	21
31-Aug-47	20	5	36	7.1	7.2	7.2	31.6	31.5	31.7	66	58	50	1	22
1-Sep-47	21	5	36	7.1	7	7.1	30.4	30.6	30.8	62	56	50	1.1	23
2-Sep-47	22	5	36	7.2	7.1	7	31.2	31.1	31.3	60	56	52	1.1	23
3-Sep-47	23	5	36	7.2	7.3	7.2	29.6	29.8	29.9	60	58	58	1.2	24
6-Sep-47	26	5	36	7.2	7.4	7.1	29.1	29.2	29.4	64	62	60	1.2	24
7-Sep-47	27	5	36	7.1	7.3	7.2	30.6	30.9	30.8	62	60	58	1.2	25
9-Sep-47	29	5	36	7.1	7.3	7.4	30.1	30.2	30.3	66	60	60	1.3	25
10-Sep-47	30	5	36	7.2	7.4	7.3	31.4	31.6	31.8	60	60	58	1.4	25

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 1 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 20:80 (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ปริมาณน้ำที่เติม (มล.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)				
11-Aug-47	101.3	62	76.8	70	24.2	43.2	10.5	140
16-Aug-47	102.8	63	56.2	71	45.3	43.9	19.9	120
17-Aug-47	98.7	65	42.4	66	57.0	42.1	24.0	140
18-Aug-47	102	67	36.4	71	64.3	43.5	28.0	120
19-Aug-47	101.5	66	30.6	64	69.9	43.3	30.3	80
20-Aug-47	102.2	68	20	68	80.4	43.6	35.1	100
23-Aug-47	99.6	67	48.6	72	51.2	42.5	21.8	100
24-Aug-47	101.8	64	34.3	71	66.3	43.4	28.8	180
25-Aug-47	99.2	65	18.2	70	81.7	42.3	34.6	160
26-Aug-47	100.6	65	16.3	67	83.8	42.9	36.0	120
30-Aug-47	102	64	19.2	71	81.2	43.5	35.3	115
31-Aug-47	101	66	26.4	72	73.9	43.1	31.8	130
1-Sep-47	101.6	68	23.7	69	76.7	43.4	33.2	120
2-Sep-47	99	67	17.6	68	82.2	42.2	34.7	130
3-Sep-47	100.2	65	14.3	67	85.7	42.8	36.7	160
6-Sep-47	102	64	26.2	71	74.3	43.5	32.3	180
7-Sep-47	101.3	63	20.2	72	80.1	43.2	34.6	200
9-Sep-47	98.8	62	21.4	73	78.3	42.2	33.0	190
10-Sep-47	99.2	64	16.3	68	83.6	42.3	35.4	180

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 2 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 40:60

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
11-Aug-47	1	5	36	7.2	7	7.1	28.8	28.7	28.5	62	60	60	-	6
16-Aug-47	5	5	36	7.2	7	7	27	27.2	27.1	60	56	58	-	6
17-Aug-47	6	5	36	7.2	7	7.1	30.4	30.6	30.2	62	60	60	0.2	6
18-Aug-47	7	5	36	7.3	7.1	7	30.8	30.4	30.7	64	60	60	0.3	6
19-Aug-47	8	5	36	7.3	7.1	7	30.9	31	31.1	62	58	58	0.4	6
20-Aug-47	9	5	36	7.3	7	6.9	29.4	29.6	29.5	58	56	54	0.5	7
23-Aug-47	12	5	36	7.2	7.1	7	29.8	29.6	29.7	58	58	56	0.6	8
24-Aug-47	13	5	36	7.2	7	6.9	31.2	31.1	31.3	58	52	50	0.6	8
25-Aug-47	14	5	36	7.3	7.1	7.2	32.6	32.5	32.3	64	60	58	0.6	8
26-Aug-47	15	5	36	7.3	7.2	7.1	32.1	32.3	32.4	62	60	56	0.8	10
30-Aug-47	19	5	36	7.4	7.3	7	30.8	30.9	31.1	62	62	60	0.8	10
31-Aug-47	20	5	36	7.4	7.2	6.9	31.6	31.8	31.5	68	64	60	0.8	10
1-Sep-47	21	5	36	7.5	7.3	7	30.9	30.8	30.6	66	60	52	1	12
2-Sep-47	22	5	36	7.4	7.2	7	30.8	30.9	31.1	66	62	54	1.1	12
3-Sep-47	23	5	36	7.4	7.1	7	29.4	29.5	29.7	60	54	50	1.2	12
6-Sep-47	26	5	36	7.3	7	6.8	28.6	28.7	28.9	62	56	52	1.2	12
7-Sep-47	27	5	36	7.2	7.1	7	27.4	27.6	27.8	60	58	54	1.4	14
9-Sep-47	29	5	36	7.4	7.3	6.9	30.6	30.9	30.7	60	56	56	1.5	14
10-Sep-47	30	5	36	7.5	7.2	7	29.6	29.8	29.9	62	62	60	1.6	14

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 2 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 40:60 (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ปริมาณน้ำที่เติม (มล.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)				
11-Aug-47	102	62	72.4	68	29.0	43.5	12.6	110
16-Aug-47	101.3	63	60.4	67	40.4	43.2	17.5	130
17-Aug-47	100.4	65	34.2	69	65.9	42.8	28.3	160
18-Aug-47	103.2	67	29.4	71	71.5	44.0	31.5	150
19-Aug-47	100.6	66	24.2	67	75.9	42.9	32.6	110
20-Aug-47	102.8	68	20.2	66	80.4	43.9	35.3	120
23-Aug-47	101.4	67	43.4	64	57.2	43.3	24.8	110
24-Aug-47	99.2	64	26.1	64	73.7	42.3	31.2	120
25-Aug-47	101.7	65	32.8	70	67.7	43.4	29.4	110
26-Aug-47	97.8	65	22.5	68	77.0	41.7	32.1	100
30-Aug-47	101	64	29.8	69	70.5	43.1	30.4	110
31-Aug-47	102.4	66	18.1	73	82.3	43.7	36.0	110
1-Sep-47	99.8	68	20.2	72	79.8	42.6	34.0	110
2-Sep-47	100.8	67	14.2	72	85.9	43.0	37.0	110
3-Sep-47	102	65	12.3	68	87.9	43.5	38.3	125
6-Sep-47	101.2	64	28.4	67	71.9	43.2	31.1	160
7-Sep-47	99.3	63	24.3	68	75.5	42.4	32.0	180
9-Sep-47	98.2	62	18.6	67	81.1	41.9	34.0	160
10-Sep-47	102.4	64	16.2	69	84.2	43.7	36.8	140

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 3 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 60:40

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
11-Aug-47	1	5	36	7.3	7	7	28.4	28.7	28.9	60	60	58	-	3
16-Aug-47	5	5	36	7.3	6.9	6.9	27.2	27.4	27.5	60	58	56	-	3
17-Aug-47	6	5	36	7.2	6.9	6.9	30.4	30.6	30.8	58	54	52	0.2	3
18-Aug-47	7	5	36	7.1	7	7	30.2	30.3	30.5	58	56	50	0.4	3
19-Aug-47	8	5	36	7.1	6.8	6.9	31.1	31.4	31.3	62	60	58	0.6	3
20-Aug-47	9	5	36	7.2	6.8	6.9	29.2	29.1	29.4	60	58	54	0.8	4
23-Aug-47	12	5	36	7.1	6.9	7	29.6	29.7	29.9	60	60	58	0.8	4
24-Aug-47	13	5	36	7	6.9	6.8	30.8	30.9	31	62	60	60	1	5
25-Aug-47	14	5	36	6.9	6.9	6.8	32.2	32.4	32.6	58	58	60	1	5
26-Aug-47	15	5	36	6.9	6.8	6.9	32.4	32.6	32.7	62	60	54	1.2	6
30-Aug-47	19	5	36	6.9	6.9	7	31.1	30.9	31.2	62	58	56	1.4	6
31-Aug-47	20	5	36	6.8	6.9	6.9	31.3	31.2	31.4	58	58	54	1.6	7
1-Sep-47	21	5	36	6.8	7	6.9	30.8	30.9	31.1	58	58	56	1.8	7
2-Sep-47	22	5	36	6.9	7	6.8	31.1	31.3	31.5	62	60	60	2	8
3-Sep-47	23	5	36	6.8	6.9	7	29.2	29.4	29.6	62	58	58	2	8
6-Sep-47	26	5	36	6.9	7	7	30.1	30.3	30.5	60	60	60	2.2	9
7-Sep-47	27	5	36	6.8	6.8	6.9	28.6	28.4	28.7	64	62	60	2.4	9
9-Sep-47	29	5	36	6.9	6.9	6.8	31.1	31	31.4	62	60	60	2.5	10
10-Sep-47	30	5	36	6.8	6.8	6.9	30.8	30.6	30.4	62	60	58	2.6	10

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 3 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 60:40 (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ปริมาณน้ำที่เติม (มล.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)				
11-Aug-47	99.2	62	60.8	68	38.7	42.3	16.4	-
16-Aug-47	100.4	61	52.8	70	47.4	42.8	20.3	60
17-Aug-47	102.8	60	32.6	67	68.3	43.9	30.0	50
18-Aug-47	98.2	63	23.4	66	76.2	41.9	31.9	60
19-Aug-47	102.1	64	14.8	70	85.5	43.6	37.3	60
20-Aug-47	99.4	66	10.4	69	89.5	42.4	38.0	70
23-Aug-47	101	65	46.8	68	53.7	43.1	23.1	70
24-Aug-47	98.5	68	20.2	72	79.5	42.0	33.4	60
25-Aug-47	101	67	15.6	66	84.6	43.1	36.4	60
26-Aug-47	102.4	66	8.4	70	91.8	43.7	40.1	60
30-Aug-47	100.3	68	11.9	71	88.1	42.8	37.7	65
31-Aug-47	98.6	68	4.5	68	95.4	42.1	40.2	60
1-Sep-47	102.2	67	3.8	67	96.3	43.6	42.0	60
2-Sep-47	101.8	69	4.6	72	95.5	43.4	41.5	60
3-Sep-47	100.4	66	10.3	70	89.7	42.8	38.5	65
6-Sep-47	101.6	65	15.4	72	84.8	43.4	36.8	90
7-Sep-47	102.8	64	13.6	74	86.8	43.9	38.1	60
9-Sep-47	102	63	5.2	72	94.9	43.5	41.3	90
10-Sep-47	100.4	62	4.6	72	95.4	42.8	40.9	80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 4 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ ขยะ = 80:20

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
11-Aug-47	1	5	36	7.3	7.3	7.2	28.1	28.3	28.5	64	62	60	-	6
16-Aug-47	5	5	36	7.3	7.3	7.1	27.1	26.8	26.9	66	60	60	0.2	6
17-Aug-47	6	5	36	7.3	7.2	7	30.6	30.4	30.7	66	60	50	0.3	8
18-Aug-47	7	5	36	7.4	7.2	7.1	30.9	31	31.1	66	60	50	0.4	8
19-Aug-47	8	5	36	7.5	7.1	7	29.4	29.6	29.7	64	62	60	0.5	10
20-Aug-47	9	5	36	7.4	7.2	7.1	29.8	30.1	30.2	66	64	60	0.6	10
23-Aug-47	12	5	36	7.3	7	7	31.1	31.3	31.4	66	60	52	0.8	12
24-Aug-47	13	5	36	7.2	7	7	31.9	32.2	32.4	66	58	50	0.8	15
25-Aug-47	14	5	36	7.1	7	6.9	32.4	32.6	32.6	66	60	56	1	16
26-Aug-47	15	5	36	7	6.9	6.9	31.1	31.3	31.4	64	62	56	1.1	18
30-Aug-47	19	5	36	7	6.9	6.9	31.8	31.9	31.7	60	62	60	1.2	20
31-Aug-47	20	5	36	6.9	6.8	6.9	30.8	30.6	31	66	64	60	1.4	22
1-Sep-47	21	5	36	6.9	6.9	6.9	31.1	31.3	31.5	66	64	62	1.4	22
2-Sep-47	22	5	36	6.8	6.9	6.8	29.1	29.4	29.5	66	62	60	1.6	24
3-Sep-47	23	5	36	6.9	7	6.9	30	30.1	30.2	62	60	50	1.8	26
6-Sep-47	26	5	36	6.9	6.9	7	29.4	29.4	29.6	62	58	50	1.8	28
7-Sep-47	27	5	36	6.8	6.9	6.9	30.1	30.2	30.4	60	60	56	2	30
9-Sep-47	29	5	36	6.8	6.8	6.9	30.4	30.4	30.6	62	60	50	2.2	32
10-Sep-47	30	5	36	6.9	6.9	7	31.4	31.1	31.5	66	60	60	2.4	36

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ง. 4 ผลการทดลองจากอัตราส่วน ดินใบก้ามปู/ขยะ = 80:20 (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ปริมาณน้ำที่เติม (มล.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)				
11-Aug-47	101.4	62	57.5	72	43.3	43.3	18.7	-
16-Aug-47	98.9	61	48.4	73	51.1	42.2	21.6	-
17-Aug-47	103.2	60	40.5	74	60.8	44.0	26.8	50
18-Aug-47	98.8	63	38.4	72	61.1	42.2	25.8	-
19-Aug-47	102.4	64	34.2	71	66.6	43.7	29.1	50
20-Aug-47	101.6	66	29.4	73	71.1	43.4	30.8	40
23-Aug-47	102	65	42.8	72	58.0	43.5	25.3	60
24-Aug-47	100.8	68	20.2	72	80.0	43.0	34.4	40
25-Aug-47	102.2	67	30.8	73	69.9	43.6	30.5	-
26-Aug-47	101.5	66	10.8	72	89.4	43.3	38.7	60
30-Aug-47	102	68	15.4	70	84.9	43.5	37.0	70
31-Aug-47	100.5	68	11.4	71	88.7	42.9	38.0	30
1-Sep-47	101.2	67	9	72	91.1	43.2	39.3	40
2-Sep-47	102.4	69	18.8	68	81.6	43.7	35.7	30
3-Sep-47	101.2	66	11.2	67	88.9	43.2	38.4	40
6-Sep-47	103.4	65	14.6	67	85.9	44.1	37.9	70
7-Sep-47	101.6	64	9.8	69	90.4	43.4	39.2	60
9-Sep-47	100.4	63	4.2	70	95.8	42.8	41.1	60
10-Sep-47	98.8	62	8.2	70	91.7	42.2	38.7	40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 60 90 วินาที และการทดลองซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 1 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
12-Sep-47	1	5	36	7.3	7.2	7.2	30.1	30.3	30.4	60	60	58	-	4
13-Sep-47	2	2	90	7.3	7.3	7.2	30.2	30.4	30.8	60	62	54	-	-
14-Sep-47	3	2	90	7.2	7.2	7.1	30.8	31	31.1	60	56	56	0.1	-
15-Sep-47	4	2	90	7.2	7.1	7.1	29.7	29.8	29.9	60	56	54	0.1	5
16-Sep-47	5	2	90	7.1	7.1	7.2	30.4	30.6	30.8	62	58	56	0.2	-
17-Sep-47	6	2	90	7	7.3	7.3	31.2	31.2	31.3	62	56	56	0.2	-
19-Sep-47	8	2	90	7	7.3	7.4	30.6	30.8	31	62	62	60	0.3	6
20-Sep-47	9	2	90	7	7.2	7.3	29.2	29.6	29.6	62	60	56	0.4	-
21-Sep-47	10	2	90	6.9	7.2	7.3	29.9	30.1	30.3	60	62	56	0.4	-
22-Sep-47	11	2	90	6.9	7.1	7.3	30.4	30.4	30.6	60	58	54	0.4	7
23-Sep-47	12	2	90	6.9	7.2	7.2	31.1	31.4	31.6	60	56	54	0.5	-
24-Sep-47	13	2	90	6.9	7.1	7.2	30.2	30.3	30.4	60	54	54	0.5	-
27-Sep-47	16	5	36	6.9	7	7.4	32.1	32.2	32.2	66	66	64	0.5	7
28-Sep-47	17	5	36	7	7	7.5	31.5	31.6	31.6	66	66	62	0.6	-
29-Sep-47	18	5	36	7	7	7.5	31.7	31.8	31.6	66	62	60	0.6	-
30-Sep-47	19	5	36	7	7	7.5	29.1	29.2	29.1	62	60	58	0.6	8
1-Oct-47	20	5	36	7	7	7.4	29.2	29.4	29.1	60	60	60	0.6	-
2-Oct-47	21	5	36	7	7	7.5	30.6	30.6	30.5	60	58	58	0.7	-
3-Oct-47	22	5	36	7	7	7.5	30.4	30.5	30.6	60	58	54	0.7	9
4-Oct-47	23	5	36	7	6.9	7.4	29.6	29.8	29.7	60	60	56	0.8	-
5-Oct-47	24	5	36	7	7	7.6	30	30.1	30.1	62	60	60	0.8	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 1 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
12-Sep-47	51.8	66	33.8	-	34.7	22.1	7.7
13-Sep-47	49.8	67	9.2	-	81.5	8.5	6.9
14-Sep-47	50	68	4.3	-	91.4	8.5	7.8
15-Sep-47	50.6	67	1.6	-	96.8	8.6	8.4
16-Sep-47	51.4	65	12.2	-	76.3	8.8	6.7
17-Sep-47	52.2	64	18.5	-	64.6	8.9	5.8
19-Sep-47	53.4	64	30.2	-	43.4	9.1	4.0
20-Sep-47	50.1	65	31.3	-	37.5	8.6	3.2
21-Sep-47	49.2	63	15.1	-	69.3	8.4	5.8
22-Sep-47	48.2	66	12	-	75.1	8.2	6.2
23-Sep-47	47.9	68	7	-	85.4	8.2	7.0
24-Sep-47	49	67	2.4	300	95.1	8.4	8.0
27-Sep-47	302.6	66	236.4	300	21.9	129.1	28.3
28-Sep-47	304.4	65	202.2	700	33.6	129.9	43.6
29-Sep-47	305.2	66	190.8	-	37.5	130.2	48.8
30-Sep-47	298.8	67	166.2	-	44.4	127.5	56.6
1-Oct-47	296.5	68	155.4	700	47.6	126.5	60.2
2-Oct-47	298	69	160	-	46.3	127.2	58.9
3-Oct-47	296.2	70	180.8	-	39.0	126.4	49.2
4-Oct-47	306.2	69	158.2	700	48.3	130.7	63.2
5-Oct-47	301	68	148.6	-	50.6	128.5	65.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 1 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
6-Oct-47	25	5	36	6.9	7	7.5	30.8	31.1	31	64	60	60	0.8	10
7-Oct-47	26	5	36	7	6.9	7.4	31.8	31.8	31.9	62	60	56	0.9	-
8-Oct-47	27	5	36	7	7	7.5	30.6	30.4	30.3	60	60	60	0.9	-
9-Oct-47	28	5	36	7.1	7.1	7.6	29.7	29.9	29.6	60	60	60	0.9	11
11-Oct-47	30	5	36	7	6.9	7.5	30.5	30.6	30.7	58	60	58	0.9	-
12-Oct-47	31	5	36	7	7	7.4	30.3	30.7	30.8	58	58	58	1	-
13-Oct-47	32	5	36	7	7	7.3	31.2	31.4	31.5	60	60	58	1	13
14-Oct-47	33	5	36	7	6.9	7.3	31.6	31.7	31.4	58	58	58	1	-
15-Oct-47	34	5	36	6.9	6.9	7.2	31.6	31.8	31.5	60	58	60	1	-
16-Oct-47	35	5	36	6.9	7	7.2	30.8	30.9	31.1	64	62	60	1	15
18-Oct-47	37	5	36	6.9	7	7.2	31.6	31.6	31.8	62	60	60	1	-
19-Oct-47	38	5	36	6.9	6.9	7.2	31.2	31.4	31.5	66	64	62	1	-
20-Oct-47	39	5	36	6.9	6.9	7.2	31.8	31.9	32.1	66	62	60	1	18
21-Oct-47	40	5	36	6.9	6.9	7.1	32.1	32.1	32.3	66	62	60	1.1	-
22-Oct-47	41	5	36	6.8	6.9	7.1	31.6	31.8	31.9	60	60	56	1.1	-
23-Oct-47	42	5	36	6.8	6.9	7.1	31.9	31.9	32	60	60	56	1.1	20
25-Oct-47	44	5	36	6.8	7	7.1	31.6	31.6	31.7	60	60	56	1.1	-
26-Oct-47	45	5	36	6.8	6.9	7	31.2	31.3	31.3	56	56	52	1.1	-
27-Oct-47	46	5	36	6.8	6.9	7	30.9	31	31.1	60	60	56	1.2	22
28-Oct-47	47	5	36	6.8	6.9	7	31.7	31.9	32	60	60	58	1.2	22

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ จ. 1 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 36 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก	ความสามารถในการกำจัด
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		(ก./ลบ.ม.- ชม.)	(ก./ลบ.ม.- ชม.)
6-Oct-47	302.6	70	192	-	36.5	129.1	47.2
7-Oct-47	294.8	71	188.2	700	36.2	125.8	45.5
8-Oct-47	291.9	72	201.2	-	31.1	124.6	38.7
9-Oct-47	301.6	70	215.5	-	28.5	128.7	36.7
11-Oct-47	253.8	69	188.7	700	25.7	108.3	27.8
12-Oct-47	250.4	68	142.3	-	43.2	106.9	46.1
13-Oct-47	254	67	106.5	-	58.1	108.4	62.9
14-Oct-47	247.8	68	99.5	700	59.8	105.8	63.3
15-Oct-47	254.2	69	96.7	-	62.0	108.5	67.2
16-Oct-47	248.7	64	90.5	-	63.6	106.1	67.5
18-Oct-47	244.6	66	86.5	700	64.6	104.4	67.5
19-Oct-47	242.6	67	82.4	-	66.0	103.5	68.4
20-Oct-47	255.3	68	88.5	-	65.3	109.0	71.2
21-Oct-47	251.3	69	86.2	700	65.7	107.2	70.5
22-Oct-47	257.4	70	88.6	-	65.6	109.8	72.0
23-Oct-47	269.2	71	101.8	-	62.2	114.9	71.4
25-Oct-47	270.8	70	113.2	800	58.2	115.6	67.3
26-Oct-47	274.6	70	116.2	-	57.7	117.2	67.6
27-Oct-47	278.8	71	120.3	-	56.9	119.0	67.6
28-Oct-47	279.6	72	116.4	800	58.4	119.3	69.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
12-Sep-47	1	5	36	7.2	7.2	7.2	29.8	29.8	30	62	60	60	-	6
13-Sep-47	2	2	90	7.2	7.1	7.2	30.4	30.5	30.6	60	60	58	-	-
14-Sep-47	3	2	90	7.1	7.2	7.3	30.2	30.1	30.3	58	62	56	-	-
15-Sep-47	4	2	90	7.1	7.3	7.2	30.6	30.8	31	58	56	54	-	6
16-Sep-47	5	2	90	7.1	7.3	7.3	30.1	30.4	30.5	58	60	56	0.1	-
17-Sep-47	6	2	90	7	7.2	7.1	31.6	31.7	31.6	60	60	56	0.1	-
19-Sep-47	8	2	90	7	7	7.1	31.7	31.9	32	60	62	60	0.1	8
20-Sep-47	9	2	90	7	7.2	7.4	30.1	30.1	30.2	62	62	60	0.2	-
21-Sep-47	10	2	90	7.1	7.4	7.3	29.6	29.7	29.9	60	60	58	0.2	-
22-Sep-47	11	2	90	7	7.2	7.3	29.8	29.6	30	60	62	56	0.3	10
23-Sep-47	12	2	90	7	7.2	7	30.1	30.4	30.2	60	58	54	0.3	-
24-Sep-47	13	5	36	7	7.1	7.1	29.6	29.6	29.8	60	62	54	0.3	-
27-Sep-47	16	5	36	7	7	7.2	32.1	32.2	32.1	60	66	62	0.4	12
28-Sep-47	17	5	36	7	7	7.2	31.5	31.5	31.5	62	66	60	0.4	-
29-Sep-47	18	5	36	7.1	7	7.3	31.4	31.6	31.7	62	62	60	0.5	-
30-Sep-47	19	5	36	7	7	7.4	29.1	29.2	29.1	62	64	60	0.5	14
1-Oct-47	20	5	36	7	7	7.3	29.4	29.5	29.2	62	64	58	0.5	-
2-Oct-47	21	5	36	7	7	7.4	30.5	30.6	30.3	60	62	60	0.6	-
3-Oct-47	22	5	36	7	7	7.5	30.3	30.6	30.4	58	58	58	0.6	16

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
12-Sep-47	52.2	68	31.6	-	39.5	22.3	8.8
13-Sep-47	51.3	69	10.8	-	78.9	8.8	6.9
14-Sep-47	51.6	70	6.4	-	87.6	8.8	7.7
15-Sep-47	52.1	71	3.1	-	94.0	8.9	8.4
16-Sep-47	52.6	71	8.6	-	83.7	9.0	7.5
17-Sep-47	53.1	72	16.2	-	69.5	9.1	6.3
19-Sep-47	50.9	72	26.1	-	48.7	8.7	4.2
20-Sep-47	50.6	70	32.4	-	36.0	8.6	3.1
21-Sep-47	52.6	71	30.5	-	42.0	9.0	3.8
22-Sep-47	49.6	69	16.4	-	66.9	8.5	5.7
23-Sep-47	48.1	68	8.6	-	82.1	8.2	6.7
24-Sep-47	198.4	70	118.9	300	40.1	84.7	33.9
27-Sep-47	203.6	71	96.8	-	52.5	86.9	45.6
28-Sep-47	202.1	72	90.4	-	55.3	86.2	47.7
29-Sep-47	198.8	69	84.2	700	57.6	84.8	48.9
30-Sep-47	204.6	70	71.5	-	65.1	87.3	56.8
01-Oct-47	203.3	68	57.6	-	71.7	86.8	62.2
02-Oct-47	198.2	66	59.4	700	70.0	84.6	59.2
03-Oct-47	203.9	68	63.7	-	68.8	87.0	59.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
4-Oct-47	23	5	36	7	7	7.5	29.8	29.9	30	60	58	60	0.6	-
5-Oct-47	24	5	36	7	7	7.6	30	30	30.1	62	62	56	0.7	-
6-Oct-47	25	5	36	6.9	7	7.5	30.7	30.9	31.1	64	62	60	0.7	18
7-Oct-47	26	5	36	7	7	7.5	31.6	31.8	31.7	62	60	60	0.7	-
8-Oct-47	27	5	36	7	7	7.4	30.2	30.4	30.6	64	60	60	0.7	-
9-Oct-47	28	5	36	7	7	7.5	29.5	28.8	29.3	62	58	58	0.7	18
11-Oct-47	30	5	36	7	7	7.6	30.4	30.5	30.6	60	62	58	0.7	-
12-Oct-47	31	5	36	7	6.9	7.6	30.5	30.6	30.7	60	60	60	0.7	-
13-Oct-47	32	5	36	7	7	7.5	31.2	31.4	31.5	60	58	58	0.8	20
14-Oct-47	33	5	36	7	6.9	7.3	31.4	31.7	31.5	58	58	54	0.8	-
15-Oct-47	34	5	36	7	6.9	7.3	31.3	31.6	31.7	58	58	58	0.8	-
16-Oct-47	35	5	36	6.9	6.9	7.3	31.1	31.2	31.2	60	58	58	0.9	22
18-Oct-47	37	5	36	7	6.9	7.3	32	32.1	32.2	62	60	58	0.9	-
19-Oct-47	38	5	36	6.9	6.9	7.2	31.6	31.6	31.7	64	62	60	0.9	-
20-Oct-47	39	5	36	6.9	7	7.2	32.2	32.1	32.2	62	62	60	1	24
21-Oct-47	40	5	36	6.8	6.9	7.2	32.2	31.9	31.9	60	58	58	1	-
22-Oct-47	41	5	36	6.8	6.9	7.1	32	32.2	32.3	60	58	56	1	-
23-Oct-47	42	5	36	6.8	6.9	7.1	31.2	31.4	31.5	64	62	58	1	26
25-Oct-47	44	5	36	6.8	6.9	7	31.7	31.7	31.8	62	60	60	1	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
4-Oct-47	201.6	69	65.8	-	67.4	86.0	58.0
5-Oct-47	198.2	68	67.5	700	65.9	84.6	55.8
6-Oct-47	196.8	70	69.4	-	64.7	84.0	54.4
7-Oct-47	199.2	71	67.7	-	66.0	85.0	56.1
8-Oct-47	196.7	72	70.2	700	64.3	83.9	54.0
9-Oct-47	206	73	69.5	-	66.3	87.9	58.3
11-Oct-47	202	74	74.6	-	63.1	86.2	54.4
12-Oct-47	207.2	73	63.2	700	69.5	88.4	61.5
13-Oct-47	208.6	72	50.4	-	75.8	89.0	67.5
14-Oct-47	196.8	70	45.2	-	77.0	84.0	64.7
15-Oct-47	202.5	69	46.1	-	77.2	86.4	66.7
16-Oct-47	208.6	68	47.9	700	77.0	89.0	68.6
18-Oct-47	190.4	70	32.4	-	83.0	81.3	67.4
19-Oct-47	196.8	71	48.6	-	75.3	84.0	63.2
20-Oct-47	202.1	72	50.8	-	74.9	86.2	64.6
21-Oct-47	210.6	74	44.8	-	78.7	89.9	70.8
22-Oct-47	205.6	73	46.2	700	77.5	87.7	68.0
23-Oct-47	207.4	70	47.5	-	77.1	88.5	68.2
25-Oct-47	198.5	68	40.2	-	79.7	84.7	67.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
26-Oct-47	45	5	36	6.9	6.9	7	31.1	31.3	31.2	64	62	60	1	-
27-Oct-47	46	5	36	6.9	6.9	6.9	30.8	30.9	31.1	62	60	58	1	28
28-Oct-47	47	5	36	6.8	7	6.9	31.7	31.8	32	60	58	58	1	-
29-Oct-47	48	3	60	6.8	6.9	7	31.6	31.6	31.8	64	62	56	1.1	-
30-Oct-47	49	3	60	6.8	6.9	7	32.1	32.2	32.2	66	64	60	1.1	30
31-Oct-47	50	3	60	6.8	6.8	6.9	32.2	32.4	32.5	66	64	60	1.1	-
1-Nov-47	51	3	60	6.7	6.8	6.9	32	32.1	32.2	62	60	58	1.2	-
2-Nov-47	52	3	60	6.7	6.8	6.9	32.2	32.3	32.4	60	58	58	1.2	32
3-Nov-47	53	3	60	6.7	6.9	6.9	32.5	32.6	32.8	60	60	58	1.2	-
4-Nov-47	54	3	60	6.7	6.9	6.9	32.6	32.7	32.7	60	56	54	1.3	-
5-Nov-47	55	3	60	6.7	6.9	6.9	32.7	32.8	32.9	60	56	56	1.3	36
6-Nov-47	56	3	60	6.6	6.9	6.9	32.6	32.5	32.7	60	54	54	1.4	-
8-Nov-47	58	3	60	6.6	6.8	6.8	32.5	32.6	32.8	60	54	52	1.4	-
9-Nov-47	59	3	60	6.6	6.8	6.8	32.6	32.5	32.7	60	58	54	1.4	36
10-Nov-47	60	3	60	6.6	6.8	6.8	32.8	32.7	32.7	62	60	58	1.5	-
11-Nov-47	61	3	60	6.6	6.8	6.8	32.7	32.6	32.6	62	60	58	1.5	-
12-Nov-47	62	3	60	6.6	6.8	6.8	32.2	32.4	32.4	62	60	58	1.5	36

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 60 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
26-Oct-47	194.8	67	34.8	-	82.1	83.1	68.3
27-Oct-47	198.6	68	36.6	-	81.6	84.8	69.1
28-Oct-47	200.4	69	38.7	-	80.7	85.5	69.0
29-Oct-47	199.7	70	30.2	-	84.9	51.1	43.4
30-Oct-47	302.8	72	54.6	700	82.0	77.5	63.6
31-Oct-47	305.3	71	48.2	1100	84.2	78.2	65.8
1-Nov-47	500.6	69	108	1100	78.4	128.2	100.5
2-Nov-47	610.4	73	169.7	1100	72.2	156.3	112.8
3-Nov-47	603.5	72	152.8	1500	74.7	154.5	115.4
4-Nov-47	711.2	70	222.4	1500	68.7	182.1	125.2
5-Nov-47	704.4	74	203.6	1500	71.1	180.4	128.2
6-Nov-47	802.6	75	260.2	1500	67.6	205.5	138.9
8-Nov-47	808.5	73	254.9	1700	68.5	207.0	141.8
9-Nov-47	907.2	71	350.6	2100	61.3	232.3	142.4
10-Nov-47	1003.6	70	449.1	2100	55.3	257.0	142.0
11-Nov-47	1012.4	74	468.7	1500	53.7	259.2	139.2
12-Nov-47	1098.6	73	600.8	1500	45.3	281.3	127.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
12-Sep-47	1	5	36	7.1	7.2	7.2	30.1	30.4	30.5	60	62	60	-	6
13-Sep-47	2	2	90	7.1	7.3	7.2	31.2	31.4	31.7	60	58	58	-	-
14-Sep-47	3	2	90	7.2	7.3	7.4	29.8	29.9	30.1	60	62	60	-	-
15-Sep-47	4	2	90	7	7.3	7.3	31.4	31.6	32.2	60	58	58	-	7
16-Sep-47	5	2	90	7	7.2	7.2	30.7	30.8	30.8	62	62	60	0.1	-
17-Sep-47	6	2	90	7	7.3	7.2	31.2	31.4	31.5	64	62	62	0.1	-
19-Sep-47	8	2	90	7	7.1	7.1	32.1	31.8	32.1	60	62	58	0.1	8
20-Sep-47	9	2	90	6.9	7.2	7.3	29.4	29.6	29.7	60	60	56	0.2	-
21-Sep-47	10	2	90	6.9	7.3	7.2	28.9	29.2	29.3	60	58	56	0.2	-
22-Sep-47	11	2	90	6.8	7.2	7.1	29.8	30.2	30.2	58	58	56	0.3	9
23-Sep-47	12	2	90	6.9	7	7.2	31.4	31.7	31.6	58	60	54	0.3	-
24-Sep-47	13	5	36	6.9	7	7.1	30.8	30.7	30.9	60	60	58	0.3	-
27-Sep-47	16	5	36	7	7	7.3	31.9	32.1	32.2	60	64	62	0.4	10
28-Sep-47	17	5	36	7	7	7.3	31.4	31.6	31.5	64	66	60	0.4	-
29-Sep-47	18	5	36	7	7	7.4	31.7	31.7	31.7	62	62	60	0.4	-
30-Sep-47	19	5	36	7	7	7.4	29	29.1	29.2	60	60	58	0.5	11
1-Oct-47	20	5	36	7	7	7.5	29.2	29.4	29.5	60	60	58	0.5	-
2-Oct-47	21	5	36	7	7	7.5	30.1	30.4	30.3	58	58	58	0.6	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
12-Sep-47	50.8	85	30.4	-	40.2	21.7	8.7
13-Sep-47	49.1	85	14.6	-	70.3	8.4	5.9
14-Sep-47	48.8	86	12.2	-	75.0	8.3	6.2
15-Sep-47	48.2	85	5.2	-	89.2	8.2	7.3
16-Sep-47	47.9	84	1.6	-	96.7	8.2	7.9
17-Sep-47	49.5	83	7.3	-	85.3	8.4	7.2
19-Sep-47	51.4	85	18	-	65.0	8.8	5.7
20-Sep-47	51.6	84	28.3	-	45.2	8.8	4.0
21-Sep-47	51	83	16.4	-	67.8	8.7	5.9
22-Sep-47	50.8	86	13.1	-	74.2	8.7	6.4
23-Sep-47	52	85	6.2	-	88.1	8.9	7.8
24-Sep-47	98.4	84	42.6	-	56.7	42.0	23.8
27-Sep-47	101.1	82	33.2	300	67.2	43.1	29.0
28-Sep-47	99.6	80	24.8	-	75.1	42.5	31.9
29-Sep-47	100.6	80	16.4	-	83.7	42.9	35.9
30-Sep-47	99.1	81	11.2	300	88.7	42.3	37.5
1-Oct-47	103.3	78	8.1	-	92.2	44.1	40.6
2-Oct-47	101	78	6.3	-	93.8	43.1	40.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
3-Oct-47	22	5	36	6.9	6.9	7.5	30.3	30.3	30.4	62	58	60	0.6	14
4-Oct-47	23	5	36	6.9	7	7.4	29.8	29.9	30	64	64	60	0.6	-
5-Oct-47	24	5	36	6.8	7	7.2	29.9	30.1	30.1	64	62	56	0.7	-
6-Oct-47	25	5	36	7	7	7.4	30.7	30.8	30.8	64	60	60	0.7	16
7-Oct-47	26	5	36	7	7	7.4	31.4	31.6	31.7	62	60	58	0.7	-
8-Oct-47	27	5	36	7	7	7.3	30.6	30.8	30.9	60	60	58	0.8	-
9-Oct-47	28	5	36	6.9	6.9	7.2	30.1	30	29.8	60	58	58	0.8	18
11-Oct-47	30	5	36	7	7	7.2	30.4	30.4	30.5	60	58	56	0.8	-
12-Oct-47	31	5	36	7	6.9	7.2	30.5	30.7	30.8	60	56	56	0.8	-
13-Oct-47	32	5	36	7	7	7.3	31	31.3	31.4	62	60	52	0.8	20
14-Oct-47	33	5	36	7	6.9	7.2	31.3	31.6	31.4	58	58	54	0.9	-
15-Oct-47	34	5	36	7	6.9	7.1	31.5	31.6	31.7	56	56	54	0.9	-
16-Oct-47	35	5	36	6.9	6.9	7.1	30.8	31.2	31.2	58	58	56	0.9	22
18-Oct-47	37	5	36	6.9	6.9	7.1	30.4	30.5	30.7	60	60	60	1	-
19-Oct-47	38	5	36	6.9	6.9	7	31.2	31.4	31.4	60	60	58	1	-
20-Oct-47	39	5	36	6.8	6.9	7	31.6	31.8	31.9	60	60	56	1.1	24
21-Oct-47	40	5	36	6.8	6.9	7	32.1	32.2	32.3	58	58	56	1.1	-
22-Oct-47	41	5	36	6.8	6.9	7	31.2	31.4	31.6	58	58	56	1.1	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
3-Oct-47	100.4	78	5.4	500	94.6	42.8	40.5
4-Oct-47	98.2	76	4.1	-	95.8	41.9	40.2
5-Oct-47	97.9	76	3	-	96.9	41.8	40.5
6-Oct-47	104	77	5.8	500	94.4	44.4	41.9
7-Oct-47	103.5	78	6.6	-	93.6	44.2	41.4
8-Oct-47	101.9	76	6.2	-	93.9	43.5	40.8
9-Oct-47	102.8	78	5.7	500	94.5	43.9	41.4
11-Oct-47	154.4	75	52.6	-	65.9	65.9	43.4
12-Oct-47	152	76	42.8	-	71.8	64.9	46.6
13-Oct-47	141.6	78	22.8	500	83.9	60.4	50.7
14-Oct-47	148.2	76	21.2	-	85.7	63.2	54.2
15-Oct-47	156.8	77	23.8	-	84.8	66.9	56.8
16-Oct-47	152.3	74	19.5	700	87.2	65.0	56.7
18-Oct-47	154.3	75	18.3	-	88.1	65.8	58.0
19-Oct-47	142.8	76	12.4	-	91.3	60.9	55.6
20-Oct-47	149	78	14.8	700	90.1	63.6	57.3
21-Oct-47	155.2	76	15.9	-	89.8	66.2	59.4
22-Oct-47	152.8	77	16.4	-	89.3	65.2	58.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
23-Oct-47	42	5	36	6.8	6.9	7	31.7	31.7	31.8	58	56	54	1.2	26
25-Oct-47	44	5	36	6.8	6.9	6.9	30.8	30.9	31.2	60	60	58	1.2	-
26-Oct-47	45	5	36	6.7	6.8	6.9	31.2	31.4	31.5	60	60	58	1.3	-
27-Oct-47	46	5	36	6.7	6.8	6.9	31	31	31.2	60	60	58	1.3	30
28-Oct-47	47	5	36	6.7	6.8	6.9	31.8	31.9	31.9	60	60	58	1.4	-
29-Oct-47	48	2	90	6.7	6.9	6.9	31.7	31.7	31.8	60	58	52	1.5	-
30-Oct-47	49	2	90	6.6	6.9	6.8	31.9	32	32.2	58	58	52	1.5	32
31-Oct-47	50	2	90	6.6	6.9	6.8	32.1	32.2	32.4	58	58	56	1.6	-
1-Nov-47	51	2	90	6.6	6.7	6.8	32	32.1	32.4	58	58	54	1.6	-
2-Nov-47	52	2	90	6.5	6.7	6.9	32.6	32.6	32.7	62	60	56	1.7	36
3-Nov-47	53	2	90	6.5	6.7	6.9	32.9	32.9	33	62	62	58	1.7	-
4-Nov-47	54	2	90	6.5	6.7	6.8	32.8	32.6	32.9	62	62	60	1.8	-
5-Nov-47	55	2	90	6.5	6.7	6.8	32.9	33.1	33	62	62	60	1.8	39
6-Nov-47	56	2	90	6.5	6.6	6.8	32.7	32.8	32.9	60	60	60	1.9	-
8-Nov-47	58	2	90	6.4	6.6	6.8	32.9	33	33.1	60	60	58	1.9	-
9-Nov-47	59	2	90	6.4	6.6	6.8	33.4	33.5	33.6	60	60	58	1.9	42
10-Nov-47	60	2	90	6.4	6.6	6.8	33.1	33.1	33.2	62	60	58	2.0	-
11-Nov-47	61	2	90	6.3	6.5	6.8	32.4	32.3	32.5	62	60	58	2.0	-
12-Nov-47	62	2	90	6.3	6.5	6.8	32.1	32.2	32.3	60	58	56	2.0	44

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดลองที่เวลาเก็บกัก 90 วินาที (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก	ความสามารถในการกำจัด
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		(ก./ลบ.ม.- ชม.)	(ก./ลบ.ม.- ชม.)
23-Oct-47	150.8	76	12.5	700	91.7	64.4	59.0
25-Oct-47	198.2	75	58.6	-	70.4	84.6	59.6
26-Oct-47	196.6	76	56.3	-	71.4	83.9	59.9
27-Oct-47	196	75	64.6	700	67.0	83.6	56.1
28-Oct-47	197.8	76	60	-	69.7	84.4	58.8
29-Oct-47	298.4	77	40.2	1000	86.5	50.9	44.1
30-Oct-47	608.2	74	110.7	1200	81.8	103.8	84.9
31-Oct-47	711.4	75	105.5	1800	85.2	121.4	103.4
1-Nov-47	906.1	76	224.4	2000	75.2	154.7	116.4
2-Nov-47	1010.3	77	278.2	2100	72.5	172.5	125.0
3-Nov-47	1181.8	78	339.6	2500	71.3	201.7	143.8
4-Nov-47	1309.4	79	387.2	2700	70.4	223.5	157.4
5-Nov-47	1520.4	76	468.2	2900	69.2	259.5	179.6
6-Nov-47	1623.5	75	514.8	3100	68.3	277.1	189.3
8-Nov-47	1719.2	74	582.4	3400	66.1	293.5	194.1
9-Nov-47	1724.1	76	593.7	3700	65.6	294.3	193.0
10-Nov-47	1808.7	77	710.6	3700	60.7	308.7	187.4
11-Nov-47	1914.2	78	836.5	3200	56.3	326.8	184.0
12-Nov-47	2006.8	76	964.1	3000	52.0	342.6	178.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 4 ผลการทดลองซ้ำ

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
12-Sep-47	1	5	36	7.2	7.1	7.1	30.4	30.6	30.5	62	60	60	-	5
13-Sep-47	2	2	90	7.2	7	7.1	30.8	30.8	30.9	62	62	58	-	-
14-Sep-47	3	2	90	7.1	7.1	7	30	30.1	30	64	62	60	-	-
15-Sep-47	4	2	90	7.2	7.1	7	31.1	31.4	31.6	62	62	60	0.1	6
16-Sep-47	5	2	90	7.2	7	7	31.8	31.7	32	60	62	58	0.1	-
17-Sep-47	6	2	90	7.3	7.1	7.1	30.9	30.8	31.1	60	60	60	0.1	-
19-Sep-47	8	2	90	7.2	7.1	7.2	32.1	32.1	32.2	60	60	58	0.1	8
20-Sep-47	9	2	90	7.1	7.2	7.3	30	30.1	30.4	60	56	58	0.2	-
21-Sep-47	10	2	90	7	7.2	7.4	29.1	29.4	29.6	60	62	60	0.2	-
22-Sep-47	11	5	36	7	7.1	7.2	30.4	30.5	30.8	60	58	58	0.2	8
23-Sep-47	12	5	36	6.9	7	7.1	31.1	31.1	31.4	60	60	60	0.3	-
24-Sep-47	13	5	36	6.9	7	7.2	30.6	30.7	30.9	62	60	58	0.3	-
27-Sep-47	16	5	36	7	7	7.2	32	32.1	32	66	66	66	0.3	8
28-Sep-47	17	5	36	7	7	7.3	31.4	31.6	31.6	66	66	66	0.3	-
29-Sep-47	18	5	36	7	7	7.4	31.6	31.8	31.7	66	64	64	0.4	-
30-Sep-47	19	5	36	7	7.1	7.3	28.9	29	29.1	66	62	62	0.4	10
1-Oct-47	20	5	36	7	7	7.4	29.2	29.4	29.3	64	62	62	0.5	-
2-Oct-47	21	5	36	7	7	7.4	30.3	30.4	30.4	62	60	60	0.5	-
3-Oct-47	22	5	36	7	6.9	7.4	30.3	30.5	30.5	62	58	60	0.6	12
4-Oct-47	23	5	36	6.9	6.9	7.3	29.6	29.6	29.8	60	60	58	0.6	-
5-Oct-47	24	5	36	6.9	6.9	7.2	29.8	30	30.1	60	60	58	0.7	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 4 ผลการทดลองซ้ำ (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
12-Sep-47	51.2	76	28.4	-	44.5	21.8	9.7
13-Sep-47	50.8	76	6.2	-	87.8	8.7	7.6
14-Sep-47	51.4	75	2.4	-	95.3	8.8	8.4
15-Sep-47	49.8	75	12.2	-	75.5	8.5	6.4
16-Sep-47	50.4	74	18.8	-	62.7	8.6	5.4
17-Sep-47	51	74	29.4	-	42.4	8.7	3.7
19-Sep-47	49.7	73	12.8	-	74.2	8.5	6.3
20-Sep-47	50.9	73	8.1	-	84.1	8.7	7.3
21-Sep-47	52.3	72	3.5	-	93.3	8.9	8.3
22-Sep-47	51.8	72	14.6	-	71.8	8.8	6.4
23-Sep-47	50.2	71	6.5	-	87.1	8.6	7.5
24-Sep-47	52.2	71	4.2	-	92.0	8.9	8.2
27-Sep-47	51.6	70	6.1	-	88.2	22.0	19.4
28-Sep-47	52.4	70	5.4	-	89.7	22.4	20.1
29-Sep-47	53.3	71	5.1	-	90.4	22.7	20.6
30-Sep-47	52.9	72	5.3	300	90.0	22.6	20.3
1-Oct-47	53.1	72	4.6	-	91.3	22.7	20.7
2-Oct-47	54.2	73	4.4	-	91.9	23.1	21.3
3-Oct-47	50.2	75	4	300	92.0	21.4	19.7
4-Oct-47	50.9	76	2.6	-	94.9	21.7	20.6
5-Oct-47	51.8	74	2.5	-	95.2	22.1	21.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 4 ผลการทดลองซ้ำ (ต่อ)

ว/ด/ป	จำนวนวัน	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	เวลาเก็บกัก (วินาที)	pH			อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลาง			ความชื้นภายในชั้นตัวกลาง (%)			การทรุดตัวของตัวกลาง (เซ็นติเมตร)	ความดันลด (มม.ของน้ำ)
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3		
6-Oct-47	25	5	36	7	7	7.2	30.7	30.9	30.9	60	60	56	0.7	14
7-Oct-47	26	5	36	7	7	7.2	31.3	31.6	31.7	62	60	60	0.8	-
8-Oct-47	27	5	36	7	7.1	7	30.4	30.1	30.2	60	60	58	0.9	-
9-Oct-47	28	5	36	7	6.9	7	29.6	29.7	29.8	60	58	56	0.9	16
11-Oct-47	30	5	36	7	6.9	7	30.4	30.5	30.4	58	58	56	0.9	-
12-Oct-47	31	5	36	6.9	7	7	30.3	30.5	30.7	60	60	58	1	-
13-Oct-47	32	5	36	6.9	7	7	30.9	31.1	31.1	58	60	58	1	16
14-Oct-47	33	5	36	6.9	7	6.9	31.2	31.4	31.3	64	62	62	1	-
15-Oct-47	34	5	36	6.9	7	7	31.4	31.5	31.5	58	58	58	1.1	-
16-Oct-47	35	5	36	6.9	7	7	30.6	30.8	30.9	60	60	58	1.1	18
18-Oct-47	37	5	36	6.9	7	7	31.1	31.2	31.3	60	60	58	1.1	-
19-Oct-47	38	5	36	6.9	6.9	7	31.4	31.6	31.8	62	60	60	1.2	-
20-Oct-47	39	5	36	6.9	6.9	6.9	32	32.1	32.2	62	60	60	1.2	20
21-Oct-47	40	5	36	6.9	6.9	6.9	32.3	32.5	32.4	62	60	60	1.2	-
22-Oct-47	41	5	36	6.8	6.9	7	31.9	32.1	32	62	62	60	1.3	-
23-Oct-47	42	5	36	6.8	6.9	7	32	32.2	32.1	60	60	60	1.3	20
25-Oct-47	44	5	36	6.8	6.9	7	31.6	31.6	31.5	60	60	58	1.3	-
26-Oct-47	45	5	36	6.7	6.9	7	31.2	31.5	31.3	60	58	54	1.3	-
27-Oct-47	46	5	36	6.7	6.9	7	31	31.2	31	62	58	56	1.3	22
28-Oct-47	47	5	36	6.7	6.9	6.9	32	31.9	31.8	60	58	56	1.3	-
10-Nov-47	60	3	60	6.6	6.8	6.8	31.8	31.7	32.0	62	60	60	1.4	-
11-Nov-47	61	2	90	6.6	6.8	6.8	31.9	32.0	32.1	60	60	58	1.4	-

หมายเหตุ : อุณหภูมิภายในชั้นตัวกลางมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 4 ผลการทดลองซ้ำ (ต่อ)

ว/ด/ป	ลักษณะของอากาศที่เข้า		ลักษณะของอากาศที่ออก		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ภาระบรรทุก (ก./ลบ.ม.- ชม.)	ความสามารถในการกำจัด (ก./ลบ.ม.- ชม.)
	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความเข้มข้น(PPM)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
6-Oct-47	49.2	74	2.2	300	95.5	21.0	20.1
7-Oct-47	48.6	73	1.8	-	96.3	20.7	20.0
8-Oct-47	47.8	78	1.4	-	97.1	20.4	19.8
9-Oct-47	53.7	76	4.3	300	92.0	22.9	21.1
11-Oct-47	54	74	3.2	-	94.1	23.0	21.7
12-Oct-47	52.9	75	2.3	-	95.7	22.6	21.6
13-Oct-47	269	73	155	700	42.4	114.8	48.7
14-Oct-47	278.8	72	130.2	-	53.3	119.0	63.4
15-Oct-47	279.6	74	118	-	57.8	119.3	69.0
16-Oct-47	271.3	73	108.6	700	60.0	115.8	69.4
18-Oct-47	274.2	75	113.4	-	58.6	117.0	68.6
19-Oct-47	276.6	76	114.8	-	58.5	118.0	69.0
20-Oct-47	270.5	71	108.2	700	60.0	115.4	69.3
21-Oct-47	248.4	75	90.2	-	63.7	106.0	67.5
22-Oct-47	251.5	74	91	-	63.8	107.3	68.5
23-Oct-47	257.2	73	92.1	700	64.2	109.8	70.5
25-Oct-47	253.6	71	90.8	-	64.2	108.2	69.5
26-Oct-47	256.8	72	94.6	-	63.2	109.6	69.2
27-Oct-47	244.6	74	87.6	700	64.2	104.4	67.0
28-Oct-47	240.6	75	83.8	-	65.2	102.7	66.9
10-Nov-47	916.2	76	396.4	1700	56.7	234.6	133.0
11-Nov-47	1689.6	74	612.2	3700	63.8	288.4	184.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ. 1 ผลการทดลองค่าความเป็นกรด – ด่างของตัวกลาง

ครั้งที่	ค่าความเป็นกรด - ด่างของตัวกลาง		
	ดินใบก้ามปู	ปุ๋ยคอก	ตะกอนฯ
1	7	7.2	6.9
2	6.8	7	6.9
3	6.9	7.1	6.8
ค่าเฉลี่ย	6.9	7.1	6.9
S.D.	0.1	0.1	0.06

ตารางที่ ฉ. 2 ผลการทดลองค่าความชื้นของตัวกลาง

ครั้งที่	ดินใบก้ามปู			ปุ๋ยคอก			ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย		
	A	B	% ความชื้น	A	B	% ความชื้น	A	B	% ความชื้น
1	113.891	107.6138	5.51	111.2118	98.6132	11.33	109.4726	26.4689	75.82
2	110.7676	104.3135	5.83	123.1329	109.4459	11.12	108.4612	24.6235	77.30
3	108.112	101.867	5.78	131.5954	117.8956	10.41	122.564	28.8578	76.45
		ค่าเฉลี่ย	5.69		**ค่าเฉลี่ย**	10.95		**ค่าเฉลี่ย**	76.52
		S.D.	0.17		**S.D.**	0.48		**S.D.**	0.74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ. 3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)

ครั้งที่	ดินใบก้ามปู			ปุ๋ยคอก			ขยะพลาสติก			ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย		
	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น
1	36.57	98.76	0.622	36.57	65.95	0.294	200.02	249.44	0.099	36.57	115.71	0.791
2	36.57	96.88	0.603	36.57	68.21	0.316	200.02	250.81	0.102	36.57	118.24	0.817
3	36.57	104.41	0.678	36.57	67.38	0.308	200.02	251.32	0.103	36.57	119.52	0.830
		ค่าเฉลี่ย	0.634		ค่าเฉลี่ย	0.306		ค่าเฉลี่ย	0.101		**ค่าเฉลี่ย**	0.813
		S.D.	0.04		**S.D.**	0.01		**S.D.**	0.002		**S.D.**	0.02

ตารางที่ ฉ. 4 ผลการทดลองค่าความพรุน (%)

ครั้งที่	ดินใบก้ามปู			ปุ๋ยคอก			ขยะพลาสติก			ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย		
	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น	X0	X1	ความหนาแน่น
1	153.15	98.76	54.4	130.44	65.95	64.5	688.63	249.44	87.8	135.14	115.71	19.4
2	153.72	96.88	56.8	131.69	68.21	63.5	692.14	250.81	88.3	136.96	118.24	18.7
3	154.13	104.41	49.7	133.87	67.38	66.5	689.45	251.32	87.6	139.85	119.52	20.3
		ค่าเฉลี่ย	53.7		**ค่าเฉลี่ย**	64.8		**ค่าเฉลี่ย**	87.9		**ค่าเฉลี่ย**	19.5
		S.D.	3.62		**S.D.**	1.53		**S.D.**	0.33		**S.D.**	0.81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ. 5 ผลการทดลองปริมาณอินทรียวัตถุที่มีอยู่ในดินใบก้ามปูก่อนทำการบำบัดก๊าซไซลีน

ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ (A)	น้ำหนักหลังอบ (B)	น้ำหนักหลังเผา (C)	% ความชื้น	% เถ้า	% อินทรียวัตถุ
1	115.1263	107.5565	99.7329	6.58	86.62	6.79
2	98.2302	91.1589	84.5936	7.20	86.12	6.68
3	117.7027	109.3692	101.8361	7.08	86.52	6.40
			ค่าเฉลี่ย	6.95	86.42	6.62
			S.D.	0.33	0.26	0.20

ตารางที่ ฉ. 6 ผลการทดลองค่าปริมาณอินทรียวัตถุและปริมาณเถ้าภายในชั้นตัวกลางหลังจากสิ้นสุดการทดลอง

ครั้งที่	ตัวอย่างตัวกลาง	น้ำหนักก่อนอบ (A)	น้ำหนักหลังอบ (B)	น้ำหนักหลังเผา (C)	% ความชื้น	% เถ้า	% อินทรียวัตถุ
1	ที่ความสูง 0.5 ม.	112.8614	83.125	76.3983	26.35	67.69	5.96
2	ที่ความสูง 0.5 ม.	110.3215	84.2516	77.147	23.63	69.93	6.44
3	ที่ความสูง 0.5 ม.	111.6124	87.2425	79.859	21.83	71.55	6.62
				ค่าเฉลี่ย	23.94	69.72	6.34
				S.D.	2.27	1.94	0.34
1	ที่ความสูง 0.9 ม.	111.4126	86.3925	81.3008	22.46	72.97	4.57
2	ที่ความสูง 0.9 ม.	122.6347	98.2842	92.1497	19.86	75.14	5.00
3	ที่ความสูง 0.9 ม.	124.1418	93.6289	86.9578	24.58	70.05	5.37
				ค่าเฉลี่ย	22.30	72.72	4.98
				S.D.	2.37	2.56	0.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ. 6 ผลการทดลองค่าปริมาณอินทรียวัตถุและปริมาณเถ้าภายในชั้นตัวกลางหลังจากสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

ครั้งที่	ตัวอย่างตัวกลาง	น้ำหนักก่อนอบ (A)	น้ำหนักหลังอบ (B)	น้ำหนักหลังเผา (C)	% ความชื้น	% เถ้า	% อินทรียวัตถุ
1	ที่ความสูง 1.3 ม.	122.812	92.2569	88.941	24.88	72.42	2.70
2	ที่ความสูง 1.3 ม.	120.6048	94.8562	91.8893	21.35	76.19	2.46
3	ที่ความสูง 1.3 ม.	110.5524	85.6856	82.259	22.49	74.41	3.10
				ค่าเฉลี่ย	22.91	74.34	2.75
				S.D.	1.80	1.89	0.32
1	ที่ความสูง 1.5 ม.	109.3624	86.4825	85.1735	20.92	77.88	1.20
2	ที่ความสูง 1.5 ม.	110.7185	88.7986	87.6471	19.80	79.16	1.04
3	ที่ความสูง 1.5 ม.	119.5423	94.2236	92.4783	21.18	77.36	1.46
				ค่าเฉลี่ย	20.63	78.13	1.23
				S.D.	0.73	0.93	0.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ. 7 ผลการทดลองปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีของดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก

รายงานผลการวิเคราะห์ดิน

ที่ กษ 0916/.003.2/292 วันที่ 3 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547

กลุ่มงานพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพดินและน้ำ กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร

ชื่อ นายเอกชัย เลิศผดุงวิทย์ **ที่อยู่** ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ **สถานที่เก็บ: ชื่อหมู่บ้าน** **ตำบล** **อำเภอ** **จังหวัด** ลพบุรี

Lab. No.	Lab. Soil No.	Sample No.	pH[1]	ความต้องการปูน[2] กก./ไร่	การนำไฟฟ้า[3] เดซิซีเมน/เมตร	อินทรียวัตถุ[4] %	ฟอสฟอรัส[5] ppm	โพแทสเซียม[6] ppm	CEC $c\ mol_c kg^{-1}$	OC %		เนื้อดิน	หมายเหตุ
1415	198	1				11.28	184	506	34.6	6.54			ดินผสมใบก้ามปู
ผู้วิเคราะห์						← วรางคนา →							

วันรับตัวอย่าง 15 พ.ย. 47

....หัวหน้ากลุ่มงาน

....ผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยเกษตรเคมี

(นางสุนันทา ชมภูนิช)

นักวิทยาศาสตร์ 8ว.

ผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยเกษตรเคมี

หมายเหตุ : 1 = ดิน : น้ำ (1 : 1) 2 = Woodruff's method 3 = ดิน : น้ำ (1 : 5) 4 = Walkley – Black method
5 = Bray II 6 = Am. acetate I N pH 7.0 extraction

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.7 ผลการทดลองปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีของดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก (ต่อ)

แผ่นที่ 1
Sheet No.

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
DEPARTMENT OF SOIL SCIENCE, FACULTY OF AGRICULTURE, KASETSART UNIVERSITY Tel. 9428104-5, 5614670 Fax: 9428106

รายงานเลขที่ F.199
Report No.
วันที่เสนอรายงาน 18/11/47
Date of report:
วันที่ส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ 15/11/47
Date of sample submitted:

ผู้ทำการวิเคราะห์ นายสมชาย กรีฑาภิรมย์ และคณะ
ผู้ทำการตรวจสอบ ดร.สุเทพ ทองแพ

ตัวอย่างของ คุณเอกชัย เลิศผดุงวิทย์
Sample submitted by:
ตัวอย่างจาก ตำบล อำเภอ
จังหวัด

Sample No.	Laboratory No.	O.M %	Total-N %	Total-P %	Total-K %	O.C %	C/N ratio
ปุ๋ยคอก	F.199-1	31.13	0.91	0.29	0.60	18.09	19.88

ตารางที่ ฉ. 7 ผลการทดลองปริมาณธาตุอาหารและคุณสมบัติทางเคมีของดินใบก้ามปูและปุ๋ยคอก (ต่อ)

แผ่นที่ 1
Sheet No.

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DEPARTMENT OF SOIL SCIENCE, FACULTY OF AGRICULTURE, KASETSART UNIVERSITY Tel. 9428104-5, 5614670 Fax: 9428106

รายงานเลขที่ S 379
Report No.
วันที่เสนอรายงาน 6/1/48
Date of report:
วันที่ส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ 24/12/47
Date of sample submitted:

ผู้ทำการวิเคราะห์ นายสมชาย กรีฑาภิรมย์ และคณะ
ผู้ทำการตรวจสอบ ดร.สุเทพ ทองแพ

ตัวอย่างของ คุณเอกชัย เลิศผดุงวิทย์
Sample submitted by:
ตัวอย่างจาก ตำบล - อำเภอ -
จังหวัด -

Sample No.	Laboratory No.	Total-N %	
ดินผสมปลูก จ.ลพบุรี	S 379-1	0.49	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของไซลีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS)

1. การชี้บ่งเคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อเคมี IUPAC	:	Dimethylbenzene
ชื่อเคมีทั่วไป	:	Xylene Xylol; Xylene; Dimethylbenzene (mixed isomers); Xylene (mixed isomers); Xylenes mixed isomers; Xylenes (o-,m-,p-isomers)
สูตรเคมี	:	$C_8 H_{10}$
สูตรโมเลกุล	:	$C_6H_4(CH_3)_2$

2. การใช้ประโยชน์ (Uses)

- ใช้เป็น Solvent

3. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD_{50} (มก./กก.) : 4000 (หนู) LC_{50} (มก./ม^3) : 21700 /4 ชั่วโมง (หนู)

PEL – TWA (ppm) : 100

TLV – TWA (ppm) : 100 TLV - STEL (ppm) : 150

4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : ของเหลว สี : ใส

กลิ่น : กลิ่นหอมหวาน นน.โมเลกุล : 106.16

จุดเดือด (^{0}ซ.) : 138.3 จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(^{0}ซ.) : 30

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 0.87

ความหนืด(mPa.sec) : 0.62-0.81

ความดันไอ(มม.ปรอท) : 6.72 ที่ 21 ^{0}ซ. ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1) : 3.7

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100มล.) : 0.13

แฟคเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 4.34 มก./ม^3 หรือ 1 มก./ม^3 = 0.23 ppm ที่ 25 ^{0}ซ.

5. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ :	- การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และหายใจติดขัด
สัมผัสทางผิวหนัง :	- การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เกิดแผลแสบไหม้ และทำให้ผิวหนังอักเสบ
กินหรือกลืนเข้าไป :	- การกลืนหรือกินเข้าไป เป็นอันตรายต่อร่างกาย ทำให้มีการขับของน้ำลายออกมามาก มีเหงื่อออก คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปวดท้อง และเบื่ออาหาร
สัมผัสถูกตา :	- การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคืองและเกิดแผลไหม้
การก่อมะเร็ง :	- สารนี้ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง
ความผิดปกติ,อื่นๆ :	- สารนี้ทำลายประสาท เลือด ดวงตา หู ตับ ไต และเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์

6. ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความคงตัว
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารออกซิไดซ์อย่างแรง
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ควันและไอระเหย
- อันตรายจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ : จะไม่เกิดขึ้น

7. การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

จุดวาบไฟ (^{0} ซ.) : 26.1 จุดลุกติดไฟได้เอง (^{0} ซ.) : 527

ค่า LEL % : 1 UEL % : 7 LEL % : - UFL % : -

- สารนี้เป็นสารไวไฟ อาจลุกติดไฟได้เมื่อสัมผัสกับความร้อน ประกายไฟ หรือเปลวไฟ
- ไอระเหยของสารสามารถแพร่กระจายออกไปถึงแหล่งจุดติดไฟ และอาจเกิดการติดไฟย้อนกลับมา
- ภาชนะบรรจุของสารอาจเกิดการระเบิดได้เมื่อสัมผัสกับความร้อนหรือไฟ
- ไอระเหยของสารนี้อาจก่อให้เกิดอันตรายจากการระเบิดได้ทั้งภายในบริเวณอาคาร ภายนอก หรือในท่อระบบระบายน้ำ
- การไหลของสารไปในท่อระบายน้ำอาจก่อให้เกิดอันตรายจากไฟและการระเบิดได้
- สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้ผงเคมีแห้ง คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำฉีดเป็นฝอย
- หรือโฟม
- ให้เคลื่อนย้ายภาชนะบรรจุออกจากบริเวณที่เกิดเพลิงไหม้ ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย
-

- ให้ใช้การฉีดน้ำเพื่อหล่อเย็นภาชนะที่ถูกเพลิงไหม้ จนกระทั่งไฟดับสนิท
- ให้อยู่ห่างจากภาชนะบรรจุสาร
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ควัน และไอระเหย

8. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)
   - เก็บในภาชนะบรรจุที่เหมาะสม
   - เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
   - เก็บห่างจากแหล่งจุดติดไฟทั้งหมด
   - เก็บห่างจากเด็ก
   - ชื่อในการขนส่ง : Xylene
   - รหัส UN : 1307
   - กลุ่มการบรรจุ : กลุ่ม III

9. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)
   - วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการรั่วไหล
   - ให้หยุดการรั่วไหล ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย
   - ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยทรายหรือวัสดุดูดซับอื่นที่ไม่ติดไฟ
   - เก็บส่วนที่หกรั่วไหลในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปกำจัด
   - การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

10. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป :	- ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบากให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป :	- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้อาเจียน นำส่งไปพบแพทย์
สัมผัสถูกผิวหนัง :	- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนังให้ล้างออกด้วยน้ำและสบู่อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกับถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์
สัมผัสถูกตา :	- ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที นำส่งไปพบแพทย์
อื่นๆ :	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกชัย เลิศผดุงวิทย์ เกิดวันที่ 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521 ที่ ต.โพธาราม อ.โพธาราม จ. ราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544 จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย