

การกำจัดไอของไซลินโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ



นางสาวสุโรชา พูลสวัสดิ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

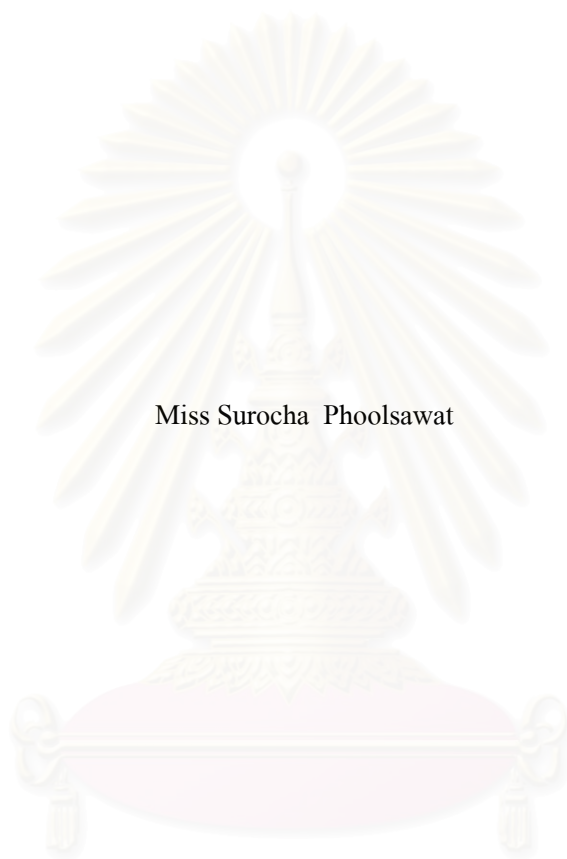
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4929-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

XYLENE VAPOR REMOVAL IN A BENCH-SCALE BIOFILTER



Miss Surocha Phoolsawat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-Department)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4929-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ
โดย	นางสาวสุโรชา พูลสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร พานิช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ดร. พอจำ อรัณยกานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร พานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

สุโรชา พูลสวัสดิ์ : การกำจัดไอของไซลีนโดยเครื่องกรองชีวภาพ. (XYLENE VAPOR REMOVAL IN A BENCH-SCALE BIOFILTER) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร พานิช อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โภษิตานนท์; 107 หน้า. ISBN 974-17-4929-5.

การศึกษาการบำบัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ 2 ชุด คือชุดที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว โดยใช้ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกเป็นแหล่งจุลินทรีย์และแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างตัวกลางหลัก : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย : ปุ๋ยคอก เป็น 75 : 5 : 20

ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบ เมื่อให้ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่ามากกว่า 80 วินาที และช่วงความเข้มข้น 20 - 200 ppmv พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนมีค่าระหว่าง 92-100 % เมื่อระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 80 วินาที และช่วงความเข้มข้น 200 - 1200 ppmv พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนมีค่าระหว่าง 7- 30 %

ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าว เมื่อให้ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมากกว่า 65 วินาที และช่วงความเข้มข้น 20 - 200 ppmv พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนมีค่าระหว่าง 93-100 % และช่วงความเข้มข้น 200 - 1200 ppmv พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนมีค่าระหว่าง 10 - 25 %

ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนโดยเฉลี่ยของทั้งสองชุดการทดลองตลอดการดำเนินการทดลองไม่แตกต่างกันแต่ความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของไซลีนในชุดตัวกลางที่เป็นแกลบและกาบมะพร้าวมีค่า 20.30 และ 28.44 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักจึงมีความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนได้ดีกว่าและมีความเหมาะสมมากกว่าเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้แกลบเป็นตัวกลางหลัก

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....

ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4489117020 : MAJOR : INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : BIOFILTER / XYLENE

SUROCHA PHOOLSAWAT : XYLENE VAPOR REMOVAL IN A BENCH-SCALE BIOFILTER. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. NOPPAPORN PANICH, D.Eng. THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. CHARNWIT KOSITANON, Ph.D. 107 pp. ISBN 974-17-4929-5.

Two bench-scale biofilter columns were used to study xylene removal from a synthetic waste air stream. In the first column the main media was paddy husk while coconut husk was in the other column, the columns containing a mixture of sludge and manure as biomedica, the ratio of main media : sludge : manure was 75 : 5 :20 v/v.

The biofilter containing paddy husk as main media, for empty bed residence time  $\geq 80$  second and inlet xylene concentration 20 - 200 ppmv the removal efficiency was observed in the range of 92-100 %. For empty bed residence time 80 second and inlet xylene concentration 200 - 1200 ppmv the removal efficiency was observed in the range of 7 - 30 %.

The biofilter containing coconut husk as main media, for empty bed residence time  $\geq 65$  second and inlet xylene concentration 20 - 200 ppmv the removal efficiency was observed in the range of 93-100 %. For empty bed residence time 65 second and inlet xylene concentration 200 - 1200 ppmv the removal efficiency was observed in the range of 10 - 25 %.

Elimination capacity of xylene between two columns were not different but xylene maximum elimination capacity of paddy husk and coconut husk as main media were 20.30 and 28.44 g/m<sup>3</sup> media/hr, respectively. The biofilter containing coconut husk as main media provided higher maximum elimination capacity and more considerable quality than the other one.

Field of Study ...~~Environmental Science~~

Student's signature.....

Academic year .....2003.....

Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ดี เนื่องจากความเมตตาและความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร.นพภาพร พานิช ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้และแนวทางในการ ทำวิจัยที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมทั้งช่วยเหลือในด้านทุนการทำวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โขมิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้และแนวทางในการทำวิจัยตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พอจำ อรัณยกานนท์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา และรองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาสละเวลา มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในการสอบวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งให้คำแนะนำต่าง ๆ ให้วิทยา นิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษด้านวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี ที่ได้มอบทุนการศึกษาตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณผู้ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ ครั้งนี้ ได้แก่ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วน สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุญาตให้ใช้สถานที่ เครื่องมือและห้อง ปฏิบัติการ กรมควบคุมมลพิษที่ให้ความอนุเคราะห์ชุด Bench Scale Model ศูนย์วิจัยและฝึกอบรม ด้านสิ่งแวดล้อมและเจ้าหน้าที่ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Diaphragm Pump พร้อมทั้งทำการ Calibrate เครื่อง Rotameter คุณศรายุทธ ราชู ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง มือ Rotameter พร้อมทั้งคำแนะนำอันมีประโยชน์ยิ่ง ดร.เอกวัฒน์ ลือพร้อมชัย และคุณวีรชัย แก้ว ผลิก ที่กรุณาให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง Gas Chromatography ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนัน ลือพิพัฒน์ไพบูลย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้ SPME คุณนันทนา ชูฉัตร ที่ให้ความ อนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ GC-MS และคำแนะนำเกี่ยวกับ Gas Chromatography คุณศุภศิลาปี ดารา ศูรย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์ต่อระบบ คุณศิริพล ต้นพันธ์ ที่ให้ความช่วย เหลือในการจัดหาตัวกลางชีวภาพ ตลอดจนเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือกันมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจให้กับผู้เขียน ในทุกด้านมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2. การศึกษาด้านเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไซลีน.....	4
2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหย.....	10
2.3 ระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ.....	13
2.4 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.2 ขั้นตอนดำเนินการ.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 การเตรียมตัวกลางบรรจุลงในชุดการทดลอง.....	36
4.2 ค่าที่ทำการตรวจวัดในการทดลอง.....	37
4.3 ปริมาณจุลินทรีย์.....	50
4.4 การเปรียบเทียบการบำบัดของระบบ.....	50
บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	55
5.1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ.....	56
5.2 การเปรียบเทียบการบำบัดไอของไซลีนในชุดที่มีตัวกลางหลัก เป็นแกลบและก้ามมะพร้าว.....	64

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	65
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
6.2 ข้อจำกัดของการทำวิทยานิพนธ์.....	66
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	87
ภาคผนวก จ.....	93
ภาคผนวก ฉ.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	107

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไซลินแต่ละไอโซเมอร์.....	5
2.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศที่กำหนดโดยประเทศต่าง ๆ.....	9
2.3 ค่ามาตรฐานสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย .....	10
2.4 การจำแนกชนิดของระบบ Biofiltration .....	16
2.5 ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้อยู่ยสารเคมีชนิดต่าง ๆ .....	22
2.6 ความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษของสารกลุ่มแอมโรแมติก.....	26
3.1 สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนผสมของตัวกลางในแต่ละชุดการทดลอง และระยะเวลาที่เดินระบบ .....	28
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเดินระบบ.....	30
3.3 ค่าพารามิเตอร์ จุดตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้.....	30
4.1 ร้อยละความชื้นของตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....	36
4.2 น้ำหนักเริ่มต้นของชุดการทดลองแต่ละชุด.....	36
6.1 ค่าที่ได้จากการทดลองในการบำบัดไอของไซลินด้วยเครื่องกรองชีวภาพ โดยใช้ตัวกลางหลักเป็นเกลบและกามมะพร้าว.....	65
6.2 ค่าที่แนะนำในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไอของไซลิน เมื่อใช้ตัวกลางหลักเป็นเกลบและกามมะพร้าว.....	66
ข-1 พื้นที่ได้ฟิคที่ได้จากการวิเคราะห์ GC โดยใช้เวลาเก็บตัวอย่างต่างกัน.....	76

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารมลพิษตามช่วงความเข้มข้น และช่วงอัตราการไหลของก๊าซต่าง ๆ กัน..... 12
2.2	ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพ ..... 14
2.3	ลักษณะของ Biotrickling Filter..... 15
2.4	ลักษณะของ Bioscrubber ..... 15
2.5	กระบวนการดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ ..... 16
2.6	การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา และกระบวนการ transport ในเครื่องกรองชีวภาพ..... 17
2.7	กลไกโดยรวมภายในเครื่องกรองชีวภาพ..... 17
3.1	Bench Scale Model..... 29
3.2	ลักษณะของ SPME..... 32
3.3	วิธีการใช้ SPME ..... 33
4.1	อุณหภูมิอากาศที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลัก เป็นแกลบและกาบมะพร้าว..... 37
4.2	ความชื้นของอากาศที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลัก เป็นแกลบและกาบมะพร้าว..... 38
4.3	น้ำหนักของชุดการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป..... 39
4.4	ความดันลดที่จุด AB และจุด AC..... 40
4.5	ความสูงของตัวกลางที่ลดลงในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลัก เป็นแกลบและกาบมะพร้าวเมื่อเวลาผ่านไป..... 41
4.6	ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าระบบกับประสิทธิภาพในการบำบัด ของระบบในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวตลอด ระยะเวลาดำเนินการทดลอง..... 42
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบกับประสิทธิภาพ การบำบัด ที่ความเข้มข้นคงที่ (100 ppmv)..... 43
4.8	ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในชุดตัว กลางที่เป็นแกลบและกาบมะพร้าว..... 44
4.9	ประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหลของไอของไซลีน เข้าระบบค่าต่าง ๆ กัน..... 45

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นเกลบ ที่อัตราการไหลของไซลีนเข้าระบบต่าง ๆ กัน .....	47
4.11	ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็น กามมะพร้าว ที่อัตราการไหลของไซลีนเข้าระบบต่าง ๆ กัน.....	48
4.12	ปริมาณไซลีนที่เข้าระบบกับความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนที่อัตราการไหลของ ไซลีนเข้าระบบต่าง ๆ กันการทดลอง .....	49
4.13	เปรียบเทียบความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ใช้ตัวกลาง หลักเป็นเกลบและกามมะพร้าว.....	50
4.14	ประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่มี เกลบผสมปืยคอกและตะกอนจาก โรงบำบัดน้ำเสียและชุดการทดลองควบคุม.....	51
4.15	ประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่มี กามมะพร้าวผสมปืยคอกและตะกอนจาก โรงบำบัดน้ำเสียและชุดการทดลองควบคุม..	52
4.16	ประสิทธิภาพการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกามมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 2 และ 5).....	53
4.17	เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ใช้ตัวกลางหลัก เป็นกามมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 2 และ 5).....	54
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารมลพิษเข้าระบบ กับความสามารถในการบำบัดมลพิษ .....	62
ข-1	พื้นที่ใต้พีคที่ได้จาก GC เมื่อใช้ fiber และ ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างที่ต่างกัน.....	77
ค-1	Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีน ที่จุดเข้าระบบด้วย GC-MS.....	79
ค-2	Mass Spectrum ของพีคที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไซลีนที่จุดเข้าระบบ.....	80
ค-3	Mass Spectrum ของพีคที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไซลีนที่จุดเข้าระบบ.....	81
ค-4	Mass Spectrum ของพีคที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไซลีนที่จุดเข้าระบบ.....	82
ค-5	Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีน ที่จุดออกระบบด้วย GC-MS.....	83
ค-6	Mass Spectrum ของพีคที่ได้จากการวิเคราะห์ไซลีนที่จุดออกระบบ.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-7 Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีน ที่จุดเข้าระบบด้วย GC-FID.....	85
ก-8 Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีน ที่จุดออกระบบด้วย GC-FID.....	86
ง-1 Calibration Curve ของ Rotameter ที่มีช่วงการวัด 0-5 l/min .....	88
ง-2 Calibration Curve ของ Rotameter ที่มีช่วงการวัด 0-25 l/min.....	88
ฉ-1 ลักษณะของกามมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง .....	101
ฉ-2 ลักษณะของเกลบที่ใช้ในการทดลอง.....	101
ฉ-3 ลักษณะของปุยคอกที่ใช้ในการทดลอง.....	101
ฉ-4 ลักษณะของตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	101
ฉ-5 Rotameter ที่ใช้ในการทดลอง.....	102
ฉ-6 Diaphragm Pump ที่ใช้ในการทดลอง.....	102
ฉ-7 SPME และหลอดแก้วที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างไปวัดความเข้มข้น .....	102
ฉ-8 ภาชนะใส่ Xylene ที่ใช้ในการทดลอง.....	102
ฉ-9 Bench Scale Model และพื้นที่ที่ทำการทดลอง.....	103
ฉ-10 ลักษณะการต่อระบบ ที่ใช้ทำการทดลอง.....	103
ฉ-11 การวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุดออก.....	103
ฉ-12 การวัดอุณหภูมิของอากาศที่จุดออก.....	103
ฉ-13 จุดเก็บตัวอย่างอากาศออก.....	104
ฉ-14 การวัดความดันลดของอากาศที่เข้าระบบ.....	104
ฉ-15 การชั่งน้ำหนักท่อ เพื่อควบคุมความชื้นตัวกลาง.....	104
ฉ-16 การเติมน้ำให้ตัวกลางเพื่อให้มีน้ำหนักเท่าเดิม.....	104
ฉ-17 การวัดความสูงของตัวกลาง.....	105
ฉ-18 การเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นที่จุดเข้า.....	105
ฉ-19 การเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นที่จุดออก.....	105
ฉ-20 Gas Chromatography ที่ใช้ในการทดลอง.....	106
ฉ-21 การใช้ SPME ในการวิเคราะห์ความเข้มข้น.....	106

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 คำนำ

จากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2540 ของสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม [1] ได้กล่าวถึงสาเหตุของการเกิดมลพิษทางอากาศแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. มลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) ประเภทต่าง ๆ เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ประโยชน์ แบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ

- แหล่งที่เคลื่อนที่ได้ ได้แก่ ยานพาหนะต่าง ๆ ซึ่งใช้เบนซิน น้ำมันดีเซล และก๊าซเหลว เป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน

- แหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ ได้แก่ ที่อยู่อาศัย โรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการต่าง ๆ และโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนสูงใช้น้ำมันดีเซล ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา และถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2. มลพิษทางอากาศที่ไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่เกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน คือ

- กระบวนการผลิตต่าง ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ ก่อให้เกิดมลพิษโดยการปล่อยหรือระบายสารเคมี สารพิษ กลิ่นเหม็น และฝุ่นละออง

- การเผาขยะ หลุมฝัง และสิ่งเหลือใช้ต่าง ๆ จากกิจกรรมการเกษตร รวมถึงไฟป่าและการเผาป่าก่อให้เกิดฝุ่นละออง ไข้หวัด ภูเขาไฟ และควัน

- การก่อสร้าง การจราจร และการคมนาคมขนส่งก่อให้เกิดฝุ่นละออง ภูเขาไฟ และควัน

ปัญหามลพิษทางอากาศในประเทศไทยเกิดขึ้นเนื่องจากประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งและคมนาคมเพิ่มขึ้น รวมถึงมีการใช้สารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตในปริมาณที่มากขึ้น

ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ไซลีน (Xylene) เป็นสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) ที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมี เป็น Intermediate ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ เป็นองค์ประกอบในสูตรผสมน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ และยังใช้เป็นสารทำละลายในหมึก ยาง กาว เรซิน แลคเกอร์ [2] ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไซลีนเช่นในอุตสาหกรรมสี (Paint Manufacturing) ไอของไซลีนสามารถแพร่กระจายสู่บรรยากาศได้ในระหว่างการผลิต การขนส่ง และการนำไปใช้ [3] ซึ่งสามารถตรวจพบไซลีนได้ในอากาศ น้ำฝน ดิน น้ำผิวดิน น้ำดื่ม และสิ่งมีชีวิตในทะเล ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดไอของไซลีนก่อนที่จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศและเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต

ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการใช้เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหยหลายวิธีเช่น การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) การควบแน่น (Condensation) การเผาเป็นเถ้า (Incineration) และระบบเมมเบรน (Membrane System) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบที่กล่าวมาข้างต้นจะได้ผลในการกำจัด แต่ปัญหาคือมีค่าใช้จ่ายที่สูง และเกิดของเสียที่เกิดจากการกำจัดตามมาในภายหลัง [4]

ระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ (Biofiltration) เป็นระบบบำบัดมลพิษทางอากาศที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายน้อย มีหลักการคือ ไอของสารที่ผ่านเข้าไปในระบบจะถูกจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับตัวกลางชีวภาพ ย่อยสลายภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้ว จะไม่เกิดของเสียตามมาภายหลังเพราะจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุเท่านั้น [5] ตัวกลางที่ใช้ในระบบมีหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ดิน ปุ๋ยคอก ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และสามารถบำบัดสารเคมีได้หลายประเภทได้แก่ สารเพิ่มออกซิเจน (Oxygenated Compound) เช่น แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ สารประกอบแอโรแมติก (Aromatic Compound) เช่น เบนซีน โทลูอิน และสารประกอบคลอรีเนต (Chlorinated Compound) เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น

ระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมานานแล้วทั้งในยุโรป และสหรัฐอเมริกา แต่ในประเทศไทย งานวิจัยยังไม่แพร่หลายนัก ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำตัวกรองชีวภาพมาใช้ในการกำจัดไอของไซลีน โดยตัวกลางหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบและกากมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก โดยนำตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียกับปุ๋ยคอกมาใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์และอาหารของจุลินทรีย์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ตัวกรองแบบชีวภาพ 2 ชนิด รวมทั้งความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไอของไซลีน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลในการใช้ตัวกลาง 2 ชนิดคือ แกลบและกามมะพร้าว ในเครื่องกรองชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไอโซลีน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดไอโซลีน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ โดยใช้ระบบสาธิตแบบ Bench Scale
2. พารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง คือ อัตราการไหลของไอโซลีน, ความดันลด (Pressure Drop), ความสูงของตัวกลาง, อุณหภูมิและความชื้นของไอโซลีนที่เข้าและออกจากระบบ และความเข้มข้นของไอโซลีนก่อนและหลังการกำจัด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดไอโซลีนโดยเครื่องกรองชีวภาพโดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ แกลบและกามมะพร้าว
2. เป็นแนวทางและทางเลือกในการกำจัดไอโซลีนในโรงงานอุตสาหกรรม
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการขยายผลจัดทำระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### การศึกษาด้านเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไซลีน

##### 2.1.1 การบ่งลักษณะ

ไซลีนเป็นแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) ในทางการค้าไซลีนจะมี ส่วนผสมของไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ คือมี เมตา-ไซลีน (m - Xylene) 40-65 % พารา-ไซลีน (p - Xylene) และ ออโร-ไซลีน (o - Xylene) และ เอทิลเบนซีน (Ethyl Benzene) อย่างละประมาณ 20 % [6] EPA ได้จัดไซลีนอยู่ใน Group D ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มที่เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ และจัดอยู่ใน Class 3 คือเป็นของเหลวไวไฟ ตามระบบการจำแนกสารของ UN (United Nations Classification System)

สูตรโมเลกุล

$C_8H_{10}$

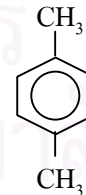
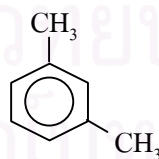
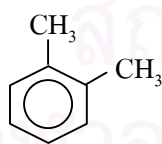
น้ำหนักโมเลกุล

106.17

CAS Registry Number ( Mixed Xylene)

1330-20-7

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



## 2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไซลีนแต่ละไอโซเมอร์

คุณสมบัติ	o - Xylene	m - Xylene	p - Xylene	Mixed Xylene
จุดหลอมละลาย (°C)	-25.0	47.4	-13.2	25.0
จุดเดือด (°C)	144.4	139.7	138.5	140.5
จุดวาบไฟ (°C)	17	31	30	29
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.88	0.86	0.86	0.867-0.869
ความดันไอ	10 mm ที่ 32.1 °C	10 mm ที่ 28.3 °C	10 mm ที่ 27.3 °C	-
การละลายน้ำที่ 20 °C	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	-
การละลายในเอทิลอีเทอร์	ละลายได้ดี	ละลายได้ดี	ละลายได้ดี	-
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง(°C)	465	530	530	-

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2541 [2]

## 2.1.3 การผลิตและการค้า

ไซลีนได้จากการกลั่น Coal Tar และปิโตรเลียม ไซลีนที่ใช้ในประเทศได้จากการนำเข้าจากต่างประเทศโดยนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน สหราชอาณาจักร ญี่ปุ่น สิงคโปร์ อิตาลี ไต้หวัน สวิตเซอร์แลนด์ และสหพันธ์สาธารณรัฐเกาหลี [2]

## 2.1.4 การใช้ประโยชน์

มีการนำไซลีนไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมและนำไปเป็นตัวทำละลายในการผสมสารเคมีต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ใช้เป็น Intermediate ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์
- 2) ใช้เป็นตัวทำละลายในหมึก ขาง กาว เรซิน และแลคเกอร์
- 3) ใช้เป็นสารขจัดสี ในอุตสาหกรรมเคลือบกระดาษ
- 4) ใช้เป็นตัวละลาย และเป็น Emulsifiers ในการผสมเคมีที่ใช้ในการเกษตร

- 5) ใช้เป็นสารล้างคราบน้ำมัน ในอุตสาหกรรมพลาสติก และอิเล็กทรอนิกส์
- 6) ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต Benzoic Acid, Phthalic Anhydride, Isophthalic และ

Terephthalic Acid

- 7) ใช้ผสมน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ [2]

### 2.1.5 ทางเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

จากข้อมูล EPA ไซลีนได้แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถตรวจพบไซลีนได้ในอากาศ, น้ำฝน, ดิน, น้ำผิวดิน, น้ำดื่ม และสิ่งมีชีวิตในทะเล

พบว่าในเขตเมืองของประเทศ สหรัฐอเมริกา มีความเข้มข้นของ Mixed Xylene ในบรรยากาศอยู่ในช่วง 0.003 - 0.38 mg/m<sup>3</sup>

เนื่องจากไซลีน ใช้เป็นส่วนประกอบของสี ดังนั้นจึงมีรายงานว่าตรวจพบ เมตา - ไซลีน และ พารา - ไซลีน ภายในบ้าน อยู่ในช่วงระหว่าง 0.010 - 0.147 mg/m<sup>3</sup> และยังมีรายงานการตรวจพบ Mixed Xylene ในน้ำดื่มมีความเข้มข้นในช่วงระหว่าง 0.2 - 9.9 mg/l ซึ่งความเข้มข้นเฉลี่ย พบว่ามีค่าน้อยกว่า 2 mg/l [6]

ในประเทศไทย แหล่งสำคัญที่แพร่กระจายไซลีนออกสู่สิ่งแวดล้อม คือ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไซลีนซึ่งไซลีนจะฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศภายในโรงงาน และออกมาจากปล่องอากาศเสียของโรงงาน ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ในประเทศไทยที่มีการใช้ไซลีน และก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ ได้แก่

- 1) โรงงานทำกิจการเกี่ยวกับสี แลคเกอร์, แชลเล็ค ในเขตกรุงเทพมหานครและเขตสมุทรปราการ จำนวน 105 โรงงาน และในส่วนภูมิภาค จำนวน 34 โรงงาน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ค่ามลพิษทางอากาศระบายออกจากปล่อง (Emission) โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีปริมาณไซลีนอยู่ในช่วง 50 - 350 พีพีเอ็ม
- 2) โรงงานพิมพ์สี เคลือบเงาบนแผ่นโลหะ ในเขตกรุงเทพมหานครและเขตสมุทรปราการ มีประมาณ 10 โรงงาน ในส่วนภูมิภาคประมาณ 2 โรงงาน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าค่ามลพิษทางอากาศระบายออกจากปล่องของโรงงานพิมพ์สี มีปริมาณไซลีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม และของโรงงานเคลือบเงาโลหะมีไซลีนประมาณ 170 - 570 พีพีเอ็ม
- 3) โรงงานเฟอร์นิเจอร์ทำไม้
- 4) โรงงานซ่อมรถยนต์ (อู่เคาะพ่นสี)
- 5) โรงงานแปงบรรจุสารเคมีทางการเกษตร [2]

### 2.1.6 การเข้าสู่ร่างกาย

การเข้าสู่ร่างกายของไซลีน ส่วนใหญ่ ผ่านทางผิวหนังและการหายใจ เมื่อผ่านเข้าทางผิวหนังจะทำให้เกิดความระคายเคือง ต่อผิวหนังรุนแรงกว่าเบนซีนและโทลูอินถ้าเข้าทางการหายใจ ก็ จะส่งผ่านเข้าสู่ระบบหมุนเวียนของกระแสโลหิต

ไซลีน เมื่อถูก Metabolized ไปเป็น Toluic Acid จะถูกขับออกทางปัสสาวะ หรือรวมตัว กับ Glycine ขับออกมาในรูป Methylhippuric Acid ( $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{COONHCH}_2\text{COOH}$ ) [2]

### 2.1.7 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

#### 2.1.7.1 ความเป็นพิษจากการสัมผัสแบบเฉียบพลัน (Acute Exposure)

จะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสสารไซลีนที่มีความเข้มข้นมากกว่า 200 พีพีเอ็ม อาการที่ เกิดขึ้นคือ

- อาการมีน้ำมูก ปวดศีรษะ คลื่นเหียน อาเจียน และอาการเสียวคอและ
- หน้าอก
- อาการทางระบบหายใจ ได้แก่ ไอและน้ำมูกไหล
- ระคายเคืองต่อผิวหนังและตา [2]

#### 2.1.7.2 ความเป็นพิษจากการสัมผัสแบบเรื้อรัง (Chronic Exposure)

จะมีอาการคล้ายคลึงกับการสัมผัสแบบเฉียบพลันแต่อาการที่เกิดขึ้นในบางระบบ รุนแรงกว่า

### 2.1.8 ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมาย

#### 2.1.8.1 มาตรการควบคุมภายในประเทศ

มาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน (Occupational Safety Standards)

- กรมแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม ได้กำหนดค่ามาตรฐาน ปริมาณความเข้มข้นของไซลีนในบรรยากาศของการทำงานในสถานประกอบการ โดยเฉลี่ยตลอด ระยะเวลาทำงานปกติ ไม่ควรเกิน 100 พีพีเอ็ม หรือ 435 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน ฉบับที่ 2 วันที่ 20 กรกฎาคม 2536 เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน กำหนดไว้ว่า อากาศที่สามารถระบายออกจากโรงงานต้องมีค่าปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้สำหรับการผลิตทั่วไป เท่ากับ 200 พีพีเอ็ม หรือ 870 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย เมื่อวันที่ 22 สิงหาคม 2534 กำหนดไว้ว่าต้องมีรายละเอียดของสารเคมีอันตราย คือ สัญลักษณ์ที่แสดงถึงอันตราย ชื่อทางเคมี ปริมาณและส่วนประกอบอันตราย และอาการเกิดพิษ คำเตือนเกี่ยวกับวิธีเก็บ วิธีใช้ วิธีเคลื่อนย้ายและวิธีกำจัดภาชนะบรรจุ ตลอดจนวิธีปฐมพยาบาลเมื่อมีอาการเนื่องจากสารเคมีอันตรายไว้ในฉลากหรือในแทรกกำกับในภาชนะบรรจุ [2]

### 2.1.8.2 มาตรการควบคุมของต่างประเทศ

1) มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ (Ambient Air Quality Standards) ในบางประเทศได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศของไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งในระยะสั้น (Short -Term Standard) และระยะยาว (Long -Term Standard) ไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

#### 2) มาตรฐานอากาศเสีย

ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันได้กำหนดค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบอินทรีย์ที่ขอมให้ปล่อยออกจากโรงงานคือ

Class I : ค่า Emission Limit 20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ Mass Flow Rate  $\geq$  0.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

Class II a : ค่า Emission Limit 50 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สำหรับสารประกอบอินทรีย์ในรูปฝุ่น) โดยที่ Mass Flow Rate  $\geq$  1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

Class II b : ค่า Emission Limit 150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ Mass Flow Rate  $\geq$  3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารอินทรีย์ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้

Class III : ค่า Emission Limit 300 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ Mass Flow Rate  $\geq$  6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [2]

#### 3) มาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน

ค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานประกอบการได้แก่  
ค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ 8 ชั่วโมงต่อวัน (Time Weight Average, หรือ TWA)

ค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Allowable Concentration, หรือ MAC)

ค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลาจำกัด ซึ่งปกติกำหนดในเวลา 15 นาที และไม่ควรเกิดขึ้นมากกว่า 4 ครั้งใน 1 วัน (Short-Term Exposure Limit, หรือ STEL) และได้มีการแสดงค่ามาตรฐานสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัยดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศที่กำหนดโดยประเทศต่าง ๆ

ประเทศ	ประเภท	มาตรฐาน (พีพีเอ็ม)
บัลแกเรีย อังการี ยูโกสลาเวีย และ สหภาพแห่งสาธารณรัฐโซเวียตสังคมนิยม	Long-Term Standard เฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง	0.05
	Short-Term Standard ในช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 นาที	0.05
สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน	Long-Term Standard ในช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 นาที	5.0
	Short-Term Standard ในช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 นาทีแต่ห้ามมิให้มีปริมาณเกินกว่าที่กำหนดเกิดขึ้นมากกว่า 1 ครั้งทุก ๆ 4 ชั่วโมง	15

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2541 [2]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย

ประเทศ	TWA		MAC		STEL	
	ppm	mg/m <sup>3</sup>	ppm	mg/m <sup>3</sup>	ppm	mg/m <sup>3</sup>
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 [2]

## 2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหย

### 2.2.1 การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการนี้เกิดโดยโมเลกุลของสารมลพิษมีการยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ดังนั้นของแข็งต้องมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ๆ แบ่งออกได้เป็น

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือการที่โมเลกุลของสารมลพิษยึดเกาะกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใด ๆ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้

- การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) คือโมเลกุลของสารมลพิษและตัวดูดซับมีการยึดกันด้วยพันธะวาเลนซ์ เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ การดูดซับทางเคมีเกิดช้ากว่าการดูดซับทางกายภาพมาก ในการดูดซับจะเกิดควบคู่กันทั้งสองกระบวนการ ตัวอย่างของตัวดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) มักนิยมใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหยที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ และมวลโมเลกุลสูง ๆ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานมาแล้วสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือไอน้ำไต่ก๊าซ แต่ประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการบำบัดครั้งต่อไปจะต่ำลง และค่าใช้จ่ายในกระบวนการการดูดซับจะเพิ่มขึ้น จากการฟื้นฟูสภาพและการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับนั่นเอง [7], [8]

### 2.2.2 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นการทำให้โมเลกุลของสารมลพิษละลายลงในตัวดูดซึม (Absorbate or Solvent) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของเหลว การดูดซึมอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซและสารดูดซึมหรือไม่เกิดปฏิกิริยาก็ได้ ตัวอย่างการดูดซึมที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ การดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากอากาศเสียจากการเผาไหม้โดยการใช้ปูนขาวในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากันได้สารแคลเซียมซัลเฟต สำหรับการใช้น้ำเป็นตัวดูดซึมมักจะไม่มีเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นโดยสารมลพิษต่าง ๆ จะละลายอยู่ในน้ำเท่านั้น [7], [8]

### 2.2.3 การควบแน่น (Condensation)

การควบแน่นคือทำให้สารมลพิษที่เป็นก๊าซเปลี่ยนรูปเป็นของเหลวหรือของแข็งโดยการลดอุณหภูมิ นิยมใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากโรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี และโรงงานผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ การควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรงนั้นน้ำหรือของเหลวที่โปรยลงมาต้องมีอุณหภูมิต่ำ ก๊าซจะเกิดการควบแน่นและตกลงปะปนลงมากับน้ำก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียที่จะต้องนำไปบำบัดต่อไป [7], [8]

### 2.2.4 การสันดาป (Combustion)

การสันดาปมีวัตถุประสงค์ในการเปลี่ยนรูปสารมลพิษที่ถูกเผาไหม้ได้ให้เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ในการกำจัดมลสารส่วนที่เผาไหม้ไม่หมดในไอเสียจากเตาเผา ซึ่งได้แก่สารไฮโดรคาร์บอนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนั้นกระบวนการนี้ยังสามารถกำจัดไอของตัวทำละลายอินทรีย์ สารไฮโดรคาร์บอน และก๊าซต่าง ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น เบนซีน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการ 1 และ 2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยว่าจะก่อให้เกิดสารมลพิษชนิดใหม่ขึ้นหรือไม่



ปัจจัยสำคัญในการเกิดการสันดาป ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ อุณหภูมิ ความปั่นป่วน และเวลาในห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม การสันดาปอาจใช้ตัวกระตุ้น (Catalyst) ช่วยทำให้การสันดาปเกิดสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและใช้อุณหภูมิในการสันดาปต่ำลง [7], [8]

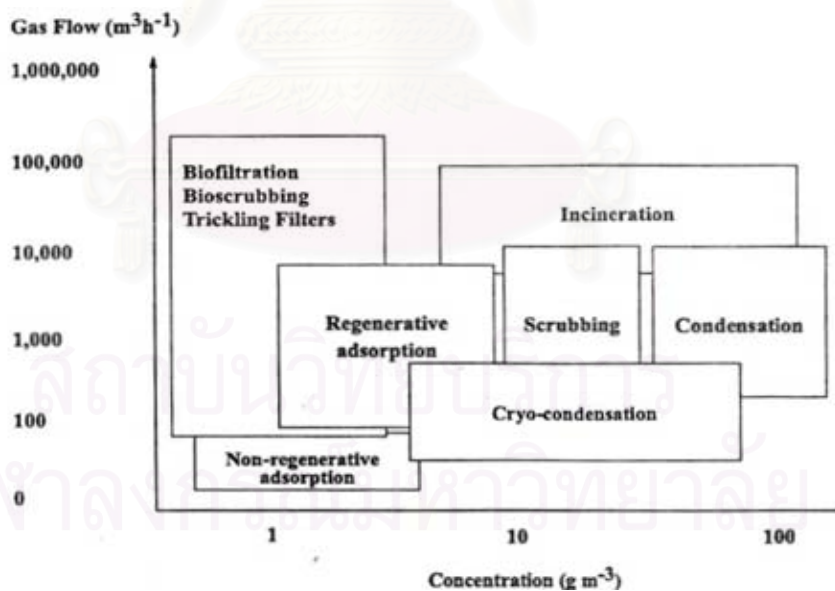
## 2.2.5 ระบบเมมเบรน (Membrane System)

เป็นระบบที่ใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหยโดยอาศัยหลักการแตกต่างของความดันทำให้เกิดการแยกของสารผ่านเมมเบรน [4]

## 2.2.6 ระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ (Biofiltration)

ใช้วิธีการกำจัดสารอินทรีย์ในอากาศด้วยกระบวนการทางชีววิทยาย่อยสลายภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยจุลินทรีย์ในสภาวะใช้ออกซิเจนซึ่งจะได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แกลือแร่ และจุลินทรีย์ ในการทำงานของระบบมีค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นเทคโนโลยีที่ไม่เป็นอันตรายและไม่ก่อให้เกิดมลพิษข้างเคียงอื่น ๆ เป็นระบบที่ไม่ต้องใช้สารเคมีแต่อาจจะต้องมีการเติมเกลือแร่และสารอาหารบางอย่างเพื่อให้จุลินทรีย์เติบโต ในกรณีที่มีสารปนเปื้อนในอากาศมีไม่เพียงพอที่จะเลี้ยงจุลินทรีย์ได้ [4]

มีการเปรียบเทียบวิธีการที่ใช้นำบำบัดสารมลพิษตามความเข้มข้นและอัตราการไหลของก๊าซ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารมลพิษตามช่วงความเข้มข้นและช่วงอัตราการไหลของก๊าซต่าง ๆ กัน

ที่มา : Devanny, Deshusses and Webster, 1999 [4]



## 2.3 ระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการใช้ปฏิกิริยาย่อยสลายของจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย และ Solid Waste ในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการตัดแปลงมาใช้บำบัดอากาศเสีย เครื่องกรองชีวภาพรุ่นแรก ๆ ถูกก่อสร้างขึ้นโดยใช้ตัวกลางเป็นดินที่มีรูพรุน และมีระบบกระจายอากาศอยู่ส่วนล่างชั้นตัวกลางที่เป็นดินและอากาศเสียจะถูกบำบัดเมื่อผ่านชั้นตัวกลางขึ้นมา ตัวกลางที่เป็นดินมักใช้บำบัดกลิ่นที่เกิดจากโรงบำบัดน้ำเสีย [4] ระบบนี้ใช้งานได้ดีแต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือมักมีการอุดตันของระบบกระจายอากาศ มีการย่อยสลายสารทำให้เกิดสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดออกมา และปัญหาชั้นตัวกลางแห้งทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้

ในปี ค.ศ. 1970 เครื่องกรองชีวภาพได้รับความสนใจมากขึ้น โดยมีการพัฒนาเครื่องกรองชีวภาพให้มีการบำบัดสารมลพิษในปริมาณที่สูงขึ้นและใช้กับสารมลพิษหลายตัวขึ้น ในประเทศเยอรมนีและเนเธอร์แลนด์ได้มีการพัฒนาออกแบบระบบกระจายอากาศใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เคยพบมาในยุคแรก ๆ ได้มีการเติมตัวกลางที่ทำหน้าที่พอง (เช่น Wood Bark และ โพลีสไตรีนบอล) ลงไปเพื่อลดการอัดแน่นของชั้นตัวกลาง และมีการนำระบบนี้ไปใช้กับโรงงานต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตอาหารสัตว์, โรงบำบัดน้ำเสียและโรงงานผลิตสารเคมี เป็นต้น [9]

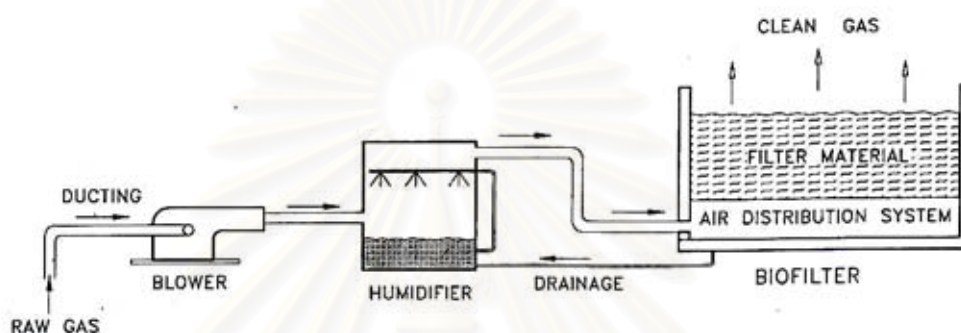
ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 และ ค.ศ. 1990 ได้มีการพัฒนาเครื่องกรองชีวภาพอย่างรวดเร็วในยุโรปและอเมริกาเหนือ โดยมีการใช้คอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบ มีการออกแบบระบบปิดในการบำบัดกลิ่น ไอของสารอินทรีย์ระเหย และ ส่วนผสมของไอสารอินทรีย์ระเหย ได้มีการทดลองใช้ตัวกลางอินทรีย์ด้วยเช่น ถ่านกัมมันต์, Powder Activated, Carbon-coated Polystyrene และ เซรามิกส์ นำมาผสมกับตัวกลางอินทรีย์จะช่วยปรับปรุงความพรุนของชั้นตัวกลาง และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชั้นตัวกลางนอกจากนั้นยังมีการพัฒนาเทคนิคและมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาร่วมด้วย [4]

### 2.3.1 ชนิดของระบบการกรองด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

มีการออกแบบระบบการกรองด้วยกระบวนการทางชีวภาพหลายลักษณะแต่กลไกการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบยังคงเหมือนกัน และสามารถแยกชนิดของระบบได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ดังตารางที่ 2.4

### 2.3.1.1 เครื่องกรองชีวภาพ (Biofilter)

ระบบของเครื่องกรองชีวภาพจะใช้จุลินทรีย์เกาะอยู่กับตัวกลางที่มีรูพรุนอยู่กับที่ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตในไบโอฟิล์ม (Biofilm) บนพื้นผิวตัวกลางหรืออาจจะแขวนลอยในส่วนของน้ำที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคตัวกลาง เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบที่ใช้กระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ ร่วมกัน เช่น การดูดซับ การดูดซึม การย่อยสลาย ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Leson and Winer, 1991 [9]

### 2.3.1.2 Biotrickling Filter

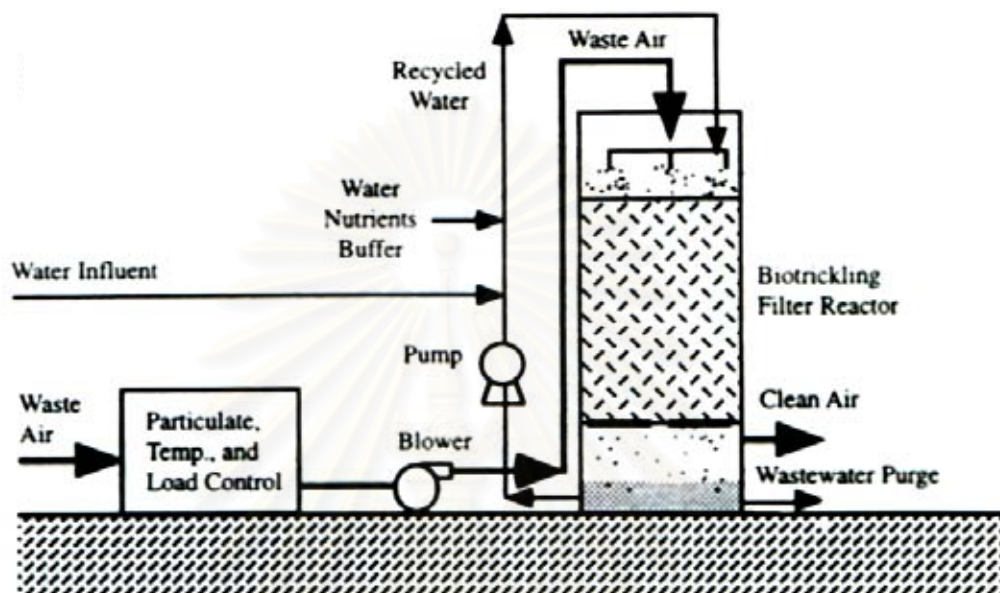
จะมีจุลินทรีย์อยู่ติดกับตัวกลางอนินทรีย์และมีจุลินทรีย์ในส่วนของน้ำทำหน้าที่ย่อยสลายไอเสียที่ถูกดูดซึมขณะผ่านระบบ ระบบนี้มีการผ่านน้ำและอากาศเข้าระบบอาจจะไหลในทางเดียวกันหรือสวนทางกันก็ได้ขึ้นกับการออกแบบ ขณะที่น้ำถูกหมุนเวียนใช้ต้องมีการเติมสารอาหารเพื่อที่จะทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด สิ่งสำคัญของ Biotrickling Filter คือ ต้องควบคุมปริมาณจุลินทรีย์เพื่อไม่ให้มีมากเกินไปเพื่อเป็นการป้องกันการอุดตันของระบบลักษณะของ Biotrickling Filter ดังแสดงในรูปที่ 2.3

### 2.3.1.3 Bioscrubber

สารมลพิษจะถูกดูดซึมในส่วนของน้ำก่อนที่จะถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในส่วนน้ำ การดูดซึมจะเกิดขึ้นส่วนใดของระบบก็ได้ เช่น ในคอลัมน์ หอสเปรย์น้ำ แต่น้ำจะถูกกล้ำเลียงมายังอีกภาชนะหนึ่งซึ่งเป็นที่ที่มีสภาวะเหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ที่จะย่อยสลาย

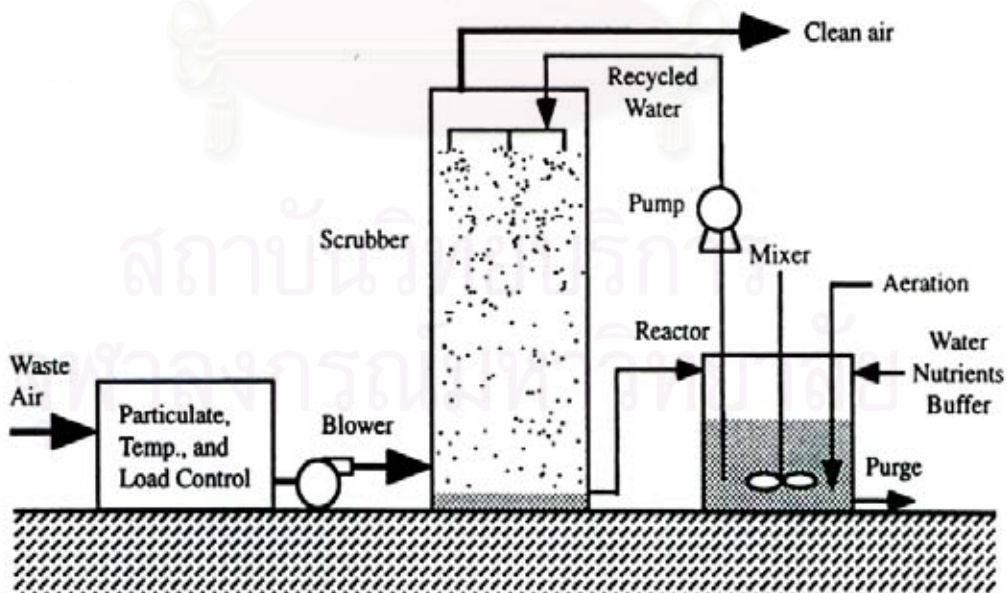
สารมลพิษ มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ลักษณะคล้ายกับ Biotrickling Filter ส่วนของน้ำที่ไหลผ่านระบบมีประโยชน์ในด้านการเติมสารอาหาร เติมหอากาศ และเป็นการให้สารมลพิษแพร่สู่ไบโอฟิล์มลักษณะของ Bioscrubber ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เพื่อให้เห็นความแตกต่างของระบบทั้งสามจึงมีการจำแนกชนิดของระบบตามจุลินทรีย์และเฟสน้ำดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ Biotrickling Filter

ที่มา : Devinnny, Deshusses and Webster, 1999 [4]



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Bioscrubber

ที่มา : Devinnny, Deshusses and Webster, 1999 [4]

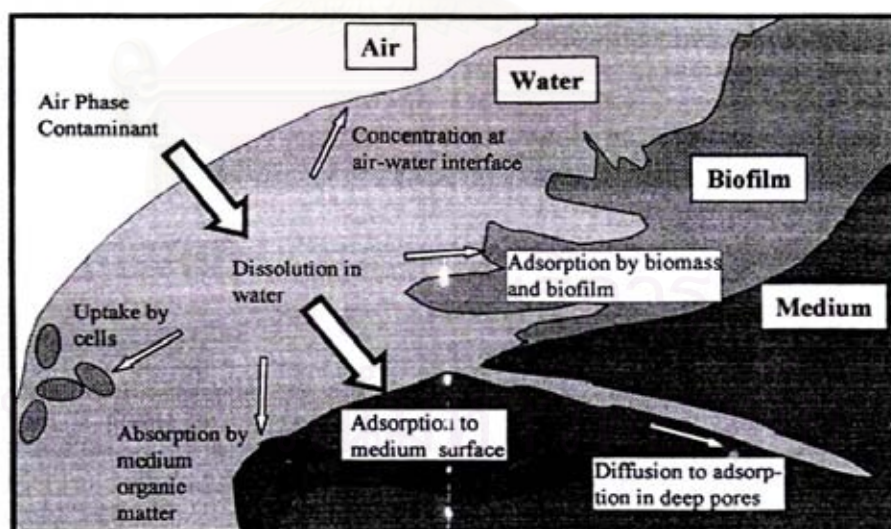
ตารางที่ 2.4 การจำแนกชนิดของระบบ Biofiltration

ชนิดของระบบ	จุลินทรีย์	Water Phase
Biofilter	Fixed	Stationary
Biotrickling filter	Fixed	Flowing
Bioscrubber	Suspended	Flowing

ที่มา : Devinny, Deshusses and Webster, 1999 [4]

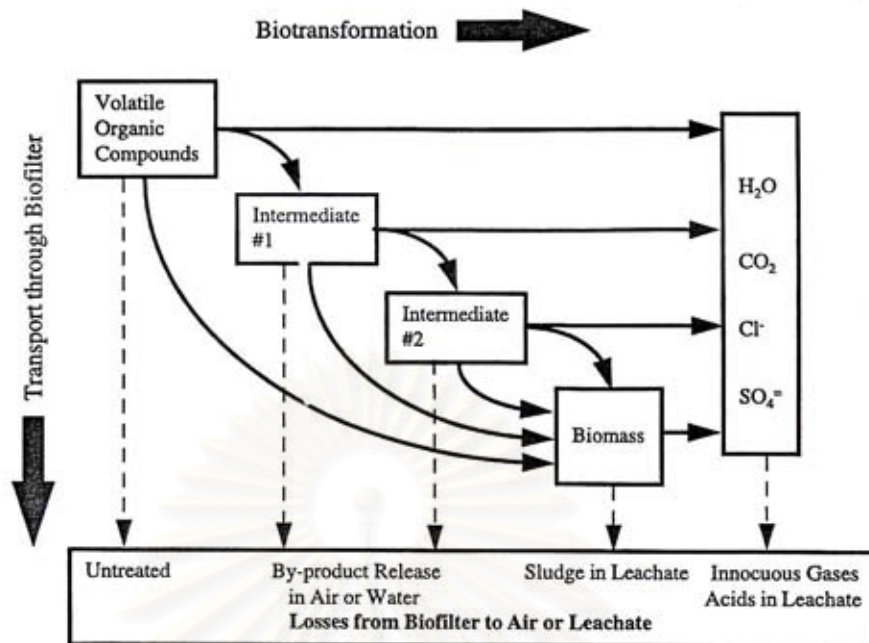
### 2.3.2 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

เครื่องกรองชีวภาพประกอบด้วยตัวกลางที่มีรูพรุนซึ่งพื้นที่ผิวเคลือบด้วยน้ำและจุลินทรีย์ การบำบัดเริ่มขึ้นด้วยการเคลื่อนตัวของสารมลพิษจากอากาศเสียดูในเฟสน้ำ จากนั้นสารมลพิษจะรวมตัวกับน้ำและจะถูกดูดซับโดย Exopolysaccharide จากเซลล์จุลินทรีย์หรือไบโอฟิล์มที่จุลินทรีย์รวมตัวอยู่ กระบวนการนี้คือการดูดซับโดยตัวกลางนั่นเอง (รูปที่ 2.5) ในที่สุดก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (รูปที่ 2.6) ทำให้สารมลพิษกลายเป็นไบโอแมส (Biomass), ธาตุอาหารอื่น หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (รูปที่ 2.7)

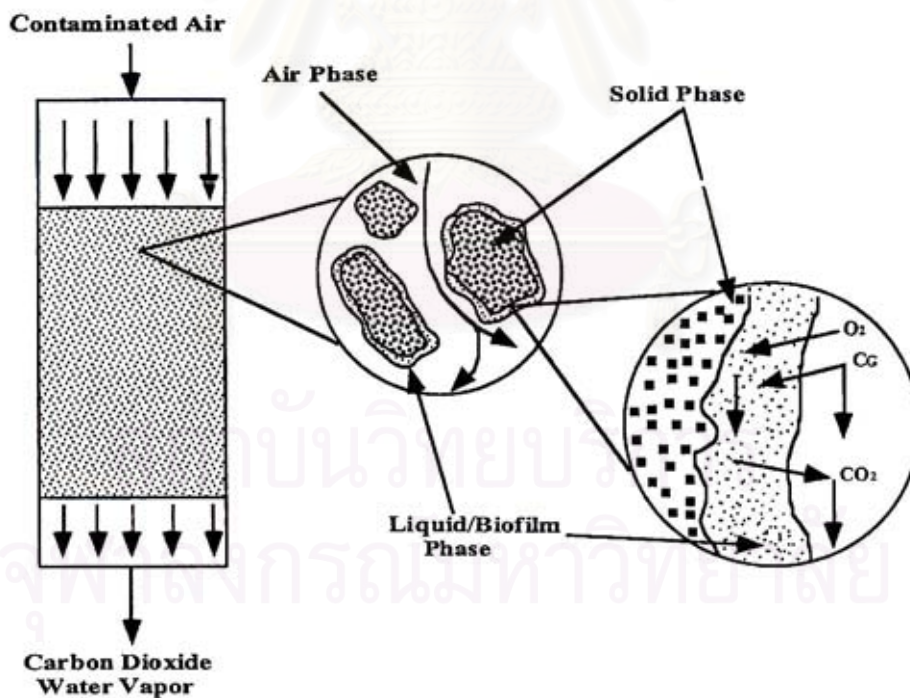


รูปที่ 2.5 กระบวนการดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny, Deshusses and Webster, 1999 [4]



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา และกระบวนการ transport ในเครื่องกรองชีวภาพ  
 ที่มา : Devinny, Deshusses and Webster, 1999 [4]



รูปที่ 2.7 กลไกโดยรวมภายในเครื่องกรองชีวภาพ  
 ที่มา : Devinny, Deshusses and Webster, 1999 [4]

### 2.3.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

#### 2.3.3.1 อุณหภูมิของอากาศเข้าระบบ

เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายทางชีววิทยาอุณหภูมิ จึงเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กิจกรรมของ จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  และเหมาะสมที่อุณหภูมิประมาณ  $37^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิที่สูงมากเกินไปอาจจะทำให้จุลินทรีย์ตาย ได้ [10] การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง  $20 - 40^{\circ}\text{C}$  ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหย [9] เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น จาก  $30$  เป็น  $50^{\circ}\text{C}$  ในการบำบัดเบนซินและโทลูอีน พบ ว่าระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [11]

พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นถึง  $20^{\circ}\text{C}$  ในการบำบัดเอธิลอะซิเตท ในช่วงที่มีปริมาณสาร เข้าระบบสูงมาก การที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายเอธิล อะซิเตท ระบายออกสู่สภาวะแวดล้อมนั่นเอง และการที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากนี้มีผลทำให้ ตัวกลางเกิด การแห้งอีกด้วย [12]

#### 2.3.3.2 ความชื้น

ความชื้นของตัวกลางเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก ถ้าขาดน้ำจุลินทรีย์ในระบบจะไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ และการลดลงของน้ำที่ล้อมรอบไบโอฟิล์มก็จะทำให้สารมลพิษถูกย่อยสลาย ลดลงด้วย เมื่อปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เกิดน้ำขังอยู่ในช่องว่างของตัวกลาง พื้นที่ผิวของตัว กลางจึงไม่ได้สัมผัสกับสารมลพิษ ทำให้เกิดการก่อตัวของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์พวกนี้จะไม่สามารถบำบัดสารมลพิษได้และจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็น [13]

สามารถเพิ่มความชื้นให้แก่เครื่องกรองชีวภาพได้โดยเติมน้ำลงไปในตัวกลาง โดยตรงโดยการใช้หัวกระจายน้ำหรืออีกวิธีหนึ่งคือการให้ความชื้นเข้าไปพร้อมกับไอของสารที่จะ บำบัด ถึงแม้ว่าจะให้ความชื้นโดยการทำให้ไอของสารอึมตัวด้วยความชื้นสัมพัทธ์ 95 - 99 % ก่อน เข้าระบบก็ตาม ยังคงต้องมีการเติมน้ำเข้าไปยังตัวกลางโดยตรงด้วยเนื่องจากกระบวนการย่อยสลาย ทางชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพเป็นกระบวนการคายความร้อน เป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิเล็กน้อย จะทำให้เกิดการไม่อึมตัวของไอน้ำตามมา [10]

เมื่อใช้ Wood Bark เป็นตัวกลางหลักในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าเมื่อ ปริมาณความชื้นในตัวกลางลดลงน้อยกว่า 60 % จะทำให้สูญเสียประสิทธิภาพในการบำบัดของ เครื่องกรองชีวภาพ [14]

โดยทั่วไปแล้วปริมาณน้ำในตัวกลางควรอยู่ในช่วง 40 – 60 % w/w แต่ก็สามารถยืดหยุ่นได้ขึ้นกับชนิดของตัวกลางที่ใช้ และพบว่า ความชื้นตัวกลางเริ่มต้นที่ 40 % w/w จะมีค่าก่อนข้างคงที่เมื่อให้ความชื้นของอากาศเข้าระบบที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 95% [13]

เมื่อใช้เพอร์ไลต์ (Perlite) เป็นตัวกลางพบว่าความสามารถในการบำบัดของระบบเริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณความชื้นในตัวกลางลดลงต่ำกว่า 35 – 40 % [15]

### 2.3.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสามารถทำงานได้ดีในช่วง pH ที่ต่างกันออกไป การเปลี่ยนแปลง pH อย่างรวดเร็วอาจจะทำให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ตายได้ ช่วง pH ปกติของตัวกลางที่ใช้ในระบบทั่วไปมีค่า 6 – 8 เมื่อทำการทดลองบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าเกิดการดักจับฟริกซันจากการบำบัด วิธีแก้ปัญหาคือใช้ตัวกลางที่มีความสามารถในการรักษาช่วงการเปลี่ยนแปลง pH ได้ก่อนข้างคงที่ [10]

เมื่อใช้ Pilot Scale บำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากโรงบำบัดน้ำเสียพบว่าเกิดการดักจับฟริก โดยที่ pH อยู่ในช่วง 2 – 7 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดยังคงมากกว่า 90 % ซึ่งเป็นการสนับสนุนข้อมูลที่ว่าจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีช่วงกว้างระหว่าง pH 1 - 8 [16]

### 2.3.3.4 ความดันลด

ความดันลดคือความต่างของความดันเข้าและออกกระบบ ถ้าระบบมีความดันลดมากจะทำให้อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบลดลง ความดันลดขึ้นกับความพรุนของตัวกลางหรือความสามารถของตัวกลางในการให้อากาศผ่านได้ ซึ่งความพรุนของตัวกลางสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นกับความชื้นและการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ทำให้ตัวกลางเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นถ้าระบบมีความชื้นมากจะทำให้ให้อากาศสามารถผ่านตัวกลางได้น้อยลง ความดันลดจึงสูงขึ้น หรือเมื่อใช้งานระบบไปช่วงเวลาหนึ่งแล้ว เกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดไบโอฟิล์มซึ่งมีผลทำให้เกิดการอุดตันในตัวกลาง อากาศผ่านตัวกลางได้น้อยลงความดันลดจึงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าความดันลดจึงมีประโยชน์ในการตรวจสอบการอัดตัวกันของตัวกลาง ถ้าความดันลดมีค่ามากผิดปกติเทียบกับค่าเริ่มต้นก็ควรจะมีการตรวจสอบค่าความชื้นของระบบหรือควรมีการเปลี่ยนตัวกลางใหม่ [4], [9], [10], [16]

มีการศึกษาการเปรียบเทียบค่าความดันลดเมื่อใช้ Fibre Peat และ Wood Bark เป็นตัวกลางหลักในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าใช้ Wood Bark มีค่าความดันลown้อยกว่า Fibre Peat และเมื่อใช้ Wood Bark ที่มีความชื้น 53 % จะมีความดันลดต่ำกว่าที่ 73 % ด้วย [14]

### 2.3.3.5 อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ

อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบบอกถึงระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางได้ ถ้าอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบมีค่าสูงขึ้น ระยะเวลาของสารมลพิษในการแพร่เข้าสู่ไบโอฟิล์มและย่อยสลายก็จะลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงด้วย [4]

ในการบำบัดโทลูอินพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 93 – 78 % [17]

ในการทดลองบำบัดไอของเอธานอลโดยใช้ตัวกลางเป็นเม็ดโพลิสไตรีนผสมกับปุ๋ยหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ และที่อัตราการไหลเข้าระบบสูงมาก (45 m/hr) นี้เองระบบไม่สามารถบำบัดไอของเอธานอลได้เลย แม้ว่าความเข้มข้นของไอของเอธานอลจะมีค่าต่ำก็ตาม [18]

ในการทดลองบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้ถ่านพีท (Peat) เป็นตัวกลาง พบว่า ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง (Empty Bed Residence Time) 3 และ 1.5 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดไอของเบนซิน โทลูอินและไซลีนอยู่ที่ 92.3 – 95.4 % แต่เมื่อระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางลดลงเหลือ 1 นาที จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไอของเบนซิน โทลูอินและไซลีนลดลงเหลือ 67.9 – 77.8 % [19]

### 2.3.3.6 ความเข้มข้นเข้าระบบ

ความเข้มข้นเข้าระบบเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงปริมาณสารมลพิษที่จะถูกกำจัดในระบบ ความเข้มข้นของสารเข้าระบบมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเป็นอย่างมาก ระบบจะมีความสามารถในการบำบัดสารที่มีความเข้มข้นเข้าระบบต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดีและความสามารถในการบำบัดจะลดลงที่ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าสูง เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบสูงจะเป็นการเพิ่มอัตราการเคลื่อนตัวของสารมลพิษสู่ไบโอฟิล์ม ดังนั้นที่ความเข้มข้นเข้าระบบสูงจะเป็นการเพิ่มการผลิตไบโอแมส ซึ่งไบโอแมสที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ปริมาตรของไบโอฟิล์มรอบตัวกลางเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความพรุนของตัวกลางลดลง เกิดการขัดขวางการไหลของอากาศและเกิดสภาวะการไหลเป็นช่อง (Channeling) ในตัวกลางได้ [20]



พบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบต่ำ ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับ ตัวกลางมีค่าเพียงพอที่จะบำบัดสารมลพิษได้หมดแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะมีค่าลดลงหาก มีการเพิ่มความเข้มข้นของเอธานอลเข้าระบบ [18]

### 2.3.3.7 จุลินทรีย์

มีจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีววิทยาในเครื่องกรองชีวภาพ การเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในไบโอฟิล์ม ปริมาณสารอาหาร, ความชื้นที่เหมาะสม, ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมและ pH [9] ชนิดจุลินทรีย์ที่ ย่อยสลายไอของสารเคมีชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 [21]

### 2.3.3.8 ชนิดของตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพมีหลายชนิดทั้งที่เป็นตัวกลางธรรมชาติและตัว กลางสังเคราะห์แต่คุณสมบัติตัวกลางที่ดีต้องมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้เหมาะสม มีความพรุนที่ให้อากาศไหลผ่านได้ดีและไม่ทำให้เกิดความดันตกมาก ความสามารถในการเป็นที่ ยึดเกาะของจุลินทรีย์ได้ดี ตัวอย่างตัวกลางเช่น ดิน ปุ๋ยหมัก ถ่านพีท ถ่านหิน Wood Bark และตัว กลางสังเคราะห์เช่น ถ่านกัมมันต์และCarbon-Coated Polystyrene [16]

### 2.3.3.9 สารอาหารในตัวกลาง

จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพใช้สารมลพิษเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลัง งานอย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ยังต้องการสารอาหารอื่นด้วย เช่น ไนโตรเจน โปแทสเซียม ซัลเฟอร์ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส และสารอาหารอื่น เครื่องกรองชีวภาพจะทำงานได้ดี ต้องมีสารอาหารที่เพียงพอที่ทำให้จุลินทรีย์นำไปใช้ได้ ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางที่ให้สารอาหารได้อย่าง ดีเนื่องจากมีสารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการครบถ้วน ส่วนตัวกลางที่เป็นพวกสารอนินทรีย์นั้นต้องมื การเติมสารอาหารต่าง ๆ ลงไปในระบบโดยปกติแล้วจะเติม ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โปแทสเซียม [4]

ตารางที่ 2.5 แสดงชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสารเคมีชนิดต่าง ๆ

Compound	Microorganism	Reference
- Acetaldehyde, Butanone, and other Aldehydes and Ketones Degrades a-Pinene to cis-Verbenol and Verbenone and trans Sobrerol	<i>Gordona corynebacterium</i> <i>Aspergillus niger</i>	[22] อ้างถึงใน [21]
- Pinene	<i>Pseudomonas maltophilia</i> , <i>Serratia marcescens</i>	[23] อ้างถึงใน [21]
- Phenol	<i>Pseudomonas putida</i> heterogeneous culture and a pure strain <i>Candida tropicalis</i> , <i>Fusarium flocciferium</i> , and <i>Trichosporon cutaneum</i>	[23] อ้างถึงใน [21]
- Xylenes and Styrene	<i>Nocardia</i>	[24] อ้างถึงใน [21]
- 1, 2 Dichloroethane	<i>Xanthobacter autotrophicus</i>	[24] อ้างถึงใน [21]
- Dichloromethane	<i>Hyphomicrobium</i> sp. gj21, <i>Pseudomonas putida</i>	[24] อ้างถึงใน [21]
- Trichloroethylene	<i>Pseudomonas cepacia</i> 64, <i>Pseudomonas mendocina</i> KR-1 (with co-substrates)	[25], [26], [27], [28] อ้างถึงใน [21]
- Sulfide	<i>Bacillus</i> , <i>Mycoides</i> and <i>Streptomyces thiobacilli</i>	[29], [30] อ้างถึงใน [21]
- Hydrogen Sulfide	<i>Xanthomonas</i> sp. DY44	[31], [32] อ้างถึงใน [21]
- Hydrogen Sulfide, Methanethiol, Dimethyl Sulfide, and Dimethyl Disulfide	<i>Thiobacillus thioparus</i> Tkm, <i>Thiobacillus thioparus</i> DW44, <i>Basidiomycete cephalosporium</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Methylotrophicstrain</i> 155, <i>Pseudomonas acidovorans</i> Dm2-11	[33], [34], [35], [36], [37], [38] อ้างถึงใน [21]
- Dimethyl Sulfide	<i>Hyphomicrobium</i>	[39] อ้างถึงใน [21]
- Dimethyl Disulfide	<i>Alcaligenes</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i>	[22], [40] อ้างถึงใน [21]

ที่มา : [http://www.cecer.army.mil/techreports/Kim\\_mops/Kim\\_Mops.uli.post.PDF](http://www.cecer.army.mil/techreports/Kim_mops/Kim_Mops.uli.post.PDF) [21]

## 2.4 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของตัวกลางนับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทำงานและประสิทธิภาพของระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ ดินเป็นตัวกลางชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้กับระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ [9] มีรายงานว่าดินและปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางชีวภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาก เนื่องจากอนุภาคของปุ๋ยหมักมีพื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถให้น้ำและอากาศผ่านได้ดี [5] Zhu, Abumaizar และ Kocher [41] ได้ทำการทดลองโดยสร้างเครื่องกรองชีวภาพ ขึ้นมา 3 คอลัมน์เพื่อทำการทดสอบการกำจัดไอของเบนซิน โดยตัวกลางที่ใช้เป็นส่วนผสมของเศษหญ้าและสเลตจ์ ที่มีชื่อทางการค้าว่า Earth Blend Leaf Humus คอลัมน์ที่ 2 และ 3 มีการใส่ถ่านกัมมันต์ ลงไปผสมกับตัวกลางดังกล่าวในอัตราส่วนที่ต่างกัน ที่สภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของไอเบนซินเข้า 0.3 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของไอเบนซินประมาณ 75 พีพีเอ็ม พบว่าทั้ง 3 คอลัมน์มีประสิทธิภาพในการกำจัด (Removal Efficiency) มากกว่าร้อยละ 90 แต่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของไอเบนซินสูงขึ้นหรือมีการเพิ่มอัตราการไหลของไอเบนซินสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วในคอลัมน์ที่ 2 และ 3 ของเครื่องกรองชีวภาพ ที่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบในตัวกลางจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่า และมีความเสถียรมากกว่าคอลัมน์ที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ โดยเครื่องกรองชีวภาพนี้มีความสามารถในการกำจัดมลพิษสูงสุด (Maximum Elimination Capacity) ประมาณ 9 กรัมเบนซินต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลางต่อชั่วโมง

มีการศึกษาการบำบัดไอของไซลีน [20] โดยใช้เม็ดพีทมผสมกับจุลินทรีย์และมีการเติมสารอาหารพวก  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{NaB}_4\text{O}_7$ ,  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  และ  $\text{CoNO}_3$  ลงไปในระบบทุกวันวันละ 1 ลิตร เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าปริมาณแบคทีเรียมีปริมาณค่อนข้างคงที่จากวันที่ 3 ถึงวันที่ 92 ของการทดลอง ใช้อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 0.4, 0.7 และ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และช่วงของความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบมีค่า 0.2 – 4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระบบมีความสามารถในการบำบัดไซลีนได้ดีที่สุดที่อัตราการไหล 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 157 วินาที มีความสามารถในการบำบัดไซลีนสูงสุดที่ 67 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ในทุกช่วงความเข้มข้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและความสามารถในการบำบัดไซลีนมีค่าลดลง และพบว่าในทุกช่วงอัตราการไหลเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและความสามารถในการบำบัดไซลีนมีค่าลดลงเช่นกัน และการศึกษาพบว่าแบคทีเรียบำบัด เมตา - ไซลีนได้ดีกว่า พารา - ไซลีน และ ออโร - ไซลีน ตามลำดับ

จากการติดตามความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์พบว่ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเข้าระบบของไอของไซลีน และปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความสามารถในการบำบัดไซลีนอีกด้วย ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการย่อยสลายไซลีนจริง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้ความเข้มข้นเข้าระบบสูงกว่าสภาวะที่ระบบมีความสามารถในการบำบัดมลพิษสูงสุดจะทำให้ความสามารถในการบำบัดมลพิษของระบบมีค่าลดลง กล่าวได้ว่าจลศาสตร์ของการย่อยสลายไซลีนโดยจุลินทรีย์นั้นไม่ใช่ Zero - Order เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไซลีนสูง ๆ มีผลยับยั้งต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์

Aizpuru และคณะ [42] ได้ทำการทดลองใช้จุลินทรีย์จากแอคติเวเต็ดสลัดจ์บับตัวกลางที่เป็นถ่านพีท (Peat) ในการบำบัดไอผสมของสารอินทรีย์ระเหยได้พวกสารเพิ่มออกซิเจน สารประกอบแอมโมเนียและสารประกอบคลอรีเนเต็ด จากการทดลองพบว่าพวกสารเพิ่มออกซิเจนจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ก่อนพวกสารประกอบแอมโมเนีย และสารประกอบคลอรีเนเต็ด มีสมมติฐานเกิดขึ้น 2 ข้อคือ มีการแข่งขันกันระหว่างกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่เฉพาะกับสารกลุ่มแรกคือพวกสารเพิ่มออกซิเจนและกลุ่มที่สองคือพวกสารประกอบแอมโมเนียและสารประกอบคลอรีเนเต็ด อีกข้อคือแบคทีเรียมีกลุ่มเดียวแต่สารที่ย่อยสลายง่ายกว่าจะถูกกำจัดก่อน โดยความสามารถในการกำจัดมลพิษสูงสุด มีค่าประมาณ 120 กรัมสารอินทรีย์ระเหยต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลางต่อชั่วโมง

มีการศึกษาในระบบ Trickle Bed Biofilter เพื่อทำการบำบัดไอของเบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน และ ไอ-ไซลีน โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแอคติเวเต็ดสลัดจ์บับตัวกลางที่เป็นถ่านหิน (Coal) พบว่า เมื่อป้อนไอของสารละลายเบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน และ ไอ-ไซลีน ในปริมาณของสารที่ถูกนำเข้าสู่ระบบต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางต่อหน่วยเวลา (Loading Rate) ต่ำกว่า 64, 110, 53 และ 55 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงกว่าร้อยละ 90 ในส่วนของไอของสารละลายผสม ที่ปริมาณของสารที่ถูกนำเข้าสู่ระบบต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางต่อหน่วยเวลาต่ำกว่า 96 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 ระบบนี้จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีทั้งไอของสารเดี่ยวและผสม ทั้งปริมาณของสารที่ถูกนำเข้าสู่ระบบต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางต่อหน่วยเวลาที่มีค่าต่ำและสูง [3]

ได้มีการศึกษาในการบำบัดไอของแก๊สไซลีน (Gasoline) โดยใช้ตัวกลางที่เป็นปุ๋ยหมักที่อัตราเร็วของอากาศเข้าระบบ 6 m/hr และระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสตัวกลางที่ 10 นาที พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด เบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน ไซลีน และ Total Petroleum Hydrocarbon

(TPH) ก่อนข้างคองที่หลังจากเริ่มเดินระบบได้ 15 วัน ประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยของ TPH และ เบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน ไซลีน อยู่ที่ 80 % และ 85% ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของเบนซิน มีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มเบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน ไซลีน และไม่เกิดความดันลค ที่อัตราการเร็วของอากาศ 6 m/hr [43]

มีการศึกษาผลของความเข้มข้นเข้าระบบ ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสตัวกลางและอุณหภูมิของคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหย โดยใช้ตัวกลางที่เป็นถ่านฟิต พบว่าที่ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง 3 นาที เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบเป็น 65 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C จะมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 % และเมื่อความเข้มข้นเข้าระบบเป็น 83 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 93 % แต่ลดลงมาเป็น 74 % ที่ 45 °C เมื่อความเข้มข้นของแก๊สเข้าระบบเป็น 92 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรและระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสตัวกลาง 1.5 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 91 % และ 94 % ที่ 25 °C และ 32 °C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสตัวกลางเป็น 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือ 68 % และ 81 % ที่ 25 °C และ 32 °C ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสาร เบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิน ไซลีน ที่ 93 – 94 % [19]

ได้มีการศึกษาการบำบัดไอของโทลูอิน โดยใช้แบคทีเรีย *Acinetobacter sp.* NCIMB 9689 โดยใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1 - 4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 17.8 - 255 m/hr ความสามารถในการบำบัดโทลูอินสูงสุดอยู่ที่ 242 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ที่อัตราเร็วของ อากาศ 127.5 m/hr และความเข้มข้นของโทลูอิน เข้าระบบที่ 4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไอของโทลูอินเท่ากับ 23.8 % และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงกว่า 90 % ที่ปริมาณสารเข้าระบบน้อยกว่า 113.7 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง [44]

สรารุช [11] ได้ทดลองกำจัดไอของเบนซินและโทลูอินโดยใช้เครื่องกรองอากาศชีวภาพซึ่งตัวกลางหลักที่ใช้เป็นดินผสม ปุ๋ยคอก และใช้เชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานผลิตน้ำอัดลม (เป๊ปซี่) ในการทดลองทำการทดลอง 2 แบบ แบบแรกคือ แบบดรัมและแบบ 3 คอลัมน์ โดยมีการแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก ศึกษาการบำบัดที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางของเครื่องแบบดรัมและแบบ 3 คอลัมน์เป็น 12.2 และ 22.2 วินาที ที่อัตราการไหลของอากาศผสม 44.22 และ 33.27 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 86.1 และ 73.8 ตามลำดับ ช่วงที่สองในเครื่องกรองอากาศชีวภาพแบบดรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ

40 - 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง 6.7 วินาที ที่อัตราการไหลของอากาศผสม 80.13 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซินและโทลูอินร้อยละ 95 และ 93 แบบที่ 2 คือเครื่องกรองอากาศชีวภาพแบบห่อสูง ทำการทดลองที่ 40-50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง 7.4 วินาที ที่อัตราการไหลของอากาศผสมเป็น 73.7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงมีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซินและโทลูอินร้อยละ 86 - 92 และ 93 - 94 ตามลำดับ

นอกจากนี้ กรมควบคุมมลพิษ [16] ได้จัดทำระบบสาธิตแบบ Bench Scale และ Pilot Scale สองชุด ติดตั้งระบบสาธิตทั้งสองที่โรงงานสหมิตรปลาปนและที่โรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาโดยที่โรงงานสหมิตรปลาปน อากาศเสียที่เข้าระบบจะมีสารมลพิษหลักพวกแอมโมเนียเมื่อใช้ตัวกลางหลักในชุดการทดลองต่างกันคือ กาบมะพร้าว เศษไม้จากการแปรรูปไม้ และผักตบชวา พบว่าในสถานะที่มีสารมลพิษเข้าระบบไม่สม่ำเสมอจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้ประมาณร้อยละ 65 - 80 และในสถานะที่มีสารเข้าระบบค่อนข้างคงที่ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียสูงกว่าร้อยละ 90 ในส่วนของโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยา อากาศเสียที่เข้าระบบเป็นอากาศจากสถานีสูบน้ำ ถังเติมอากาศและห้องเครื่องรีดตะกอน ซึ่งสารมลพิษหลักได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเมทิลเมอร์แคปแทน พบว่าเมื่อใช้ตัวกลางในการทดลองต่างกันคือ กาบมะพร้าว เศษไม้จากการแปรรูปไม้ และผักตบชวา จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลเมอร์แคปแทนได้มากกว่าร้อยละ 98

มีการรวบรวมเอกสารเกี่ยวกับความสามารถในการบำบัดมลพิษของสารกลุ่มแอมโรแมติก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษของสารกลุ่มแอมโรแมติก

สารมลพิษ	ตัวกลางที่ใช้	EC <sub>max</sub> *(g/m <sup>3</sup> /hr)	Ref
Benzene	Compost-Based	8	[45] อ้างถึงใน [43]
Toluene	Compost-Based	15	[45] อ้างถึงใน [43]
Toluene	Compost	45-55	[46] อ้างถึงใน [43]
BTX	Compost/Perlite	50-60	[46] อ้างถึงใน [43]
Xylene	Compost-Based	25	[47] อ้างถึงใน [4]

\* EC<sub>max</sub> = Maximum Elimination Capacity

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 ชุด Bench Scale Model ประกอบด้วย

- 1) ท่อครีติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ยาว 2 m ปิดหัวท้ายด้วยปลั๊ก PVC ตลอดความยาวของท่อจะเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 mm
- 2) วาล์วลม
- 3) สายยาง
- 4) ภาชนะบรรจุสารเคมี
- 5) Diaphragm Pump
- 6) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศชนิด Rotameter โดยมี 2 เครื่อง คือเครื่อง A มีช่วงอัตราการไหล 0 - 5 l/min และเครื่อง B มีช่วงอัตราการไหล 0 - 25 l/min โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Inlet และ Outlet เท่ากับ 10 mm

##### 3.1.2 Manometer

##### 3.1.3 เทอร์โมมิเตอร์แอลกอฮอล์ 0-100 °C

##### 3.1.4 Hygrometer #777 BARIGO

##### 3.1.5 กระดาษวัด pH Fix 0 -14

##### 3.1.6 ตาชั่งชนิดชั่งได้สูงสุด 7 kg (ความละเอียด 2 ตำแหน่งของกิโลกรัม)

##### 3.1.7 หลอดนิตยขนาด 20 ml

##### 3.1.8 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด (4 ตำแหน่งของกรัม)

##### 3.1.9 Xylene Analytical Grade

##### 3.1.10 ชุดเก็บตัวอย่างความเข้มข้นของไซลีน

- 1) หลอดแก้วเก็บตัวอย่าง
- 2) Solid Phase MicroExtraction Fiber (SPME) Holder
- 3) Polydimethylsiloxane Stationary Phase (100  $\mu$ m Film Thickness)

##### 3.1.11 เครื่อง Gas Chromatography ของ Hewlett-Packard รุ่น HP 6890N

### 3.2 ขั้นตอนดำเนินการ

#### 3.2.1 การเตรียมตัวกลางชีวภาพ

ตัวกลางที่นำมาใช้ในการทดลองคือ ปุ๋ยคอก, ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย, กาบมะพร้าวที่มีลักษณะเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดประมาณ 1 – 2 cm และแกลบ

ในการผสมเพื่อให้ได้ตัวกลางที่มีความชื้นในการทดลองตามที่ต้องการ จะต้องมีการเติมน้ำลงไป ดังนั้นจึงต้องมีการหาปริมาณความชื้นของตัวกลางทุกชนิดก่อนนำมาผสม ในการหาความชื้นและปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงในส่วนผสมของตัวกลางแสดงในภาคผนวก ก

การเตรียมตัวกลางที่จะบรรจุเข้าไปในระบบมีขั้นตอนดังนี้คือ

- 1) นำตัวอย่างตัวกลางทุกชนิดไปหาค่าความชื้น
- 2) ผสมตัวกลางในแต่ละชุดการทดลองตามสัดส่วนโดยปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยปริมาตรตัวกลางทุกชนิดต้องไม่ผ่านการบดอัด เมื่อได้ปริมาตรตัวกลางตามต้องการแล้วนำตัวกลางนั้นมาชั่งน้ำหนัก
- 3) นำตัวกลางมาผสมกัน ปรับความชื้นเป็น 60% โดยการเติมน้ำ
- 4) บรรจุตัวกลางลงในท่อออกรีลิก โดยไม่มีการอัดตัวกลาง ใช้วิธีเขย่าเพื่อให้มีช่องว่างระหว่างตัวกลางน้อยที่สุด จากนั้นวัดความสูงของตัวกลาง

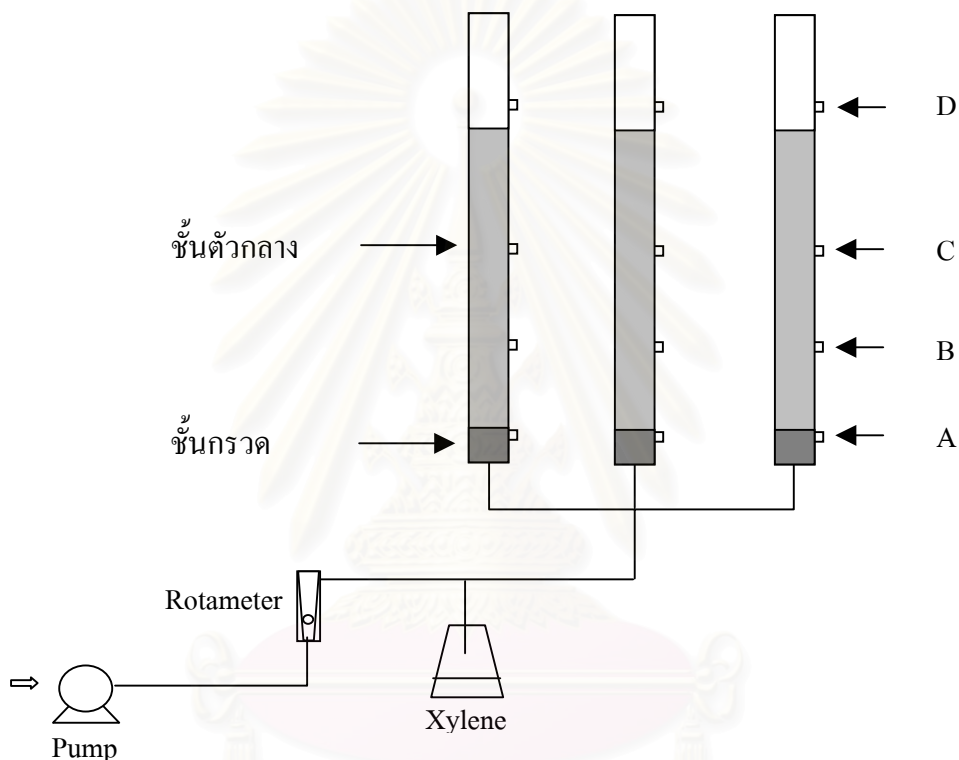
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนผสมของตัวกลางในแต่ละชุดการทดลองและระยะเวลาที่เดินระบบ

ชุดการทดลองที่	ส่วนผสมของตัวกลาง ( ร้อยละโดยปริมาตร)				ระยะเวลาที่เดินระบบ
	แกลบ	กาบมะพร้าว	ปุ๋ยคอก	ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย	
1. แกลบ	75	-	20	5	ตลอด 134 วัน
2. กาบมะพร้าว	-	75	20	5	ตลอด 134 วัน
3. แกลบ(ชุดควบคุม)	100	-	-	-	35 วันแรก
4. กาบมะพร้าว (ชุดควบคุม)	-	100	-	-	วันที่ 36 – 83
5. กาบมะพร้าว (ทำซ้ำ)	-	75	20	5	วันที่ 84 - 134



### 3.2.2 การจัดตั้งระบบ Bench Scale Biofilter

จัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยท่อทดลองจำนวน 3 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 cm โดยชั้นล่างเป็นชั้นกรวดสูง 20.0 cm ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักตัวกลางและกระจายอากาศให้ทั่วตัวกลาง ในแต่ละชุดการทดลอง มีจุดเก็บตัวอย่าง 4 จุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 mm โดยความสูงจากปลายท่อออกครีติกถึงจุดเก็บตัวอย่าง A, B, C และ D มีค่าเป็น 16.0, 68.5, 108.5 และ 168.5 cm ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 Bench Scale Model

### 3.2.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

#### 3.2.3.1 การเดินระบบ

ในแต่ละวันจะทำการเดินระบบวันละ 7 ชั่วโมง Diaphragm Pump จะทำหน้าที่นำอากาศไหลผ่าน Rotameter เพื่อควบคุมอัตราการไหลที่ต้องการในแต่ละวัน

เมื่ออากาศไหลผ่าน Rotameter ที่อัตราการไหล  $x$  l/min และต่อไปยังท่อที่ต่อกับภาชนะที่บรรจุไซลีนประมาณ 30 ml โดยไซลีนจะระเหยขึ้นมาผสมกับอากาศ และอากาศที่ผสม

ไอของโซลีนจะผ่านไปยังจุดแยก จากนั้นจึงเข้าสู่ชุดการทดลองแต่ละชุดโดยอัตราการไหลที่แท้จริงเมื่อผ่านจุดแยกและเข้าสู่ชุดการทดลองแต่ละชุด เป็นค่าที่ผ่านการคำนวณจากข้อมูลการ Calibration ของ Rotameter (ดังแสดงในภาคผนวก ง) และแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยตัวแปรที่ใช้ในการเดินระบบแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเดินระบบ

วันที่เดินระบบ	อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ (l/min)	ความเข้มข้นของไอของโซลีนเข้าระบบ	
		หน่วย ppmv	หน่วย g/m <sup>3</sup>
1 – 60	0.9	20 – 200	0.087 – 0.870
61 – 83	1.2	20 – 200	0.087 – 0.870
84 – 100	1.5	20 – 200	0.087 – 0.870
101 – 106	4.3	20 – 200	0.087 – 0.870
107 - 114	2.4	20 – 200	0.087 – 0.870
115 - 134	1.7	200 - 1200	0.870 – 5.220

นอกจากควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบแล้วในทุกวันยังมีการควบคุมความชื้นของตัวกลางให้มีค่าประมาณ 60 % เท่ากับวันที่เริ่มทำการเดินระบบ โดยการชั่งน้ำหนักชุดการทดลองและเติมน้ำลงในตัวกลางโดยตรง

### 3.2.3.2 การตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ จุดตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้

พารามิเตอร์	อุปกรณ์ที่ใช้	จุดตรวจ
ความชื้นสัมพัทธ์	Hygrometer	จุด A และ D
อุณหภูมิ	Thermometer	จุด A และ D
ความดันลด	Manometer	เทียบระหว่างจุด A,B และ A,C
ความสูงของตัวกลาง	ตลับเมตร	จากจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดของตัวกลาง
pH ของตัวกลาง	กระดาษวัด pH	น้ำทิ้งส่วนเกิน
ความเข้มข้นของไอของโซลีน	SPME, GC - FID	จุด A และ D

### 3.2.3.3 การเก็บตัวอย่างความเข้มข้นของไอของไซลีน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างไอของไซลีนจะประกอบไปด้วย Solid Phase MicroExtraction Fiber Holder ซึ่งเป็นตัวยึด fiber ชนิด Polydimethylsiloxane ความหนา 100  $\mu\text{m}$  ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกชุดเก็บตัวอย่างว่า SPME (รูปที่ 3.2)

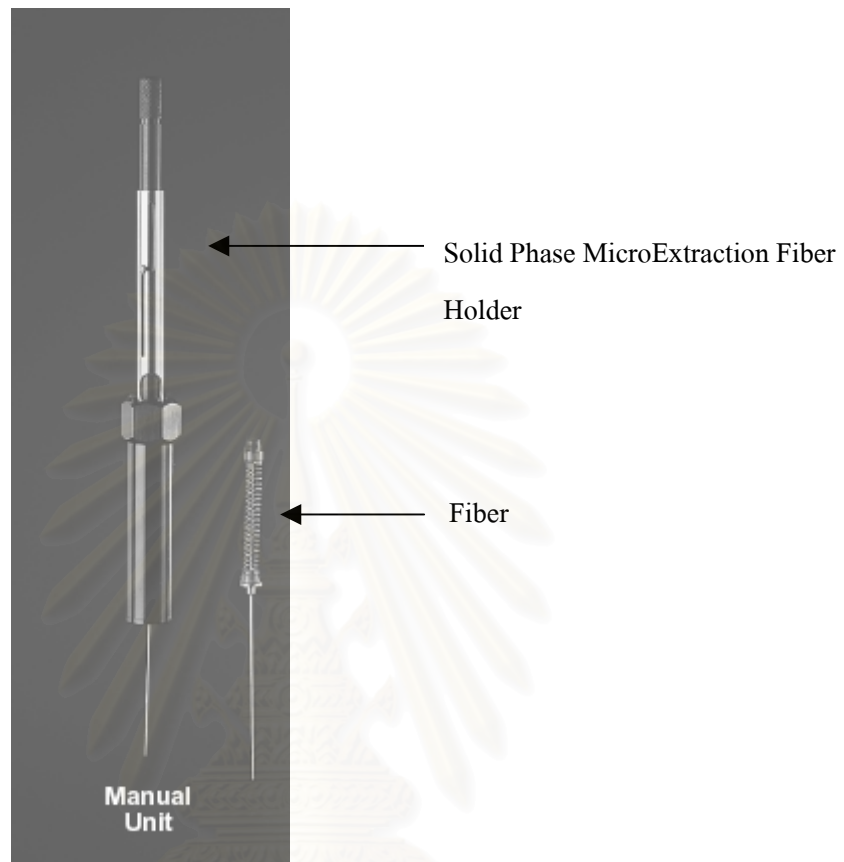
หลักการทำงานของ SPME คือ นำ SPME ไปจับไอของไซลีนที่จุดที่ต้องการ Fiber ชนิด Polydimethylsiloxane จะทำหน้าที่ในการจับไอของไซลีนไว้และเมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จนำไปวัดค่ากับเครื่อง Gas Chromatography โดยรูปที่ 3.3 แสดงวิธีการใช้ SPME

ข้อจำกัดของ Fiber ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Fiber ที่เพิ่งใช้งานกับเครื่อง GC จะทำให้ Fiber มีอุณหภูมิสูงเมื่อนำไปเก็บตัวอย่างต่อทันทีจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง จึงต้องรอให้ Fiber เย็นตัวลงก่อนซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 – 45 นาที

เนื่องจากมี Fiber ชนิด Polydimethylsiloxane จำนวน 3 ชั้น ดังนั้นจึงใช้ Fiber แต่ละชั้นเก็บตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองแยกกัน

ปริมาณของไซลีนที่ถูกจับโดย SPME นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายค่ามาก เช่น เวลาที่ใช้ในการจับ อุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องมีการทำการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ SPME ในการเก็บตัวอย่างความเข้มข้นโดยใช้ตัวแทนอัตราการไหลที่ 1.5 l/min โดยเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 2, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที

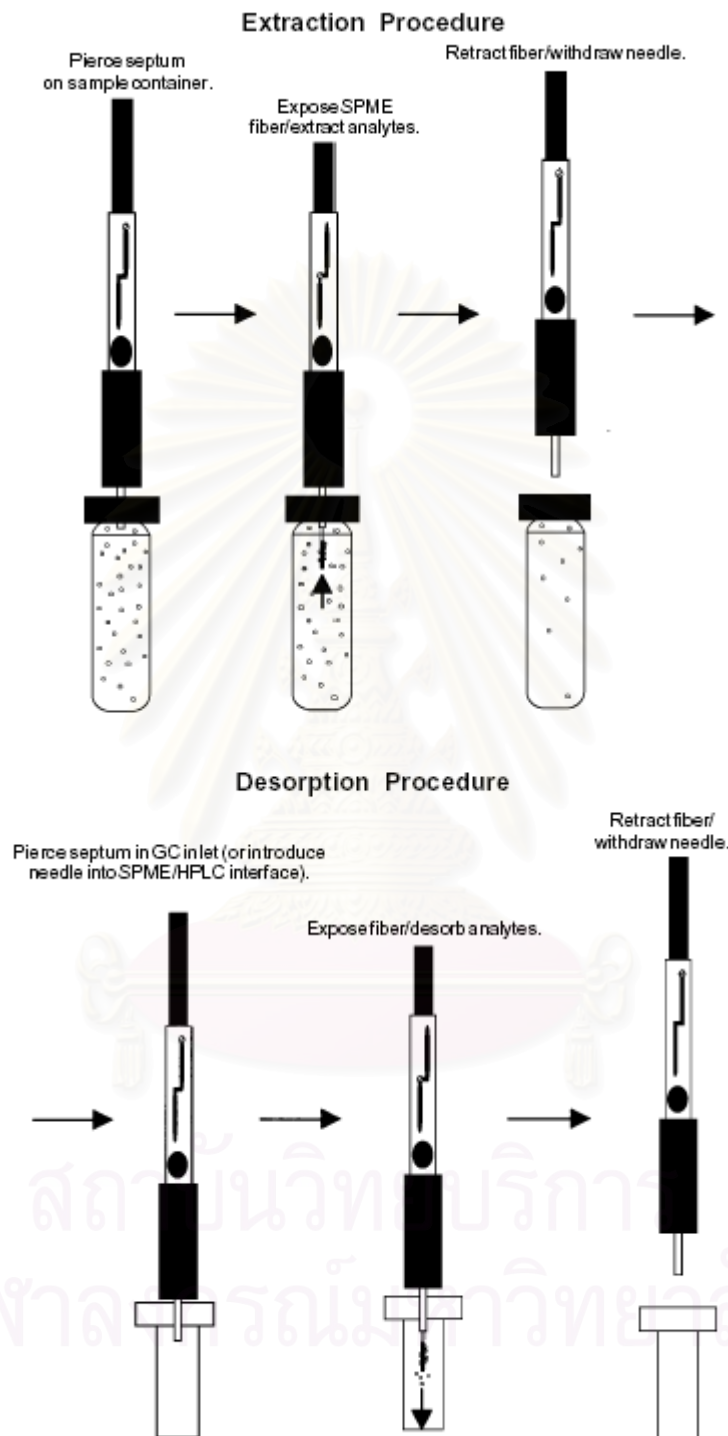
จากผลการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลา 15 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บตัวอย่างความเข้มข้น (ภาคผนวก ข)



ส่วนของ Fiber ที่ยื่นออกมาจากปลายของตัว  
SPME Holder ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 ลักษณะของ SPME [48]



รูปที่ 3.3 วิธีการใช้ SPME [49]

### 3.2.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณของไอของไซลีน

ใช้ Gas Chromatography ของ Hewlett - Packard รุ่น HP 6890N

Column : HP - 5 ( 5% Phynyl Methyl Siloxane, 30m X 0.32mm ID, 0.25  $\mu$ m film)

Oven : 40  $^{\circ}$ C (1 min) to 130  $^{\circ}$ C at 10  $^{\circ}$ C/min , 1 min

Carrier : Helium

Detector : FID, 200  $^{\circ}$ C

Injector : Splitless, 180  $^{\circ}$ C

เมื่อนำ SPME มาถือจะ hold SPME ไว้กับ Injector เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อให้ไอของไซลีนระเหยสู่คอลัมน์ของ Gas Chromatography และเป็นการทำให้ไม่มีไซลีนเหลืออยู่ใน Fiber เมื่อนำไปใช้ในการเก็บตัวอย่างครั้งต่อไป

คำนวณความเข้มข้นเข้าระบบได้จากปริมาณไซลีนที่หายไปโดยทำการชั่งน้ำหนักไซลีนก่อนและหลังเดินระบบในวันที่มีการใช้ GC

พื้นที่ใต้พีคที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างที่จุดเข้า (จุด A) ที่วัดได้จาก GC เป็นความเข้มข้นเข้าระบบ และใช้บัญญัติไตรยางค์เทียบพื้นที่ใต้พีคที่จุดออก (จุด D) เป็นความเข้มข้นออกระบบ

ในการหาปริมาณไซลีนนั้นจะคิดจากปริมาณไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ รวมกันและได้มีการตรวจสอบกับเครื่อง GC - MS เพื่อเป็นการยืนยันว่าเป็นสารไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ จริง (ภาคผนวก ค) และนำมาใช้ในการคิดพื้นที่รวมของไซลีนทั้ง 3 ไอโซเมอร์ เนื่องจากการวิเคราะห์และรายงานผลจะคิดเป็น Mixed Isomer (ตัวอย่างการคำนวณดังภาคผนวก ง)

ในการคำนวณความเข้มข้นจะคิดแยกกันในแต่ละชุดการทดลองเนื่องจาก Fiber ชนิด Polydimethylsiloxane มีจำนวน 3 ชั้น และใช้ Fiber แต่ละชั้นในการเก็บตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองแยกกัน

### 3.2.3.5 การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด

ในการทดลองนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างของตัวกลางในช่วงที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบสูง

โดยเก็บตัวอย่างตัวกลาง 1 กรัม ที่จุด C ในชุดตัวกลางหลักที่เป็นแกลบและ

กาบมะพร้าว เตรียมเป็นสารละลายและทำเจือจาง จากนั้นจึงเลี้ยงเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral Salts ในสภาวะที่มีโซเดียมเป็นสารตั้งต้น นำไปเพาะเชื้อที่ตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นจึงตรวจนับจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ทั้งหมด

### 3.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลความสามารถในการบำบัดสารมลพิษมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ t-test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยทำการเปรียบเทียบดังนี้

- 1) ระหว่างชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 1 และ 2)
- 2) ระหว่างชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและชุดควบคุมของแกลบ (ชุดการทดลองที่ 1 และ 3)
- 3) ระหว่างชุดการทดลองที่ ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวและชุดควบคุมของกาบมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 2 และ 4)
- 4) ระหว่างชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวในชุดที่ทำการทดลองก่อนและชุดที่ทำการทดลองซ้ำ (ชุดการทดลองที่ 2 และ 5)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมตัวกลางบรรจุลงในชุดการทดลอง

การจะบรรจุตัวกลางลงในชุดการทดลองนั้นต้องมีการหาค่าความชื้นของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ก่อน แล้วจึงปรับค่าความชื้นของตัวกลางรวมทั้งหมดเป็น 60 % ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ร้อยละความชื้นของตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ชนิดตัวกลาง	ความชื้น (%)
แกลบ	27.34
กาบมะพร้าว	10.58
ปุ๋ยคอก	38.42
ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย	85.43

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักเริ่มต้นของชุดการทดลองแต่ละชุด

ชุดที่	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง	น้ำหนักตัวกลางรวมก่อนเติมน้ำ (kg)	ปริมาณน้ำที่เติม (kg)	น้ำหนักตัวกลางหลังการเติมน้ำและบรรจุลงกระบอกล (kg)
1	ตลอด 134 วัน	0.41	0.14	3.51
2	ตลอด 134 วัน	0.35	0.15	3.49
3	35 วันแรก	0.30	0.24	3.51
4	วันที่ 36 – 83	0.22	0.26	3.47
5	วันที่ 84 - 134	0.35	0.15	3.49

โดยวิธีการวิเคราะห์ค่าความชื้นและวิธีการปรับความชื้นของตัวกลางเป็น 60 % แสดงไว้ในภาคผนวก ก

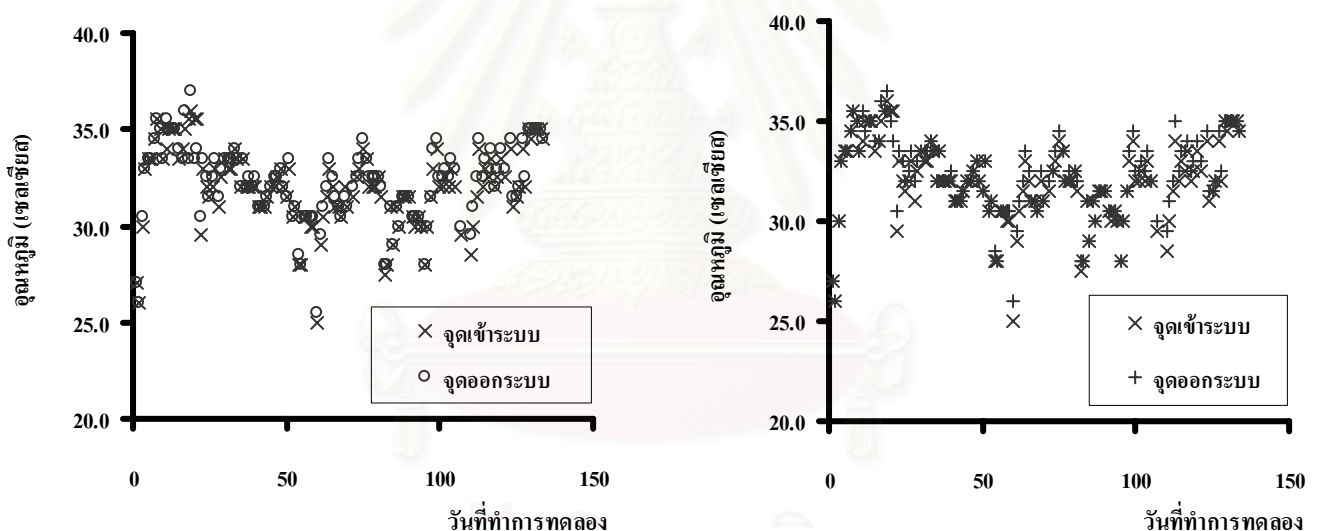


## 4.2 ค่าที่ทำการตรวจวัดในการทดลอง

เนื่องจากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นชุดการทดลองที่มีการทดลองตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการเดินระบบจึงนำข้อมูลของชุดการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นหลักในการเปรียบเทียบโดยจะแทนชื่อชุดการทดลองที่ 1 ว่า แกลบ และชุดการทดลองที่ 2 ว่า กาบมะพร้าว

### 4.2.1 อุณหภูมิที่เข้าออกระบบ

จากการทดลองอุณหภูมิที่เข้าระบบกับอุณหภูมิจนอากาศคืออุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากการทดลองที่สภาวะอากาศปกติ อุณหภูมิเข้าระบบมีค่าตั้งแต่ 24 - 36 °C และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากระบบก็มีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 - 2 °C เท่านั้น และแทบจะไม่มีแตกต่างกันในชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวดังแสดงในรูปที่ 4.1



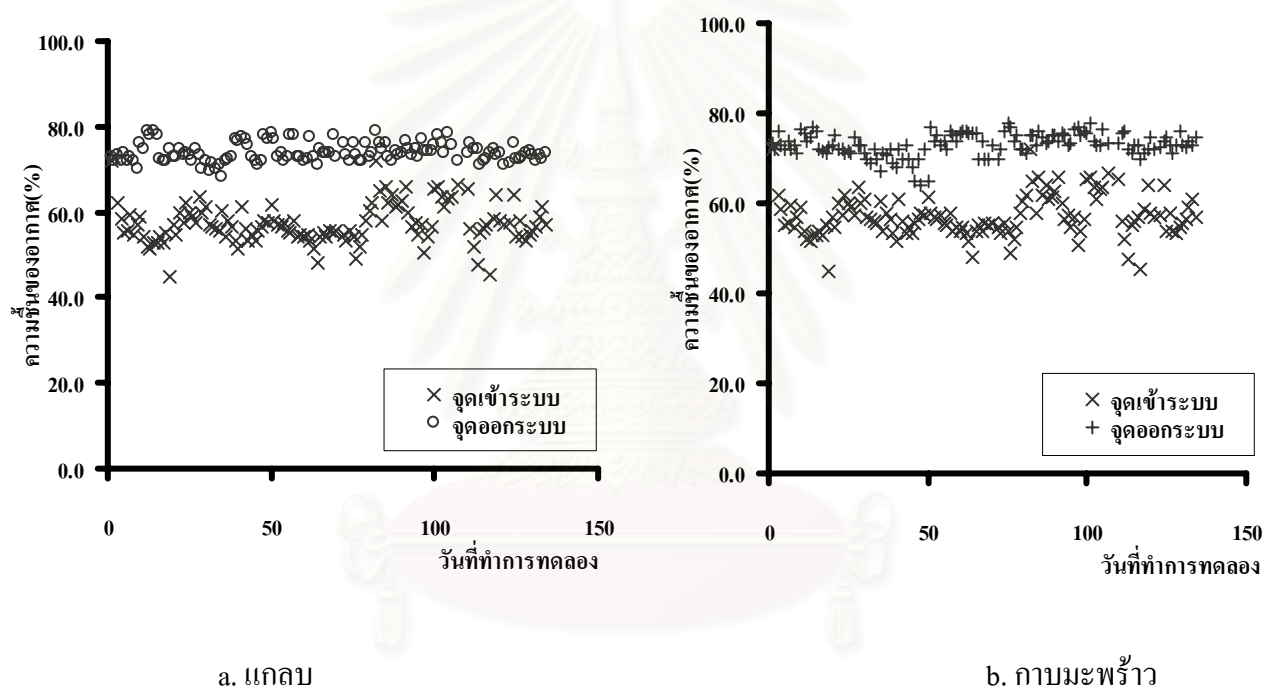
a. แกลบ

b. กาบมะพร้าว

รูปที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว

#### 4.2.2 ความชื้นของอากาศที่เข้าออกระบบ

ความชื้นในอากาศในระยะเวลาทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 45 – 75 % ความชื้นที่เหมาะสมจะทำให้ตัวกลางไม่เกิดการแห้ง ในเครื่องกรองอากาศชีวภาพทั่วไป นิยมให้ความชื้นของอากาศเข้าระบบ 95 - 100 % แต่ในการทดลองนี้ทำที่สภาวะอากาศปกติจึงไม่ได้มีการเพิ่มความชื้นเข้าระบบแต่อย่างใด จากผลการทดลองความชื้นของอากาศที่เข้าระบบมีค่าต่ำกว่าความชื้นของอากาศที่ออกจากระบบ (รูปที่4.2) ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่เข้าระบบเมื่อผ่านตัวกลางจะพาความชื้นที่อยู่ในตัวกลางออกมาด้วย ส่งผลให้ความชื้นของอากาศที่ออกระบบมีค่ามากขึ้น และทำให้ตัวกลางแห้ง จึงต้องมีการควบคุมความชื้นของตัวกลางอย่างสม่ำเสมอโดยการเติมน้ำเข้าไปในตัวกลาง



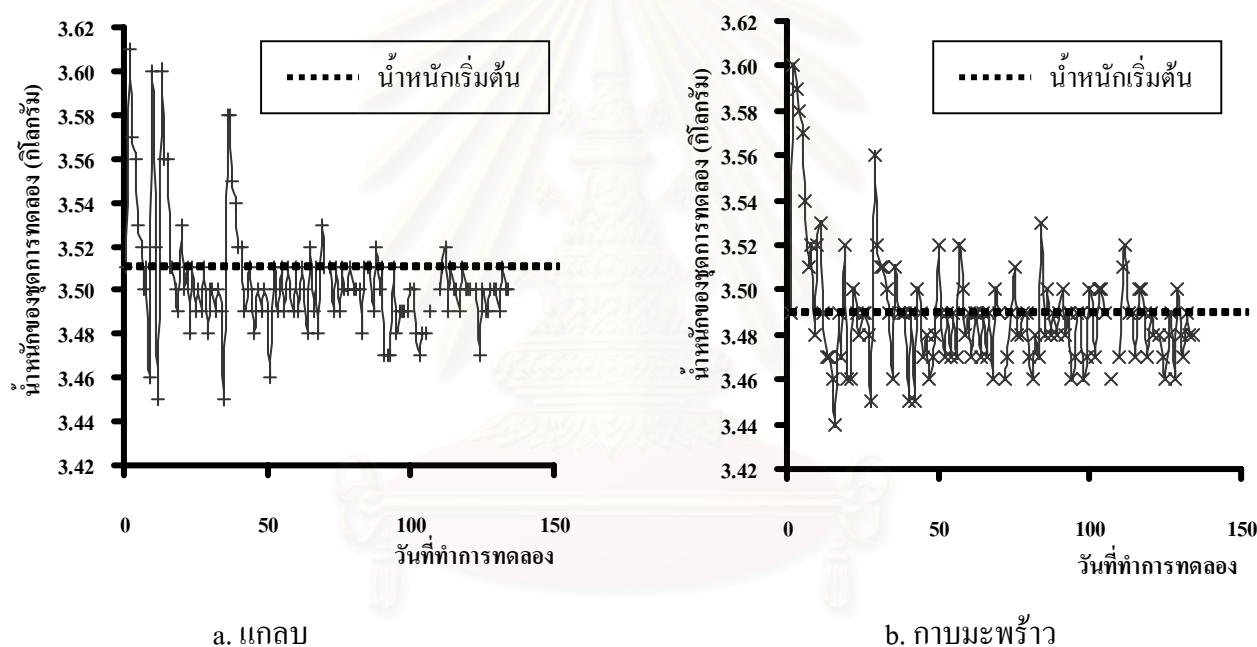
รูปที่ 4.2 ความชื้นของอากาศที่เข้าและออกระบบในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและ กาบมะพร้าว

#### 4.2.3 ความชื้นตัวกลาง

การควบคุมความชื้นของตัวกลางทำได้โดยการเติมน้ำลงไปในตัวกลางเพื่อควบคุมความชื้นในตัวกลางให้มีค่า 60 % ตลอดการทดลอง ในการหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมน้ำลงไปในตัวกลางนั้นใช้วิธีการชั่งน้ำหนักชุดการทดลอง โดยน้ำหนักที่หายไปคือปริมาณน้ำในตัวกลางที่ระเหยไปนั่นเอง และเติมน้ำลงไปให้ชุดการทดลองแต่ละชุดมีน้ำหนักเท่าเดิม ช่วงเริ่มต้นการทดลองน้ำหนักชุด

การทดลองค่อนข้างจะเปลี่ยนแปลงมากทำให้ต้องมีการเติมน้ำในปริมาณมาก แต่เมื่อทำการทดลองไปช่วงเวลาประมาณ 6 สัปดาห์ น้ำหนักของตัวกลางจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง หรือกล่าวได้ว่า ความชื้นของตัวกลางค่อนข้างจะคงที่

การเปลี่ยนแปลงนี้สังเกตได้ทั้งสองชุดการทดลอง แต่ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็น กาบมะพร้าวมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของตัวกลางแคบกว่าในชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็น แกลบ อธิบายได้โดยลักษณะทางกายภาพของกาบมะพร้าวซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้มากกว่าแกลบ จึงรักษาความชื้นไว้ได้ค่อนข้างคงที่กว่าในช่วงเริ่มเดินระบบ แต่เมื่อหลัง 6 สัปดาห์ แกลบและกาบมะพร้าวมีความสามารถในการรักษาความชื้นไว้ได้ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 น้ำหนักของชุดการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป

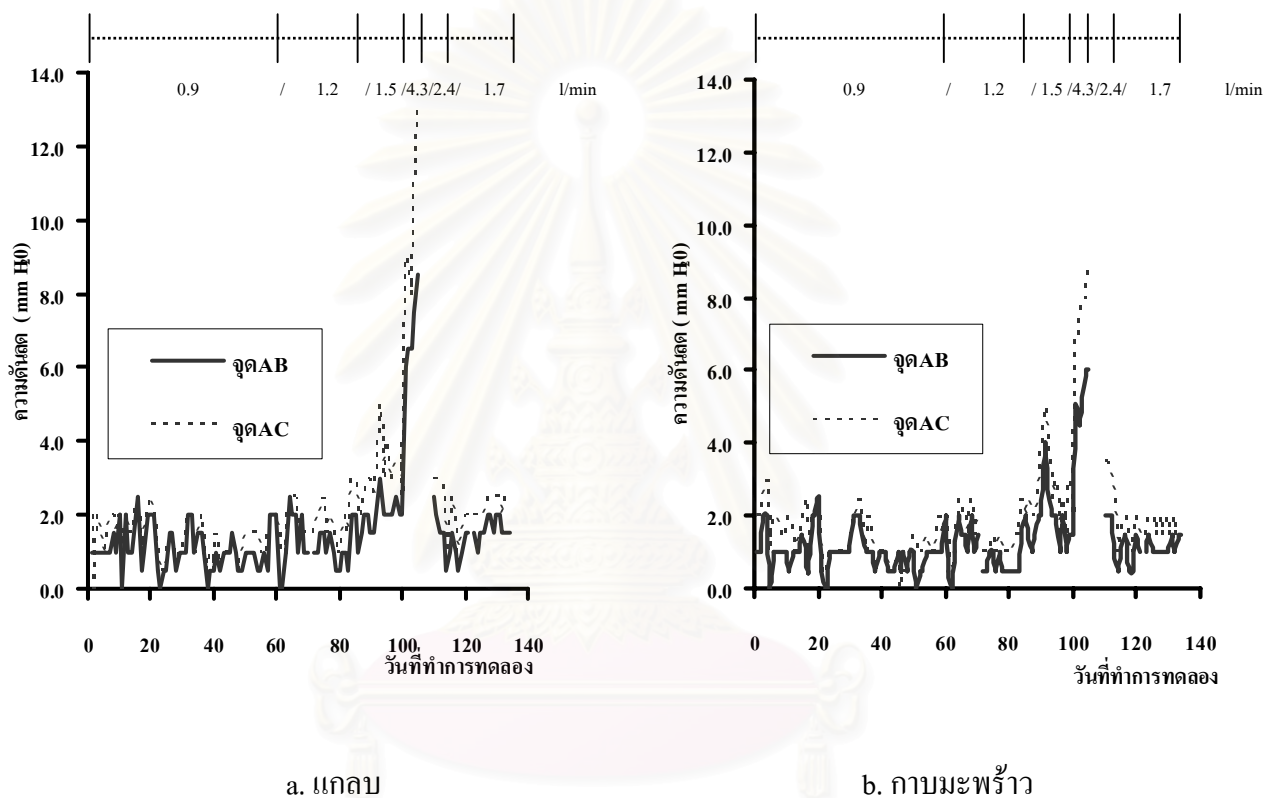
#### 4.2.4 ความดันลดของระบบ

ความดันลดคือความต่างของความดันเข้าและออกระบบ ความดันลดที่เพิ่มขึ้น หมายถึงเกิดการต้านทานการไหลของอากาศผ่านระบบมากขึ้น ทำให้ปริมาตรอากาศที่ไหลผ่านระบบมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง จากการทดลองวัดความดันลดในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบมีค่าสูงกว่าเนื่องจากแกลบมีขนาดเล็กกว่ากาบมะพร้าว จึงมีการอัดตัวของตัวกลางมากกว่า และจากการเปรียบเทียบ

เทียบความดันลดระหว่างจุด AB และ AC ผลที่ได้คือจุด AC มีความดันลดสูงกว่าจุด AB ในทั้งสองชุดการทดลอง อธิบายได้ว่าจุด A และจุด C อยู่ห่างกันมากกว่าจุด A และจุด B จึงทำให้จุด AC เกิดความต่างของความดันมากกว่าจุด AB

แต่ค่าความดันลดโดยส่วนใหญ่ที่วัดได้จากการทดลองมีค่าไม่สูงนัก ประมาณ 0 - 4 mm H<sub>2</sub>O เนื่องจากใช้อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบต่ำและเมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบสูงขึ้นจะทำให้ความดันลดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยในทั้งสองชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่

4.4



รูปที่ 4.4 ความดันลดที่จุด AB และจุด AC

#### 4.2.5 pH

จากการศึกษาค่า pH ของตัวกลางโดยทำการวัดค่า pH จากน้ำส่วนเกินที่ออกมาจากระบบทุกสัปดาห์เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าไซลีนที่เข้าไปในระบบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของตัวกลางและจะมีผลต่อการบำบัดของระบบหรือไม่ จากผลการวัดค่า pH ของตัวกลางในชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวพบว่ามีค่าเท่ากับ 7 ตลอดการทดลอง

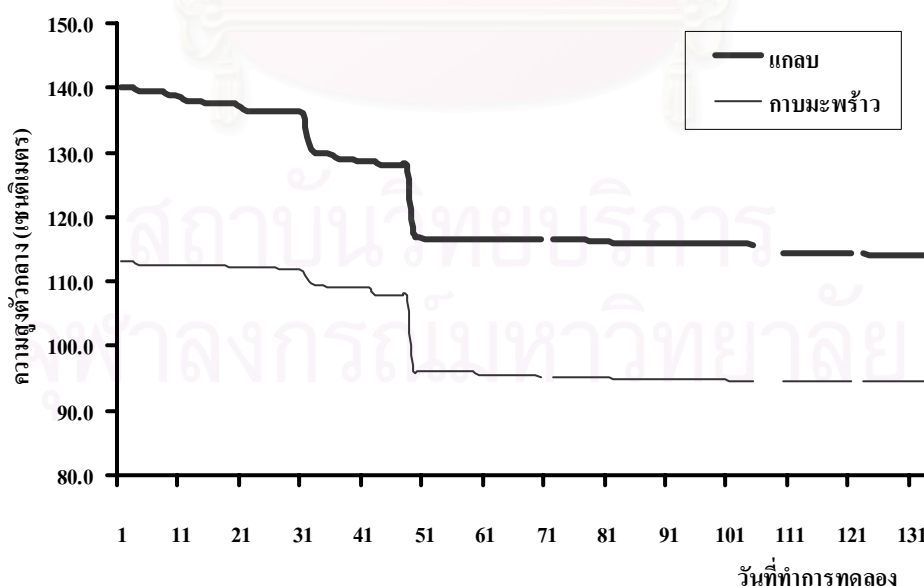
#### 4.2.6 ปริมาณสารอาหารในตัวกลาง

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของสารอาหารที่มีอยู่ในปุ๋ยคอกในรูปของ Total N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O โดยกลุ่มวิจัยเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร มีค่าร้อยละ 1.51 : 1.32 : 1.66 ซึ่งโดยปกติแล้วเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางเป็นปุ๋ยหมักมีการเติมไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.4, 0.15 และ 0.15 % โดยน้ำหนัก ถือว่าเป็นค่าที่เพียงพอ

#### 4.2.7 การยุบตัวของตัวกลาง

การยุบตัวของตัวกลางสังเกตได้จากความสูงของตัวกลางที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวกลางมีการยุบตัวอย่างรวดเร็ว 2 ครั้ง เนื่องจากเกิดโพรงขึ้นในตัวกลาง ดังนั้นในการทดลองจึงต้องมีการเขย่าเพื่อให้ตัวกลางอยู่ชิดกันมากขึ้น การเกิดโพรงในตัวกลางมีข้อเสียคืออากาศเสียที่ผ่านระบบจะไม่ถูกจุลินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลางบำบัด เนื่องจากอากาศเสียสัมผัสกับอนุภาคของตัวกลางได้น้อยลง

ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว นั้น มีลักษณะการยุบตัวคล้ายกันมากและการยุบตัวของตัวกลาง คิดเป็น 18.57 % และ 16.37 % ตามลำดับซึ่งแสดงได้ว่ากาบมะพร้าวมีการยุบตัวน้อยกว่าแกลบเพียงเล็กน้อย และจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสภาพของตัวกลางพบว่าแกลบมีการฟูพองมากกว่ากาบมะพร้าว



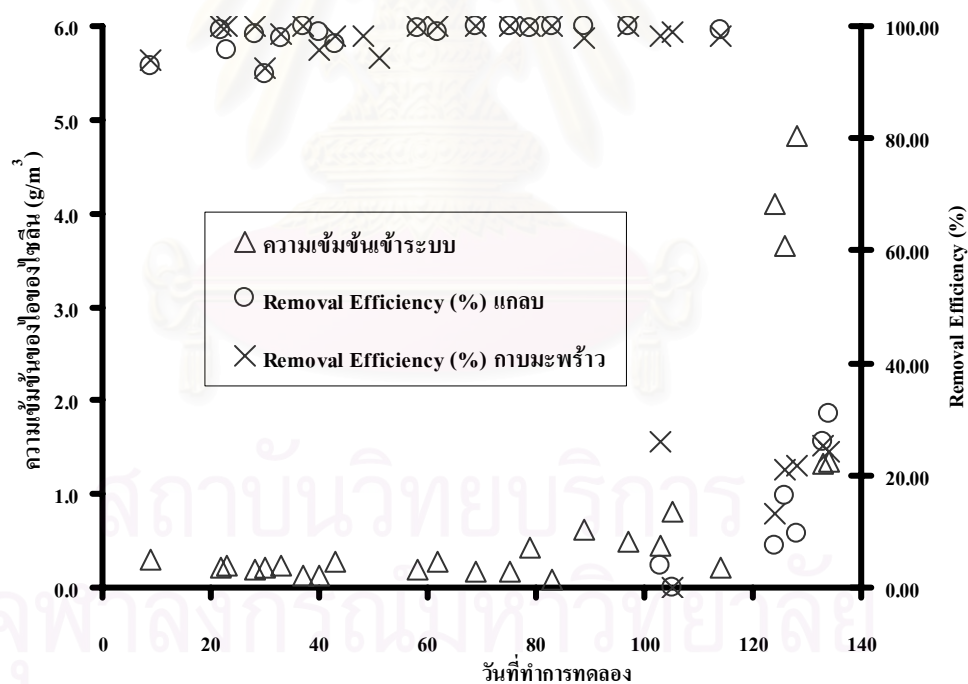
รูปที่ 4.5 ความสูงของตัวกลางที่ลดลงในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวเมื่อเวลาผ่านไป

#### 4.2.8 ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าระบบ

ในชุดการทดลองที่ใช้แกลบและกามมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักพบว่าระบบมีประสิทธิภาพบำบัดได้ใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าระบบกับประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกามมะพร้าว พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้งสองชุดมีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปพบว่าในช่วงวันที่ 1 - 114 ของการเดินระบบ เมื่อความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.870 g/m<sup>3</sup> (0 - 200 ppmv) ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีเกือบ 100 % ในวันที่ 103 และ 105 ของการเดินระบบ ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นเป็นเพราะ มีการเพิ่มอัตราการไหลของไซลีนเข้าระบบสูงขึ้นกว่าเดิมมาก และช่วงวันที่ 115 - 134 ของการเดินระบบ ได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.870 - 5.220 g/m<sup>3</sup> (200 - 1200 ppmv) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบมีค่าลดลงโดยมีค่าไม่มากกว่า 30 %



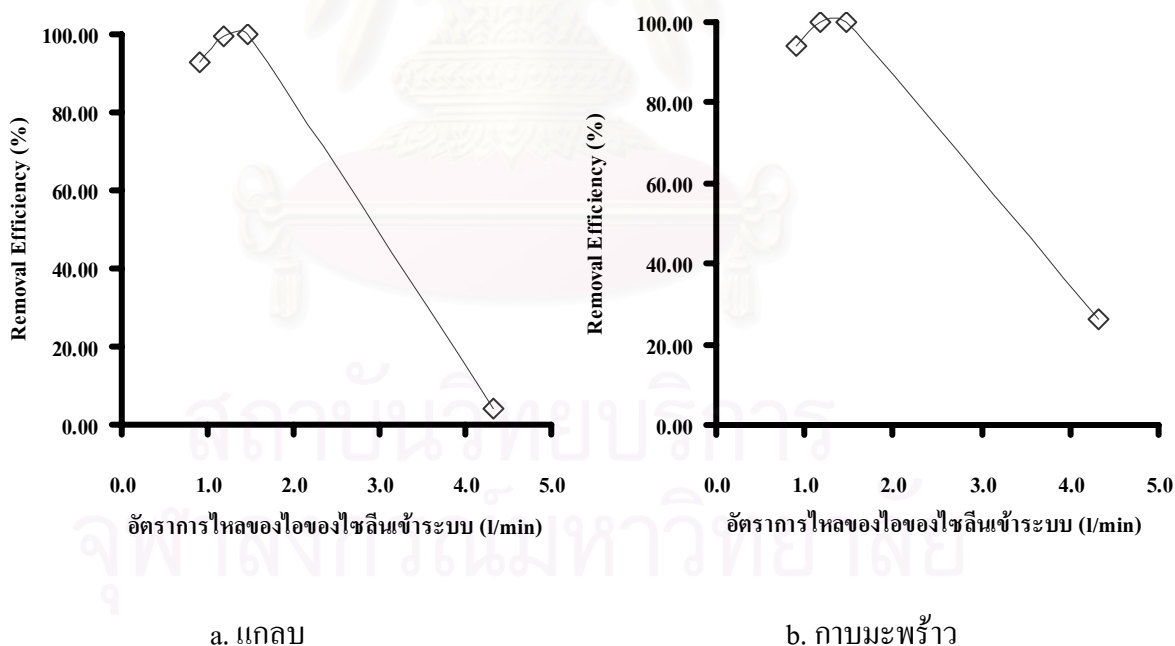
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าระบบกับประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกามมะพร้าวตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลอง

#### 4.2.9 อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบ

ที่ความเข้มข้นเท่า ๆ กัน เมื่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และสังเกตได้ในชุดการทดลองทั้งสอง

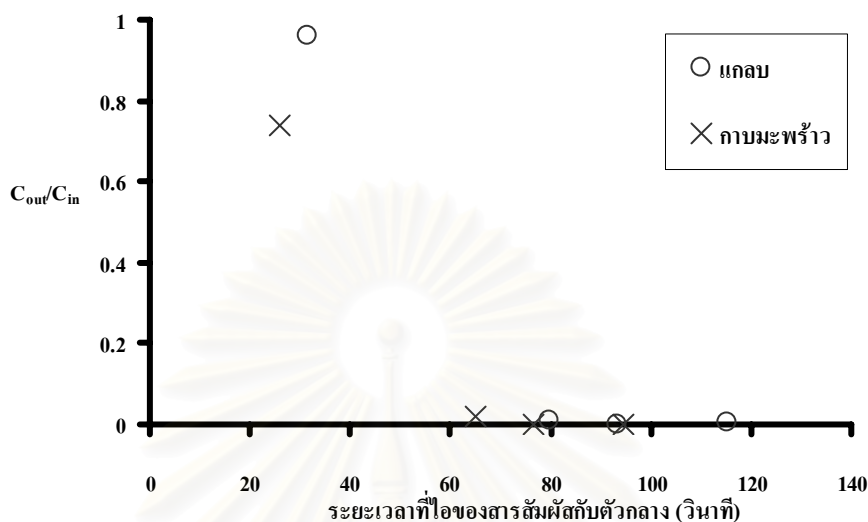
ในการทดลองนี้ การควบคุมความเข้มข้นของไอของไซลีนทำได้ยาก จึงได้คัดเลือกข้อมูลที่มีความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบมีค่าประมาณ  $0.435 \text{ g/m}^3$  (100 ppmv) มาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.7

การที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าต่ำทำให้ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่ามากขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นมาก จะทำให้ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่าน้อยลง สารมลพิษจึงผ่านอนุภาคตัวกลางไปอย่างรวดเร็วทำให้ไม่ถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ติดกับผิวของตัวกลาง สังเกตได้จากรูปที่ 4.7 ที่ความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบคงที่ เมื่ออัตราการไหลเข้าระบบมีค่า 1.5 l/min ระบบมีความสามารถบำบัดได้ถึง 100 % แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศเข้าที่ 4.3 l/min ความสามารถในการบำบัดของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว หรือแทบจะไม่บำบัดเลย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบกับประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นคงที่ (ประมาณ 100 ppmv)

เมื่อนำระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมาพิจารณาพบว่าระบบต้องการเวลาที่เพียงพอที่จะทำการบำบัดไอของไซลีนได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในชุดตัวกลางที่เป็นกลมและกากมะพร้าว

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่าน้อยจะทำให้ความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าเท่ากับความเข้มข้นของไอของไซลีนออกระบบ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าและความเข้มข้นของไอของไซลีนออกมีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือ ระบบไม่เกิดการบำบัดสารมลพิษ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลามากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าและความเข้มข้นของไอของไซลีนออกมีค่าน้อยลง จนถึงระยะเวลาหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่าระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์

จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการบำบัดอย่างสมบูรณ์ โดยในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกลมต้องการเวลาในการบำบัดอย่างสมบูรณ์ไม่น้อยกว่า 80 วินาที และชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกากมะพร้าวต้องการเวลาในการบำบัดอย่างสมบูรณ์ไม่น้อยกว่า 65 วินาที

#### 4.2.10 การบำบัดของระบบ

การบำบัดของระบบสามารถวัดได้จาก ประสิทธิภาพของระบบ (Removal Efficiency) และความสามารถในการบำบัดของระบบ (Elimination Capacity) ซึ่งวิธีการคำนวณได้จากภาคผนวก ง



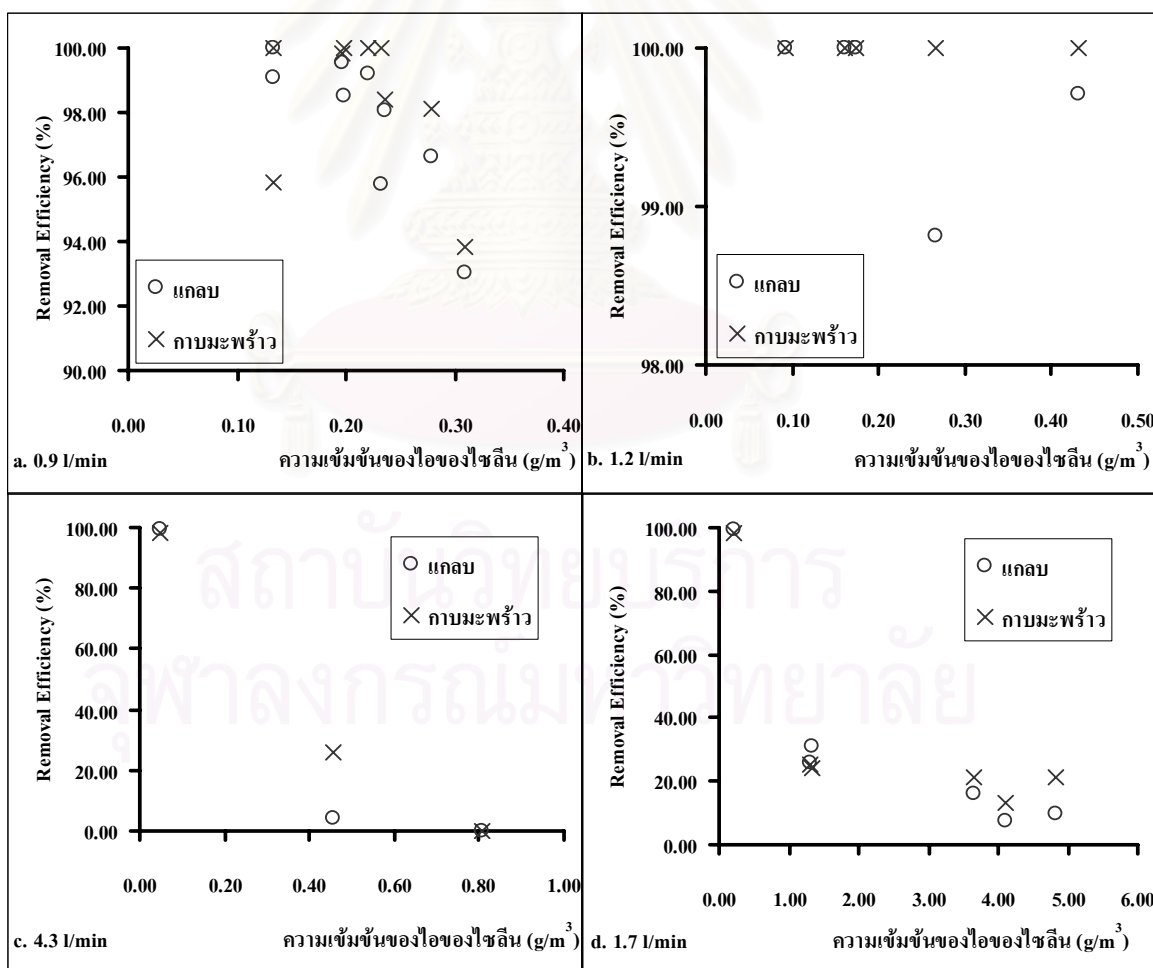
#### 4.2.10.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency)

ในการทดลองนี้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 0.9, 1.2, 1.5, 4.3, 2.4 และ 1.7 l/min แต่สามารถแสดงแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดที่ชัดเจนที่อัตราการไหลที่ 0.9, 1.2, 4.3 และ 1.7 l/min เท่านั้น

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบให้มีค่าสูงขึ้น ในชุดการทดลองที่ใช้เกลือและกามมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักพบว่าระบบมีประสิทธิภาพบำบัดได้ใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ในช่วงอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบ 0.9 – 1.7 l/min โดยที่ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 0.870 g/m<sup>3</sup> พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 92 – 100 %

ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเป็น 1.7 l/min โดยที่ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.870 – 5.220 g/m<sup>3</sup> พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7 – 30 %



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบค่าต่าง ๆ กัน

ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเป็นค่าที่ใช้วัดร้อยละความแตกต่างของความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าและออกระบบเบื้องต้น การที่ระบบจะทำงานได้ดีหรือไม่ดีต้องมีปัจจัยอื่นมาประกอบด้วย เช่น อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบ และความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบ มาพิจารณาด้วย ดังนั้นจึงควรมีการแสดงค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของระบบด้วย

#### 4.2.10.2 ความสามารถในการบำบัดของระบบ (Elimination Capacity)

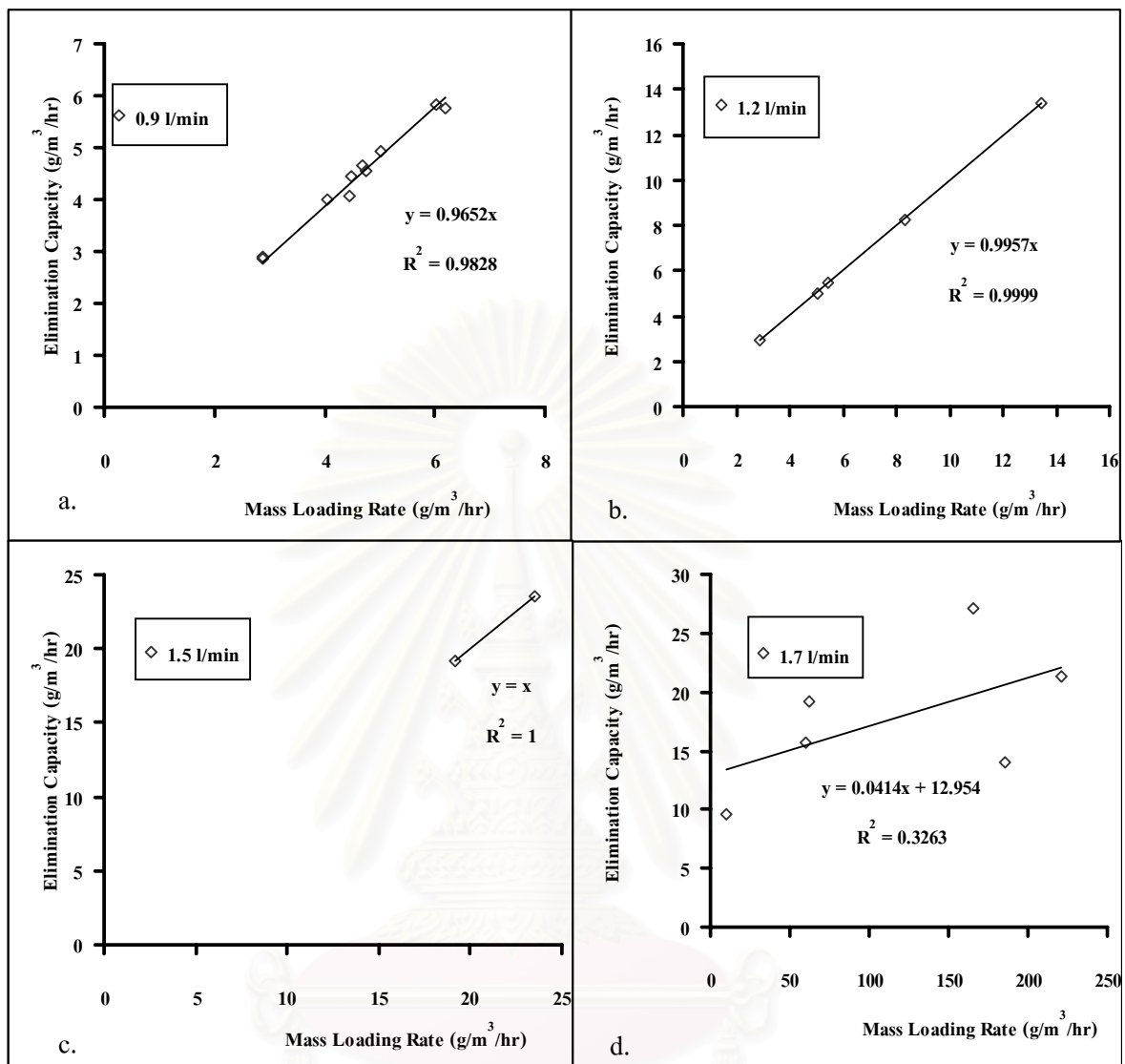
ความสามารถในการบำบัดของระบบ เป็นมวลของสารมลพิษที่ถูกกำจัดออกไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา ค่านี้สามารถนำมาเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีขนาดและอัตราการไหลต่างกัน

ในการทดลองนี้ได้แสดงความสามารถการบำบัดที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 0.9, 1.2, 1.5 และ 1.7 l/min เนื่องจากสามารถแสดงแนวโน้ม ได้ชัดเจนที่สุด

จากรูปที่ 4.10 เมื่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่า 0.9, 1.2 และ 1.5 l/min ปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบกับความสามารถในการบำบัดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยระบบสามารถบำบัดสารมลพิษได้คิดเป็นร้อยละ 98 - 100 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเป็น 1.7 l/min และเพิ่มปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบมากขึ้นที่ประมาณ  $60 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  แล้วทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง  $20 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  เท่านั้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารมลพิษสูงถึง  $200 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  ก็พบว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษก็ยังมีค่าอยู่ในช่วง  $20 - 27 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระบบมีขีดจำกัดในการบำบัดสารมลพิษนั่นเอง

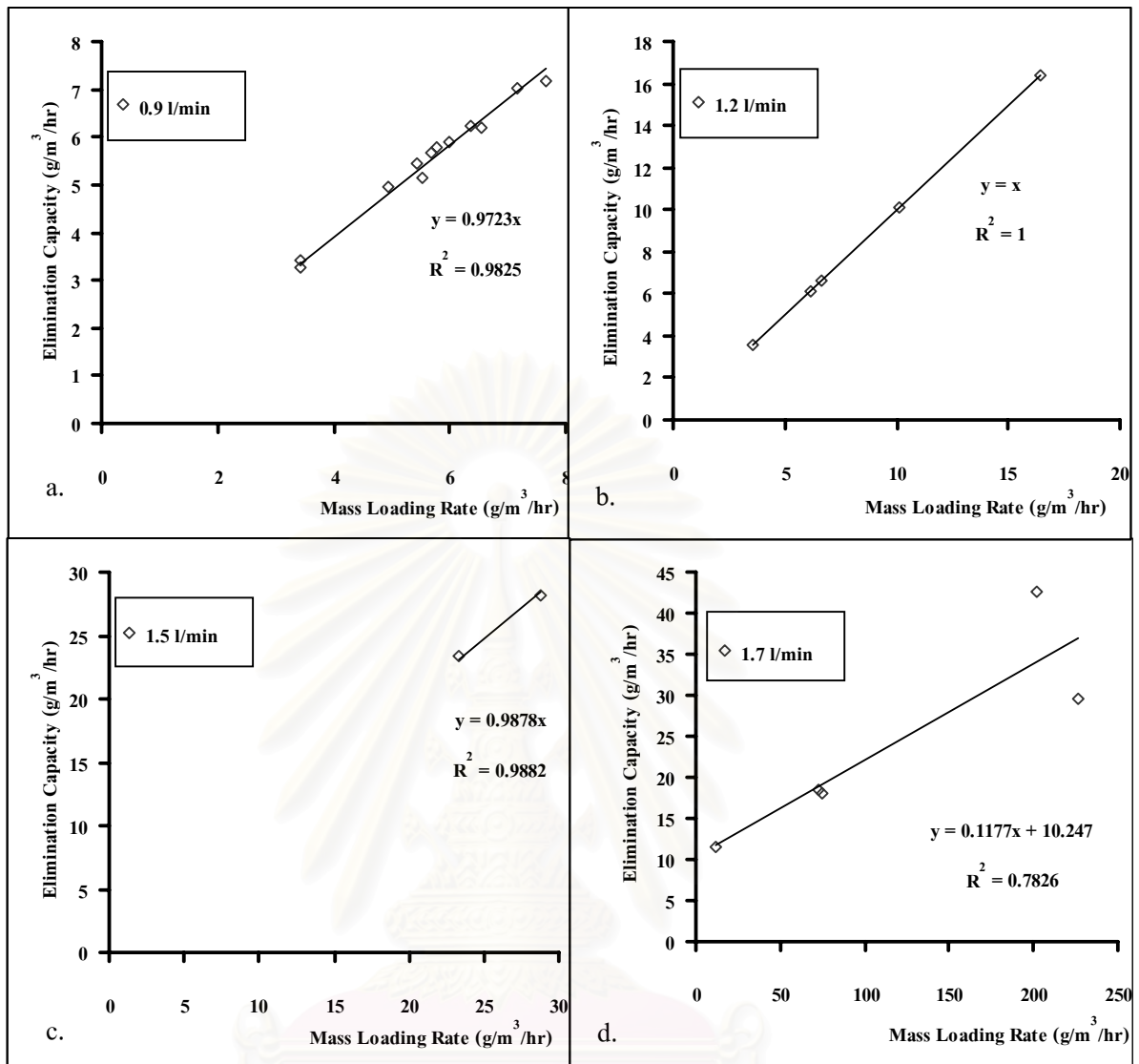
ในทำนองเดียวกันชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกามมะพร้าว ก็มีแนวโน้มของความสามารถในการบำบัดสารมลพิษคล้ายกับชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11 เมื่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่า 0.9 1.2 และ 1.5 l/min ปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบกับความสามารถในการบำบัดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเป็น 1.7 l/min และเพิ่มปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบมากขึ้นที่ประมาณ  $70 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง  $20 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  เท่านั้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารมลพิษสูงถึง  $200 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  ก็พบว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษก็ยังมีค่าอยู่ในช่วง  $30 - 45 \text{ g/m}^3/\text{hr}$



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบ ที่อัตราการไหลของไซลีนเข้าระบบต่าง ๆ กัน

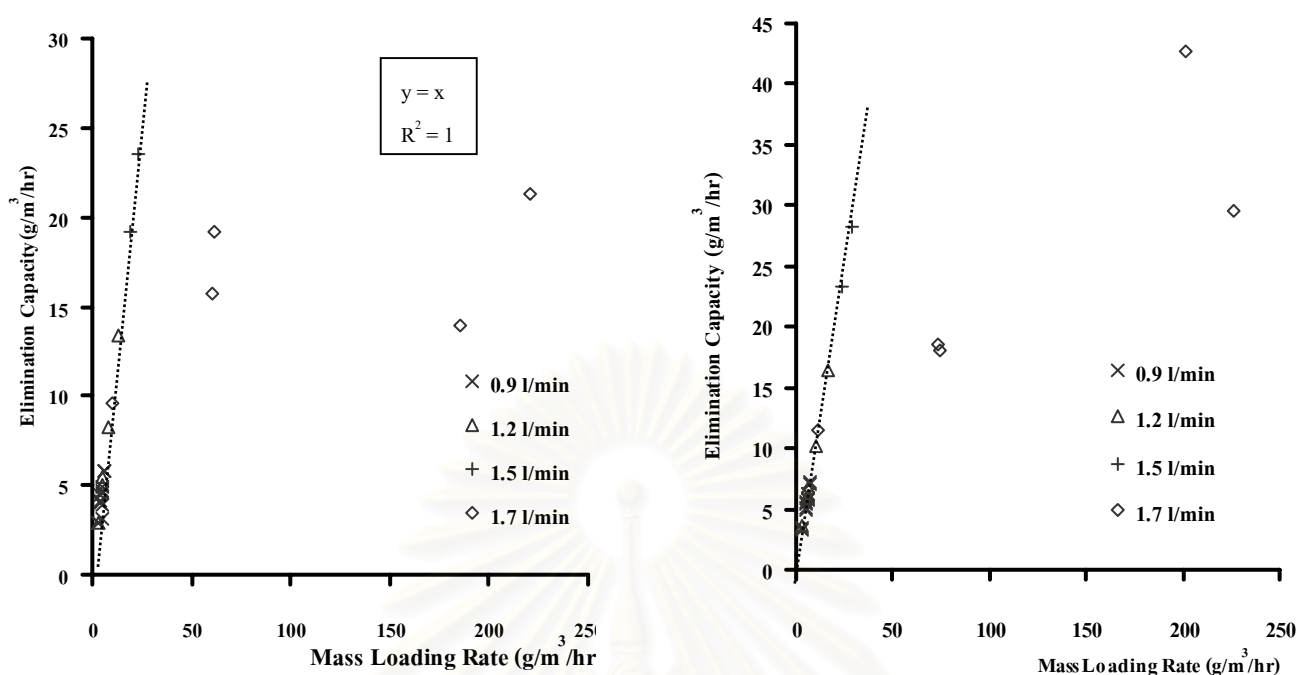
ตามปกติแล้วเมื่อมีปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ระบบจะมีความสามารถสูงสุดที่จะบำบัดสารมลพิษได้ (Maximum Elimination Capacity) ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 นั้น ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 0.9, 1.2 และ 1.5 l/min ปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบและความสามารถในการบำบัดสารมลพิษยังคงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 (Removal Efficiency ~ 100 %) และทั้งสามอัตราการไหลนี้ไม่ได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น ค่าปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบยังไม่มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็น กาบมะพร้าว ที่อัตราการไหลของไซลีนเข้าระบบต่าง ๆ กัน

ที่อัตราการไหล 1.7 l/min ในช่วงแรกที่ปริมาณสารมลพิษเข้าระบบต่ำ ระบบยังมีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษได้ดีอยู่ (Removal Efficiency ~ 100 %) แต่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบสูงมากขึ้น ทำให้ปริมาณสารมลพิษที่เข้าระบบมีค่ามากขึ้น และทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ โดยความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง (Removal Efficiency ต่ำลงมากและค่า  $R^2$  ไม่ใกล้เคียง 1) โดยความสามารถในการบำบัดสารมลพิษมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่

เมื่อนำค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษที่อัตราการไหลต่าง ๆ มาไว้ในกราฟเดียวกันแล้วจะเป็นดังรูปที่ 4.12



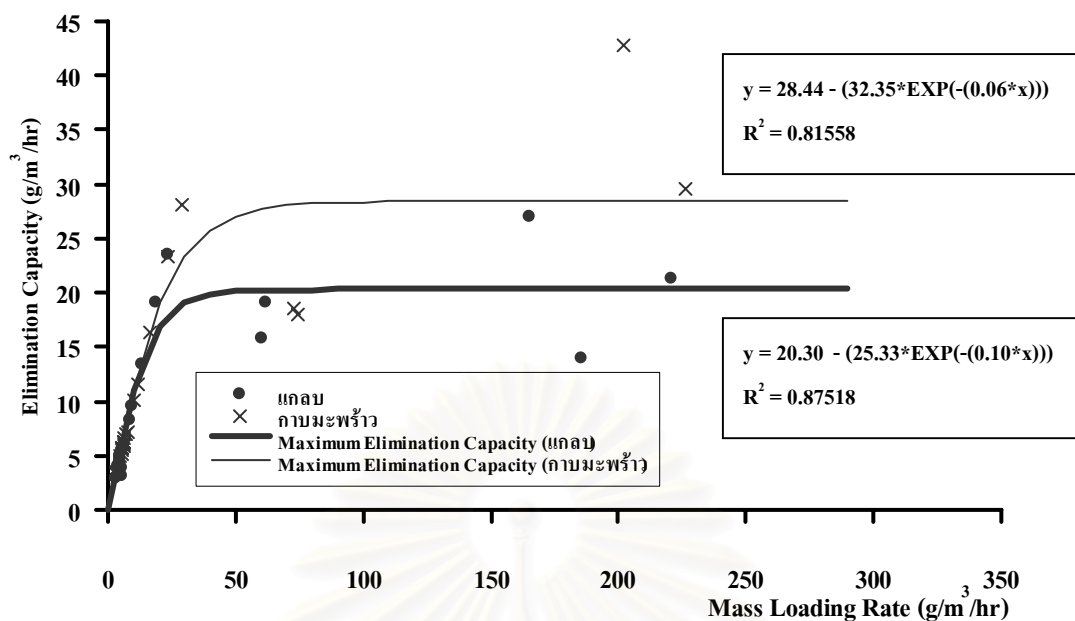
a. แกลบ

b. กาบมะพร้าว

รูปที่ 4.12 ปริมาณไซลินที่เข้าระบบกับความสามารถในการบำบัดไอของไซลินที่อัตราการไหลของไซลินเข้าระบบต่าง ๆ กัน

สังเกตได้ว่าที่อัตราการไหล 0.9, 1.2 และ 1.5 l/min นั้น ความสามารถในการบำบัดของระบบมีค่าใกล้เคียงกับเส้นแนวโน้มที่  $R^2 = 1$  โดยในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวมีค่ามากที่สุดที่อยู่ในช่วงเส้นตรงคือ 23 g/m<sup>3</sup>/hr และ 28 g/m<sup>3</sup>/hr ตามลำดับ แต่ที่อัตราการไหล 1.7 l/min ค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษนั้นมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นแนวโน้มเดิม จึงสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของไซลินเข้าระบบมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5 l/min และปริมาณของสารมลพิษเข้าระบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 23 และ 28 g/m<sup>3</sup>/hr ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว ตามลำดับจะทำให้ระบบสามารถบำบัดสารมลพิษได้ใกล้เคียง 100 % และเมื่อมองภาพโดยรวมของกราฟพบว่าเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 4.13 เป็นการใช้นิพจน์ Nonlinear Regression Analysis มาใช้กับข้อมูลของชุดการทดลองทั้งสองพบว่าในชุดการทดลองที่ใช้แกลบเป็นตัวกลางหลัก ความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษมีค่าประมาณ 20.30 g/m<sup>3</sup>/hr และชุดการทดลองที่ใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลัก ความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษมีค่าประมาณ 28.44 g/m<sup>3</sup>/hr (ดังแสดงการวิเคราะห์ค่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษในภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของไซลินในชุดการทดลองที่ใช้ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว

### 4.3 ปริมาณจุลินทรีย์

ผลการนับปริมาณจุลินทรีย์ในวันที่ 121 ของการเดินระบบซึ่งได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของไซลินเข้าระบบสูงแล้ว พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณจุลินทรีย์ในชุดการทดลองตัวกลางที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวมีค่า  $2.2 \times 10^8$  และ  $1.5 \times 10^8$  CFU/g ตามลำดับ ถือว่าเป็น ปริมาณจุลินทรีย์ที่พบในเครื่องกรองชีวภาพปกติทั่วไป

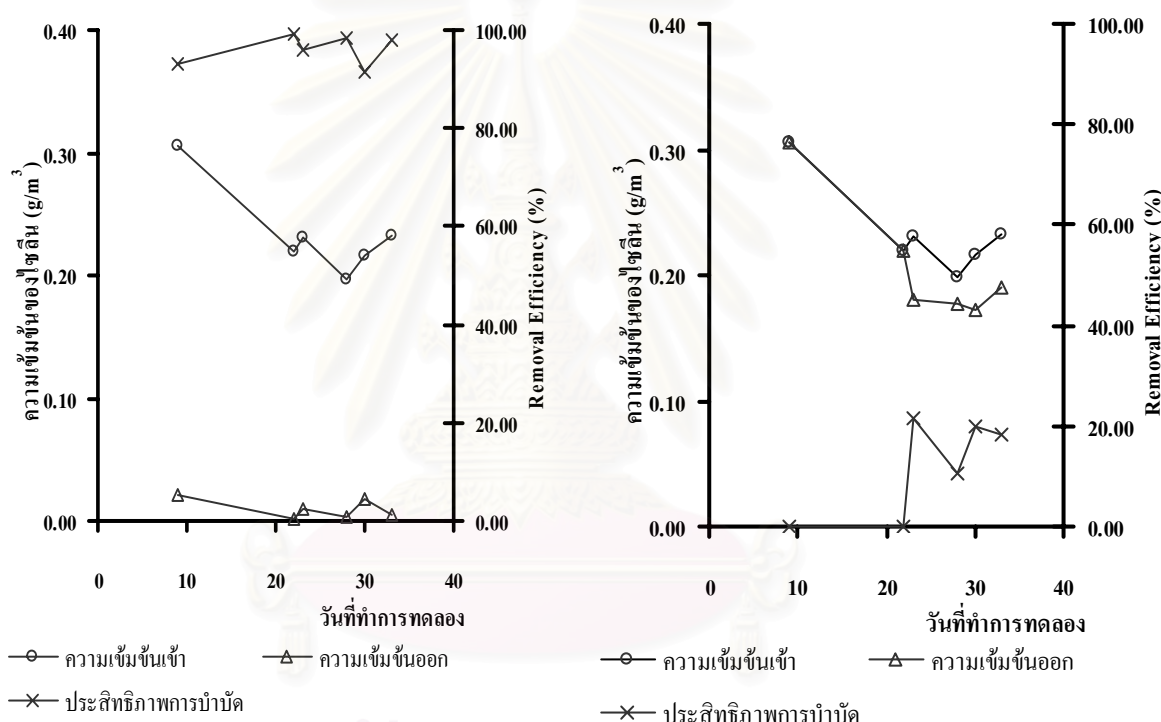
### 4.4 การเปรียบเทียบการบำบัดของระบบ

#### 4.4.1 การบำบัดของชุดการทดลองที่ 1 และ 2

จากการนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดสารมลพิษในชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งตัวกลางหลักเป็นแกลบและชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวมาเปรียบเทียบกันโดยใช้สถิติ t - test พบว่า ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบ มีค่าไม่แตกต่างจากความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่มีตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p = 0.138$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดังแสดงผลในภาคผนวก จ)

#### 4.4.2 การบำบัดของชุดการทดลองที่ 1 และ 3

การทดลองนี้ได้จัดทำชุดควบคุมขึ้นมาสองชุดคือชุดที่ 3 และ 4 ซึ่งทั้งสองชุดนี้ไม่ได้ผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกลงไปด้วยเพื่อทำการเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกในระบบ เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกที่ใส่ไปในระบบ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ระบบเกิดการบำบัดไอของไซลีน ชุดการทดลองที่ 1 และ 3 มีความแตกต่างกันด้านองค์ประกอบของตัวกลางคือชุดการทดลองที่ 3 นั้นไม่ได้เติมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียลงไป มีแต่ตัวกลางหลักคือแกลบ เพียงอย่างเดียว จึงทำให้ไม่เกิดการบำบัดซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน



a. แกลบผสมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย      b. แกลบ (ชุดควบคุม)

**รูปที่ 4.14** ประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นที่เข้าและออกระบบ ในชุดการทดลองที่มีแกลบผสมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและชุดการทดลองควบคุม

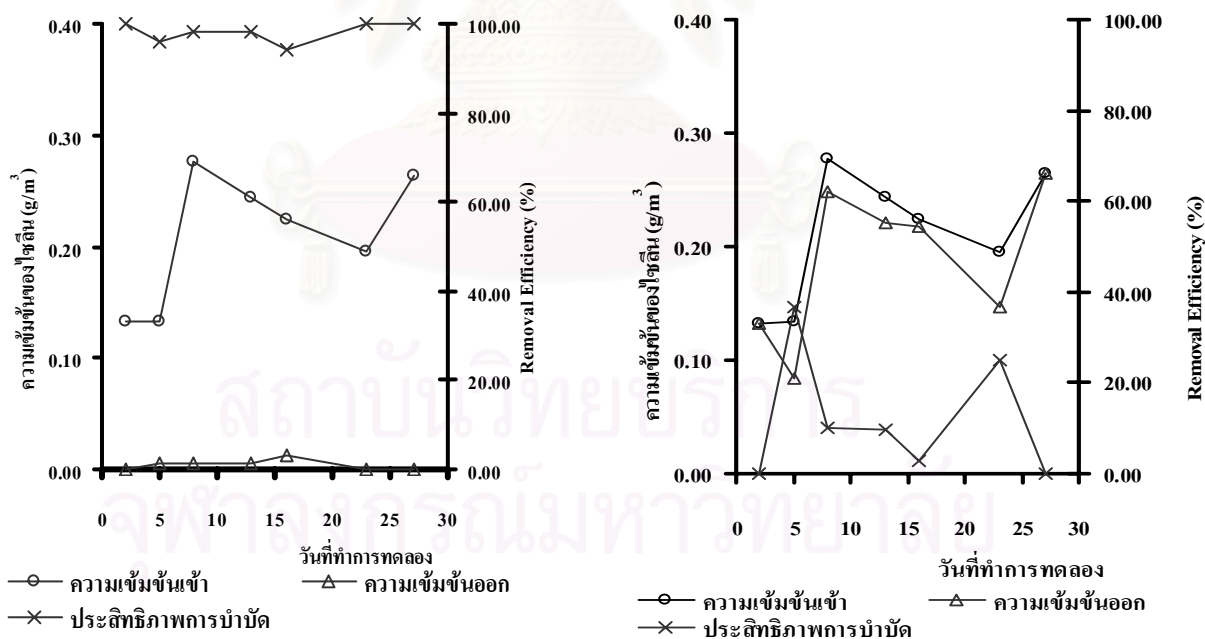
เมื่อพิจารณา ความเข้มข้นที่ออกระบบ ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบ (รูปที่ 4.14a) พบว่ามีค่าน้อยมากหรือบำบัดได้เกือบทั้งหมด โดยประสิทธิภาพการบำบัดดูได้จาก Removal Efficiency มีค่าระหว่าง 95-100 % ส่วนในชุดการทดลองควบคุม (รูปที่ 4.14b) นั้น ความเข้มข้นเข้าระบบและออกระบบมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดได้จาก Removal Efficiency แล้วมีค่าระหว่าง 0 – 20 % ซึ่งมีค่าต่ำมาก และจากการนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของความ

สามารถในการกำจัดสารมลพิษในชุดการทดลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกันโดยใช้สถิติ t - test พบว่า ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่แลกเปลี่ยนเป็นตัวกลางหลักมีค่ามากกว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p = 0$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดังแสดงในภาคผนวก จ)

#### 4.4.3 การบำบัดของชุดการทดลองที่ 2 และ 4

ชุดการทดลองที่ 2 และ 4 มีความแตกต่างกันด้านองค์ประกอบของตัวกลางคือชุดการทดลองที่ 4 นั้นไม่ได้เติมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียลงไป มีเพียงตัวกลางคือ กาบมะพร้าวเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ไม่เกิดการบำบัดซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณา ความเข้มข้นที่ออกระบบ ในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าว สังเกตว่ามีค่าน้อยมากหรือบำบัดได้เกือบทั้งหมด โดยประสิทธิภาพการบำบัดได้จาก Removal Efficiency มีค่าระหว่าง 95 - 100 % ส่วนในชุดการทดลองควบคุมนั้น ความเข้มข้นเข้าระบบและออกระบบมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดได้จาก Removal Efficiency แล้วมีค่าระหว่าง 0 - 40 % ซึ่งมิต่ำมาก



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นที่เข้าและออกระบบ ในชุดการทดลองที่มีกาบมะพร้าวผสมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและชุดการทดลองควบคุม

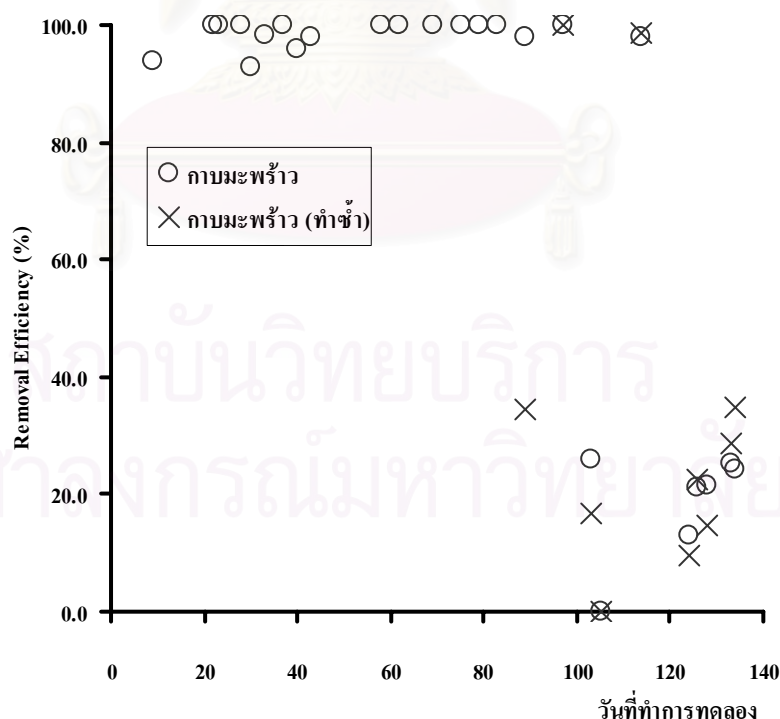


และจากการนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดสารมลพิษในชุดการทดลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกันโดยใช้สถิติ t - test พบว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักมีค่ามากกว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p = 0$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย และปุ๋ยคอก เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดการบำบัดไอของไซลีนจริง ซึ่งตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย เป็นแหล่งให้กำเนิดจุลินทรีย์ในระบบ และปุ๋ยคอก เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์นั่นเอง

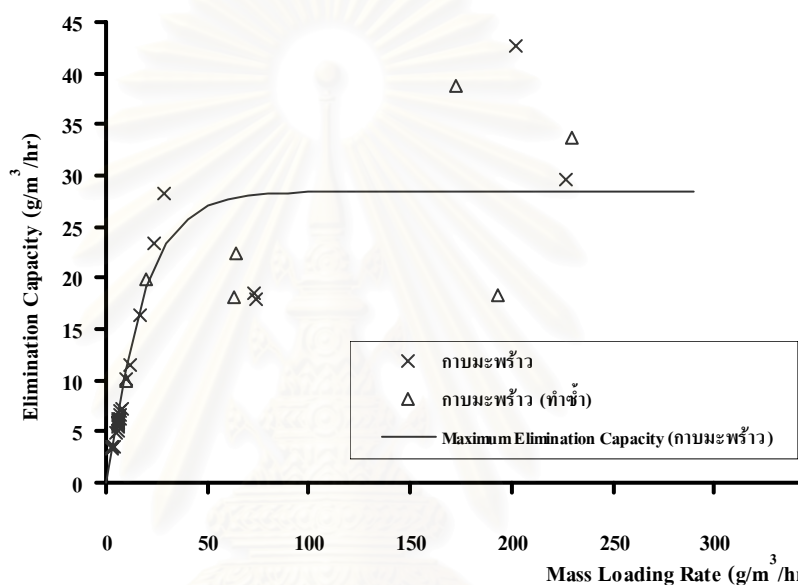
#### 4.4.4 การบำบัดของชุดการทดลองที่ 2 และ 5

ชุดการทดลองที่ 5 สร้างขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการทำงานของชุดการทดลองที่ 2 โดยชุดการทดลองที่ 5 มีองค์ประกอบเหมือนกันทุกประการกับชุดการทดลองที่ 2 คือเป็นตัวกลางผสมระหว่างกาบมะพร้าวผสมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเพียงแต่ทำการเดินระบบช้ากว่า (ทำการทดลองช้า) ในวันที่เดินระบบวันแรกของชุดการทดลองที่ 5 เป็นวันที่ 84 ของการทดลองในชุดที่ 2 เมื่อพิจารณาเทียบกันแล้วพบว่าชุดการทดลองที่ 5 มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันกับชุดการทดลองที่ 2 มาก



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 2 และ 5)

ในวันที่ 19 ม.ค. 47 ที่ความเข้มข้นเข้าระบบเท่ากันในชุดการทดลองที่ 5 เป็นวันที่ 6 ของการเดินระบบพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 35% ส่วนในชุดการทดลองที่ 2 เป็นวันที่ 89 ของการเดินระบบพบว่าบำบัดได้ 97.97 % ทั้งนี้เพราะชุดการทดลองที่ 5 เป็นช่วงเริ่มเดินระบบจุลินทรีย์ยังทำงานได้ไม่เต็มที่ การบำบัดจึงยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อวันที่ 27 ม.ค. 47 (วันที่ 14 ของการเดินระบบในชุดการทดลองที่ 5) ประสิทธิภาพการบำบัดได้เพิ่มขึ้นเป็น 100 % และหลังจากนั้นระบบก็สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชุดการทำงานที่ 2 (รูปที่ 4.16)



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองที่ใช้ตัวกลางหลักเป็นกามมะพร้าว (ชุดการทดลองที่ 2 และ 5)

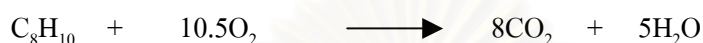
จากรูปที่ 4.17 จากการสังเกตพบว่าแนวโน้มของความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนของชุดการทดลองที่กามมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักทั้งในชุดที่ทำการทดลองก่อนและชุดที่ทำซ้ำพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

และจากการนำข้อมูลค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดสารมลพิษในชุดการทดลองที่ใช้กามมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักระหว่างชุดที่ทำการทดลองก่อน (ชุดที่ 2) และชุดที่ทำซ้ำ (ชุดที่ 5) มาเปรียบเทียบกันโดยใช้สถิติ t - test พบว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันกับความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญ ( $p = 0.369$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

Jorio et al. [20] รายงานว่าเมื่อไซลีนเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเท่านั้น ซึ่งจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้



แต่ในแง่ของการย่อยสลายทางชีววิทยาของสารประกอบอินทรีย์แล้ว จุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนอินทรีย์ส่วนหนึ่งในการเจริญเติบโตซึ่งเป็นไปตามสมการ



ซึ่งในเครื่องกรองชีวภาพทั่วไปจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการข้างต้นเนื่องจากการบำบัดในระบบเครื่องกรองชีวภาพใช้หลักการการทำงานของจุลินทรีย์

จากผลการทดลองบำบัดไอของไซลีน โดยเครื่องกรองชีวภาพ โดยตัวกลางหลักที่ใช้เป็นแกลบและกาบมะพร้าว โดยมีการผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกลงไปเพื่อเป็นแหล่งจุลินทรีย์และแหล่งอาหารของจุลินทรีย์นั้น พบว่าเครื่องกรองชีวภาพสามารถบำบัดไอของไซลีนได้จริง พิสูจน์ได้จากทำชุดการทดลองควบคุมขึ้นมา 2 ชุด แต่ละชุดทำการทดลองเทียบกับแกลบผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอก และกาบมะพร้าวผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอก โดยในชุดการทดลองควบคุมนั้นไม่มีการเติมปุ๋ยคอกและตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียลงไป ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนมีค่าต่ำมากเนื่องจากไม่เกิดการบำบัดไอของไซลีนในชุดการทดลองควบคุมทั้งสอง

และเมื่อมีการนำค่าเฉลี่ยของความสามารถในการบำบัดไซลีนของชุดทดลองและชุดควบคุมที่เป็นตัวกลางหลักเป็นแกลบไปทดสอบโดยสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ผลปรากฏว่าค่าเฉลี่ยของความสามารถในการบำบัดไซลีนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และให้ผลเช่นเดียวกันเมื่อนำค่าเฉลี่ยของความสามารถในการบำบัดไซลีนของชุดทดลองและชุดควบคุมที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวไปทดสอบโดยสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ยังมีข้อมูลที่ชี้ให้เห็นได้อย่างชัดเจนอีกว่าการบำบัดเกิดจากจุลินทรีย์ในระบบจริงโดยพิจารณาจากชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกทั้งสองชุด แต่ทั้งสองชุดนี้ทำการทดลองที่ระยะเวลาต่างกันโดย ในวันที่ 19 ม.ค. 47 ได้ทำการเดินระบบที่ความเข้มข้นเข้าระบบเท่ากันในชุดการทดลองที่ 5 (ทำการทดลองซ้ำ) เป็นวันที่ 6 ของการเดินระบบพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 35% ส่วนในชุดการทดลองที่ 2 (ทำการทดลองก่อน) เป็นวันที่ 89 ของการเดินระบบพบว่าบำบัดได้ 97.97 % ทั้งนี้เพราะชุดการทดลองที่ 5 เป็นช่วงเริ่มเดินระบบจุลินทรีย์ยังทำงานได้ไม่เต็มที่ การบำบัดจึงยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่หลังจากนั้นชุดการทดลองที่ 5 ก็มีประสิทธิภาพการกำจัดได้ดีเท่า ๆ กับชุดการทดลองที่ 2 ตลอดการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าการผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียและปุ๋ยคอกสามารถทำให้เกิดการบำบัดไอของไซลินได้ในเครื่องกรองชีวภาพ

และจากการพิจารณาข้อมูลของทั้งสองชุดการทดลองแล้วจะพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงวันที่ 7 ถึงวันที่ 9 ของการเดินระบบโดยทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าประมาณ 90%

จากข้อมูลการนับปริมาณจุลินทรีย์ชี้ให้เห็นว่าในช่วงที่มีความเข้มข้นของไซลินเข้าระบบสูงมากยังมีจุลินทรีย์ทำงานอยู่ โดยในชุดการทดลองตัวกลางที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวมีค่า  $2.2 \times 10^8$  และ  $1.5 \times 10^8$  CFU/g ตามลำดับ

ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์ที่นับได้นั้นมีความใกล้เคียงกับงานของ Jorio et al. [20] ที่ได้ทำการนับปริมาณจุลินทรีย์และมีค่าระหว่าง  $10^8 - 10^{10}$  CFU/g และจากรายงานของ Devanny, Deshusses and Webster [4] กล่าวว่าในเครื่องกรองชีวภาพทั่วไปจะพบปริมาณแบคทีเรียอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^8 - 10^{10}$  CFU/g และปริมาณราอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^3 - 10^6$  CFU/g

## 5.1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

### 5.1.1 อุณหภูมิ

ในเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปอุณหภูมิของไอของสารที่ออกจากระบบควรจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของไอของสารเข้าระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกรองชีวภาพเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายทางชีววิทยาซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พลังงานความร้อนจึงถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม มีผลทำให้ไอของสารที่ออกจากระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น

และจากรายงานการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของระบบมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของระบบที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์จะทำให้ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงกลับทำให้ความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนได้ลดลง [20] แต่จากงานวิจัยอื่นในการบำบัดโพลูอินและเบนซินที่  $40 - 50^{\circ}\text{C}$  พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  [11] จึงสรุปว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัดไอของสารแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบนั้นต่างชนิดกัน และช่วงที่อุณหภูมิที่จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีจะมีค่าต่างกันด้วย

จากผลการวัดอุณหภูมิของไอของไซลีนพบว่าไม่เห็นค่าความแตกต่างของไอของไซลีนที่เข้าระบบและออกจากระบบอย่างชัดเจน ทั้งในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกามมะพร้าว โดยอุณหภูมิที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้นไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C}$  โดยเฉลี่ย เนื่องจากเครื่องกรองชีวภาพที่ทำการทดลองเป็นระบบเล็ก ปริมาตรตัวกลางไม่มากพอที่จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างชัดเจน และการทดลองนี้ไม่สามารถชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการบำบัดไอของไซลีนที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนช่วงอุณหภูมิได้ แต่สามารถสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิเข้าระบบที่เป็นอุณหภูมিবรรยากาศปกติ ( $25-35^{\circ}\text{C}$ ) เป็นช่วงอุณหภูมิที่จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพสามารถย่อยสลายไอของไซลีนได้

### 5.1.2 ความชื้น

ความชื้นของตัวกลางเป็นปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดในเครื่องกรองชีวภาพถ้าความชื้นของตัวกลางต่ำเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถบำบัดสารมลพิษได้ แต่ถ้าความชื้นของตัวกลางมีค่าสูงเกินไปจะทำให้อนุภาคของน้ำเกิดการขังอยู่ในตัวกลางหรือ ช่องระหว่างอนุภาคตัวกลางซึ่งเป็นการขัดขวางการไหลของอากาศผ่านตัวกลาง เป็นผลให้เกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นและทำให้เกิดกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ไม่เกิดการบำบัดสารมลพิษ และเกิดกลิ่นเหม็น ในด้านความชื้นของตัวกลางนั้นพบว่าความชื้นของตัวกลางมีค่าลดลงในแต่ละวันสังเกตได้จากน้ำหนักของชุดการทดลองทั้งสองที่ลดลง และสังเกตได้ว่าความชื้นที่เข้าระบบมีค่าต่ำกว่าความชื้นที่ออกจากระบบ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ได้มีการให้ความชื้นกับไอของไซลีนที่เข้าระบบ เมื่อไอของสารที่มีความชื้นที่เข้าระบบน้อย (ความชื้นของบรรยากาศประมาณ 50 - 65 %) ผ่านตัวกลางที่มีความชื้นมากกว่า (ประมาณ 60 %) ก็จะทำให้เกิดการพัดพาความชื้นที่อยู่ในตัวกลางออกมาด้วย เป็นผลให้ความชื้นที่ออกจากระบบมีค่าสูงกว่าความชื้นเข้าระบบ จะทำให้เกิดการแห้งของตัวกลางอีกด้วย และการแห้งของตัวกลางก็จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลง เนื่องจาก

ความชื้นที่ลดลงหมายถึงปริมาณน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางลดลง จะเป็นการลดการดูดซับเบื้องต้นของ สารมลพิษกับน้ำ เมื่อปริมาณสารมลพิษถูกดูดซับได้ลดลง จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่เฟสน้ำที่อยู่บนผิวของ ตัวกลางก็จะบำบัดสารมลพิษได้น้อยลงด้วย

ในเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปจึงมีการให้ความชื้นของอากาศเข้าระบบมีค่าตั้งแต่ 95 – 99 % เพื่อเป็นการควบคุมความชื้นของตัวกลาง แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะรักษาความชื้นของตัวกลางให้ คงที่ตลอดการทดลองได้จึงต้องมีการเติมน้ำให้ตัวกลางโดยตรงด้วย

จากการสังเกตลักษณะของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพที่ความสูงตัวกลางต่างกัน พบว่า ความชื้นของตัวกลางใกล้กับจุดเข้าระบบจะมีค่าน้อยกว่าความชื้นของตัวกลางที่อยู่ไกลจากจุดเข้า ระบบ ในการทดลองนี้ทำการควบคุมความชื้นในตัวกลางให้มีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 60% ทำได้โดยใช้ สมมติฐานที่ว่าน้ำหนักตัวกลางที่ลดลงเกิดจากการระเหยของน้ำเป็นหลัก และจะทำการเติมน้ำลงใน ตัวกลางโดยตรงเพื่อควบคุมน้ำหนักของตัวกลางให้คงที่ตลอดการทดลอง [16]

จากผลการบำบัดพบว่าตัวกลางที่เป็นแกลบและกาบมะพร้าวที่มีความชื้น 60 % มีความ เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ในเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไอของไซลีนได้ แต่ในเครื่อง กรองชีวภาพที่ใช้ในการบำบัดสารชนิดอื่นโดยใช้ตัวกลางชนิดอื่นนั้นต้องมีการพิจารณา ระดับ ความชื้นที่เหมาะสมใหม่เนื่องจากตัวกลางต่างชนิดกันก็จะมีระดับความชื้นที่เหมาะสมในการบำบัด ต่างกัน

### 5.1.3 pH

จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษได้ดีในช่วง pH ที่ต่างกัน เครื่องกรองชีวภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงของช่วง pH ก็จะมีผลต่อจำนวนและการย่อยสลายสารมล พืชของจุลินทรีย์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัด วิธีแก้ปัญหาคือควรมีการเติมสาร ที่เป็นบัฟเฟอร์ลงไปในตัวกลาง เช่น ปูนขาว เป็นต้น จากการทดลองวัด pH ในทุกสัปดาห์พบว่าค่า pH มีค่าเท่ากับ 7 ตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลอง แสดงว่าจุลินทรีย์ที่บำบัดไอเสียของไซลีน สามารถดำรงชีพได้ที่สภาวะ pH เท่ากับ 7 ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่าช่วง pH ของเครื่องกรองชีวภาพที่ ทำการทดลองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง  $7.0 \pm 0.5$

### 5.1.4 ปริมาณสารอาหารในตัวกลาง

จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพใช้สารมลพิษเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน เครื่องกรองชีวภาพจะมีความสามารถในการบำบัดได้ดี ต้องมีปริมาณสารอาหารเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์นำไปใช้งานได้ ตัวกลางอินทรีย์ เช่น ปุ๋ย เป็นแหล่งสารอาหารที่มีประโยชน์สำหรับจุลินทรีย์ [4] เนื่องจากมีสารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการครบถ้วน แต่ตัวกลางอนินทรีย์ เช่น ถ่านกัมมันต์ เม็ดพลาสติก ไม่มีแหล่งอาหารให้จุลินทรีย์จึงต้องมีการเติมสารอาหารให้เครื่องกรองชีวภาพ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นปุ๋ยที่มีไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม ลงไปในน้ำที่จะป้อนให้กับระบบ และในการทดลองนี้ได้ใช้ปุ๋ยคอกเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในตัวกลาง ซึ่งมีอัตราส่วน Total N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O มีค่าเท่ากับ 1.51 : 1.32 : 1.66 โดยปกติแล้วเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางเป็นปุ๋ยหมักมีการเติมไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.4, 0.15 และ 0.15 % โดยน้ำหนัก ถือว่าเป็นค่าที่เพียงพอ

### 5.1.5 ความดันลด

พบว่าความดันลดที่จุด AC มีค่ามากกว่าจุด AB ในทั้งสองชุดการทดลองและตัวกลางหลักที่เป็นแกลบจะมีแนวโน้มในการทำให้เกิดความดันลดมากกว่าตัวกลางหลักเป็นกาบมะพร้าวซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วงที่เพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบสูง ๆ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกาบมะพร้าวที่เป็นเส้นใยมากกว่า มีความโปร่งมากกว่าทำให้อากาศสามารถไหลผ่านได้ดีกว่าแกลบ ในช่วงที่เพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 4.3 ลิตรต่อนาทีนั้น ค่าความดันลดของชุดการทดลองทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความดันลดที่เพิ่มขึ้นหมายถึงเกิดการต้านทานการไหลของอากาศผ่านระบบมากขึ้น ทำให้ปริมาณอากาศที่ไหลผ่านระบบมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง [4]

จากข้อมูลของ Devinny, Deshusses and Webster [4] กล่าวว่าสภาวะการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปนั้นความดันลดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 – 1.0 cm H<sub>2</sub>O ต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร ในการทดลองนี้จึงได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 0.9, 1.2 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากทำให้เกิดความดันลดในระบบไม่มากเกินไปเกิน 4.0 mm H<sub>2</sub>O ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมากและไม่มีผลต่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบ และเมื่อพิจารณาความดันลดที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงวันที่ 134 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการเดินระบบแล้วพบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน แม้ว่าในชุดการทดลองที่เป็นแกลบและกาบมะพร้าวจะมีความสูงของตัวกลางลดลง 18.57 % และ 16.37 % ตามลำดับ ซึ่งความสูงของตัวกลางที่ลดลงนี้แสดงถึงการยุบตัว

ของตัวกลางทำให้ตัวกลางเกิดการอัดตัวเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดที่ไม่เพิ่มขึ้นนี้สามารถบอกได้ว่าตัวกลางในระบบไม่เกิดการอัดตัวเพิ่มขึ้นมาก ตัวกลางยังสามารถใช้งานต่อไป แต่ถ้าค่าความดันลดเพิ่มขึ้นสูงมากทั้งที่อัตราการไหลของไอของไซลีนในระบบยังมีค่าคงที่เท่าเดิม หมายถึงเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ในระบบทำให้เกิดการอัดตัวของไบโอแมส อาจจะต้องมีการพิจารณาเปลี่ยนตัวกลาง และตัวกลางที่มีความชื้นมากเกินไปก็สามารถทำให้เกิดค่าความดันลดสูงขึ้นได้เช่นกัน จึงควรมีการตรวจสอบค่าความดันลดของตัวกลางอย่างสม่ำเสมอ

จากการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบจะทำให้ความดันลดของเครื่องกรองชีวภาพมีค่าสูงขึ้น อัตราการไหลของไอของไซลีนที่ใช้ในการทดลองไม่ได้ทำให้เกิดความดันลดที่สูงเกินไปในระบบ และถึงแม้ว่าเกิดการยุบตัวของตัวกลางเนื่องจากเวลาผ่านไปและเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ ก็ไม่ได้ทำให้ความดันลดสูงขึ้นจากเดิมมากนัก ดังนั้น ถ้าพิจารณาในแง่ของความดันลดเพียงอย่างเดียวแล้วกามะพร้าวและแกลบเป็นตัวกลางที่สามารถนำมาใช้ในเครื่องกรองอากาศชีวภาพที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าชุดการทดลองแต่ละชุดที่ 0.9, 1.2 และ 1.5 ลิตรต่อนาทีได้เป็นอย่างดี โดยกามะพร้าวจะทำให้เกิดความดันลดน้อยกว่าแกลบ และมีการยุบตัวน้อยกว่าแกลบ

#### 5.1.6 ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง (Empty Bed Residence Time)

##### และอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ

อัตราการไหลของไอของไซลีนที่เข้าระบบมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง ในเครื่องกรองชีวภาพที่มีปริมาตรคงที่นั้น เมื่ออัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าสูงหมายถึงระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่าน้อย ที่ความเข้มข้นคงที่ พบว่าที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบต่ำจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไซลีนได้ดีกว่าที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบสูง เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดของเครื่องกรองชีวภาพถูกควบคุมด้วย mass transfer rate ของสารมลพิษสู่ไบโอฟิล์ม ซึ่งขึ้นกับระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางโดยตรง ดังนั้นที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบสูง จึงทำให้ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่าน้อย สารมลพิษจึงไม่สามารถเข้าถึงพื้นผิวระหว่างอากาศและไบโอฟิล์มได้ทัน

จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของไซลีนประมาณ 100 ppmv นั้นเครื่องกรองชีวภาพที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบ ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 1.5 ลิตรต่อนาที คิดเป็นระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 94 วินาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดไอของ



ไซลีนได้เท่ากับ 100 % แต่ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 4.3 ลิตรต่อนาที คิดเป็นระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 32 วินาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนได้เท่ากับ 4 % เท่านั้น

เครื่องกรองชีวภาพที่ตัวกลางหลักเป็นกามมะพร้าว ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 1.5 ลิตรต่อนาที คิดเป็นระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 77 วินาทีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนได้เท่ากับ 100 % แต่ที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 4.3 ลิตรต่อนาที คิดเป็นระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางเท่ากับ 26 วินาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไอของไซลีนได้เท่ากับ 25.99 % เท่านั้น

### 5.1.7 ความเข้มข้นที่เข้าระบบ

เมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบคงที่ เมื่อความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบมีค่าต่ำ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเข้าระบบสูงมากกลับทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบขึ้นโดยตรงกับขีดจำกัดของความสามารถในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่อยู่ติดผิวไบโอฟิล์มนั่นเอง

จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบที่ 1.7 ลิตรต่อนาที ในเครื่องกรองชีวภาพที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบเมื่อความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 50 ppmv ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 99.21 % แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 320 ppmv ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 31.11 % เท่านั้น และในเครื่องกรองชีวภาพที่ตัวกลางหลักเป็นกามมะพร้าว เมื่อความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 50 ppmv ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 98.07 % แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบเป็น 320 ppmv ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 24.21 % เท่านั้น

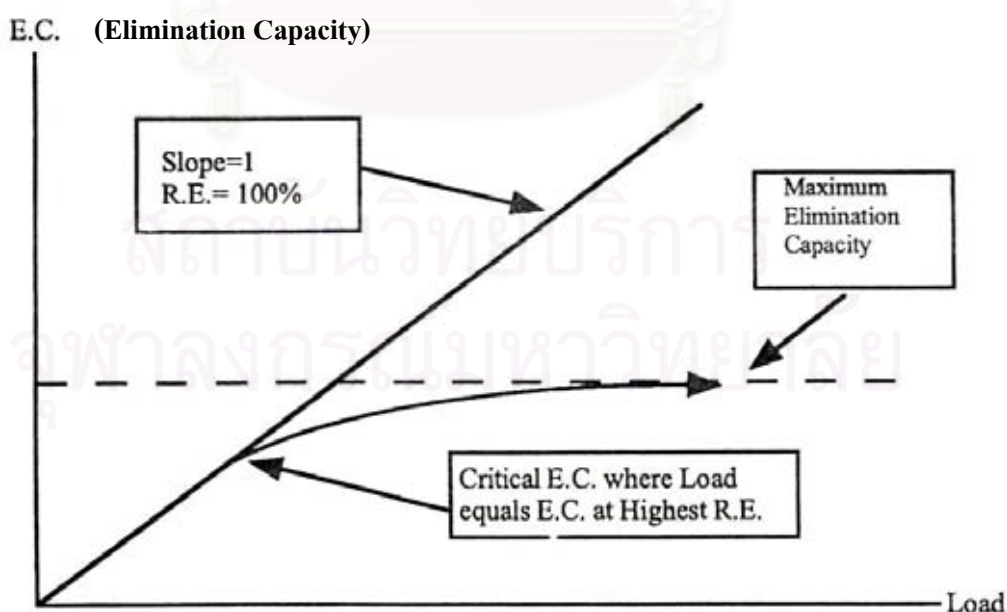
### 5.1.8 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency) และความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ (Elimination Capacity)

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency) เป็นค่าที่บอกถึงค่าความเข้มข้นเข้าและออกกระบบที่ลดลงในขณะใดขณะหนึ่งโดยเบื้องต้น ดังนั้นในกล่าวถึงการบำบัดของ

ระบบจึงจำเป็นต้องบอกถึงค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ (Elimination Capacity) เข้ามาใช้อธิบายด้วย

มีการนำค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษนี้ไปเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกรองชีวภาพ 2 เครื่องที่มีปริมาตรตัวกลางต่างกัน หรืออัตราการไหลของสารเข้าระบบต่างกันได้ เนื่องจากหน่วยที่เกิดขึ้นจากการคำนวณจะเป็นหน่วยเดียวกัน คือกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง โดยค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณของสารเข้าระบบต่อปริมาตรตัวกลางต่อเวลา (Mass Loading Rate)

ดังนั้นถ้าค่าปริมาณของสารเข้าระบบต่อปริมาตรตัวกลางต่อเวลา (Mass Loading Rate) และค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ (Elimination Capacity) มีค่าเท่ากันแสดงว่าความเข้มข้นของสารออกจากระบบมีค่าเป็นศูนย์ ระบบสามารถบำบัดไอของสารมลพิษได้หมด ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 100 % แต่เมื่อถึงค่าปริมาณของสารเข้าระบบต่อปริมาตรตัวกลางต่อเวลาค่าหนึ่งจะทำให้ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ มีค่าลดลง ระบบจะไม่สามารถบำบัดไอของสารมลพิษได้หมด ประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่า 100 % และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเข้าระบบต่อปริมาตรตัวกลางต่อเวลามากขึ้นไปอีก จะทำให้ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษมีค่าค่อนข้างคงที่ ระบบไม่สามารถบำบัดสารมลพิษได้มากกว่าค่านี้อีกแล้ว จึงเรียกว่าถึงค่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษ (Maximum Elimination Capacity) ดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารมลพิษเข้าระบบกับความสามารถในการบำบัดมลพิษ

ที่มา : Devinny, Deshusses and Webster, 1999 [4]

จากรูปที่ 5.1 อธิบายได้ว่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษอาจจะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าปริมาณสารเข้าระบบก็ได้ และอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการบำบัดสารมลพิษกับปริมาณสารเข้าระบบก็คือ ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency) นั่นเอง

สามารถอธิบายขีดความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษในแง่ของจลนศาสตร์ได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอของสารมลพิษเท่ากับเป็นการเพิ่ม transfer rate ของสารมลพิษจาก gas phase ไปสู่ใบ ไอฟิล์มทำให้เกิดกิจกรรมการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์มากขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์ที่อยู่ติดผิวใบ ไอฟิล์มมีขีดจำกัดในการย่อยสลายสารมลพิษอยู่ค่าหนึ่ง ที่ความสามารถสูงสุดในการบำบัดสารมลพิษค่าหนึ่งนั้น แสดงว่าถึงขีดความสามารถสูงสุดของการบำบัดได้ของจุลินทรีย์ในระบบแล้ว

จากการทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศเข้าชุดการทดลองเป็น 0.9, 1.2 และ 1.5 ลิตรต่อวินาทีนั้น พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาณสารเข้าระบบต่อปริมาตรตัวกลางต่อหน่วยเวลากับความสามารถในการบำบัดสารมลพิษมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่าระบบมีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษได้ดีหรือประสิทธิภาพใกล้เคียง 100 % แต่ที่อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบทั้งสามค่านี้ไม่ได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบให้มีค่าสูงมาก จนกระทั่งเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษที่ลดลงได้ แต่ในช่วงอัตราการไหลของอากาศเข้าชุดการทดลองเป็น 1.7 ลิตรต่อวินาทีนั้นได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของไอของไซลีนเข้าระบบให้สูงมากพอจนเห็นการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการบำบัดสารมลพิษว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเข้าระบบสูงมากขึ้น

และแนวโน้มของความสามารถในการบำบัดมลพิษสูงสุดของเครื่องกรองอากาศชีวภาพที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าแต่ละค่าจะมีค่าไม่เท่ากัน [20] โดยความสามารถในการบำบัดไซลีนของเครื่องกรองอากาศชีวภาพที่ใช้อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบต่ำที่สุด (0.9 l/min) จะมีความสามารถสูงสุดในการบำบัดไซลีนมากกว่าที่อัตราการไหลของไอของไซลีนเข้าระบบค่าอื่น ๆ เนื่องจากมีระยะเวลาที่สารสัมผัสกับตัวกลางมากที่สุดจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าสูงกว่า

เมื่อนำค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษของชุดการทดลองแต่ละชุดที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากค่าที่ได้จากกราฟในช่วงแรกมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (Removal Efficiency = 100 %) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Efficiency < 100 %) ดังนั้นภาพรวมของกราฟที่เกิดขึ้นความสัมพันธ์จึงไม่เป็นเส้นตรง จึงได้ใช้ Nonlinear Regression Analysis ในการวิเคราะห์รูป

แบบความสัมพันธ์นี้และได้ผลความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนที่ใช้แกลบและกาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักในชุดการทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวมีค่า 20.30 และ 28.44 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง ตามลำดับ

จากผลการทดลองไม่สามารถหาค่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนที่ใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางหลักในชุดการทดลองที่ 5 โดยใช้ Nonlinear Regression Analysis ได้เนื่องจากข้อมูลมีน้อยเกินไป จึงสามารถแสดงได้เพียงนำข้อมูลความสามารถในการบำบัดไอของโซลีนมาเทียบกับความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนในชุดการทดลองที่ 2 ว่ามีค่าใกล้เคียงกันเท่านั้น

## 5.2 การเปรียบเทียบการบำบัดไอของโซลีนในชุดที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว

Eitner [47] ได้ทำการบำบัดไอของโซลีนโดยใช้ตัวกลางเป็น Compost - Based พบว่าได้ค่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนเท่ากับ  $25 \text{ g/m}^3/\text{hr}$

Jorio et al. [20] ได้ทำการบำบัดไอของโซลีนโดยใช้ตัวกลางชนิดใหม่เป็นลูกกลมเล็กที่ประกอบด้วย Peat Moss 70 % w/w และตัวกลางที่ทำหน้าที่พองและปรับสภาวะให้เหมาะสม 30 % w/w พบว่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนมีค่า สูงถึง  $67 \text{ g/m}^3/\text{hr}$

จากการทดลองนี้พบว่าค่าความสามารถสูงสุดในการบำบัดไอของโซลีนที่ได้จากการใช้ Nonlinear Regression Analysis มีค่า 20.30 และ  $28.44 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  โดยใช้ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความสามารถในการบำบัดไอของโซลีนในชุดทดลองที่ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวนั้น ผลปรากฏว่าความสามารถในการบำบัดไอของโซลีนของทั้งสองชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % แต่ถ้าจะพิจารณาโดยนำข้อมูลจากการทดลองค่าอื่น ๆ มาเปรียบเทียบแล้ว กาบมะพร้าวน่าจะเป็นตัวกลางหลักที่น่าสนใจกว่าแกลบ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกาบมะพร้าวเป็นเส้นใยมากกว่าแกลบเมื่อใช้งานไปในระยะเวลาอันนานจะทำให้ยุบตัวน้อยกว่า

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการบำบัดไอของโซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพที่มีตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าที่ได้จากการทดลองในการบำบัดไอของโซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพโดยใช้ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว

พารามิเตอร์	ตัวกลางหลัก	
	แกลบ	กาบมะพร้าว
ความดันลด (mm H <sub>2</sub> O)	0 – 4	0 – 4
การยุบตัวของตัวกลาง (%)	18.57	16.37
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบต่ำ (0 – 200 ppmv)	92 – 100	93 - 100
เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบสูง (200 – 1200 ppmv)	7 - 30	10 - 25
ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางที่เหมาะสม (วินาที)	80 - 95	65 - 80
ความสามารถสูงสุดในการบำบัดโซลีน (g/m <sup>3</sup> /hr)	20.30	28.44

จากข้อมูลข้างต้นทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ากาบมะพร้าวและแกลบสามารถใช้เป็นตัวกลางหลักในการบำบัดไอของโซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพได้เช่นเดียวกัน แต่ในเรื่องการดูแลรักษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพและอายุการใช้งาน กาบมะพร้าวจะให้ผลดีกว่าแกลบ

จากผลการทดลองนี้ทำให้สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไอของโซลีนเมื่อใช้ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าวได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าที่แนะนำในการออกแบบเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไอของไซลีนเมื่อใช้ตัวกลางหลักเป็นแกลบและกาบมะพร้าว

ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	ตัวกลางหลัก	
	แกลบ	กาบมะพร้าว
ความสูงของชั้นตัวกลาง (เมตร)	1.00 – 1.50	1.00 – 1.50
ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง (วินาที)	80 – 95	65 – 80
ความเข้มข้นของไอของไซลีน (ppmv)	0 – 200	0 – 200
ประสิทธิภาพการบำบัดที่คาดว่าจะได้รับ (%)	99 - 100	99 - 100

จากผลการทดลองจะพบว่าเครื่องกรองชีวภาพสามารถบำบัดไอของไซลีนได้จริงและการที่เครื่องกรองชีวภาพจะทำงานได้ดีเพียงใดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งแต่ทุกปัจจัยมีความเกี่ยวข้องกันทั้งหมดซึ่งต้องมีสถานะที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ที่จะทำงานได้ดีทั้ง ความชื้น, ตัวกลาง, อุณหภูมิ, ความเป็นกรดด่าง, ความดันลด, ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่เข้าระบบ, อัตราการไหลของไซลีนที่เข้าระบบ รวมไปถึงปริมาณสารอาหารในตัวกลางด้วย ดังนั้นเครื่องกรองชีวภาพจึงควรจะต้องได้รับการดูแลอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษได้สูงสุด

## 6.2 ข้อจำกัดของการทำวิทยานิพนธ์

- 1) เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือทำให้ไม่สามารถทำการทดลองชุดการทดลองควบคุม (ชุดที่ 3 และ 4) ควบคู่กันไปด้วยตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองดังเช่นชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ได้
- 2) ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือและช่วงเวลาในการทำวิจัยทำให้ไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นได้มากเท่าที่ต้องการ

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการศึกษาชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ที่ใช้ในเครื่องกรองชีวภาพ

- 2) ควรมีการทำการทดลองที่สถานะที่แตกต่างกันออกไป เช่น ความชื้นที่ต่ำลง, อัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้น, ความเข้มข้นของสารในระบบที่สูงขึ้น
- 3) ใช้ตัวกลางหรืออัตราส่วนตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพที่ต่างออกไป
- 4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้บำบัดไอของสารเคมีประเภทอื่นได้ ทั้งไอของสารชนิดเดียวหรือไอของสารผสม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. นโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, สำนักงาน. 2542. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2540. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมูปก.
2. ความคุมมลพิษ, กรม. 2514. ไซลิ้น. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : อินทิเกรตเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี.
3. Lu, C., Chu, W., and Lin, M.R. 2000. Removal of BTEX Vapor from Wastes Gases by a Trickle Bed Biofilter. J. Air & Waste Manage. Assoc. 50 : 411-417.
4. Devinny, J. S., Deshusses, M.A., and Webster, T.S. 1999. Biofiltration for Air Pollution Control. Boca Raton : CRC Press.
5. Williams, T. O., and Miller, F.C.1992. Odor Control Using Biofilter : Part I. Biocycle 33 (10) : 72, 74-77.
6. U.S. Environmental Protection Agency. 2003. Xylenes (Mixed isomers)[online]. แหล่งที่มา : <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/xylenes.html>[2003, March 5]
7. Lang, M.E., and Jager, R.A. 1992. Odor Control for Municipal. Biocycle 33 (8) : 76-85.
8. มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2544. การจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
9. Leson, G., and Winer, A.M. 1991. Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions. J. Air & Waste Manage. Assoc. 41 : 1045-1054.
10. Williams, T. O., and Miller, F.C. 1992. Biofilters and facility operations : Part II. Biocycle 33 (11) : 75-79.
11. สราวุธ หาญทงศ์. 2543. ประสิทธิภาพการบำบัดไอของเบนซีนและโทลูอินด้วยเครื่องกรองอากาศชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
12. Deshusses, M., Johnson, C.T., and Leson, G. 1999. Biofiltration of High Loads of Ethyl Acetate in the Presence of Toluene. J. Air & Waste Manage. Assoc. 49 : 973-979.
13. Quinlan, C., Strevett, K., Ketcham, M., and Grego, J. 1999. VOC Elimination in a Compost Biofilter Using a Previously Acclimated Bacterial Inoculum. J. Air & Waste Manage. Assoc. 49 : 544-553.
14. Langenhove, H.V., Wuyts, E., and Schamp, N. 1986. Elimination of Hydrogen Sulfide from Odorous Air by a Wood Bark Biofilter. Wat. Res. 20 (12) : 1471-1476.



15. Veiga, M.C., and Kennes, C. 2001. Parameters Affecting Performance and Modeling of Biofilters Treating Alkylbenzene-Polluted Air. Appl Microbiol Biotechnol 55 : 254-258.
16. ความคุมมลพิษ, กรม. 2544. โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ) รายงานหลัก. (ม.ป.ท.).
17. Kiared, K., Fundenberger, B., Brzezinski, R., Viel, G., and Heitz, M.. 1997. Biofiltration of Air Pollution with Toluene under Steady-State Condition : Experimental Observations. Ind. Eng. Chem. Res. 36 : 4719-4725.
18. Arulneyam, D., and Swaminathan, T. 2000. Biodegradation of Ethanol Vapor in a Biofilter. Bioprocess Engineering 22 : 63-67.
19. Yoon, I. K., and Park, C.H. 2002. Effects of Gas Flow Rate, Inlet Concentration and Temperature on Biofiltration of Volatile Organic Compounds in a Peat-Packed Biofilter. Journal of Bioscience and Bioengineering 93 (2) : 165-169.
20. Jorio, H., Bibeau, L, Viel, G., and Heitz, M. 2000. Effects of Gas Flow Rate and Inlet Concentration on Xylene Vapors Biofiltration Performance. Chemical Engineering Journal 76 : 209-221.
21. Kim, B.J., Severin, B.F., and Neilson, L.M. 1999. Biofiltration of Solvent Vapors from Munitions Manufacturing Operations[online].แหล่งที่มา : [http://www.cecer.army.mil/techreports /Kim\\_mops/Kim\\_Mops.uli.post.PDF](http://www.cecer.army.mil/techreports /Kim_mops/Kim_Mops.uli.post.PDF)[2003, February 27]
22. Bendinger, B., Kroppenstedt, R.M., Rijnaarts, H., Langenhove, H.R.V., Oberthuer, R.C., and Itendorf, K. 1990. Studies on the Microbiology and the Degradation Capacities of a Biofilter. VCH Verlagsgesellschaft 529-533.
23. Govind, R.,Zhao, W., and Bishop,D.F. 1994. Biofiltration for Treatment of Volatile Organic Compounds(VOCs). IGT Seventh International Symposium on Gas, Oil, and Environmental Technology. (n.p.)
24. Zilli, M., Converti, A., Lodi, A., Borghi, M.D., and Ferraiolo, G. 1993. Phenol Removal from Waste Gases with a Biological Filter by *Pseudomonas putida*. Biotechnology and Bioengineering 41 : 693-699.
25. Diks, R.M.M., and Ottengraf , S.P.P. 1991. Verification Studies of a Simplified Model for the Removal of Dichloromethane from Waste Gases Using a Biological Trickling Filter (Part II). Bioprocess Engineering 6 : 131-140.

26. Diks, R.M.M., and Ottengraf, S.P.P. 1991. Verification Studies of a Simplified Model for the Removal of Dichloromethane from Waste Gases Using a Biological Trickling Filter (Part I). Bioprocess Engineering 6 : 93-99.
27. Ergas, S.J., Kinney, K., Fuller, M.E., and Scow, K.M. 1994. Characterization of a Compost Biofiltration System Degrading Dichloromethane. Biotechnology and Bioengineering 44 (9) : 1048-1054.
28. Ensley, B.D. 1994. A Gas Lift Bioreactor for Removal of Contaminants from the Vapor Phase. Applied and Environment Microbiology 60 (1) : 285-291.
29. Carlson, D.A., and Leiser, C.P. 1966. Soil Beds for the Control of Sewage Odors. Journal of the Water Pollution Control Federation 38 (5) : 829-840.
30. Cho, K.-S., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. Removal of Dimethyl Disulfide by the Peat Seeded with Night Soil Sludge. Journal of Fermentation and Bioengineering 71 (4) : 289-291.
31. Cho, K.-S., Kuniyoshi, I., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. A Newly Isolated Heterotrophic Bacterium, *Xanthomonas sp.* DY44, To Oxidize Hydrogen Sulfide to Polysulfide. Biotechnology Letters 13 (12) : 923-928.
32. Cho, K.-S., Hirai, M., and Shoda, M. 1992. Degradation of Hydrogen Sulfide by *Xanthomonas sp.* DY44 Isolated from Peat. Applied Environmental Microbiology 58 (4) : 1183-1189.
33. Kanagawa, T., and Mikami, E. 1989. Removal of Methanethiol, Dimethyl Sulfide, Dimethyl Disulfide, and Hydrogen Sulfide from Contaminated Air by *Thiobacillus thioparus* TK-m. Applied Environmental Microbiology 55 (3) : 555-558.
34. Cho, K.-S., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. Degradation Characteristics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol, Dimethyl Sulfide and Dimethyl Disulfide by *Thiobacillus thioparus* DW44 Isolated from Peat Biofilter. Journal of Fermentation and BioEngineering 71 (6) : 384-389.
35. Phae, C.-G., and Shoda, M. 1991. A New Fungus Which Degrades Hydrogen Sulfide, Methanethiol, Dimethyl Sulfide and Dimethyl Disulfide. Biotechnology Letters 13 (5) : 375-380.

36. Zhang, L., Hirai, M., and Shoda. 1991. Removal Characteristics of Dimethyl Sulfide, Methanethiol and Hydrogen Sulfide by *Hyphomicrobium sp.* 155 Isolated from Peat Biofilter. Journal of Fermentation and Bioengineering 72 (5) : 392-396.
37. Zhang, L., Hirai, M., and Shoda, M. 1992. Removal Characteristics of Dimethyl Sulfide by a Mixture of *Hyphomicrobium sp.* 155 and *Pseudomonas acidovorans* DMR-11. Journal of Fermentation and Bioengineering 74 (3) : 174-177.
38. Zhang, L., Kuniyoshi, I., Hirai, M., and Shoda. 1991. Oxidation of Dimethyl Sulfide by *Pseudomonas acidovorans* DMR-11 Isolated from Peat Biofilter. Biotechnology Letters 13 (3) : 223-228.
39. Smet, E., Verstraetee, W., and Langenhove, H.V. 1994. Biofiltration of Methyl Sulfides. VDIBerichte 1104 : 539-544.
40. Cho, K.S., Zhang, L., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. Removal Characteristics of Hydrogen Sulfide, and Methanethiol by *Thiobacillus sp.* Isolated from Peat in Biological Deodorization. Journal of Fermentation and Bioengineering 71 (1) : 44-49.
41. Zhu, L., Abumaizar, R. J. and Kocher W. M. 1998. Biofiltration of Benzene Contaminated Air Streams Using Compost-Activated Carbon Filter Media. Environmental Progress. 17 (3): 168-172.
42. Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J. C. and Fanlo, J. L. 2001. Biofiltration of a Mixture of Volatile Organics Emissions. J. Air & Waste Manage. Assoc. 51: 1662-1670.
43. Namkoong, W., Park, J.-S., and VanderGheynst, J.S. 2003. Biofiltration of Gasoline Vapor by Compost Media. Environmental Pollution 121 : 181-187.
44. Zilli, M., Borghi, A.D., and Converti, A. 2000. Toluene Vapour Removal in a Laboratory-Scale Biofilter. Appl Microbiol Biotechnol 54 : 248-254.
45. Johnson, C.T., and Deshusses, M.A. 1997. Quantitative Structure-Activity Relationships for VOC Biodegradation in Biofilters. In Allen, B.C., and Leeson, A. (eds.), Proc. Of the Forth Inter in situ and on-site Bioreclamadatiom Symp, pp. 175-180. Columbus : Battelle Press.
46. Seed, L.P., and Corsi, R.L. 1994. Biofiltration of BTEX Contaminated Streams: Laboratory Studies. In Proc. Of 87<sup>th</sup> annual meeting and Exhibition of the AWMA. A&WMA. Pittsburgh. (n.p.)

47. Eitner, D. 1989. Vergleich von Biofiltermedien anhand mikrobiologischer und bodenphysikalischer Kenden. In Biologische Abluftreinigung. p. 191.
48. Supelco. 2000. Solid Phase Microextraction Direct, Solvent-Free Extraction of Organic Compounds. [CD-ROM].
49. Supelco. 2000. Solid Phase Microextraction : Theory and Optimization of Conditions. [CD-ROM].



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## วิธีการวิเคราะห์ค่าความชื้น

1. นำตัวอย่างตัวกลางมาชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม
2. นำไปอบที่ 104 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator
4. นำตัวอย่างตัวกลางมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณค่าร้อยละความชื้น

$$\text{ค่าร้อยละความชื้นในตัวอย่าง} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก}}$$

## วิธีการปรับความชื้นของตัวกลางเป็น 60%

ตัวอย่างคำนวณ เช่น แกลบหนัก 220.88 กรัม มีความชื้น 27.34%

$$\text{ค่าร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก}}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} &= \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} \times (100 - \text{ค่าร้อยละความชื้นของตัวอย่าง})}{100} \\ &= \frac{220.88 (100 - 27.34)}{100} \end{aligned}$$

$$= 160.49 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น แกลบที่มีน้ำหนักแห้ง 160.49 กรัม ถ้าต้องการความชื้นที่ 60% จึงควรจะมีน้ำหนักจริง

$$= \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}{(100 - \text{ค่าร้อยละความชื้นในตัวอย่าง})}$$

$$= \frac{160.49}{(100 - 60/100)}$$

$$= 401.22 \text{ กรัม}$$

ต้องเติมน้ำเพิ่ม  $401.22 - 220.88 = 180.34$  กรัม จึงจะทำให้แกลบที่เดิมมีความชื้น 27.34% กลายเป็นแกลบที่มีความชื้น 60 %



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



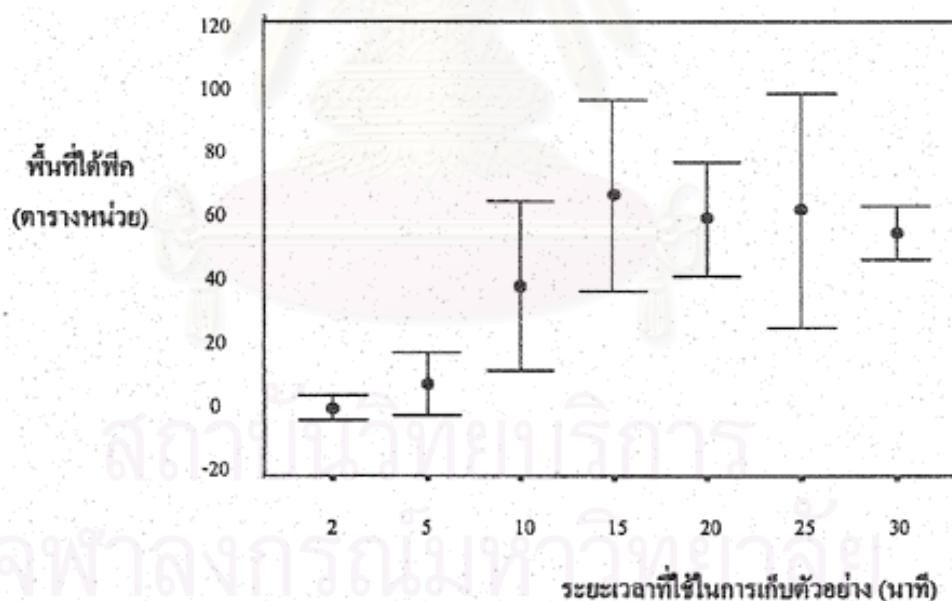
## ภาคผนวก ข

การหาเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ ข-1 พื้นที่ได้ฟักที่ได้จากการวิเคราะห์ GC โดยใช้เวลากักตัวอย่างต่างกัน

Fiber	เวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง (นาที)						
	2	5	10	15	20	25	30
1	2.65475	11.50769	36.15937	77.14127	54.63319	49.32454	51.45364
2	0.00000	4.12224	29.01034	53.63490	67.08677	58.40141	54.41296
3	0.00000	9.39770	49.56542	68.30161	55.08414	77.67516	58.07934
Mean	0.88	8.34	38.24	66.36	58.93	61.80	54.65
± SD	± 1.53	± 3.80	± 10.43	± 11.87	± 7.06	± 14.48	± 3.32

นำมาเขียนกราฟจะได้



รูปที่ ข-1 พื้นที่ได้ฟักที่ได้จาก GC เมื่อใช้ fiber และ ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างที่ต่างกัน

จากรูปจะเห็นว่าค่าของพื้นที่ที่ได้จากการวัด GC ใน fiber ที่ต่างกันและ ระยะเวลาที่เก็บต่างกันก็จะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาจากข้อมูลจะเลือกใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างที่ 15 นาทีเนื่องจากเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้พื้นที่ได้ฟักของการเก็บตัวอย่างมีค่ามากที่สุด

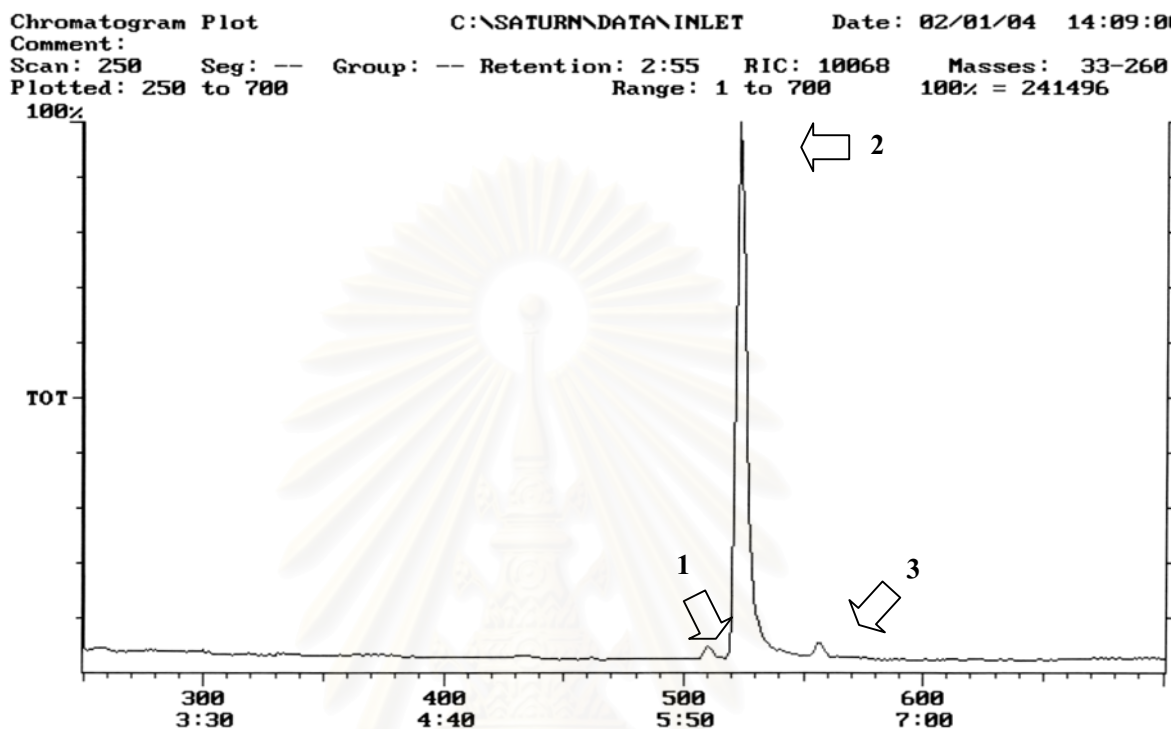


ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์ด้วย GC-MS



รูปที่ ค-1 Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่จุดเข้าระบบด้วย GC-MS

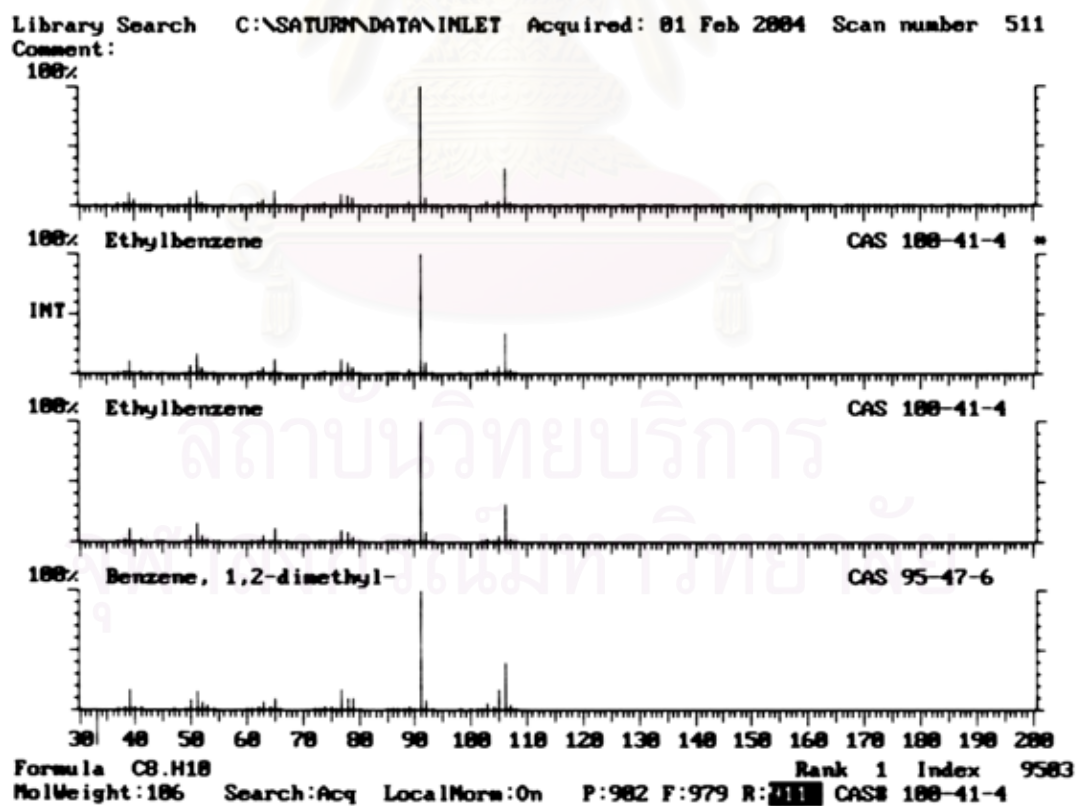
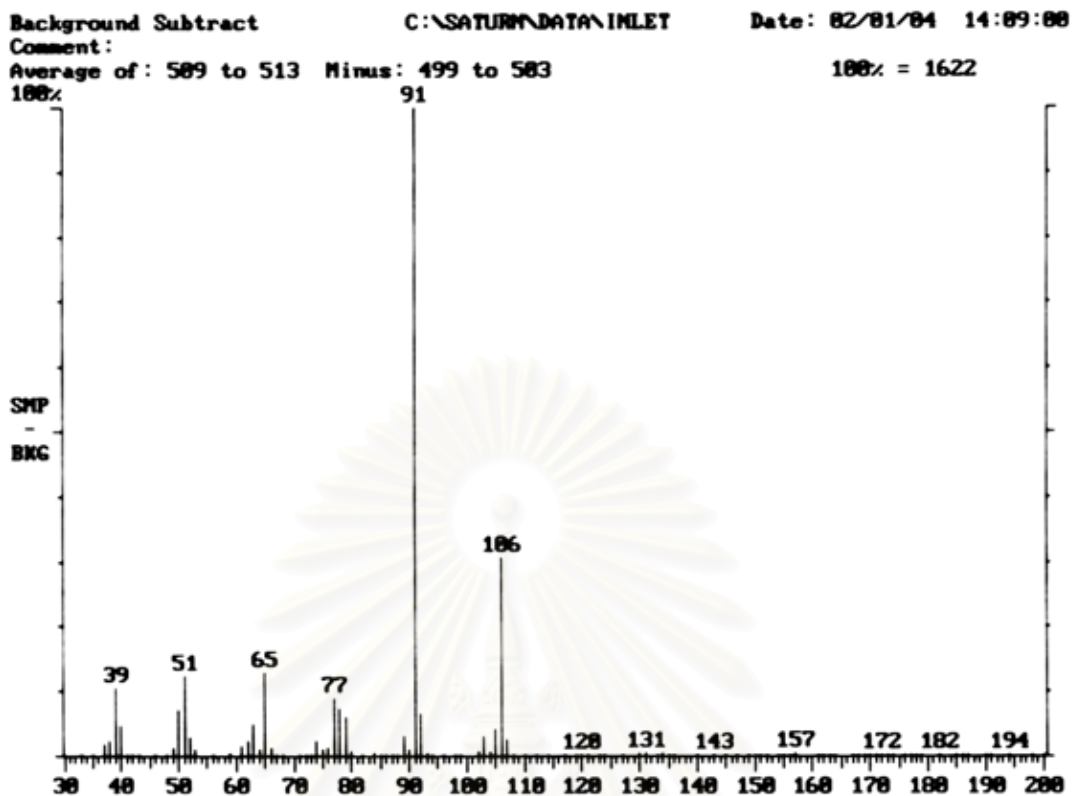
เมื่อดึงไอของไซลีนจากระบบบำบัดมาวิเคราะห์ด้วย GC-MS โดยใช้สภาวะเดียวกันกับที่ทำการทดลองที่เครื่อง GC-FID โดยใช้คอลัมน์ DB1 ทำให้ได้ Chromatogram ออกมาดังรูปที่ 1 จะเห็นว่ามียุคหลักเกิดขึ้น 3 ยุค จึงทำการเช็คว่าพีคทั้ง 3 คือสารเคมีชนิดใดบ้าง

เมื่อนำพีคที่ 1 มาแปรสัญญาณจะได้ Mass Spectrum ดังรูปที่ ค-2 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระเบียนแล้วจะได้ว่าพีคที่ 1 คือ Ethylbenzene

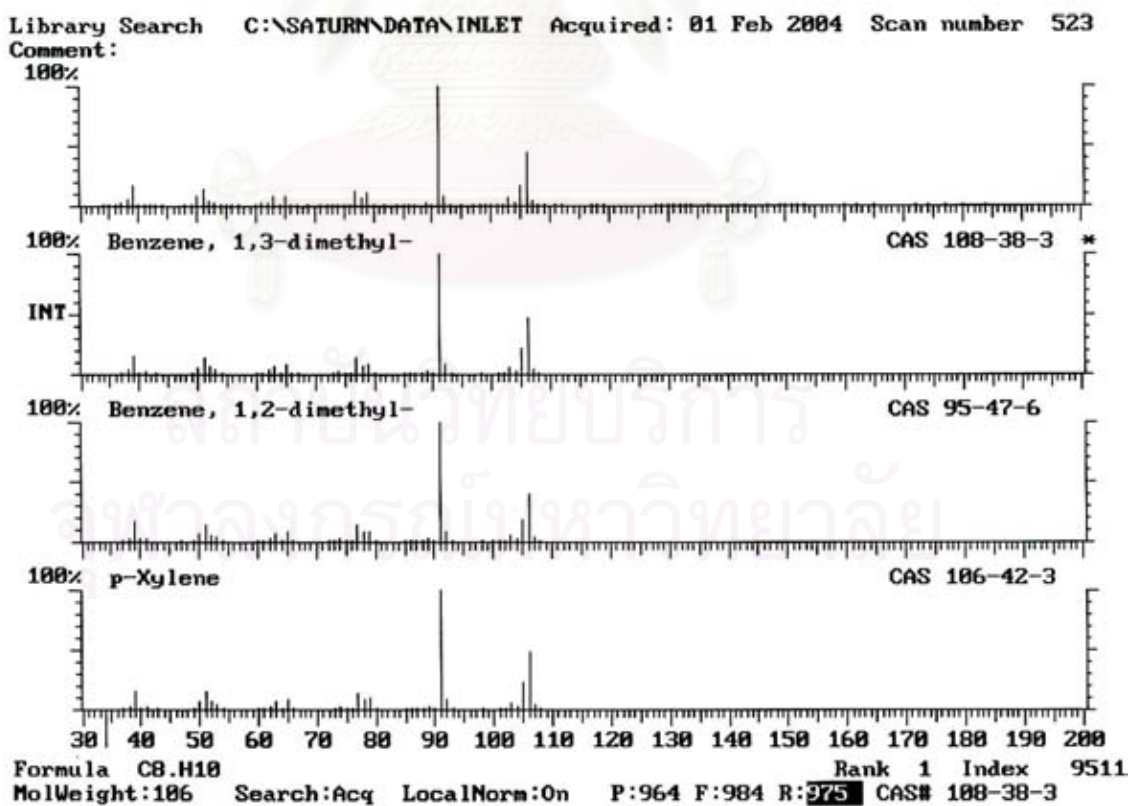
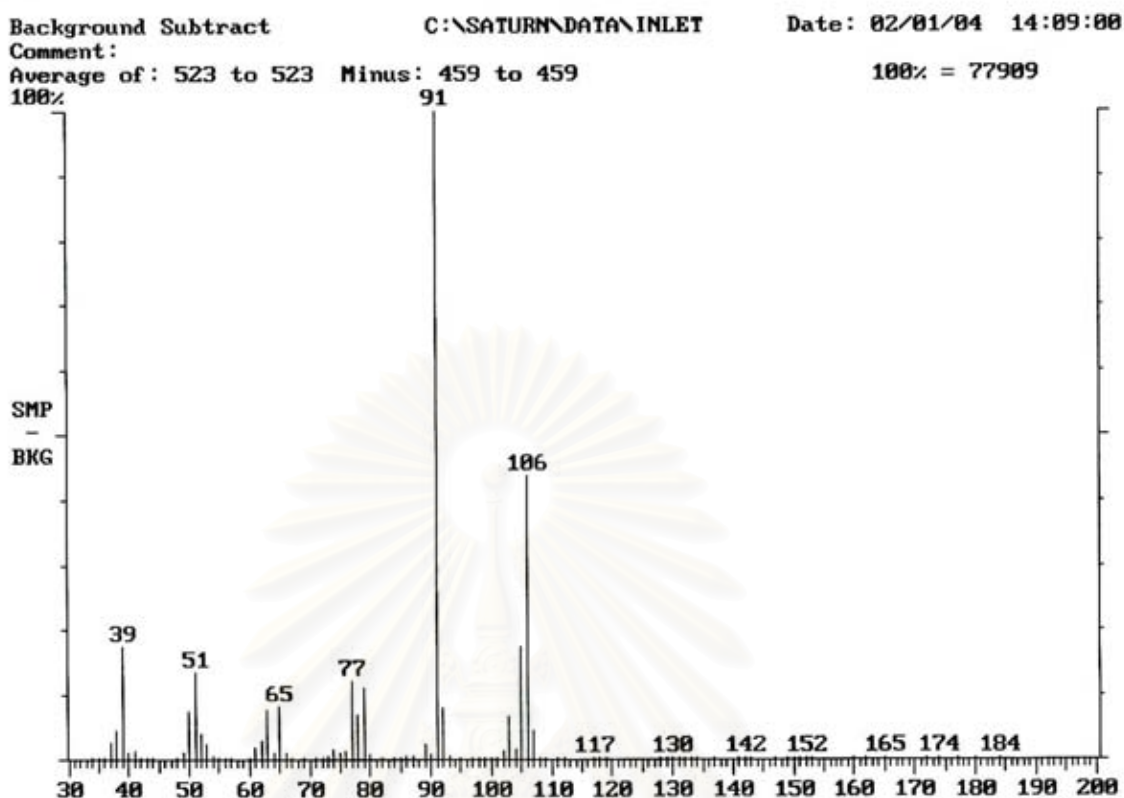
เมื่อนำพีคที่ 2 มาแปรสัญญาณจะได้ Mass Spectrum ดังรูปที่ ค-3 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระเบียนแล้วจะได้ว่าพีคที่ 2 คือ m-Xylene และ p-Xylene

เมื่อนำพีคที่ 3 มาแปรสัญญาณจะได้ Mass Spectrum ดังรูปที่ ค-4 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระเบียนแล้วจะได้ว่าพีคที่ 3 คือ o-xylene

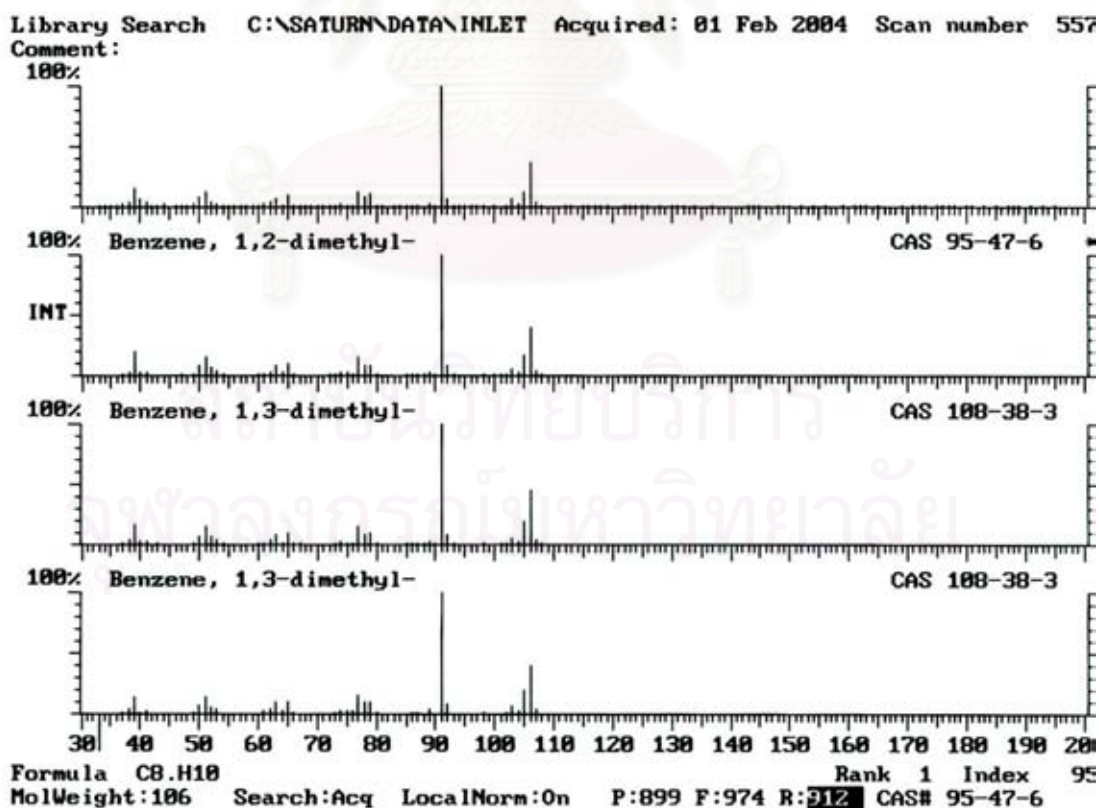
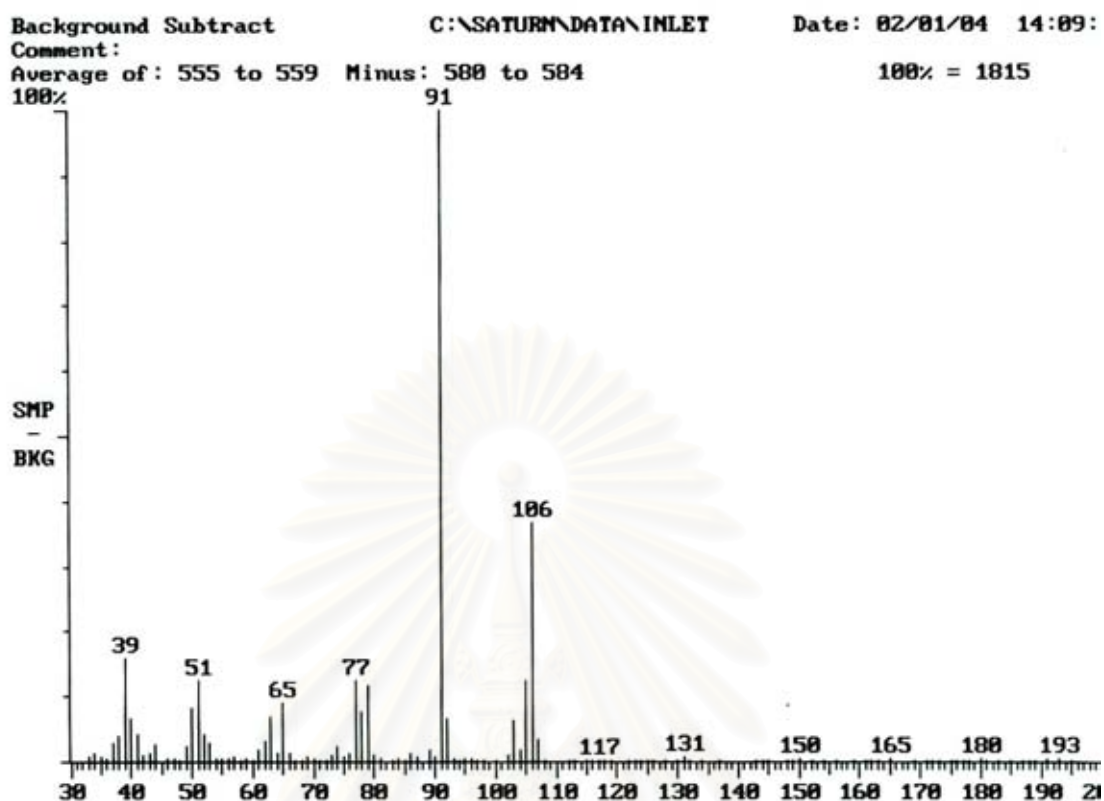
ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำพื้นที่ใต้พีคของพีคที่ 2 และ 3 มารวมกันเป็นปริมาณ Xylene ทั้งหมด



รูปที่ ก-2 Mass Spectrum ของพีคที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไซลีนที่จุดเข้าระบบ



รูปที่ ๓-3 Mass Spectrum ของพีคที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฮลินที่จุดเข้าระบบ

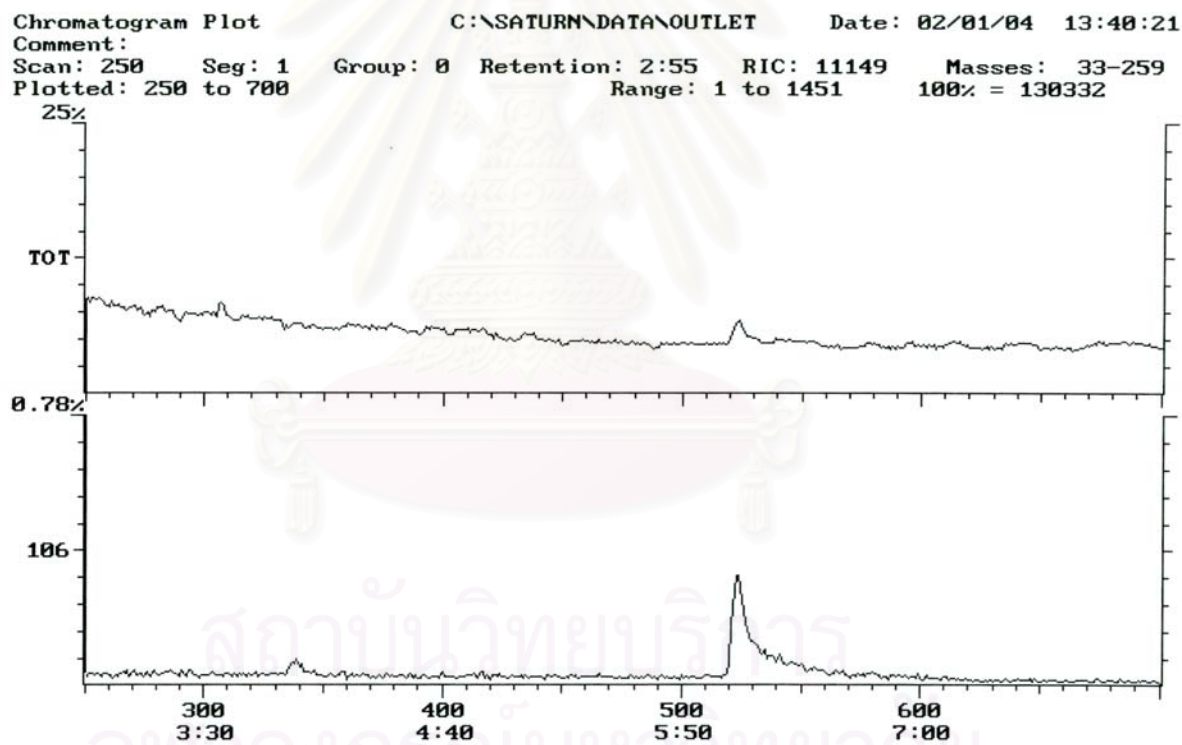


รูปที่ ๓-4 Mass Spectrum ของพีคที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ใช้ลินที่จุดเข้าระบบ

เมื่อนำไอของไซลีนที่จุดออกจากระบบมาวิเคราะห์ด้วย GC-MS จะได้ผลดังรูปที่ ค-5 จะเห็นว่า Chromatogram ที่ได้มีลักษณะแตกต่างไปจากรูปที่ ค-1 คือพบเพียงแค่ 1 พีค

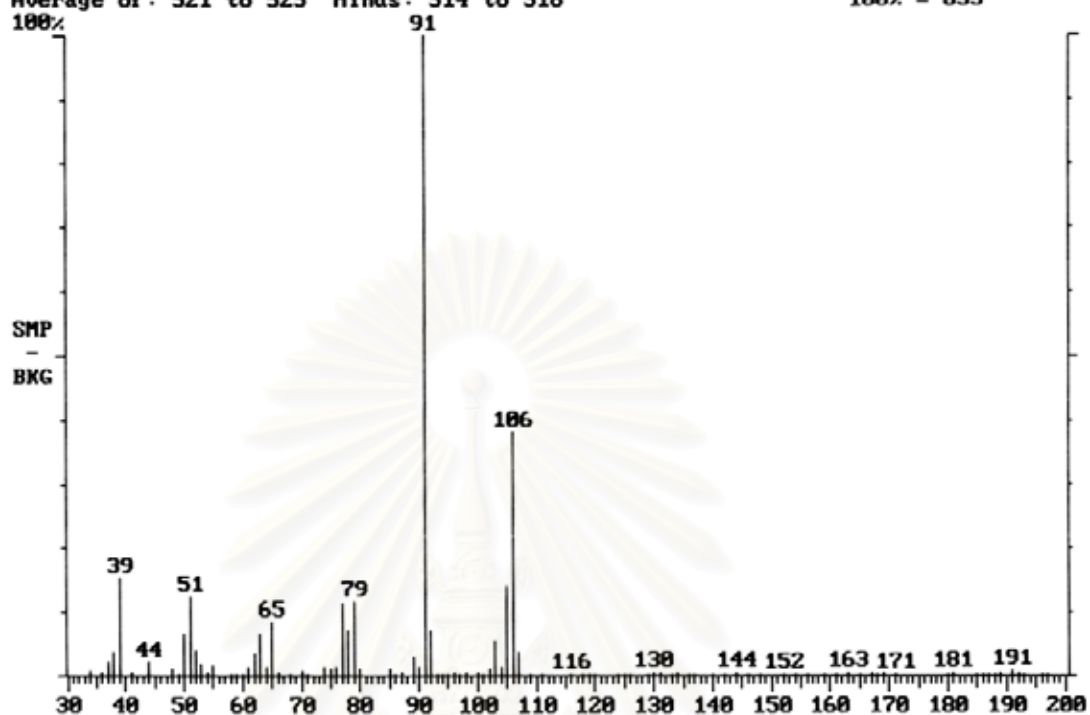
เมื่อขยายสัญญาณของ Chromatogram ของพีคที่เหลืออยู่ที่จุดออก และแปรสัญญาณจะได้ Mass Spectrum ดังรูปที่ ค-6 ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่า เป็นพีคเดียวกับพีคที่ 2 ใน จุดเข้าระบบ

นั่นแสดงว่า เมื่อผ่านระบบบำบัดไอของไซลีนจะถูกบำบัดไปและเหลือไอของ ไซลีน ซึ่งเป็น พีคของ m-Xylene และ p-Xylene นั่นเอง

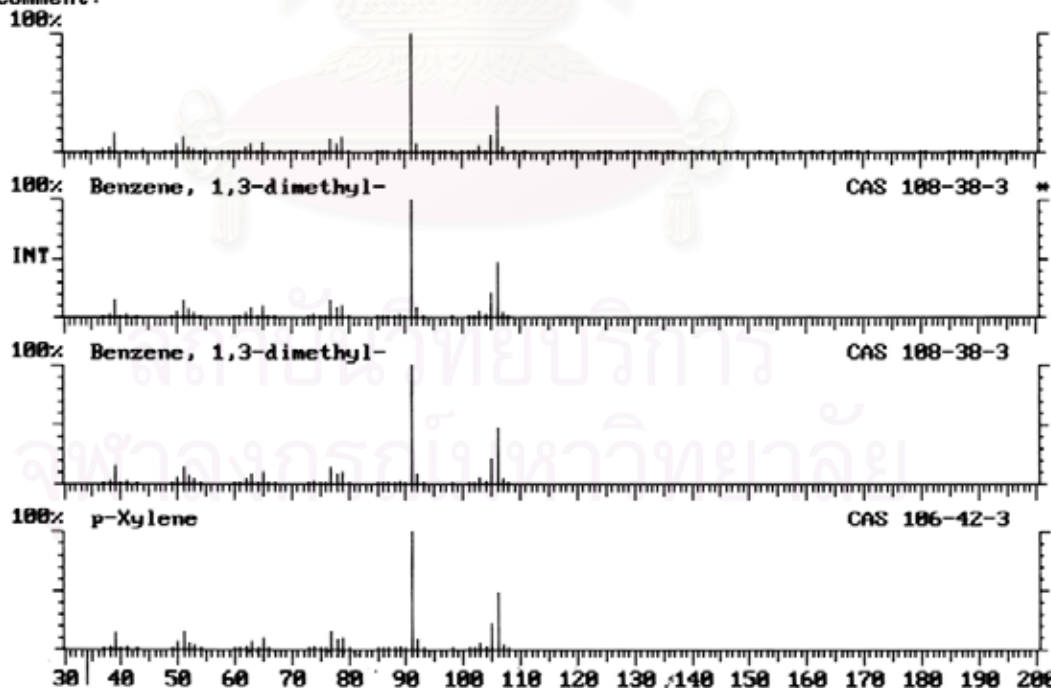


รูปที่ ค-5 Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่จุดออกระบบด้วย GC-MS

Background Subtract C:\SATURN\DATA\OUTLET Date: 02/01/04 13:48:21  
 Comment:  
 Average of: 521 to 525 Minus: 514 to 518 100% = 833



Library Search C:\SATURN\DATA\OUTLET Acquired: 01 Feb 2004 Scan number 523  
 Comment:



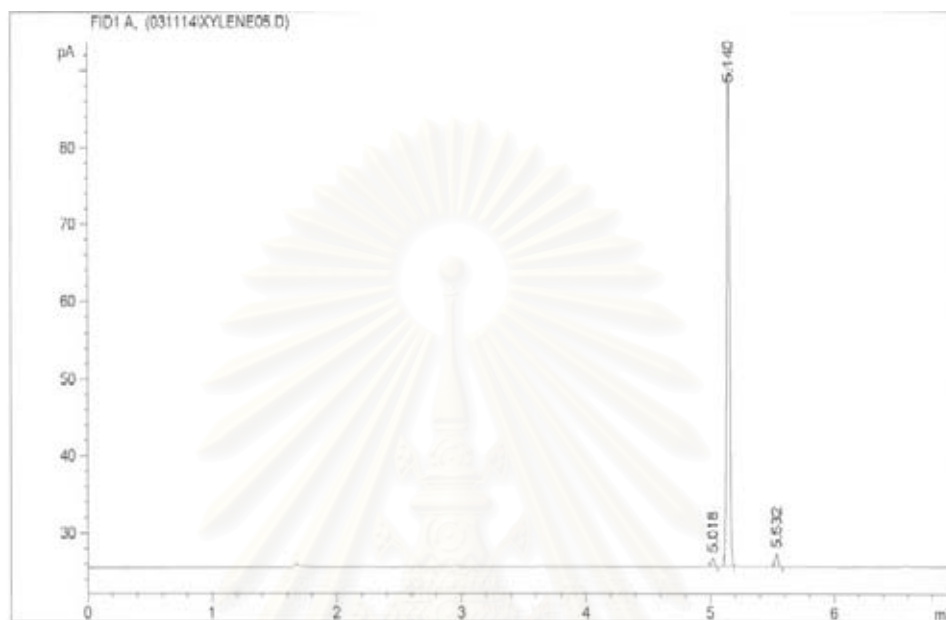
Formula C<sub>8</sub>H<sub>10</sub> Rank 2 Index 9511  
 MolWeight:106 Search:Acq - Local Norm:On P:881 F:973 R:300 CAS# 108-38-3

รูปที่ ๓-6 Mass Spectrum ของพีคที่ได้จากการวิเคราะห์โซลินที่จุดออกระบบ



## การวิเคราะห์ด้วย GC-FID

เมื่อนำไอของไซลีนที่จุดเข้าระบบมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FID จะได้ตัวอย่าง Chromatogram ดังรูปที่ ก-7



=====  
 Area Percent Report  
 =====

Sorted By : Signal  
 Multiplier : 1.0000  
 Dilution : 1.0000

Signal 1: FID1 A,

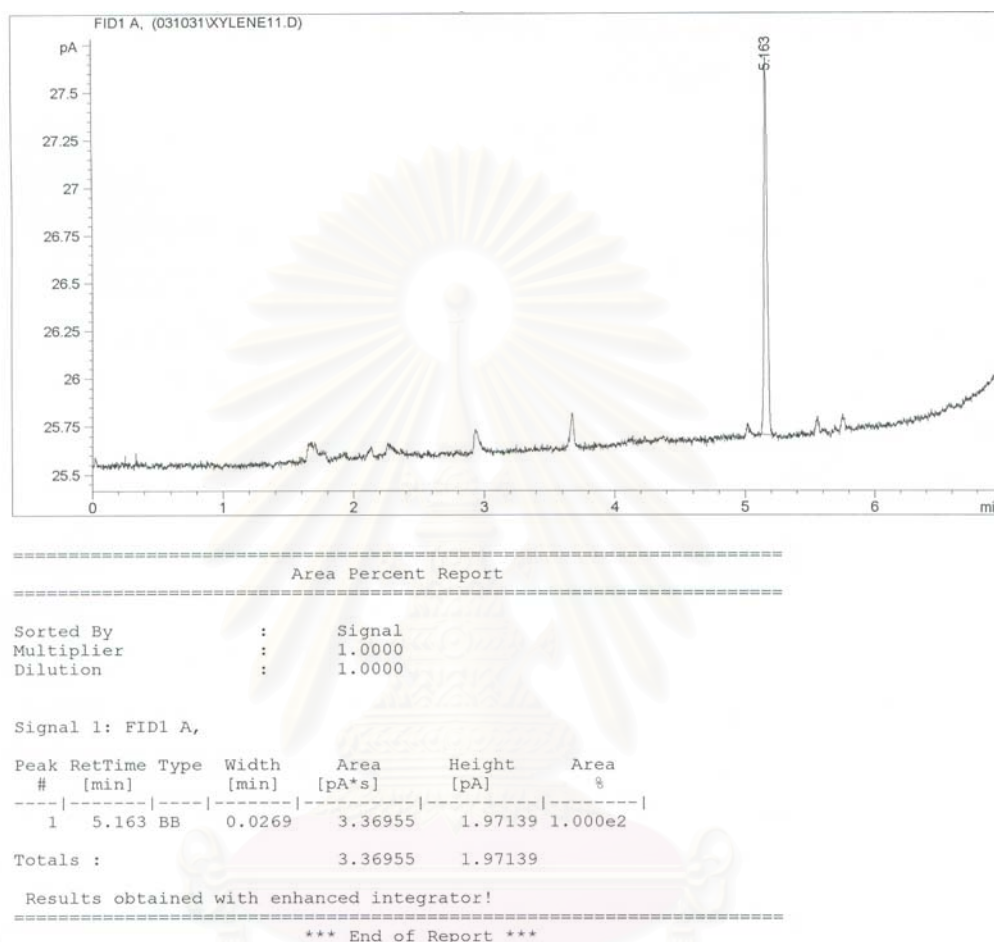
Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	5.018	BB	0.0233	1.73484	1.16722	1.58445
2	5.140	BB	0.0260	105.07332	64.42083	95.96480
3	5.532	BP	0.0253	2.68336	1.71174	2.45075
Totals :				109.49152	67.29979	

Results obtained with enhanced integrator!  
 \*\*\* End of Report \*\*\*

รูปที่ ก-7 แสดง Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่จุดเข้าระบบ ด้วย GC-FID

จากรูปที่ ก-7 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดย GC-MS แล้วจะพบว่า  
 พีคที่ 1 เกิดพีคที่ Retention Time เท่ากับ 5.016 นาที เป็นพีคของ Ethyl benzene  
 พีคที่ 2 เกิดพีคที่ Retention Time เท่ากับ 5.140 นาที เป็นพีคของ m-Xylene และ p-Xylene  
 พีคที่ 3 เกิดพีคที่ Retention Time เท่ากับ 5.532 นาที เป็นพีคของ o-Xylene

เมื่อนำตัวอย่างความเข้มข้นของไอของไซลีนที่จุดออกมารวิเคราะห์โดย GC-FID (รูปที่ ค-8) แล้วพบว่ามียี่สิบเกิดขึ้น 1 พีค ที่ Retention Time เท่ากับ 5.163 นาที แสดงว่าเป็นพีคของ m-Xylene และ p-Xylene



รูปที่ ค-8 Chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนที่จุดออกกระบบด้วย GC-FID

เมื่อเปรียบเทียบแล้วพีคที่ได้จากการวิเคราะห์โดย GC-MS และ GC-FID มีลักษณะเดียวกันและข้อมูลจาก GC-MS ได้พิสูจน์แล้วว่า พีคที่ 2 และ 3 ที่เกิดขึ้นเป็นพีคของไซลีน ดังนั้นพีคที่ 2 และ 3 ที่เกิดขึ้นใน Chromatogram ของ GC-FID จึงเป็นสารไซลีนด้วย

ดังนั้นในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอของไซลีนในการทดลองนี้จึงรวมพื้นที่ของพีคที่ 2 และ 3 ที่มี Retention Time เท่ากับ 5.140 นาที Retention Time เท่ากับ 5.532 นาที เป็นปริมาณไซลีนทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ นำไปคำนวณความเข้มข้นของไอของไซลีนต่อไป



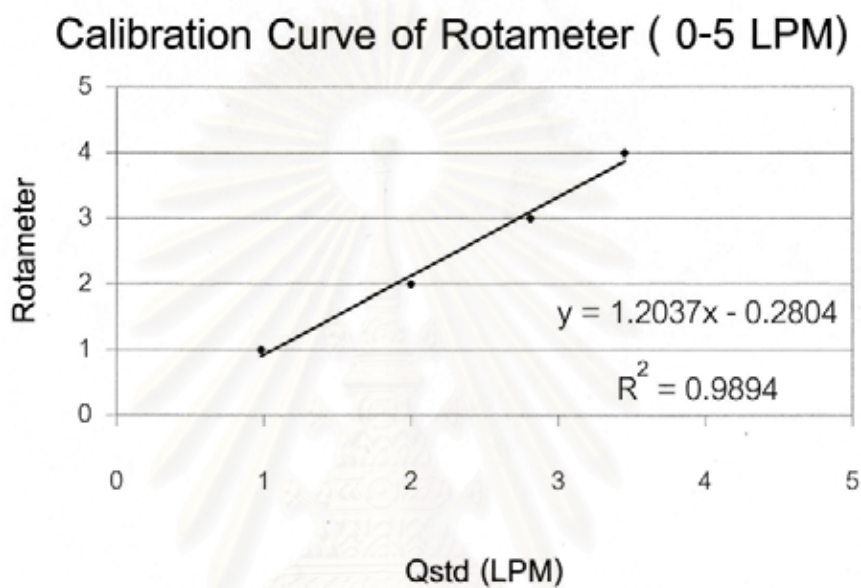
ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

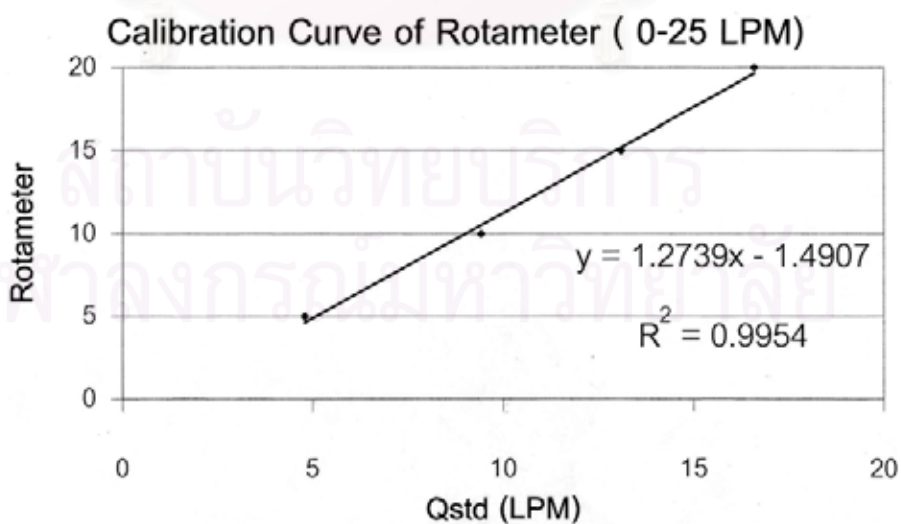
## ภาคผนวก ง

## การคำนวณอัตราการไหลที่แท้จริงที่อุณหภูมิทดลอง

Rotameter ที่ใช้ในการทดลองได้รับการ Calibration จากศูนย์วิจัยและฝึกอบรม ด้านสิ่งแวดล้อมดังนี้



รูปที่ ง-1 Calibration Curve ของ Rotameter เครื่อง A ที่มีช่วงการวัด 0-5 l/min



รูปที่ ง-2 Calibration Curve ของ Rotameter เครื่อง B ที่มีช่วงการวัด 0-25 l/min

จากรูปที่ ง-1 และ ง-2 เป็นสภาวะการทำงานของ Rotameter ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดันบรรยากาศ แกน y เป็นค่าที่อ่านได้จาก Rotameter และแกน x เป็นแกนที่แสดงอัตราการไหลของอากาศที่แท้จริงที่ 25 °C

$$\text{จากสูตร} \quad Q_{25^{\circ}\text{C}} = Q_a [T_{25^{\circ}\text{C}} / T_a]$$

ที่อุณหภูมิ 30 °C ค่าที่อ่านได้จาก Rotameter เป็น 3 l/min ,

$$\begin{aligned} Q_{25^{\circ}\text{C}} &= 3(298/303) \\ &= 2.95 \text{ l/min} \end{aligned}$$

แทนค่า  $Q_{25^{\circ}\text{C}} = 2.95$  เป็นค่า y ในสมการ  $y = 1.2037x - 0.2804$

จะได้ค่า x ซึ่งเป็นค่า  $Q_{\text{std}}$  ที่ 25 °C  $x = 2.68 \text{ l/min}$

และนำมาแทนในสมการ  $Q_{25^{\circ}\text{C}} = Q_a [T_{25^{\circ}\text{C}} / T_a]$  อีกครั้ง

จะได้ค่า  $2.68 = Q_a [298/303]$

$$Q_a = 2.73 \text{ l/min}$$

ดังนั้นที่อุณหภูมิ 30 °C และตั้งค่า Rotameter เป็น 3 l/min จะทำให้ได้ค่าอัตราการไหลที่แท้จริงที่ 30 °C เท่ากับ 2.73 l/min

และเมื่อผ่านจุดแยกเข้าสู่ชุดการทดลองแต่ละชุด (3 ชุด) จะคิดเป็นอัตราการไหล 2.73/3 l/min เข้าสู่ชุดการทดลองแต่ละชุดเท่ากับ 0.91 l/min

$$\begin{aligned} \text{แปลงหน่วย l/min เป็น m}^3/\text{hr} \quad 0.91 \text{ l/min} &= 0.91 \times 10^{-3} \times 60 \text{ m}^3/\text{hr} \\ &= 5.46 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

**การคำนวณความเข้มข้นของไอของไซลีนในสถานะก๊าซ**

ในการทดลองนี้ใช้การชั่งมวลของไซลีนที่หายไปมาคำนวณตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 30 °C ทำการระเหยไซลีนเข้าระบบโดยทำการเปิดเครื่องเป็นเวลาทั้งหมด 420 นาที ที่อัตราการไหลที่ 3 l/min ของ Rotameter และชั่งมวลปริมาณไซลีนที่หายไปได้ 0.2246 g

### การคำนวณเป็นหน่วย ppmv

หาปริมาตรไซลีนในสถานะก๊าซ

$$= (\text{กรัมของไซลีน}) \times (1/\text{มวลโมเลกุลของไซลีน}) \times (22.4) \times (\text{อุณหภูมิทดลองหน่วยเคลวิน}/273)$$

$$= (0.2246 \text{ g}) \times (1/106.17 \text{ g/mol}) \times (22.4 \text{ dm}^3/\text{mol}) \times (303 \text{ K}/273 \text{ K}) = 0.0526 \text{ dm}^3$$

หาปริมาตรของอากาศทั้งหมดที่ผ่านระบบ 420 นาที และอัตราการไหลที่แท้จริงของอากาศที่ 30 °C = 2.73 l/min

ดังนั้นจะมีอากาศทั้งหมดไหลผ่านปริมาตรเท่ากับ  $2.73 \times 420 = 1146.6 \text{ L (dm}^3)$

เพราะฉะนั้นจะหาความเข้มข้นของไอของไซลีนได้จาก

$$= (\text{ปริมาตรของไซลีนในสถานะก๊าซ/ปริมาตรอากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านระบบ}) \times 10^6 \text{ ppmv}$$

$$= (0.0526/1146.6) \times 10^6 \text{ ppmv}$$

$$= 45.87 \text{ ppmv}$$

### การคำนวณเป็นหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสูตร  $PV = nRT$

ดังนั้น  $\text{ppmv}/1000 = (\text{g/m}^3) \times 0.0821 \times (\text{temperature})/\text{มวลโมเลกุล}$

$$45.87/1000 = (\text{g/m}^3) \times 0.0821 \times 303/106.17$$

$$\text{g/m}^3 = 0.1958$$

แสดงว่าไซลีน 0.2246 g ที่อุณหภูมิ 30 °C เมื่อเดินระบบที่อัตราการไหลที่อ่านได้ที่ Rotameter เท่ากับ 3 l/min จะทำให้มีอัตราการไหลเข้าระบบที่เท่ากับ 2.73 l/min และเมื่อผ่านจุดแยกจะมีอัตราการไหลเข้าแต่ละท่อเป็น 0.91 l/min ที่ความเข้มข้นของไอของไซลีนเท่ากับ 45.87 ppmv หรือ 0.1958 g/m<sup>3</sup>

### การคำนวณหาระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสตัวกลาง

เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ และ ปริมาตรของชั้นตัวกลางหาได้จาก

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

$$V_f = \text{ปริมาตรของชั้นตัวกลาง (m}^3)$$

$$Q = \text{อัตราการไหลของอากาศ (m}^3/\text{หน่วยเวลา)}$$

เช่น ปริมาตรของชั้นตัวกลางเป็น 2.21 ลิตร อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.91 l/min ดังนั้น EBRT เท่ากับ  $= 2.21/0.91 = 2.43$  นาที  
หรือเท่ากับ  $2.43 \times 60 = 145.71$  วินาที

### การคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency)

เป็นค่าที่แสดงถึงสารมลพิษที่ถูกกำจัดโดยระบบ มักแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{Removal Efficiency} = \left[ \frac{C_{gi} - C_{go}}{C_{gi}} \right] \times 100$$

$C_{gi}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ ( $g/m^3$ )

$C_{go}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ ( $g/m^3$ )

เช่น ความเข้มข้นของสารเข้าระบบ  $0.5000 g/m^3$  ความเข้มข้นของสารออกระบบ  $0.1000 g/m^3$   
ดังนั้นจะมี Removal Efficiency เท่ากับ  $(0.5-0.1) \times 100/0.5 = 80 \%$

### การคำนวณหาปริมาณของสารที่ถูกนำเข้าระบบต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางต่อหน่วยเวลา (Mass Loading Rate)

หาได้จาก

$$\text{Mass Loading Rate} = \frac{Q \times C_{gi}}{V_r}$$

$Q$  = อัตราการไหลของอากาศ ( $m^3/hr$ )

$C_{gi}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ ( $g/m^3$ )

$V_r$  = ปริมาตรของชั้นตัวกลาง ( $m^3$ )

เช่น	อัตราการไหลของอากาศ	$5.46 \times 10^{-2}$	$m^3/hr$
	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ	0.5000	$g/m^3$
	ปริมาตรของชั้นตัวกลาง 2.21 ลิตร =	$2.21 \times 10^{-3}$	$m^3$
จะมี	Mass Loading Rate	$= 5.46 \times 10^{-2} \times 0.5000 \times (1/2.21 \times 10^{-3})$	
		$= 12.35$	$g/m^3/hr$

### การคำนวณหาความสามารถในการกำจัดมลพิษ (Elimination Capacity)

แสดงถึงมวลของสารพิษที่ถูกกำจัดออกไปต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางต่อเวลา

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

ใช้เปรียบเทียบผลการบำบัดระหว่างชุดการทดลองที่มีขนาดและอัตราการไหลของอากาศต่างกัน ได้

เช่น ความเข้มข้นของสารในระบบ 0.5000 g/m<sup>3</sup>

ความเข้มข้นของสารออกระบบ 0.1000 g/m<sup>3</sup>

อัตราการไหลของอากาศ 5.46 x 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/hr

ปริมาตรของชั้นตัวกลาง 2.21 ลิตร = 2.21 x 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>

ดังนั้นจะมีค่า Elimination Capacity = (0.4000) x (5.46 x 10<sup>-2</sup>) x (1/2.21 x 10<sup>-3</sup>)

= 9.88 g/m<sup>3</sup>/hr

การนำพื้นที่ได้พีคมาคำนวณความเข้มข้น

ตัวอย่างเช่นวันที่ 31/10/2003 มีความเข้มข้นในระบบเท่ากับ 73.57 ppmv

พื้นที่ได้พีคของชุดการทดลองที่ 1 ที่จุดเข้าระบบวัดได้ 58.80840

พื้นที่ได้พีคของชุดการทดลองที่ 1 ที่จุดออกระบบวัดได้ 4.08574

พื้นที่ได้พีค 58.80840 คิดเป็นความเข้มข้น 73.57 ppmv

ดังนั้น พื้นที่ได้พีค 4.08574 คิดเป็นความเข้มข้น 73.57(4.08574)/58.80840

= 5.11 ppmv

พื้นที่ได้พีคของชุดการทดลองที่ 2 ที่จุดเข้าระบบวัดได้ 54.57707

พื้นที่ได้พีคของชุดการทดลองที่ 2 ที่จุดออกระบบวัดได้ 3.36955

พื้นที่ได้พีค 54.57707 คิดเป็นความเข้มข้น 73.57 ppmv

ดังนั้น พื้นที่ได้พีค 3.36955 คิดเป็นความเข้มข้น 73.57(3.36955)/54.57707

= 4.54 ppmv





ภาคผนวก จ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-1 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสามารถในการบำบัดไขมันในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## T-Test

Group Statistics

	EXP1	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
EXP2	1.000	29	8.57003	7.27138	1.35026
	2.000	29	12.71193	12.89651	2.39482

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
EXP2	Equal variances assumed	3.850	.055	-1.507	56	.138	-4.14190	2.74925	-9.64931	1.36551
	Equal variances not assumed			-1.507	44.168	.139	-4.14190	2.74925	-9.68205	1.39826

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-2 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสามารถในการบำบัดไขมันในชุดการทดลองที่ 1 และ 3 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## T-Test

Group Statistics

	VAR00001	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
EXP13	1.000	6	4.62467	.65216	.26624
	2.000	6	.58300	.50039	.20428

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
EXP13	Equal variances assumed	.105	.753	12.044	10	.000	4.04167	.33558	3.29394	4.78939
	Equal variances not assumed			12.044	9.372	.000	4.04167	.33558	3.28709	4.79624

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-3 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสามารถในการบำบัดไขมันในชุดการทดลองที่ 2 และ 4 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## T-Test

Group Statistics

	VAR00001	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
EXP24	1.00	7	5.9934	2.3252	.8788
	2.00	7	.4841	.4687	.1772

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
EXP24	Equal variances assumed	4.314	.060	6.145	12	.000	5.5093	.8965	3.5559	7.4626
	Equal variances not assumed			6.145	6.487	.001	5.5093	.8965	3.3549	7.6637

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-4 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสามารถในการบำบัดไขมันในชุดการทดลองที่ 2 และ 5 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## T-Test

Group Statistics

	VAR00001	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
EXP25	2	29	12.71193	12.89651	2.39482
	5	11	16.77291	11.75680	3.54481

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
EXP25	Equal variances assumed	.007	.934	-.910	38	.369	-4.06098	4.46408	-13.09803	4.97608
	Equal variances not assumed			-.949	19.743	.354	-4.06098	4.27795	-12.99208	4.87013

จ-5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณสารมลพิษที่ป้อนเข้าระบบกับค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ

ในข้อมูลความสามารถในการบำบัดของชุดการทดลองที่ 1 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์พบว่า เป็นรูปแบบความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Y = C + A * \text{EXP}(-B * X)$$

จึงใช้ Nonlinear Regression นำมาหาค่าความสัมพันธ์ของค่าปริมาณสารมลพิษที่ป้อนเข้าระบบ (X) กับค่าความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ (Y) ในชุดที่ 1 หาค่า A B และ C ได้ดังต่อไปนี้

$$R \text{ squared} = 1 - \text{Residual SS} / \text{Corrected SS} = .87518$$

Parameter	Estimate	Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval	
			Lower	Upper
A	-25.33478705	2.858743593	-31.26345840	-19.40611571
B	.101200320	.025000747	.049351944	.153048696
C	20.302367547	1.207395105	17.798383357	22.806351737

ดังนั้นจึงใช้ค่า	A	B	C
	-25.33478705	0.101200320	20.302367547

$$\begin{aligned} \text{แทนลงในสมการ } y &= C + A * \text{EXP}(-B * X) \\ &= 20.302367547 - (25.33478705 * \text{EXP}(-0.101200320 * x)) \end{aligned}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาสร้างกราฟจะได้ค่า y สูงสุดคือ 20.30 ดังแสดงเปรียบเทียบไว้แล้วในบทที่ 4 รูปที่ 4.13

ในชุดที่ 2 หาค่า A B และ C ได้ดังต่อไปนี้

$$R \text{ squared} = 1 - \text{Residual SS} / \text{Corrected SS} = .81588$$

Parameter	Estimate	Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval	
			Lower	Upper
A	-32.34650508	3.867938535	-40.39032361	-24.30268655
B	.062062893	.019955530	.020563097	.103562689
C	28.439182996	2.391236646	23.466334162	33.412031831

ดังนั้นจึงใช้ค่า

A	-32.34650508
B	0.062062893
C	28.439182996

$$\begin{aligned} \text{แทนลงในสมการ } y &= C + A * \text{EXP}(-B * X) \\ &= 28.439182996 - (32.34650508 * \text{EXP}(-(0.062062893 * x))) \end{aligned}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาสร้างกราฟจะได้ค่า y สูงสุดคือ 28.44 ดังแสดง

เปรียบเทียบไว้แล้วในบทที่ 4 รูปที่ 4.13

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก จ

## รูปแสดงขั้นตอนการดำเนินการ



รูปที่ จ-1 ลักษณะของกาบมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ-2 ลักษณะของแกลบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ-3 ลักษณะของปุยดอกที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ-4 ลักษณะของตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ฉ-5 Rotameter ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ฉ-6 Diaphragm Pump ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ฉ-7 SPME และ  
หลอดแก้วที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง  
อย่างไ่วัดความเข้มข้น



รูปที่ ฉ-8 ภาชนะใส่ Xylene  
ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ๙-9 Bench Scale Model และพื้นที่ที่ทำการทดลอง



รูปที่ ๙-10 ลักษณะการต่อระบบ ที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่ ๙-11 การวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุดออก



รูปที่ ๙-12 การวัดอุณหภูมิของอากาศที่จุดออก



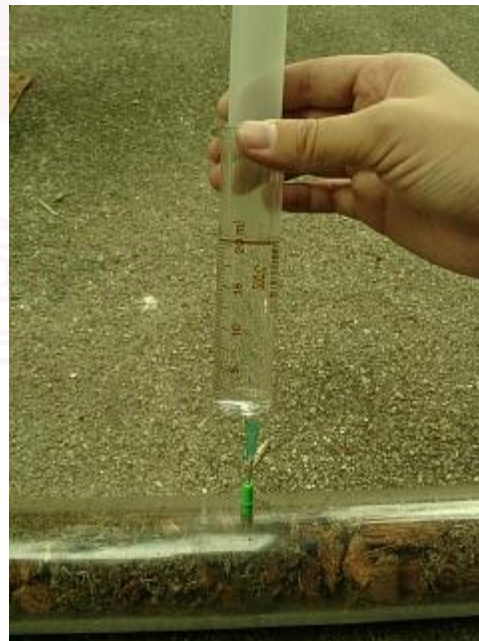
รูปที่ ๑-13 จุดเก็บตัวอย่าง  
อากาศออก



รูปที่ ๑-14 การวัดความดันลดของอากาศ  
ที่เข้าระบบ



รูปที่ ๑-15 การชั่งน้ำหนักท่อ เพื่อควบคุม  
ความชื้นตัวกลาง



รูปที่ ๑-16 การเติมน้ำให้ตัวกลางเพื่อให้มีน้ำหนัก  
เท่าเดิม



รูปที่ ฉ-17 การวัดความสูงของ  
ตัวกลาง



รูปที่ ฉ-18 การเก็บตัวอย่างเพื่อ  
วัดความเข้มข้นที่จุดเข้า



รูปที่ ฉ-19 การเก็บตัวอย่างเพื่อ  
วัดความเข้มข้นที่จุดออก



รูปที่ จ-20 Gas Chromatography ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ-21 การใช้ SPME ในการวิเคราะห์ความเข้มข้น

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุโรชา พูลสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2543 โดยได้รับทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย