

การบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ



นาย จิรวัดน์ กัมพยนต์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4004-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# REMOVAL OF ACETONE VAPOR BY BIOFILTRATION



Mr. Jirawat Kanpayan

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

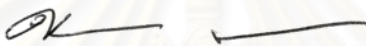
Academic Year 2005

ISBN 974-17-4004-2

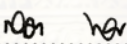
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ  
โดย    นายจิรวุฒิ กั้นพยนต์  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์

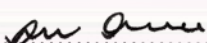
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พานิช)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

จิรวัดน์ กันพยนต์ : การบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ (REMOVAL OF ACETONE VAPOR BY BIOFILTRATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ.วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, 149 หน้า. ISBN 974-17-4004-2.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพ ในระดับห้องปฏิบัติการ การทดลองใช้ตัวกลางหลัก 4 ประเภท ได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ (เศษไม้จากการแปรรูปไม้) โดยใช้ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นแหล่งจุลินทรีย์ ปุ๋ยคอกเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ และเศษไม้เพื่อช่วยป้องกันการอุดตันของตัวกลาง อัตราส่วนของตัวกลางผสมประกอบด้วย ตัวกลางหลัก : เศษไม้ : ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน : ปุ๋ยคอก เท่ากับ 60 : 20 : 10 : 10 โดยปริมาตร การทดลองนี้ทำการแปรผันอัตราไหลอากาศที่ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นไออะซิโตนในช่วง 200-1,000 ส่วนในล้านส่วน

ผลการทดลอง พบว่า ตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีระยะเวลาพักที่เหมาะสมเท่ากับ 68 วินาที ในขณะที่ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดา และขี้กบ มีระยะเวลาพักที่เหมาะสมเท่ากับ 82 วินาที ระบบจึงมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ เท่ากับ 97, 90, 120 และ 83 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ โดยมีค่าความดันลด เท่ากับ 21, 40, 13 และ 7 มิลลิเมตรของน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ ดังนั้น ปุ๋ยหมัก จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพเนื่องจากมีความสามารถในการกำจัดสูงและค่าความดันลดที่ต่ำ และพบว่าอัตราส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อมวลอะซิโตนที่ถูกกำจัดเท่ากับ 1.6 สิ่งนี้บ่งบอกว่าการกำจัดไออะซิโตนเกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา ..วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..2548.....

## 4670262221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : BIOFILTRATION / ACETONE VAPOR / BIODEGRADATION

JIRAWAT KANPAYAN : REMOVAL OF ACETONE VAPOR BY BIOFITRATION.

THESIS ADVISOR :ASSOC.PROF.WONGPUN LIMPASENI, 149 pp. ISBN 974-17-4004-

2.

The objective of this research was to study the removal of acetone vapor by bench scale biofilter. Four main medias were used comprising biosolids soil, composted potting soil, compost and wood. The sludge from municipal wastewater treatment plant served as a source of microorganisms. Cow manure was used as a source of nutrients and wood chips were used to prevent bed compaction. The ratio of main media: wood chips : sludge : manure was 60 : 20 : 10 : 10 by volume. The experiment varied the gas flow rate at 2.5, 3.0 and 4.0 liters per minute and acetone concentration ranged from 200-1,000 ppmv.

This result showed that the optimum empty bed residence time was 68 seconds for compost media and 82 seconds for biosolids soil, composted potting soil and wood media in order to achieve the acetone removal efficiency more than 90 %. Biosolids soil, composted potting soil, compost and wood achieved the maximum elimination capacity of 97, 90, 120 and 83 g/m<sup>3</sup>-hr. The pressure drops were 21, 40, 13 and 7 mm water/meter of bed, respectively. The compost had high elimination capacity and low pressure drop. It is a suitable media for the removal of acetone vapor by biofiltration. The experimental mass ratio of carbon dioxide produced to the acetone eliminated equaled to 1.60, indicating that acetone was eliminated by biodegradation.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Environmental Engineering.....Student's signature.....*Jirawat*.....  
Field of study .Environmental Engineering.....Advisor's signature.....*Assoc. Prof. Wongpun Limpaseni*.....  
Academic year ..2005.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทาง รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว รองศาสตราจารย์ ดร.นพภาพร พานิช และอาจารย์ ดร.พิชญ์ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาแนะแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์และกลุ่มวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2547 และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความชื้นและพีเอชในดิน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ลดราคาในการวิเคราะห์ธาตุอาหารในตัวอย่าง

ขอขอบคุณ พี่นันต์ วีระณรงค์ และพี่สมใจ แสงดารา พี่ๆน้องๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ๆ ของผู้วิจัยในการสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย.....	4
2.2 การกรองทางชีวภาพ.....	5
2.3 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองทางชีวภาพ.....	6
2.3.1 การถ่ายเทก๊าซ.....	6
2.3.2 น้ำ.....	7
2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ.....	8
2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	9
2.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....	10
2.3.6 พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น.....	11
2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบการกรองทางชีวภาพ.....	12
2.4.1 ตัวกลาง.....	12
2.4.2 จุลินทรีย์.....	15
2.4.3 ปริมาณน้ำ.....	15
2.4.4 อุณหภูมิ.....	15
2.4.5 สภาพต่างและความเป็นกรด-ด่างของตัวกลาง.....	16
2.4.6 ธาตุอาหาร.....	16
2.4.7 ภาระบรรทุกของสารมลพิษ.....	16

2.4.8	ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน.....	17
2.5	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.6	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา.....	22
2.6.1	คุณสมบัติตัวกลาง.....	22
2.6.2	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ.....	22
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1	แผนการวิจัย.....	24
3.1.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง.....	24
3.1.2	ประเภทและอัตราส่วนผสมของวัสดุตัวกลาง.....	26
3.1.3	ความเข้มข้นไออะซิโตนและอัตราไหลอากาศ.....	26
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.3	ชุดทดลอง.....	27
3.4	การเก็บตัวอย่างอากาศและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	31
3.5	ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ.....	31
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	34
4.1	คุณสมบัติตัวกลาง.....	34
4.1.1	ขนาดอนุภาค.....	35
4.1.2	ความหนาแน่น.....	36
4.1.3	ความพรุน.....	36
4.1.4	ความชื้น.....	36
4.1.5	พีเอช.....	36
4.1.6	อินทรีย์วัตถุ.....	36
4.1.7	ปริมาณธาตุอาหาร.....	37
4.1.8	สรุปคุณสมบัติตัวกลาง.....	37
4.2	ประสิทธิภาพการบำบัด.....	38
4.2.1	อิทธิพลของภาระบรรทุกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	38
4.2.2	อิทธิพลของความสูงของตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	40
4.2.3	อิทธิพลของอัตราไหลอากาศและเวลากักพักที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการบำบัด.....	46
4.2.4	อิทธิพลของความเข้มข้นไออะซิโตนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	53
4.3	ความสามารถในการกำจัด.....	54



4.4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	61
4.5 สมดุลคาร์บอน.....	66
4.6 ปริมาณจุลินทรีย์.....	69
4.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ.....	69
4.8 ความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ พีเอช และอุณหภูมิ.....	70
4.9 ความดันลด.....	73
4.10 การทรุดตัวของตัวกลาง.....	76
4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท.....	76
4.12 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรม.....	81
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง.....	87
ภาคผนวก ข ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	98
ภาคผนวก ค ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา.....	105
ภาคผนวก ง ผลการทดลองตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	112
ภาคผนวก จ ผลการทดลองตัวกลางประเภทขี้กบ.....	119
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น	
อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที.....	126
ภาคผนวก ช ผลการทดลองปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น	
อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที.....	131
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองค่าความชื้นของตัวกลางและค่าความดันลด.....	136
ภาคผนวก ฌ ผลการทดลองค่า ความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีเอช.....	141
ภาคผนวก ญ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น.....	146
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	149

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอะซิโตน.....	4
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง.....	14
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง.....	24
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนผสมตัวกลาง.....	26
ตารางที่ 3.3 แผนการวิจัย.....	26
ตารางที่ 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	27
ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	31
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางหลัก.....	34
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางเสริม.....	35
ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุอาหารของตัวกลางผสม.....	37
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตนของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท.....	38
ตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดและค่าการะบรทุกวิกฤติ.....	59
ตารางที่ 4.6 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	67
ตารางที่ 4.7 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	68
ตารางที่ 4.8 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	68
ตารางที่ 4.9 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทขี้กบ.....	69
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท.....	77
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าการะบรทุกวิกฤติ และค่าความสามารถในการกำจัดไออะซิโตน.....	77
ตารางที่ 5.1 สรุปพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลอง.....	79

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบการกรองชีวภาพ.....	5
รูปที่ 2.2 กลไกการทำงานภายในเครื่องกรองชีวภาพ.....	6
รูปที่ 2.3 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ.....	8
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการถ่ายเทมวลสารภายในเครื่องกรองชีวภาพ..	11
รูปที่ 3.1 ดินใบก้ามปู.....	25
รูปที่ 3.2 ดินสีดา.....	25
รูปที่ 3.3 ปุ๋ยหมัก.....	25
รูปที่ 3.4 ชี๊บกบ.....	25
รูปที่ 3.5 เศษไม้.....	25
รูปที่ 3.6 ปุ๋ยคอก.....	25
รูปที่ 3.7 ตะกอนจุลินทรีย์.....	25
รูปที่ 3.8 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ.....	28
รูปที่ 3.9 ชุดการทดลองเครื่องกรองชีวภาพ.....	28
รูปที่ 3.10 ชุดสร้างไออะซิโตนและการติดตั้งRotameter.....	29
รูปที่ 3.11 ชุดสร้างไออะซิโตนและชุดสร้างความชื้นสัมพัทธ์อากาศ.....	29
รูปที่ 3.12 บริเวณทางเข้าของเครื่องกรองชีวภาพ.....	30
รูปที่ 3.13 ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดและค่าภาระบรรจุทุกวิถี.....	33
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรจุทุก ในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	38
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรจุทุก ในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	39
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรจุทุก ในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	39
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรจุทุก ในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทชี๊บกบ.....	40
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล. ....	41
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท ดินสีดา ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล. ....	41



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และประสิทธิภาพ การบำบัดในช่วงเวลาการทดลอง ของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	51
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และประสิทธิภาพ การบำบัดในช่วงเวลาการทดลอง ของตัวกลางประเภทปุยหมัก.....	52
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และประสิทธิภาพ การบำบัดในช่วงเวลาการทดลอง ของตัวกลางประเภทจี้กบ.....	52
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตนและประสิทธิภาพการบำบัดของ ตัวกลางทั้ง 4 ประเภทที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที.....	53
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ที่ความเข้มข้น ไออะซิโตน 1,000 สนล. และที่อัตราไหลอากาศต่างๆ.....	54
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถ ในการกำจัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	55
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถ ในการกำจัดของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	55
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถ ในการกำจัดของตัวกลางประเภทปุยหมัก.....	56
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถ ในการกำจัดของตัวกลางประเภทจี้กบ.....	56
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัด ที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	57
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัด ที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	57
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัด ที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทปุยคอก.....	58
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัด ที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทจี้กบ.....	58
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง ประเภทดินใบก้ามปู.....	59
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง ประเภทดินสีดา.....	60

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง ประเภทปุ๋ยหมัก.....	60
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง ประเภทจี้กบ.....	61
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู.....	62
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีของตัวกลางประเภท ดินสีดา.....	62
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีของตัวกลางประเภท ปุ๋ยหมัก.....	63
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีของตัวกลางประเภท จี้กบ.....	63
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	64
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	65
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	65
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทจี้กบ.....	66
รูปที่ 4.47 ปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนและหลังการเดินระบบของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท.....	70
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ และพีเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	71
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ และพีเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทดินสีดา.....	72
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ และพีเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	72

รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ และพืเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทซีกบ.....	73
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและค่าความดันลดตลอดเวลา เดินระบบ ของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู.....	74
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและค่าความดันลดตลอดเวลา เดินระบบ ของตัวกลางประเภทดินสิดา.....	74
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและค่าความดันลดตลอดเวลา เดินระบบ ของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก.....	75
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและค่าความดันลดตลอดเวลา เดินระบบ ของตัวกลางประเภทซีกบ.....	75
รูปที่ 4.56 เปรียบเทียบค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท.....	76

## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

### สัญลักษณ์

$C_{ads}$	= ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับ
$C_B$	= ค่าของแรงแห้ง่าย (VSS) ของน้ำชะตัวกลาง
$C_{C,out}$	= ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ
$C_G$	= ความเข้มข้นของสารในอากาศ
$C_{GI}$	= ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ
$C_{G0}$	= ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ
$C_L$	= ความเข้มข้นของสารในน้ำ
$C_L^*$	= ความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับความเข้มข้นของอากาศบริเวณนั้น
$C_{max}$	= ความเข้มข้นของสารมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้
$H$	= ค่าคงที่ของเฮนรี
$K_f$	= ค่าคงที่ของ Freundlich
$K_L$	= ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir
$K_S$	= Half-saturation constant
$k_{max}$	= อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด
$k_t$	= ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล
$n$	= ค่าคงที่
$P_{CO_2}$	= อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
$Q_A$	= อัตราไหลอากาศ
$Q_L$	= อัตราไหลของน้ำชะ
$t$	= เวลา
$V_f$	= ปริมาตรตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ
$X$	= ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ
$\alpha$	= อัตราส่วนของคาร์บอนในมวลชีวภาพ( $C_5H_7NO_2$ )
$\beta$	= อัตราส่วนของคาร์บอนต่อSCODในน้ำชะ
$\mu$	= ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ
$\mu_{max}$	= ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด



**คำย่อ**

ACE = ความเข้มข้นอะซิโตน

EBRT = เวลาที่พัก (Empty Bed Residence Time)

EC = ค่าความสามารถในการกำจัด (Elimination Capacity)

Max. EC = ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity)

LPM = ลิตรต่อนาที

ppmv = ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร (สนล.) (Part per million by volume)

RE = ประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Efficiency)

VOCs = สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลภาวะอากาศเป็นปัญหาที่ค่อนข้างจะถูกละเลย และไม่ให้ความสำคัญมากนัก เนื่องจากเป็นปัญหาที่มองเห็นไม่ชัดเจน โดยเฉพาะมลพิษอากาศประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ในระดับระยะจนถึงขั้นเป็นพิษต่อร่างกาย และบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง อีกทั้งสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถทำปฏิกิริยากับ ออกไซด์ของไนโตรเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดปัญหา เช่น กลุ่มควันในบรรยากาศ ฝนกรด สภาวะโลกร้อน โอโซนซึ่งล้วนแต่เป็นสารที่ก่อให้เกิดอาการระคายเคืองต่อสิ่งมีชีวิต ทั้งในมนุษย์ พืช และสัตว์ ลดความสามารถในการมองเห็น ตลอดจนเกิดการกัดกร่อนต่อสิ่งก่อสร้าง โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย มาจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตัวทำละลาย เช่น อุตสาหกรรมสารเคมี อุตสาหกรรมน้ำมัน และระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

ปัจจุบันการเติบโตของอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตัวทำละลาย (Solvent) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังเช่น ประเทศไทยมีการนำเข้าอะซิโตนเพิ่มขึ้นจาก 19,030,429 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2544 เป็น 68,816,831 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2547 (กรมศุลกากร, 2544-2547) อุตสาหกรรมประเภทผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กในต่างประเทศ ก่อให้เกิดมลพิษอากาศประกอบด้วย อะซิโตนต่ำกว่า 800 ส่วนในล้านส่วน(สนล.) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ต่ำกว่า 50 สนล. โทลูอินต่ำกว่า 20 สนล. และไตรคลอโรเอทิลีนต่ำกว่า 13 สนล. (Den, 2001 อ้างถึงใน Den, Huang และ Li, 2003)

อะซิโตนจัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายประเภท สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบและสามารถละลายน้ำได้ดี โดยก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและคุณภาพอากาศ The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ของสหรัฐอเมริกา เสนอค่าความเข้มข้นของอะซิโตนในบรรยากาศขณะทำงานไม่เกิน 250 สนล. สำหรับการทำงาน 10 ชั่วโมงต่อวัน และ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ (ATSDR, 1995)

เทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) การเผา (Incineration) การควบแน่น (Condensation) ระบบเมมเบรน (Membrane systems) เป็นต้น แต่เทคโนโลยีเหล่านี้ต้องใช้เงินลงทุนและค่าดำเนินการสูง อีกทั้งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ขั้นที่สอง ซึ่งต้องมีการบำบัดต่อไป

การกรองทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการควบคุมมลพิษในอากาศ โดยให้อากาศเสียผ่านวัสดุที่มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ โดยอาศัยหลักการ ใช้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารมลพิษในอากาศให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ขั้นที่สอง สำหรับมลพิษ

ธรรมชาติสามารถควบคุมประสิทธิภาพได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และเป็นเทคโนโลยีที่มีค่า  
 ดำเนินการต่ำ การกรองทางชีวภาพจึงคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Leson และ Winer, 1991)  
 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดของการกรองทางชีวภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นประเภท  
 ของตัวกลางที่เหมาะสม ประเภทและความเข้มข้นของสารมลพิษ อัตราไหล่อากาศ และระยะเวลา  
 กักพัก เป็นต้น อีกทั้งต้องควบคุมสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประเภทของตัวกลางที่เหมาะสม โดยมีตัวกลางที่ใช้ศึกษาทั้งหมด 4  
 ประเภท ได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ อีกทั้งเป็นวัสดุที่หาได้  
 ง่ายภายในประเทศและมีราคาถูก และศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไออะซิโตน ตลอดจน  
 ระยะเวลาพัก นำไปสู่เกณฑ์การออกแบบเบื้องต้นของระบบการบำบัดสารประกอบอินทรีย์  
 ระเหยง่ายโดยการกรองทางชีวภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัด สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย  
 ประเภทอะซิโตน โดยระบบการกรองทางชีวภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ ไออะซิโตน และระยะเวลาพักที่ส่งผล  
 กระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดของการกรองทางชีวภาพ

1.2.3 เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อบำบัดสารประกอบ  
 อินทรีย์ระเหยง่ายประเภทอะซิโตน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยคุณภาพอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 การวิจัยนี้ทดลองกับชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Bench scale) จำนวน 4 ชุด  
 การทดลอง

1.3.2 ตัวกลางหลัก ได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ

1.3.3 ตัวกลางเสริม ได้แก่ เศษไม้ ปุ๋ยคอก และตะกอนจุลินทรีย์

1.3.4 แปรผันความเข้มข้น ไออะซิโตนที่ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 สมล.

1.3.5 แปรผันอัตราไหล่อากาศที่ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาที

1.3.6 อุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ให้เป็นไปตามอุณหภูมิห้องทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 กระบวนการกรองทางชีวภาพจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

1.4.2 นำวัสดุธรรมชาติและมีอยู่ในประเทศมาใช้ประโยชน์เป็นตัวกลาง

1.4.3 ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด

1.4.4 เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบการกรองทางชีวภาพหรือการนำไปใช้ในการออกแบบใช้งานจริงต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

#### 2.1 สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

Nevers (2000) ให้คำจำกัดความว่า สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย คือ สารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งหรือของเหลวโดยมีความดันไอที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 0.01 psia (0.0007 บรรยากาศ) และมีจุดเดือดที่ชั้นบรรยากาศปกติสูงจนถึง 500 °F (260 °C) ส่วนใหญ่มักจะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนน้อยกว่า 12 อะตอม

##### 2.1.1 สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทอะซิโตน

อะซิโตนจัดเป็นสารอินทรีย์ประเภทคีโตน เป็นตัวทำละลายทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตยา ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น พลาสติก น้ำมันชักเงา และเครื่องสำอาง เป็นต้น อะซิโตนเป็นสาเหตุของอาการระคายเคืองตาและจมูก ปวดหัว ทำให้เซื่องซึม เบื่ออาหาร คลื่นเหียน อาเจียน แขนขาอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ และระคายเคืองเยื่อเมือก (Rafson, 1998) โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอะซิโตน

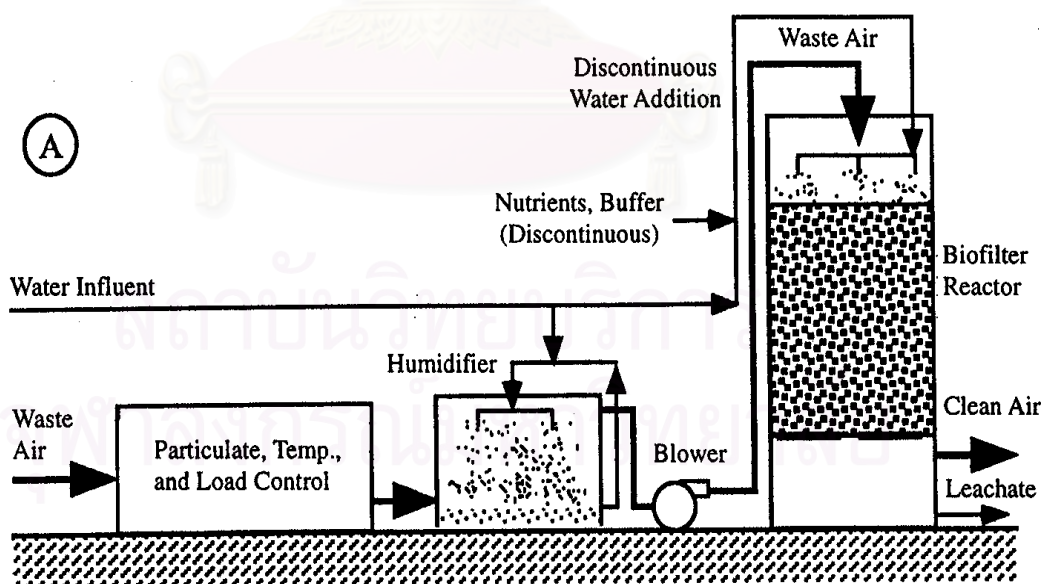
Parameter	Value
Synonyms	2 - propanone; dimethy ketone
CAS registry no.	67 - 64 - 1
Chemical formula	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>
Molecular weight	58.08
Physical state	Liquid
Vapor pressure at 20°C	181.72 mmHg
Melting point	-94°C
Boiling point	56.5°C
Solubility in water	Miscible
Log K <sub>ow</sub>	-0.24
Henry's law constant	4.26 x 10 <sup>-5</sup> atm - m <sup>3</sup> /mol
Odor threshold in air (absolute)	13 - 20 ppm

ที่มา: U.S. Environmental Protection Agency (2004)

## 2.2 การกรองทางชีวภาพ (Biofiltration)

การกรองทางชีวภาพ คือ กระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์ที่อาศัยบนตัวกลางทำการย่อยสลายมลพิษที่มีอยู่ในอากาศ โดยที่จุลินทรีย์จะเติบโตภายในฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) บนผิวของตัวกลางหรือแขวนลอยในน้ำบริเวณรอบๆ ตัวกลาง ตัวกลางที่ดีควรเป็นวัสดุเนื้อเยื่อ เช่น ปุ๋ยหมัก ถ่าน เป็นต้น ที่สำคัญต้องเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวมากพอสำหรับการยึดเกาะ เมื่ออากาศผ่านเครื่องกรองชีวภาพ มลพิษในอากาศจะถูกดูดซับเข้าสู่ภายในฟิล์มชีวภาพและวัสดุตัวกลาง โดยมลพิษจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป ภายในเครื่องกรองชีวภาพจะมีกลไกทำงานร่วมกันประกอบไปด้วย การดูดซึม (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Degradation) และการคายสารออก (Desorption) ของก๊าซมลพิษ และอาจต้องมีการเติมน้ำให้กับระบบเพื่อรักษาปริมาณความชื้น ตลอดจนการเติมธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์ภายในเครื่องกรองชีวภาพ

เครื่องกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพนั้น ตัวกลางควรมีคุณสมบัติ เช่น ความพรุน ระดับการยึดตัว ความสามารถกักเก็บน้ำ และความสามารถในการอยู่อาศัยของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เหมาะสม อีกทั้งต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ พิเศษของตัวกลาง อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และธาตุอาหารให้เหมาะสม เป็นต้น

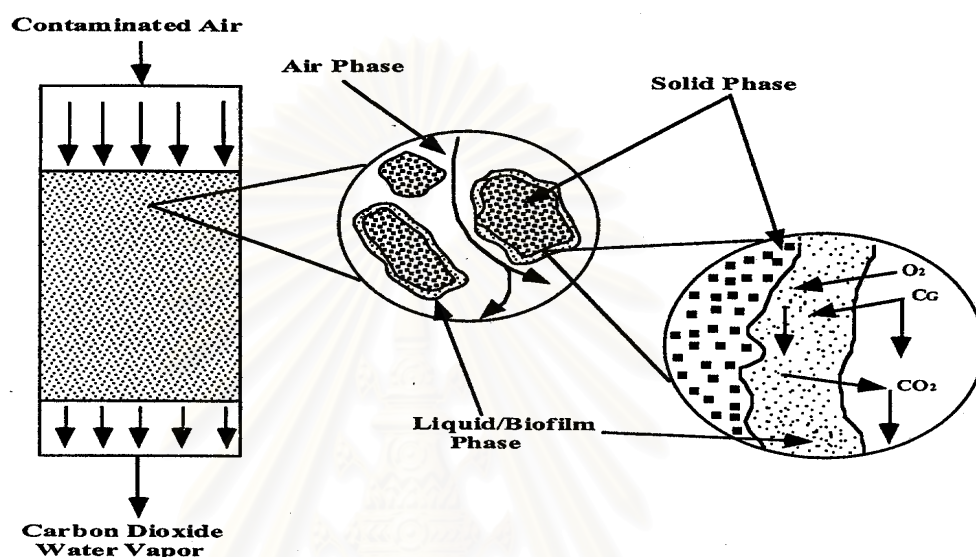


รูปที่ 2.1 ระบบการกรองทางชีวภาพ

ที่มา : Deviny, Deshusses และ Webster (1999)

## 2.3 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองทางชีวภาพ (Mechanism of biofiltration)

การออกแบบและควบคุมระบบการกรองทางชีวภาพ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจถึง กลไกต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกรองชีวภาพ เพื่อช่วยให้สามารถออกแบบและพัฒนาาระบบให้ดีขึ้น ตลอดจนการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ระบบเสียหายได้อย่างถูกต้อง กลไกที่เกี่ยวข้องมีดังนี้



รูปที่ 2.2 กลไกการทำงานภายในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devinny และคณะ (1999)

### 2.3.1 การถ่ายเทก๊าซ (Gas transfer)

#### 2.3.1.1 ความสมดุลของก๊าซ (The equilibrium of gas)

การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ (Water phase) ที่สภาวะสมดุลการแยกตัวของสารจากน้ำไปยังอากาศ อธิบายโดยอาศัยกฎของเฮนรี (Henry's law) ที่ว่า ความเข้มข้นของสารในอากาศเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารในน้ำ ดังสมการที่ 2.1

$$C_G = H \times C_L \dots\dots\dots 2.1$$

โดยที่ H = ค่าคงที่ของเฮนรี  
 $C_G$  = ความเข้มข้นของสารในอากาศ  
 $C_L$  = ความเข้มข้นของสารในน้ำ

### 2.3.1.2 อัตราการถ่ายเทก๊าซ (Gas transfer rate)

การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ เป็นวัตถุประสงค์หลักของการกรองทางชีวภาพ หากอัตราการถ่ายเทมวลของสารมลพิษสูงจะยอมให้อากาศไหลผ่านถังปฏิกรณ์เร็วขึ้น ส่งผลให้ระบบการกรองทางชีวภาพมีความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ การถ่ายเทมวลจากอากาศไปยังน้ำ เป็นไปตามทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film theory) อัตราการถ่ายเทมวลสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความเข้มข้นของสารในสถานะของเหลวหรือก๊าซ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลดังสมการที่ 2.2

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

- โดยที่  $C_L$  = ความเข้มข้นของสารในน้ำ  
 $C_L^*$  = ความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับความเข้มข้นของอากาศบริเวณนั้น  
 $t$  = เวลา  
 $k_t$  = ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทก๊าซเกิดขึ้นในกระบวนการที่สารมลพิษในอากาศแพร่ลงสู่ฟิล์มชีวภาพซึ่งอัตราการถ่ายเทก๊าซขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารมลพิษ และ ค่าคงที่อัตราการถ่ายเทมวล

### 2.3.2 น้ำ (The water phase)

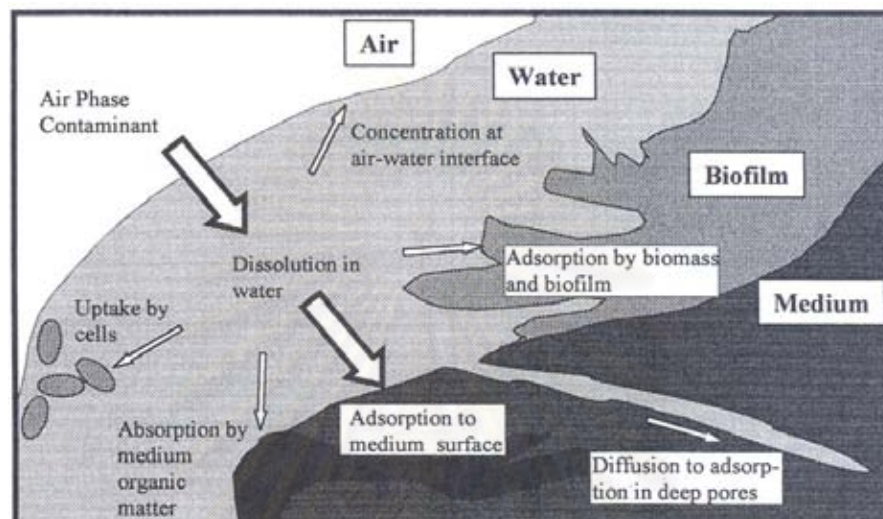
การกรองทางชีวภาพมีสมมุติฐานว่าน้ำอยู่ในสถานะอยู่กับที่ (Stationary) อาจจะมีน้ำไหลลงด้านล่างของถังปฏิกรณ์เนื่องจากการควบแน่นหรือการเติมน้ำ (Irrigation) มากเกินไป แต่การไหลจะช้า และปกติผู้ควบคุมระบบจะลดการไหลของน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดน้ำชะ (Leachate) การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นการไหลแบบราบเรียบมากกว่าการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้น การแพร่จึงเป็นกลไกหลักในการถ่ายเทมวลไปสู่ น้ำ การย่อยสลายทางชีวภาพและการดูดซับสารมลพิษในน้ำ หรือในฟิล์มชีวภาพจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวกลางคล้ายกับการซึม สารมลพิษจะแพร่ไปยังตัวกลางและปลดปล่อยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากย่อยสลายทางชีวภาพออกมา ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีความดันไอสูงจึงถ่ายเทไปสู่อากาศ

การแพร่ของสารมลพิษเข้าสู่ฟิล์มชีวภาพ โดยปกติแล้วจะช้ากว่าการแพร่ในอากาศ เนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทมวลของน้ำ โดยที่ส่วนด้านล่างของชั้นฟิล์มชีวภาพจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษลดน้อยลงและอาจไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่ น้ำเป็นสิ่งสำคัญโดยเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และสารมลพิษจะแพร่สู่น้ำ และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือดูดซับต่อไป



### 2.3.3 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants)

เมื่อโมเลกุลของสารมลพิษละลายน้ำจะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ การดูดซับไว้บนผิวของตัวกลาง ดูดซับไว้บนผิวของสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ และดูดซับไว้ภายในสารอินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพหรือตัวกลางหรือการสะสมที่ผิวน้ำ จุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพนำสารมลพิษไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ

ที่มา : Devigny และคณะ (1999)

การดูดซับสารมลพิษของเครื่องกรองชีวภาพ อธิบายได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่

(1) Freundlich model ซึ่งตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า พื้นที่สำหรับการดูดซับมีไม่จำกัด และปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำ ดังสมการที่ 2.3

$$C_{ads} = K_f C_L^{1/n} \dots\dots\dots 2.3$$

โดยที่  $C_{ads}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับ

$C_L$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะของเหลว

$n$  = ค่าคงที่

$K_f$  = ค่าคงที่ของ Freundlich

(2) Langmuir model ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับจะสมดุลทางเคมีกับความเข้มข้นของสารมลพิษที่ละลายน้ำ และการดูดซับมีพื้นที่จำกัด ดังสมการที่ 2.4

$$C_{\text{ads}} = \frac{C_{\text{max}} \times C_L}{K_L + C_L} \dots\dots\dots 2.4$$

- โดยที่  $C_{\text{ads}}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกดูดซับ  
 $C_L$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะของเหลว  
 $C_{\text{max}}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษสูงสุดที่สามารถดูดซับได้  
 $K_L$  = ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir

โดยปกติเป้าหมายหลักในการออกแบบของการกรองทางชีวภาพ คือการย่อยสลายสารมลพิษทางชีวภาพ แต่การดูดซับในสารอินทรีย์ก็ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลา การดูดซับจะมีผลในช่วงเริ่มต้นของการทำงาน (Start-up) เป็นหลัก

### 2.3.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

1) फिल्मชีวภาพ (Biofilm) คือ มวลของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนผิวของตัวกลางและทำการย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย โดยกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ फिल्मชีวภาพจะเป็นฟิล์มบางๆอยู่ระหว่างของแข็งและก๊าซ การกรองทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อฟิล์มชีวภาพมีความหนา 1- 5 มิลลิเมตร

2) จลนศาสตร์ (Kinetics) คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการย่อยสารมลพิษทางชีวภาพและอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพิจารณาค่าทางจลนศาสตร์ คือ Michaelis-Menten equation เป็นดังสมการ 2.5

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{k_{\text{max}} C_L}{K_S + C_L} \dots\dots\dots 2.5$$

- โดยที่  $C_L$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษในสถานะของเหลว  
 $k_{\text{max}}$  = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด  
 $K_S$  = Half-saturation constant

เมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษ ( $C_L$ ) มากกว่าค่าคงที่การอิ่มตัว ( $K_m$ ) มากๆ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพจะเท่ากับ อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด ( $k_{max}$ ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หมายถึงว่า อัตราการย่อยสลายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษ

เมื่อสารมลพิษมีความเข้มข้นต่ำ ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยในการกรองทางชีวภาพบริเวณทางเข้าของก๊าซจะเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เนื่องจากมีความเข้มข้นสูง แต่เมื่อห่างออกไปจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์พิจารณาได้จากสมการที่ 2.6

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \dots \dots \dots 2.6$$

โดยที่ X = ความเข้มข้นของมวลชีวภาพ  
 $\mu$  = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ

การคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะ ใช้ความสัมพันธ์ของ Monod ดังสมการที่ 2.7

$$\mu = \frac{\mu_{max} C_L}{K_m + C_L} \dots \dots \dots 2.7$$

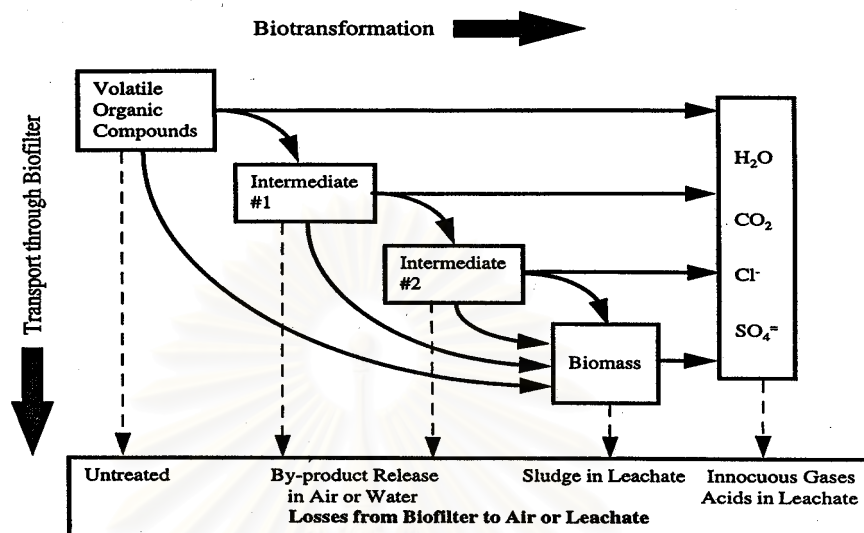
$\mu_{max}$  = ค่าคงที่อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด

### 2.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Product generation)

อากาศปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) หรือแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ไหลผ่านระบบการกรองชีวภาพ จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟต และไนเตรท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารมลพิษที่ต้องการบำบัด ดังรูปที่ 2.4 ในอีกทางหนึ่ง สารประกอบอาจถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อันดับที่สองซึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์ประเภทอื่นต่อไป สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือย่อยสลายยากจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารใหม่โดยจุลินทรีย์ สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่นี้อาจจะระเหยไปกับอากาศเนื่องจากมีความดันไอสูง ขณะที่บางชนิดมีความทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ก็จะสะสมในเครื่องกรองชีวภาพหรือถูกน้ำชะทิ้งไป

การศึกษาการกรองทางชีวภาพของเอทานอล พบว่า กรณีที่มีการป้อนสารมลพิษให้ระบบในอัตราที่สูง อาจเป็นเหตุให้เกิดการสะสมตัวของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่กับมวลชีวภาพซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่บางตัวมีสภาพเป็นกรดอะซิติก การสะสมของกรดอะซิติกทำ

ให้พีเอชของตัวกลางลดต่ำลง ส่งผลให้กระบวนการเมทาบอลิซึมช้าลง หากมีการสะสมมากๆ จะทำให้ระบบการกรองทางชีวภาพเสียหายได้



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและกระบวนการถ่ายเทมวลสารภายในเครื่องกรองชีวภาพ  
ที่มา : Deviny และคณะ (1999)

### 2.3.6 พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น (Heat generation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น ขณะที่จุลินทรีย์ต้องการพลังงานในดำรงชีวิตซึ่งได้มาจากพลังงานทางเคมี ก่อให้เกิดพลังงานความร้อน สำหรับสารมลพิษบางชนิดปริมาณความร้อนมีความสำคัญมาก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ของเอทานอล 1 กรัมต่ออากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 20°C เป็น 38 °C

ในระบบสภาวะไม่คงที่ (Non steady state) พลังงานความร้อนเกิดเนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพจะช่วยให้เครื่องกรองชีวภาพมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตัวกลางและเครื่องกรองชีวภาพจะดูดซับพลังงานความร้อนไว้ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) อุณหภูมิของตัวกลางและถังปฏิกรณ์จะไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิของระบบมีความแตกต่างกับอุณหภูมิภายนอกจะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับถังปฏิกรณ์

ในระดับห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อน โดยทำการหุ้มฉนวนกันความร้อน สำหรับถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับภายนอกต่อปริมาตรต่ำ การถ่ายเท

ความร้อนสู่ผนังถังปฏิกรณ์ถือว่าน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลให้ปริมาณน้ำในตัวกลางจะระเหยออก และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจะสูงกว่าอากาศที่เข้า

ความร้อนของอากาศที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณปริมาณพลังงานที่ถูกใช้ไปในการทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลรวมของความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยกับความร้อนที่ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเปรียบเทียบกับความร้อนจากการเผาไหม้ของสารมลพิษที่บำบัด เพื่อคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ถูกย่อยสลายไป ดังนั้นสมดุลความร้อนสามารถคำนวณได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดของมวลชีวภาพ

## 2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบการกรองทางชีวภาพ

### 2.4.1 ตัวกลาง (Media)

#### 2.4.1.1 เกณฑ์ในการเลือกตัวกลางที่เหมาะสม

1) ปริมาณธาตุอาหารอนินทรีย์ (Inorganic nutrient content) กระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จำเป็นต้องธาตุอาหารประเภทสารอนินทรีย์ อันประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซัลเฟต ปกติการให้ธาตุอาหารจะทำการปล่อยช้าๆ เช่น การเติมธาตุอาหารประเภทเกล็ด หรือการปล่อยสารละลายธาตุอาหารให้กับตัวกลาง โดยทั่วไปตัวกลางประเภทมูลรวม (Compost base) การเติมธาตุอาหารเบื้องต้นที่พิจารณาแล้วว่าเพียงพอ คือประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปริมาณอยู่ในช่วง 0.4, 0.15 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวกลางแห้ง

2) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic content) บางกรณีที่เครื่องกรองชีวภาพอาจจะได้รับการปล่อยสารมลพิษไม่ต่อเนื่อง อันเป็นเหตุมาจากการหยุดทำงานของกระบวนการผลิต หรือการหยุดเครื่องกรองชีวภาพในวันหยุด ดังนั้นตัวกลางที่มีสารอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยหมักจึงมีแหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์ขณะหยุดระบบ

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

4) ปริมาณน้ำ (Water content) ตัวกลางที่ดีต้องควรมีคุณสมบัติในการกักเก็บปริมาณน้ำในระดับที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ โดยตัวกลางควรมีปริมาณน้ำระหว่าง 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

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

6) ความพรุนและการดูดซับ (Sorptions characteristics, porosity) เพื่อความมั่นใจว่าก๊าซมีการไหลแบบตามกัน (Plug flow) และมีค่าความดันตกที่ต่ำ ดังนั้น ความพรุนของตัวกลางควรอยู่ในช่วง 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

7) การยึดเกาะของแบคทีเรีย (Bacteria attachment) วัสดุตัวกลางจะต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการยึดเกาะของแบคทีเรีย งานวิจัยที่ผ่านมาสรุปว่าตัวกลางที่ขรุขระมีความพรุนสูงและชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีการสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว

#### 2.4.1.2 ประเภทของตัวกลาง

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

2) พีท (Peat) โดยธรรมชาติพีทมีสภาพเป็นกรดและไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการควบคุมปริมาณน้ำจึงทำได้ค่อนข้างยาก จึงต้องนำสลัดจ์มาเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เนื่องจากพีทไม่มีกลุ่มจุลินทรีย์อาศัยอยู่ ตลอดจนมีปริมาณธาตุอาหารน้อยกว่าปุ๋ยหมักจึงต้องมีการเติมธาตุอาหาร แต่มีข้อดีที่ว่ามีความดันตกที่ต่ำมาก

3) ดิน (Soil) การนำดินมาใช้ประโยชน์ในการกรองทางชีวภาพเนื่องจากดินมีรากากและอุดมสมบูรณ์ไปด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ท้องถิ่น แต่ดินก่อให้เกิดค่าความดันตกที่สูงจึงต้องมีการฟื้นฟูบ่อย

4) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกิดมีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่ดีมาก เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ มีความคงทนต่อการแตกหัก มีคุณสมบัติในการยึดเกาะของน้ำที่ดีและมีพื้นผิวการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูง น้ำและมวลชีวภาพที่ผิวจะทำให้ความสามารถการดูดซับลดลง แต่จำเป็นต้องมีการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ และการให้ธาตุอาหาร ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานกันทั่วไปทำมาจากกะลามะพร้าวซึ่งมีรูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ซม. ยาว 0.5 ซม.

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

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

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

สรุปการเลือกใช้ตัวกลาง ดังตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของตัวกลางที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้ตัวกลางขึ้นกับความเหมาะสม โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและประโยชน์การใช้งาน ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ และเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลาง

คุณสมบัติ/ตัวกลาง	ปุ๋ยหมัก	พีท	ดิน	ถ่านกัมมันต์	วัสดุสังเคราะห์
จำนวนจุลินทรีย์	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
พื้นที่ผิวสัมผัส	ปานกลาง	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง
การซึมผ่านอากาศ	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
ปริมาณธาตุอาหาร	สูง	ปานกลาง-สูง	สูง	ไม่มี	ไม่มี
ความสามารถการดูดซับ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-สูง	ไม่มี-สูง
อายุการใช้งาน	2-4 ปี	2-4 ปี	มากกว่า 30 ปี	มากกว่า 5 ปี	มากกว่า 15 ปี
ราคา	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลาง-สูง	สูงมาก
การใช้งานทั่วไป	ง่ายและคุ้มค่าต่อการลงทุน	มีปัญหาเรื่อง การควบคุม ความชื้น	เหมาะกับระบบที่มีการระบายทุกต่ำ	ต้องเติมธาตุอาหาร อาจทำให้ราคาสูง	เหมาะสำหรับ Biotrickling filter

ที่มา : ดัดแปลงจาก Devigny และคณะ (1999)

## 2.4.2 จุลินทรีย์ (Microbial)

ในเครื่องกรองชีวภาพ จุลินทรีย์จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารมลพิษให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงาน และ มวลชีวภาพที่เกิดขึ้นใหม่ แบคทีเรียและราเป็นจุลินทรีย์หลักที่อยู่ในฟิล์มชีวภาพ ข้อดีของแบคทีเรีย คือสามารถใช้สารอาหารและเติบโตได้อย่างรวดเร็วในสภาวะที่เหมาะสม ส่วนราจะเติบโตช้าและมีขนาดที่ใหญ่กว่าแบคทีเรีย ทำให้รามีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อยกว่าแบคทีเรีย และราทนต่อสภาวะต่างๆ ได้ดี แต่ที่สำคัญ ราจะสร้างเส้นใยที่ซับซ้อนซึ่งจะขัดขวางการไหลของอากาศ และยังเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างตัวกลาง หากราเติบโตมากขึ้นจะทำให้ค่าความดันลดสูงขึ้น

## 2.4.3 ปริมาณน้ำ (Water content)

น้ำเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในเครื่องกรองชีวภาพ หากการควบคุมปริมาณน้ำไม่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพลดต่ำลง โดยน้ำจะมีความสำคัญดังนี้

### 2.4.3.1 ผลกระทบทางชีววิทยา (Biological effects)

น้ำเป็นส่วนประกอบภายในเซลล์จุลินทรีย์ น้ำจึงมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตอยู่ของกลุ่มจุลินทรีย์

### 2.4.3.2 ผลกระทบต่อการแยกตัว (Partition effects)

ปริมาณน้ำมีผลต่อการถ่ายเทมวล เนื่องจากขั้นตอนการกรองทางชีวภาพมีการถ่ายเทสารมลพิษจากอากาศไปสู่ น้ำ ก่อนนำไปสู่กลไกการดูดซับ การดูดซึม และการย่อยสลายทางชีวภาพ หากมีปริมาณน้ำมากหมายถึง สารมลพิษละลายน้ำได้มากขึ้น โอกาสในการย่อยสลายก็มากขึ้นด้วย อีกทั้งการบำบัดสารมลพิษย่อมเร็วและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

### 2.4.3.3 การขัดขวางการไหลของอากาศ (Interference with air flow)

หากมีน้ำในเครื่องกรองชีวภาพมากเกินไป จะเกิดการขัดขวางการไหลของอากาศเนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลผ่านช่องว่างที่เต็มไปด้วยน้ำ เมื่อเครื่องกรองชีวภาพไม่มีระบบการเติมน้ำโดยตรงสามารถควบคุมปริมาณน้ำได้ โดยการให้ความชื้นกับอากาศที่เข้าเครื่องกรองชีวภาพ ควรควบคุมปริมาณความชื้นในตัวกลางให้อยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นสัมพัทธ์อากาศมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ การควบคุมปริมาณน้ำในตัวกลางโดยควบคุมปริมาณความชื้นของอากาศที่เข้าเครื่องกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียว อาจกระทำได้ยากหรือเป็นไปได้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้นจากการออกซิเดชันสารมลพิษ

## 2.4.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์จะมีอุณหภูมิต่างๆ บรรจุสารเคมีและเอนไซม์ในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆจำนวนมาก ซึ่งปฏิกิริยา



จะเกิดเร็วขึ้นหากอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาส่วนมากจะเพิ่มเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น  $10^{\circ}\text{C}$  แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ เช่น เยื่อหุ้มไขมันจะถูกย่อยสลาย เมื่ออุณหภูมิสูงและเซลล์จะถูกทำลายโดยความร้อน และค่าคงที่ของเฮนรีสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซมลพิษลดลง เป็นไปได้ที่การดูดซับสารมลพิษจะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทสารมลพิษจากอากาศไปยังจุลินทรีย์ลดลง

#### 2.4.5 สภาพต่างและความเป็นกรด-ด่างของตัวกลาง (Medium pH and alkalinity)

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถมีชีวิตอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม และอาจจะเกิดการยับยั้งหรือตายหากสภาพกรด-ด่างอยู่นอกช่วง โดยทั่วไปเครื่องกรองชีวภาพมักจะออกแบบให้มีค่าพีเอชใกล้เคียง 7 การควบคุมความเป็นกรดภายในเครื่องกรองชีวภาพอาจทำได้โดยการเติมบัฟเฟอร์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

#### 2.4.6 ธาตุอาหาร (Nutrients)

จุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพจะใช้สารมลพิษเป็นแหล่งพลังงาน และคาร์บอน อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารในการดำรงชีพ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซัลเฟอร์ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม เหล็ก และอื่นๆ เครื่องกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพต้องมีการจัดเตรียมวิธี และปริมาณการเติมธาตุอาหารให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ ปุ๋ยหมักมีข้อดีในแง่มีธาตุอาหารอยู่ เนื่องจากปุ๋ยหมักทำได้จากซากพืช หรือ สัตว์จากน้ำเสีย เป็นต้น ส่วนตัวกลางที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น หิน ถ่านกัมมันต์ พลาสติก หรือ Polyurethane foam ต้องมีการเติมธาตุอาหารให้เพียงพอ

Hunter และ Oyama (2000) แนะนำอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ประมาณ 100:10:1 โดยมวล

#### 2.4.7 ภาระบรรทุกของสารมลพิษ (Contaminant load)

ภาระบรรทุกของสารมลพิษ คือ มวลของสารมลพิษที่ปล่อยเข้าเครื่องกรองชีวภาพต่อเวลาต่อปริมาตร เป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อระบบกรองทางชีวภาพ ประสิทธิภาพการบำบัดจะดีขึ้นเมื่อภาระบรรทุกต่ำ ภาระบรรทุกของสารมลพิษอาจแบ่งได้ดังนี้ ภาระบรรทุกต่ำเมื่ออัตราการไหลอากาศต่ำ และภาระบรรทุกสูงเมื่ออัตราการไหลอากาศสูง ภายใต้สภาวะต่างๆที่มีความเข้มข้นสูงจะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารมลพิษในฟิล์มชีวภาพสูงจะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพสูงขึ้น เมื่อค่าจลนศาสตร์ทางชีวภาพสูงกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ในกรณีที่มีการแพร่เป็นปัจจัยจำกัด สารมลพิษในอากาศที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะเป็นตัวขับเคลื่อนให้มลพิษแพร่เข้าสู่ฟิล์มชีวภาพได้เร็วมากยิ่งขึ้น

การเปลี่ยนแปลงภาระบรรทุกเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นปกติในการทำงานจริง เช่น อัตราการผลิตของโรงงานสูงขึ้นหรือต่ำลง การหยุดการผลิตในตอนกลางคืนหรือวันหยุด ย่อมส่งผลกระทบต่อเครื่องกรองชีวภาพ เนื่องจาก ระบบทางชีววิทยาจะทำงานได้ดีเมื่อภาระบรรทุกคงที่ บางครั้งเครื่องกรองชีวภาพเกิดการปรับสภาพภาระบรรทุก (Load equalization) ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับของตัวกลาง มีรายงานเกี่ยวกับการเพิ่มภาระบรรทุกของ Methyl ethyl ketone (MEK) ในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้คือหลังจากเพิ่มภาระบรรทุก 2-3 ชั่วโมง มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อธิบายได้ว่าสารมลพิษถูกดูดซับอย่างรวดเร็วและถูกย่อยสลายภายใน 2-3 ชั่วโมง

#### 2.4.8 ปัจจัยจำกัดด้านออกซิเจน (Oxygen limitation)

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

$$k = k_{\max} \frac{C_{L,j}}{K_{M,j} + C_{L,j}} \cdot \frac{C_{L,o}}{K_{M,o} + C_{L,o}} \dots\dots\dots 2.8$$

- โดยที่  $k$  = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ  
 $k_{\max}$  = อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด  
 $K_{M,j}$  และ  $K_{M,o}$  = ค่าคงที่การอิ่มตัวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และออกซิเจน ตามลำดับ  
 $C_{L,j}$  และ  $C_{L,o}$  = ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และออกซิเจน ตามลำดับ

การที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัดอาจมีข้อโต้แย้ง เนื่องจากในอากาศมีปริมาณออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เหตุผลที่ออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัด เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแยกตัวของก๊าซออกซิเจนจากน้ำเท่ากับ 33.5 หมายความว่า ปริมาณออกซิเจนส่วนมากอยู่ในอากาศมากกว่าที่ละลายน้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C ก๊าซออกซิเจนมีความสามารถในการละลายน้ำ 8.1 มก.ต่อลิตร หรือ 0.253 มิลลิโมลต่อลิตร เพราะฉะนั้น หากพิจารณาจากปริมาณสมมูล (Stoichiometric) ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต้องใช้ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (เป็นความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่รอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ) มากกว่า 0.25 มิลลิโมลต่อลิตร (เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่รอยต่อระหว่างอากาศกับน้ำ) มีโอกาสที่

ออกซิเจนในฟิล์มชีวภาพหมักก่อนที่นำไปใช้บำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นสิ่งที่ควรพิจารณาควบคู่ไปกับคุณสมบัติของสารมลพิษและอุณหภูมิ เป็นต้น

## 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**กรมควบคุมมลพิษ (2544)** ศึกษาโครงการวิจัยเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบเครื่องกรองชีวภาพ) เพื่อกำจัดกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสียและโรงงานปลาป่น พบว่าโรงบำบัดน้ำเสีย กลิ่นที่บำบัดคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และเมทิลเมอร์แคปแทน ( $CH_3SH$ ) โดยใช้ตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย กาบมะพร้าว ปุ๋ยคอก และ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในอัตราส่วน 75:20:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 99 % ใช้ระยะเวลาพักที่ที่เหมาะสมประมาณ 30-40 วินาที อัตราการะบรทุกที่เหมาะสมในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และเมทิลเมอร์แคปแทน เท่ากับ 30 กรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลบ.ม.-ชม. และ 64 กรัมเมทิลเมอร์แคปแทนต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ

โรงงานปลาป่นกลิ่นที่บำบัดคือ แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) โดยใช้ตัวกลางที่เหมาะสมประกอบด้วย กาบมะพร้าว ปุ๋ยคอก และ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในอัตราส่วน 75:20:5 โดยปริมาตรตามลำดับ ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 80 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาพักที่ที่เหมาะสม 50-60 วินาที อัตราการะบรทุกที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 10 กรัมแอมโมเนียต่อลบ.ม.-ชม.

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

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

**เสริมศักดิ์ ทังมั่งมี (2546)** ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอินโดยเครื่องชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า ตัวกลางประเภทมวลรวมซึ่งประกอบด้วยปุ๋ยหมัก:เศษไม้:ตะกอนจุลินทรีย์ ในอัตราส่วน 70:20:10 โดยปริมาตร มีความสามารถในการกำจัดโทลูอินมากที่สุด 97.21 % และค่าเวลาในการกักพักเพื่อประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอินอย่างน้อย 90 % ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 50 วินาที

**เอกชัย เลิศผดุงวิทย์ (2548)** ศึกษาการกำจัดไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม โดยทดลองความเข้มข้นไซลีนในช่วง 50-2,000 สนล. และแปรผันเวลากักพักที่ 36, 60 และ 90 วินาที พบว่าอัตราส่วนผสมของดินผสมใบก้ามปูและปุ๋ยคอกต่อขยะพลาสติกที่เหมาะสม เท่ากับ 60:40 โดยปริมาตร ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 96 % และความสามารถในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 194 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.

**Bohn (1988)** ศึกษาการกำจัดสารมลพิษในอากาศโดยใช้ดิน พบว่า ดินมีประสิทธิภาพการบำบัด 99 % ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย และสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เช่น อะดีไฮด์ กรดอินทรีย์  $SO_2$ ,  $NO_x$  และ  $H_2S$  สำหรับก๊าซที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ เช่น มีเทน โพรเพน และคาร์บอนมอนอกไซด์ มีประสิทธิภาพการบำบัด 90 % โดยดินยังทำหน้าที่กำจัดทั้งของเหลวและอนุภาคของแข็งในอากาศเสีย ปัจจุบันใช้ดินในการกำจัดกลิ่นในอุตสาหกรรมประเภท สารเคมี เกษษกัมภ์ และผลิตอาหาร

**Leson และ Winer (1991)** ศึกษาเกี่ยวกับการกรองชีวภาพเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับควบคุมการแพร่กระจายของมลภาวะอากาศประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย สรุปว่า การกรองชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมสารประกอบอินทรีย์อินทรีย์ระเหยง่ายที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีววิทยา หรืออากาศพิษที่เป็นสารอนินทรีย์ โดยปล่อยสารปนเปื้อนให้ผ่านวัสดุที่มีการทำงานทางชีววิทยา ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 % สำหรับมลพิษธรรมดา ขณะที่มีการดำเนินการต่ำ การกรองทางชีวภาพจึงคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

**Hwang, Tang และ Wang (1997)** ศึกษาแบบจำลองกระบวนการกรองทางชีวภาพของอะซีโตน วัตถุประสงค์การวิจัย คือการค้นหาค่าจลนศาสตร์ของการกรองทางชีวภาพสำหรับการบำบัดอะซีโตนซึ่งเป็นก๊าซมลพิษที่มีความสามารถละลายน้ำสูง โดยพบว่าค่าความสามารถในการกำจัดเท่ากับ 80 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ความต้านทานการถ่ายเทมวลของอะซีโตนมีค่าน้อยมากในกระบวนการกรองทางชีวภาพ โดยผลวิเคราะห์อัตราการกำจัดอะซีโตนมีออกซิเจนเป็นปัจจัยจำกัด

**Lith, Leson และ Michelsen (1997)** ศึกษาการประเมินข้อมูลการออกแบบของเครื่องกรองชีวภาพ พบว่า เมื่อเครื่องกรองชีวภาพได้รับความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสูงและอัตราการกำจัดสูงเป็นสาเหตุทำให้สูญเสียความชื้นสูง ทำให้ต้องมีการเติมน้ำให้กับระบบ ในทางกลับกัน หากเติมน้ำมากเกินไปและเกิดการควบแน่นในระบบเป็นสาเหตุให้มีน้ำมากเกินไปส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง

**Tang, Hwang และ Wang (1997)** ศึกษา การย่อยสลายอะซิโตนในเครื่องกรองชีวภาพ ในการวิจัยใช้ตัวกลาง จากการผสมระหว่างปุ๋ยหมักที่มีอนุภาคขนาด 0.7-2.0 มม. และเม็ดดินเหนียวพรุนที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 4-5 มม. โดยแปรผันความเข้มข้นของอะซิโตนจาก 0.62 ถึง 4.17 กรัมต่อลบ.ม. (257-1730 สนล.) และความเร็วของก๊าซ (Gas superficial velocity) อยู่ในช่วง 0.66 ถึง 4.21 ซม.ต่อวินาที พบว่า ความสามารถในการกำจัดอะซิโตน 82 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.

**Gostomaski, Sisson และ Cherry (1997)** ศึกษากลศาสตร์ของน้ำในการกรองทางชีวภาพ เรื่องบทบาทของความชื้นและความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์อธิบายว่า ความชื้นเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการไหลเข้า-ออกของก๊าซมลพิษ และความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการออกซิเดชันของจุลินทรีย์เป็นหลักในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ จากการทดลองการกรองทางชีวภาพแสดงว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับการออกซิเดชันโทลูอินโดยจุลินทรีย์ การเกิดความร้อนเนื่องจากจุลินทรีย์เพียงพอที่ทำให้น้ำระเหยออกจากเครื่องกรองชีวภาพ อาจทำให้การย่อยสลายมลพิษมีประสิทธิภาพต่ำลง

**Cardenas-Gonzales, Ergas และ Switzenbaum (1999)** ศึกษาคุณสมบัติพิเศษเฉพาะของปุ๋ยหมักที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับการกรองชีวภาพ พบว่า ปุ๋ยหมักที่ทำจากมูลม้า และการผสมของวัสดุตามธรรมชาติ ในช่วงต้นมีการทำงานของจุลินทรีย์สูง และใช้เวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ตั้งแต่ตัวกลางที่ดีที่สุดในการทดลองคือ ปุ๋ยหมักขยะจากสนามหญ้า เนื่องจากมีเสถียรภาพที่สุด

**Deshusses และ Johnson (2000)** ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเครื่องกรองชีวภาพ พบว่า การบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย มีความสามารถในการกำจัดสูงสุดในช่วง 20-120 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. โดยลำดับการย่อยสลายทางชีวภาพจากง่ายไปยาก ดังนี้ Alcohols > Ester > Ketone > Aromatics > Alkanes

**Jorio และคณะ (2000)** ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและความเข้มข้นของไซลีนในการกรองทางชีวภาพ โดยทำการแปรผันอัตราการไหล ดังนี้ 0.4, 0.7 และ 1.0 ลบ.ม.ต่อชม. และแปรผันความเข้มข้นของไอไซลีนจาก 0.2 ถึง 4 กรัมต่อลบ.ม. พบว่า อัตราไหลอากาศที่ 0.4 ลบ.ม.ต่อชม. ก่อให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดได้สูงที่สุด โดยใช้เวลากักพัก 157 วินาที สำหรับการ

ทดลองทุกๆความเข้มข้นเข้า พบว่า เมื่ออัตราไหลอากาศสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดและความสามารถในการกำจัดจะลดลง สำหรับการทดลองทุกอัตราการไหลอากาศพบว่า ความสามารถในการกำจัดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของไซลินสูงขึ้น

**Delhomenie, Bibeau และ Heitz (2002)** ศึกษาผลกระทบของอนุภาคและปรากฏการณ์ดูดซับในตัวกลางประเภทปุยหมัก โดยการบำบัดโทลูอินโดยการกรองทางชีวภาพ พบว่า ขนาดของอนุภาคปุยหมัก และพื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นปัจจัยหลักสำหรับกระบวนการย่อยสลายการย่อยทางชีวภาพ เมื่อลดขนาดอนุภาคซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมีความสามารถในการกำจัดดังนี้ 180 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. (5 มม., 590 ม.<sup>2</sup>/ม.<sup>3</sup>), 90 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. (10 มม., 280 ม.<sup>2</sup>/ม.<sup>3</sup>) และ 45 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.(20 มม.,120 ม.<sup>2</sup>/ม.<sup>3</sup>) ตามลำดับ

**Delhomenie และคณะ (2002)** ศึกษา การบำบัดโทลูอินโดยการกรองทางชีวภาพ การพัฒนาปุยหมักโดยการเติมปุ๋ยคอก และ Organic binder โดยไม่มีเติมเชื้อจุลินทรีย์ในตัวกลาง โดยแปรผันความเข้มข้นโทลูอิน 0.6-2.6 กรัมต่อลบ.ม. และอัตราไหลอากาศที่ 0.4-1 ลบ.ม.ต่อชม. ซึ่งเทียบเท่ากับเวลาพัก 65-165 วินาที พบว่า เมื่อภาระบรรทุก 65 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 95 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 55 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.

**Chang และ Lu (2003)** ศึกษาการกรองชีวภาพของไอระเหยผสมระหว่างไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และอะซิโตนโดยการโปรยกรองในสภาวะคงที่แบบชั่วคราว (Pseudo-steady state) พบว่า เมื่อเพิ่มภาระบรรทุกประเภทคาร์บอน (Carbon loading) ความสามารถในการกำจัดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และอะซิโตน เพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และ ประสิทธิภาพการบำบัดของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์สูงกว่าอะซิโตน ซึ่งบ่งบอกว่าไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เป็นสารอาหารที่ถูกใช้ก่อนของสารผสม ระหว่าง ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และอะซิโตนโดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 % เมื่อภาระบรรทุกคาร์บอนของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และอะซิโตน ต่ำกว่า 80 และ 53 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ

**Den, Huang และ Li (2003)** ศึกษาการโปรยกรองทางชีวภาพสำหรับการควบคุมสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด ตั้งแต่ 850 ถึง 2400 สนล. เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 95 % และระบบสามารถกลับมาทำงานเหมือนเดิมภายใน 2 วันหลังจากการเพิ่มภาระบรรทุก

**Delhomenie และคณะ (2003)** ศึกษาการดูดซับของเครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดโพลีอินทรีย์สารวิธีบำบัดน้ำเสีย โดยแยกเป็นวิธีทางกลศาสตร์ 2 วิธีได้แก่ การกวนผสมตัวกลาง (Bed stirring) และการฉีดล้างด้วยน้ำ (Bed washing) วิธีทางเคมี คือ การควบคุมปริมาณธาตุอาหารได้แก่ไนโตรเจน

**Elmrini และคณะ (2004)** ศึกษาการบำบัดก๊าซไซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพโดยการแปรผันความเข้มข้นและอัตราไหลอากาศ โดยแปรผันการะบรทุกในช่วง 34-95 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. และอัตราไหลอากาศในช่วง 0.4-1.1 ลบ.ม.ต่อชม. ซึ่งเท่ากับเวลากักพักที่ 150-56 วินาที พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 96 % เมื่อใช้เวลากักพัก 150 วินาที และแปรผันความเข้มข้น 0.48-2.69 กรัมต่อลบ.ม. โดยมีการศึกษาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่า อัตราส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อมวลของไซลีนที่ถูกกำจัดเท่ากับ 2.72 แสดงว่าการกำจัดไซลีนเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน

## 2.6 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา

เทคโนโลยีเครื่องกรองชีวภาพ สามารถบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารเคมี อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ การกำจัดกลิ่นในโรงบำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบดังนี้

### 2.6.1 คุณสมบัติตัวกลาง

ตัวกลางที่นิยมทั่วไปได้แก่ ดิน ปุ๋ยหมัก และมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นโดยการเติมวัสดุเพิ่ม ได้แก่ เศษไม้ เม็ดดินเหนียว Organic binder ปุ๋ยคอก เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพต่อระบบ เช่น ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัส ความพรุนเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ ปริมาณธาตุอาหาร ค่าความดันลด เป็นต้น

### 2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

- 1) ประเภทของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยลำดับการย่อยสลายทางชีวภาพจากง่ายไปยาก ดังนี้ Alcohols > Ester > Ketone > Aromatics > Alkanes
- 2) ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่เหมาะสมกับเครื่องกรองชีวภาพอยู่ในช่วง 0.1-5 กรัมต่อลบ.ม และความเข้มข้นอะซิโตนมักอยู่ในช่วง 0.6-4.1 กรัมต่อลบ.ม

3) อัตราไหล่อากาศซึ่งจะสอดคล้องกับเวลากักพักสารมลพิษในระบบ โดยทั่วไป การออกแบบเครื่องกรองชีวภาพใช้เวลากักพักอยู่ในช่วง 30-150 วินาที ซึ่งขึ้นกับประเภทของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

4) ความชื้น โดยความชื้นจะสูญเสียออกจากระบบเมื่อมีการบำบัดสารมลพิษ ต้องมีการเติมน้ำเพื่อรักษาความชื้นให้เหมาะสม โดยต้องระวังการเติมน้ำมากเกินไปซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งต้องควบคุมความชื้นตัวกลางประมาณ 50 %

5) ภาระบรรทุก โดยทั่วไประบบเครื่องกรองชีวภาพออกแบบให้สามารถรับภาระบรรทุกในช่วง 20-120 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาข้อมูลการออกแบบเบื้องต้น และปัจจัยที่กระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตนโดยเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 4 ชุดการทดลอง โดยศึกษาถึงความเหมาะสมของตัวกลางที่เลือกใช้ ความเข้มข้นของไออะซิโตน และเวลาที่กักพัก ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการวิจัยดังนี้

##### 3.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลาง

การวิจัยนี้เลือกใช้ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และ จีบ เป็นวัสดุตัวกลางหลัก โดยเติมวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้แก่ เศษไม้เพื่อป้องกันการอัดตัว ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อเป็นแหล่งจุลินทรีย์ และเติมปุ๋ยคอกเพื่อเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์ คุณสมบัติทางกายภาพเป็นสิ่งจำเป็นเบื้องต้นของวัสดุตัวกลาง ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงวัสดุให้มี เช่น ความชื้น พีเอช ธาตุอาหารให้เหมาะสม โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางหลัก

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1.ขนาดอนุภาคตัวกลาง ( $d_{50}$ )	ASTM C 136-92
2.ความหนาแน่น	JIS1474-1976
3.ความพรุน	แทนที่ด้วยน้ำ
4.ความชื้น	ASTM D 2974-87
5.พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
6. อินทรีย์วัตถุ	ASTM D2974-87
7.N	ส่งวิเคราะห์ที่ภาควิชาปฐพีวิทยา
8.P	คณะเกษตร
9.K	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



รูปที่ 3.1 ดินใบก้ามปู



รูปที่ 3.2 ดินสีดา



รูปที่ 3.3 ปุ๋ยหมัก



รูปที่ 3.4 ซี้กบ



รูปที่ 3.5 ปุ๋ยคอก



รูปที่ 3.6 เศษไม้



รูปที่ 3.7 ตะกอนจุลินทรีย์

### 3.1.2 ประเภทและอัตราส่วนผสมของวัสดุตัวกลาง

การวิจัยนี้ใช้วัสดุและอัตราส่วนผสม ตามตารางที่ 3.2 กำหนดความสูงตัวกลาง 1.50 เมตร มีปริมาตร 3.40 ลิตร

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนผสมตัวกลาง

ชุดการทดลอง/ชนิดตัวกลางหลัก	สัดส่วนโดยปริมาตร			
	ตัวกลางหลัก	เศษไม้	ตะกอนจุลินทรีย์	ปุ๋ยคอก
1.ดินใบก้ามปู	60	20	10	10
2.ดินสีดา	60	20	10	10
3.ปุ๋ยหมัก	60	20	10	10
4.ขี้กบ	60	20	10	10

### 3.1.3 ความเข้มข้นไออะซิโตนและอัตราไหลอากาศ

ป้อนไออะซิโตนวันละ 8 ชั่วโมง แปรผันระยะเวลากักตั้งแต่ 50-100 วินาที โดยแปรผันความเข้มข้นอะซิโตนตั้งแต่ 200-1,000 สนล. โดยเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตน 50 สนล. ทุกๆ 5 วัน จนเท่ากับ 200 สนล. หลังจากนั้นเพิ่มความเข้มข้น 200 สนล. ทุกๆ 5 วัน ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แผนการวิจัย

ชุดการทดลอง	อัตราไหลอากาศ ลิตรต่อนาที	เวลากักพัก วินาที	ความเข้มข้นไออะซิโตน สนล.	ระยะเวลา วัน
Start - up	2.0	102	50-200	20
1	2.5	82	200-1,000	25
2	3.0	68	200-1,000	25
3	4.0	51	200-1,000	25

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.4

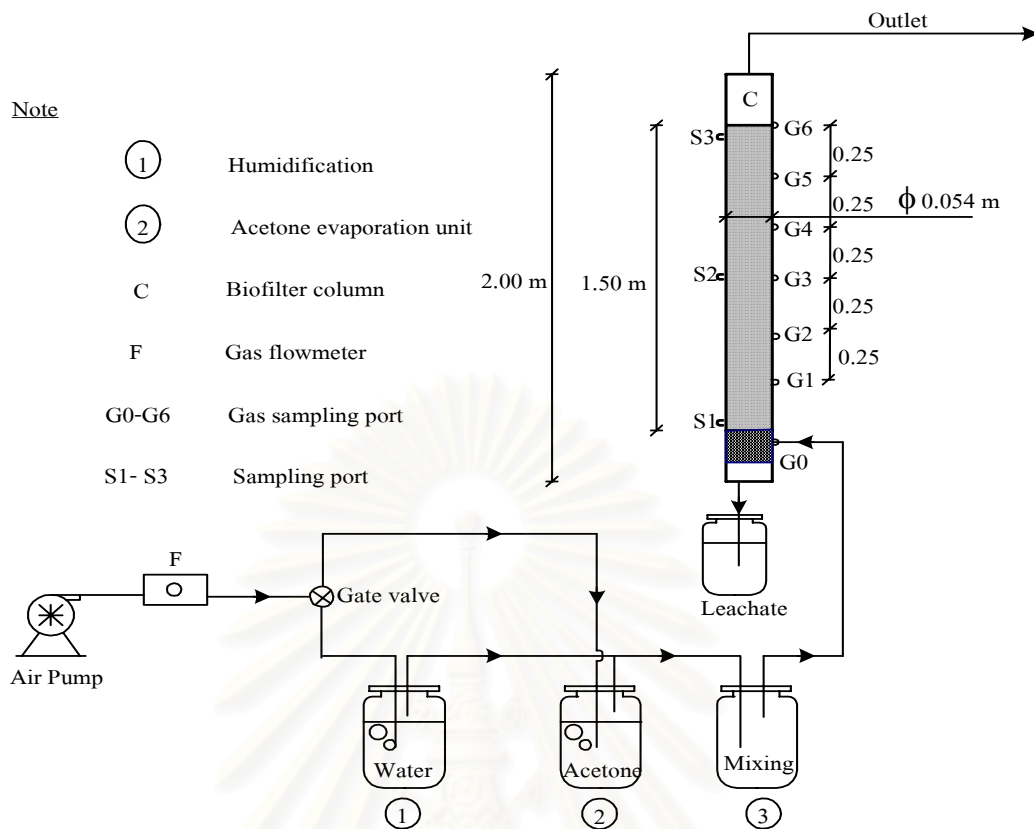
ตารางที่ 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	รุ่น
ป้อนไออะซิโตน	ปั๊มอากาศ	Tiger/ 119.6 ลิตรต่อนาที
ความชื้นไออะซิโตน	ไฮโกรมิเตอร์	Barigo/ RH 0-100 %
ความเข้มข้นไออะซิโตน	เครื่องวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแบบพกพา	Minirae 2000/ 0.1-10,000 สนล.
อัตราไหลอากาศ	Flow meter	Dwyer/ 1-10 ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	CO <sub>2</sub> Analyzer	Gas Ranger/ Sieger 0.01-100 %
ค่าความดันลด	มาโนมิเตอร์	Dwyer/ Series 477-3 Max. pressure 29 psi
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	Brannan/10-100°C
ความชื้นตัวกลาง	เครื่องวัดความชื้นและพีเอชในดิน	E.M System Soil Tester/ 0-100 %
พีเอช	เครื่องวัดความชื้นและพีเอชในดิน	E.M System Soil Tester/ pH 3.5-8

### 3.3 ชุดทดลอง

#### 3.3.1 เครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องกรองชีวภาพ ทำจากท่ออคริลิกใส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.054 เมตร สูง 2.0 เมตรจำนวน 4 ชุดการทดลอง ดังรูปที่ 3.8 บรรจุตัวกลางสูง 1.50 เมตร มีจุดเก็บตัวอย่างอากาศที่ระดับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 เมตร จุดวัดพารามิเตอร์ทั่วไปที่ระดับความสูง 0.10, 1.00 และ 1.45 เมตร โดยปล่อยอากาศเสียเข้าด้านล่าง ซึ่งใช้กรวดขนาด 0.5 ซม. เป็นตัวรองรับตัวกลางและช่วยในการกระจายอากาศ และมีส่วนประกอบอื่นดังนี้ ชุดสร้างไออะซิโตน ชุดสร้างความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และชุดเก็บน้ำชะ



รูปที่ 3.8 แผนภาพเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.9 ชุดการทดลองเครื่องกรองชีวภาพ



รูปที่ 3.10 ชุดสร้างไออะซิโตนและการติดตั้งRotameter



รูปที่ 3.11 ชุดการสร้างไออะซิโตนและชุดสร้างความชื้นสัมพัทธ์อากาศ



รูปที่ 3.12 บริเวณทางเข้าเครื่องกรองชีวภาพ

### 3.4 การเก็บตัวอย่างอากาศและการวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการวิจัยตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์

ตัวแปร	จุดเก็บตัวอย่าง	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่
1. Gas concentration	G0 ถึง G6	เครื่องวิเคราะห์ VOCs	ทุกวัน
2. Air flow rate	ทางเข้า	Flow meter	ทุกวัน
3. Humidity	ทางเข้า	ไฮโกรมิเตอร์	ทุกวัน
4. Moisture content	S1, S2 และ S3	เครื่องวัดความชื้นในดิน	ทุก 3 วัน
5. pH	น้ำชะตัวกลาง	พีเอชมิเตอร์	ทุก 2 วัน
6. Temperature	S1, S2 และ S3	เทอร์โมมิเตอร์	ทุก 2 วัน
7. CO <sub>2</sub>	G0 และ G6	CO <sub>2</sub> Analyzer	ทุกวัน
8. Pressure drop	G0/G6	มาโนมิเตอร์	ทุก 5 วัน
9. Compaction	ตัวกลาง	ตลับเมตร	ทุก 7 วัน
10. VSS	น้ำชะตัวกลาง	Standard Methods 2540-D	ทุก 5 วัน
11. SCOD	น้ำชะตัวกลาง	Standard Methods 5220-D	ทุก 5 วัน

### 3.5 ตัวชี้ประสิทธิภาพของระบบ

**3.5.1 เวลาพัก (Empty Bed Residence Time; EBRT)** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศ และปริมาตรของตัวกลางภายในเครื่องกรองชีวภาพ ดังสมการที่ 3.1

$$EBRT = \frac{V_f}{Q_A} \dots\dots\dots 3.1$$

โดยที่ EBRT = เวลาพัก  
 $V_f$  = ปริมาตรตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ  
 $Q_A$  = อัตราไหลอากาศ

**3.5.2 ภาระบรรทุก (Mass Loading)** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารมลพิษต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางในเครื่องกรองชีวภาพ ดังสมการที่ 3.2

$$Mass \text{ loading} = \frac{Q \times C_{GI}}{V_f} \dots\dots\dots 3.2$$

โดยที่  $C_{GI}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ



**5.1.3 ประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Efficiency)** แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษที่เข้าระบบ ดังสมการที่ 3.3

$$\text{Removal efficiency} = \frac{(C_{GI} - C_{G0})}{C_{GI}} \times 100 \dots\dots\dots 3.3$$

โดยที่  $C_{G0}$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ

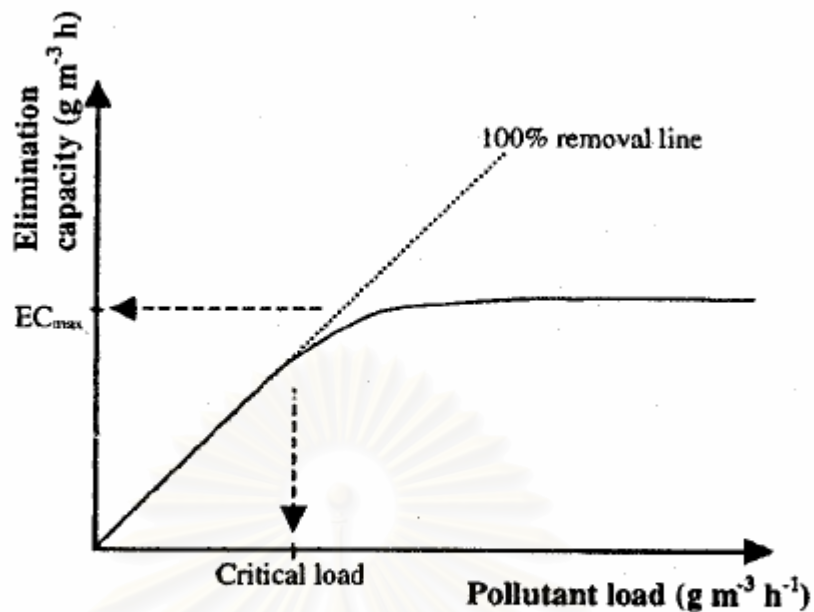
**5.1.4 ความสามารถในการกำจัดสารมลพิษ (Elimination Capacity)** คือ มวลของสารมลพิษที่ถูกกำจัดไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Elimination capacity} = \frac{(C_{GI} - C_{G0}) \times Q}{V_f} \dots\dots\dots 3.4$$

**5.1.5 ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity, Max. EC)** คือ ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดที่เครื่องกรองชีวภาพสามารถกำจัดได้ โดยที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารมลพิษและระยะเวลาพัก วิธีการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าความสามารถในการกำจัดและค่าภาระบรรทุกของสารมลพิษ ตามรูปที่ 3.13

**5.1.6 ค่าภาระบรรทุกวิกฤติ (Critical Loading)** คือ ค่าภาระบรรทุกสารมลพิษที่เข้าระบบ เครื่องกรองชีวภาพที่ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่า 100 % วิธีการวิเคราะห์ค่าภาระบรรทุกวิกฤติ โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสามารถในการกำจัดและค่าภาระบรรทุกของสารมลพิษ ตามรูปที่ 3.13

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**FIGURE 1. Typical elimination capacity vs load characteristic in a biofilter.  $\text{EC}_{\text{max}}$  is the maximum elimination capacity; the critical load is the maximum loading at which the removal efficiency starts to deviate significantly from the 100% removal line.**

รูปที่ 3.13 ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดและค่าภาระบรรทุกวิกฤติ  
ที่มา : Deshusses และ Johnson (2000)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 คุณสมบัติตัวกลาง

การออกแบบระบบการกรองทางชีวภาพให้มีประสิทธิภาพ วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการ 1) เป็นวัสดุที่มีสภาวะเหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์ 2) การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและมีช่องว่างที่เหมาะสม ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง และมีการสูญเสียความดันน้อย 3) มีการอัดตัวของตัวกลางน้อย เพื่อประหยัดค่าบำรุงรักษา (Leson และ Winer, 1991)

การวิจัยนี้เลือกใช้ตัวกลางหลัก 4 ประเภทได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และจี้กบ ผลวิเคราะห์คุณสมบัติตัวกลางหลัก ดังตารางที่ 4.1 และตัวกลางเสริม 3 ประเภท ได้แก่ เศษไม้ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน และปุ๋ยคอก ผลวิเคราะห์คุณสมบัติตัวกลางเสริม ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวกลางหลัก

(n= 3 ยกเว้น ขนาดอนุภาค, N, P และ K มี n= 1)

พารามิเตอร์	ดินใบก้ามปู		ดินสีดา		ปุ๋ยหมัก		จี้กบ	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ขนาดอนุภาค $d_{50}$ (mm)	3.5	-	1.2	-	2.1	-	5-10	-
ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )	0.467	0.04	0.495	0.025	0.701	0.21	0.111	0.016
ความพรุน (%)	55.42	1.40	56.55	1.78	39.33	2.35	86.37	1.50
ความชื้น (%)	15.40	1.38	11.36	0.43	22.70	2.61	3.44	0.19
พีเอช	7.0	0.0	7.3	0.26	6.8	0.10	-	-
อินทรีย์วัตถุ (%)	3.33	0.95	1.21	0.06	3.05	0.40	2.03	0.15
N (%)	2.59	-	0.18	-	2.77	-	-	-
P (%)	0.10	-	0.08	-	1.08	-	-	-
K (%)	0.64	-	0.66	-	0.29	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวกลางเสริม

(n= 3 ยกเว้น ขนาดอนุภาค, N, P และ K มี n= 1)

พารามิเตอร์	เศษไม้		ปุ๋ยคอก		ตะกอนจุลินทรีย์	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ขนาดอนุภาค (cm)	1-2	-	-	-	-	-
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.100	0.010	0.175	0.009	0.937	0.009
ความพรุน (%)	92.08	0.41	70.02	1.76	21.17	0.23
N (%)	-	-	2.21	-	-	-
P (%)	-	-	0.76	-	-	-
K (%)	-	-	0.96	-	-	-

#### 4.1.1 ขนาดอนุภาค (Particle size)

ขนาดอนุภาคเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่สำคัญ ขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวกลาง คือ ตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง แต่จะขัดขวางการไหลผ่านของอากาศซึ่งเป็นการสูญเสียความดัน งานวิจัยที่ผ่านมากล่าวว่า ขนาดอนุภาคเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าอัตราไหลอากาศ (Adu และ Otten, 1996 อ้างถึงใน Delhomenie และคณะ, 2002) โดย Leson และ Winer (1991) แนะนำขนาดอนุภาคของวัสดุที่เหมาะสม ควรใหญ่กว่า 4 มม. ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความดันต่ำ

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) แสดงในภาคผนวก ก.3-ก.5 ของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสิดา และปุ๋ยหมักมีขนาด 3.5, 1.2 และ 2.1 มม. ตามลำดับ โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวกลางทั้ง 3 ประเภทเล็กกว่าขนาดที่งานวิจัยก่อนหน้าแนะนำ (4 มม.) ซึ่งมีโอกาสที่ทำให้สูญเสียค่าความดัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity,  $Cu=d_{60}/d_{10}$ ) เท่ากับ 9.4, 12 และ 10 ตามลำดับ โดยจัดอยู่ในช่วงอนุภาคละเอียด (Well grade,  $Cu$  มากกว่า 4-6) ส่วนตัวกลางประเภทซีกบทำการร่อนคัดเลือกรูขนาดตั้งแต่ 0.5-1 ซม. ในส่วนของตัวกลางเสริมประเภทเศษไม้เลือกใช้ขนาด 1-2 ซม. เพื่อช่วยป้องกันการอัดตัวของตัวกลางผสม

#### 4.1.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว นำไปใช้ในการคำนวณน้ำหนักของตัวกลางที่ต้องใช้ และเป็นข้อมูลการออกแบบโครงสร้างรองรับตัวกลาง ผลการวิเคราะห์ ดินใบก้ามปู ดินสิดา และปุ๋ยหมัก มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.5-0.7 กรัมต่อลบ.ซม. ส่วนจี้กบมีความหนาแน่นเพียง 0.11 กรัมต่อลบ.ซม. ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการลงทุนค่าก่อสร้างโครงสร้างรองรับ ส่วนตัวกลางเสริมประเภทเศษไม้และปุ๋ยคอกมีความหนาแน่นเพียง 0.10 และ 0.175 กรัมต่อลบ.ซม. เป็นผลดีกับระบบเพื่อป้องกันการกดทับของตัวกลาง ทำให้ใช้งานได้นานขึ้น

#### 4.1.3 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ วัสดุที่มีความพรุนสูง ข้อดี คือ ทำให้มีการกระจายตัวของอากาศได้ดี ทำให้มลพิษเกิดการสัมผัสกับฟิล์มชีวภาพได้สูงขึ้น และทำให้เกิดการสูญเสียความดันน้อย ข้อเสีย คือ อาจมีการทรุดตัวในภายหลัง งานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เลือกใช้ตัวกลางที่มีความพรุนประมาณ 40-80 % (Devanny และคณะ, 1999) ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสิดา และปุ๋ยหมัก มีความพรุนเท่ากับ 55.42, 56.55 และ 39.33 % ตามลำดับ ส่วนตัวกลางประเภท จี้กบ เศษไม้ และปุ๋ยคอก เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงถึง 86.36, 92.08 และ 70.02 % ตามลำดับ โดยทั้งตัวกลางหลักและตัวกลางเสริมจัดว่าเป็นวัสดุที่มีความพรุนเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางผสม

#### 4.1.4 ความชื้น (Moisture content)

เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่สุดในระบบการกรองชีวภาพ เนื่องจากน้ำเป็นตัวดูดซับมลพิษและธาตุอาหารไว้สำหรับจุลินทรีย์ในการดำรงชีพ ความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 40-60 % (Leson และ Winer, 1991) ผลการวิเคราะห์พบว่า ดินใบก้ามปู ดินสิดา ปุ๋ยหมัก และจี้กบ มีความชื้น 15.48, 11.36, 22.20 และ 2.03 % ตามลำดับ ซึ่งยังมีความชื้นต่ำต้องทำการเติมน้ำให้มีความชื้นประมาณ 60 %

#### 4.1.5 พีเอช (pH)

Leson และ Winer (1991) แนะนำว่าตัวกลางควรมีพีเอชระหว่าง 7-8 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ ผลการวิเคราะห์ตัวกลางทั้ง 4 ประเภทมีค่าพีเอชเหมาะสมที่นำมาใช้งาน

#### 4.1.6 อินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวกลางมีความจำเป็นสำหรับระบบที่ทำงานไม่ต่อเนื่อง หรือหยุดในบางช่วงเวลา ปกติจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์จากสารมลพิษ หากระบบหยุดในช่วงบางเวลา จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์จากตัวกลางแทน

Leson และ Winer (1991) แนะนำตัวกลางควรมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่า 55 % ผลการทดสอบ พบว่า ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสิดา ปุ๋ยหมัก และจี้กบ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วง 1-3 % ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ที่แนะนำไว้ค่อนข้างมาก ดังนั้นตัวกลางทั้ง 4 ประเภทอาจเป็นข้อดีสำหรับระบบที่ทำงานไม่ต่อเนื่อง

#### 4.1.7 ปริมาณธาตุอาหาร (Nutrients)

การดำรงชีพของจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารประเภท N, P และ K ประมาณ 0.4, 0.15 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตัวกลางแห้ง (Devanny และคณะ, 1999) ผลการวิเคราะห์ ดินใบก้ามปู และปุ๋ยหมัก มีธาตุอาหารที่เพียงพอ ในขณะที่ ดินสิดาและจี้กบ จำเป็นต้องเติมปุ๋ยคอกเพื่อเป็นแหล่งธาตุอาหาร ปุ๋ยคอกที่ใช้ในการวิจัยเป็นมูลโค การวิเคราะห์ปริมาณ N, P และ K ครั้งนี้ส่งวิเคราะห์ที่ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยมีค่าเท่ากับ 2.21, 0.76 และ 0.96 % ตามลำดับ

#### 4.1.8 สรุปคุณสมบัติตัวกลาง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของ ตัวกลางทั้ง 4 ประเภท พบว่า คุณสมบัติบางประการมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกลาง เช่น ความพรุน พีเอช แต่คุณสมบัติบางประการต้องทำการปรับปรุงให้เหมาะสมขึ้น เช่น ปริมาณธาตุอาหารในบางตัวกลางเช่น จี้กบ ยังไม่เพียงพอจึงต้องทำการเติมปุ๋ยคอก การเติมน้ำเพื่อควบคุมระดับความชื้นของตัวกลางให้ได้ประมาณ 60 % และเติมเศษไม้ผสมกับตัวกลางหลัก เนื่องจาก อนุภาคของตัวกลางมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 4 มม. เพื่อป้องกันการอัดตัวภายหลังใช้งาน โดยการทดลองนี้เติมปุ๋ยคอก 10% โดยปริมาตรให้กับตัวกลางทั้ง 4 ประเภท เนื่องจากตัวกลางบางประเภทมีปริมาณธาตุอาหารต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม ได้แก่ จี้กบและดินสิดา ผลการคำนวณปริมาณธาตุอาหารของตัวกลางผสมทั้ง 4 ประเภท พบว่า ตัวกลางผสมมีธาตุอาหารอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุอาหารของตัวกลางผสม

พารามิเตอร์	ดินใบก้ามปู	ดินสิดา	ปุ๋ยหมัก	จี้กบ	ค่าที่เหมาะสม ร้อยละโดยน้ำหนัก
N (%)	2.34	1.65	2.45	0.50	> 0.40
P (%)	0.13	0.11	0.95	0.17	> 0.15
K (%)	0.60	0.61	0.28	0.22	> 0.15

## 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัด

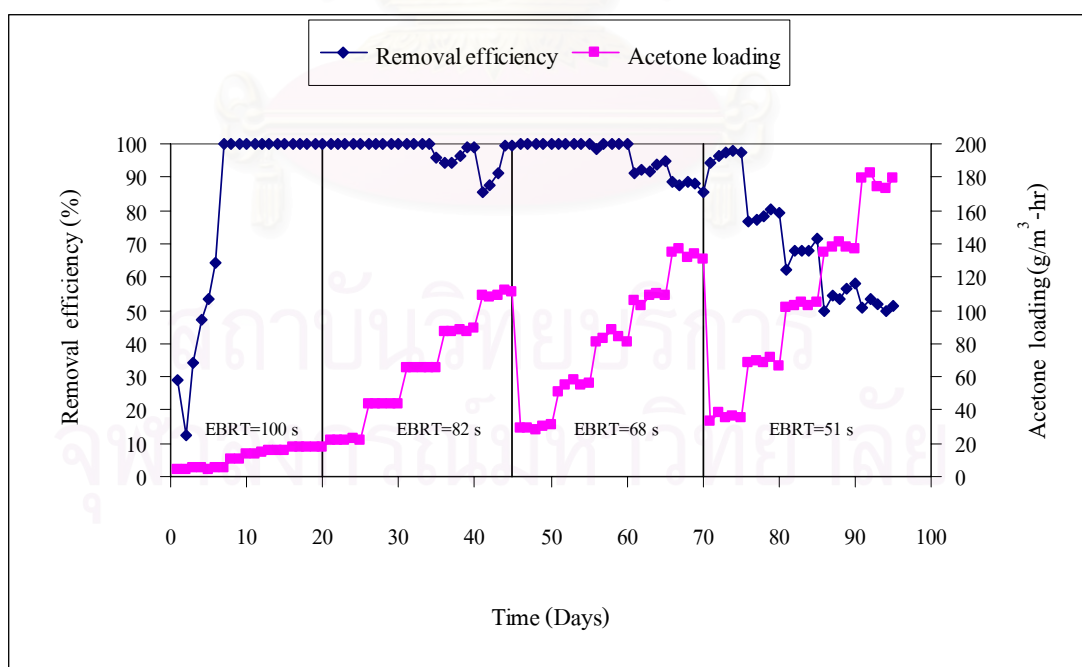
การวิจัยนี้ทำการแปรผันความเข้มข้นไออะซิโตนตั้งแต่ 200-1,000 สนล. และอัตราไหลอากาศที่ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาทีซึ่งเท่ากับระยะเวลาพัก 82, 68 และ 51 วินาที ตามลำดับ

### 4.2.1 อิทธิพลของภาระบรรทุกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

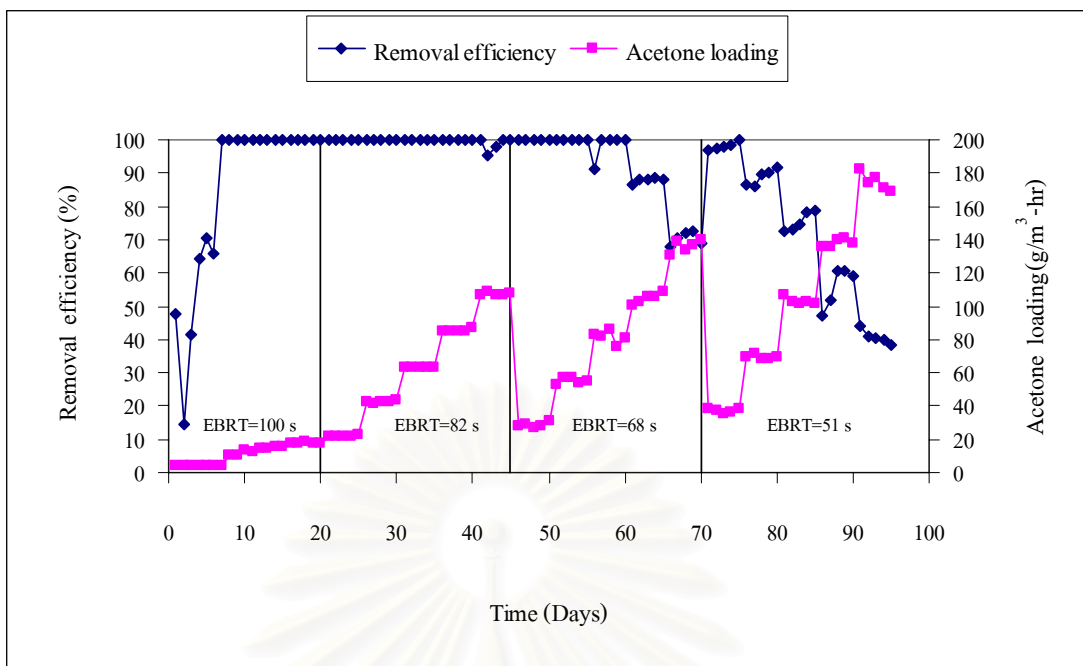
รูปที่ 4.1-4.4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตนที่ค่าภาระบรรทุกต่างๆ ตลอดช่วงเวลาทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตนลดลงเมื่อค่าภาระบรรทุกเพิ่มขึ้นหรือเวลากักตักน้อยลง โดยสรุปประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงการทดลองของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตนของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

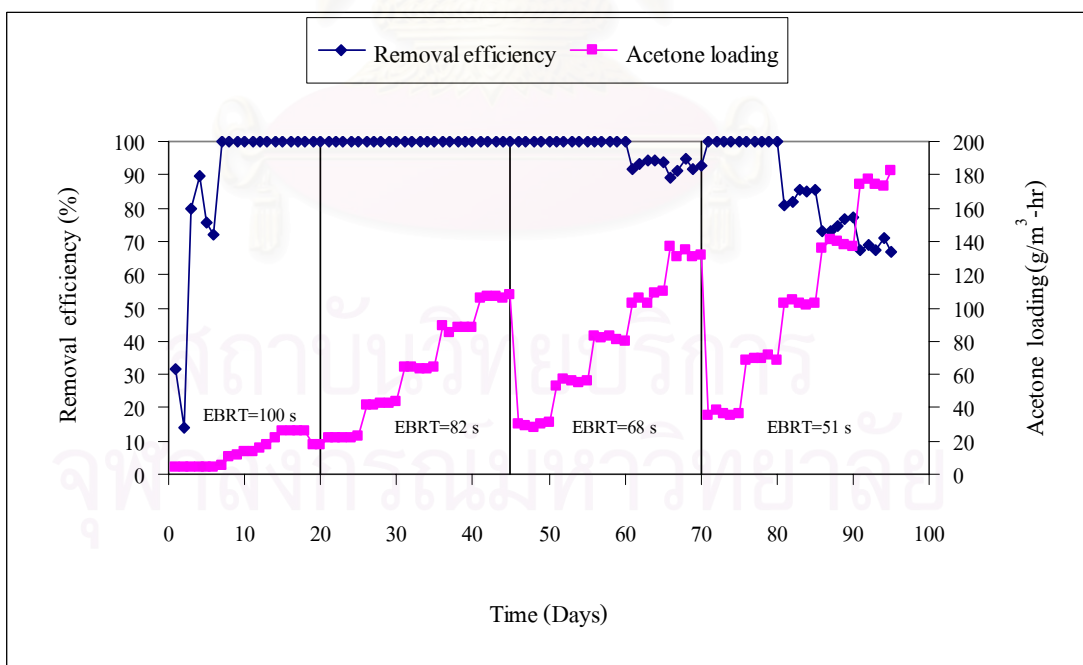
ประเภทตัวกลาง	ค่าภาระบรรทุก (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
ดินใบก้ามปู	4-182	49-100
ดินสีดา	4-182	38-100
ปุ๋ยหมัก	4-182	66-100
ขี้กบ	4-182	41-100



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรทุกในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู

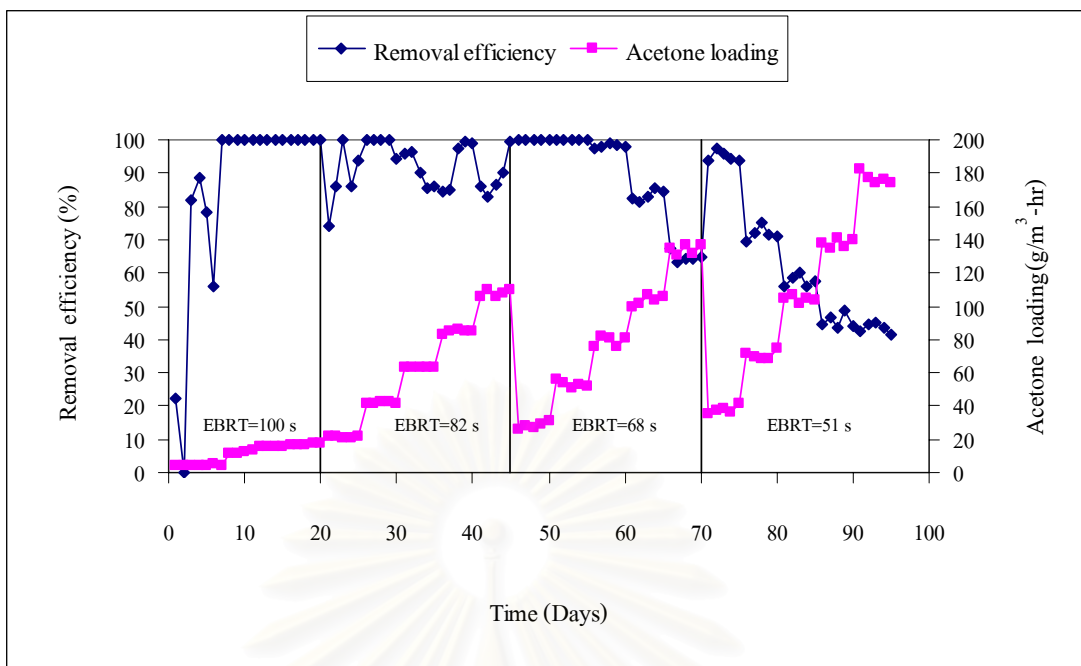


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรทุกในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินสีดำ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรทุกในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทขี้หมัก



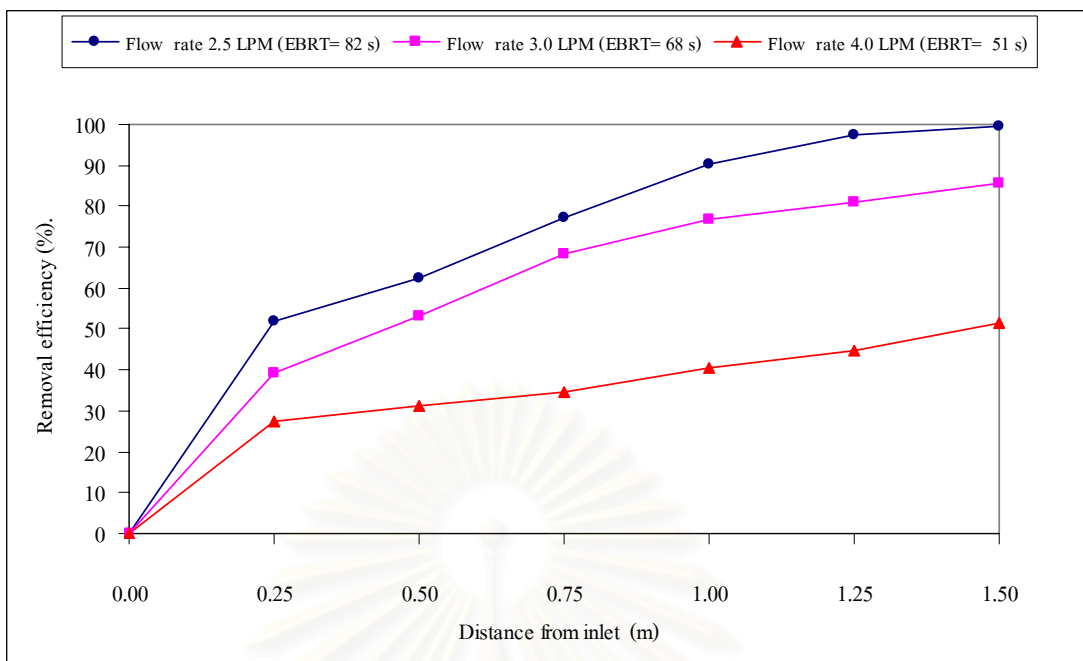


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าภาระบรรทุกในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทจี้กบ

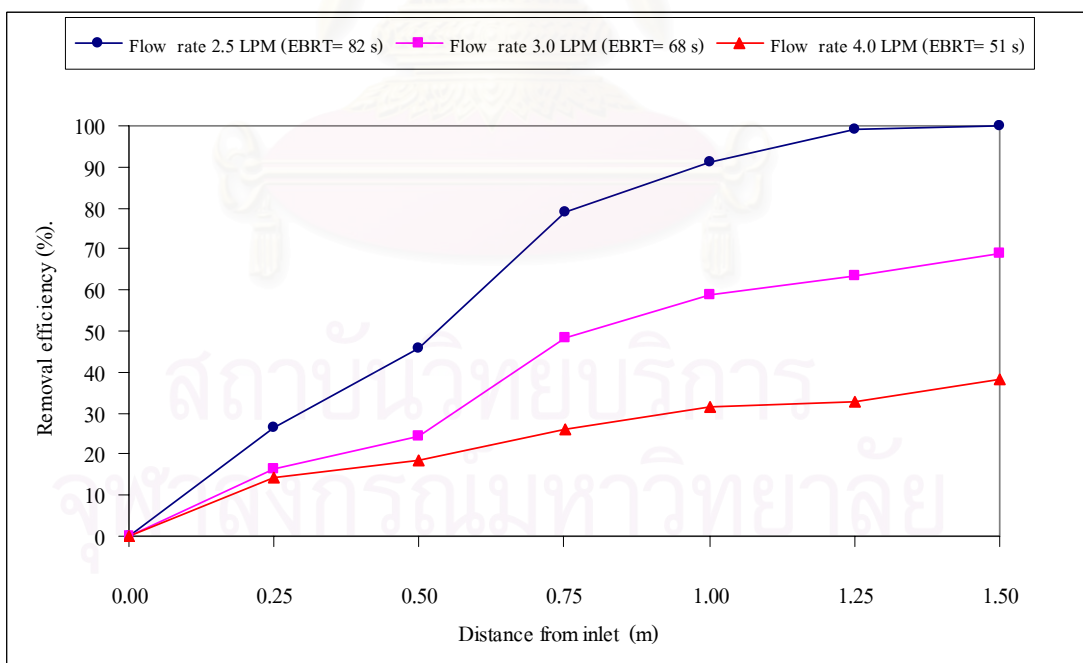
#### 4.2.2 อิทธิพลของความสูงตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ระดับความสูงต่างๆของตัวกลาง เพื่อพิจารณาความสูงที่มีความสามารถในการบำบัดมลพิษได้อย่างเหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

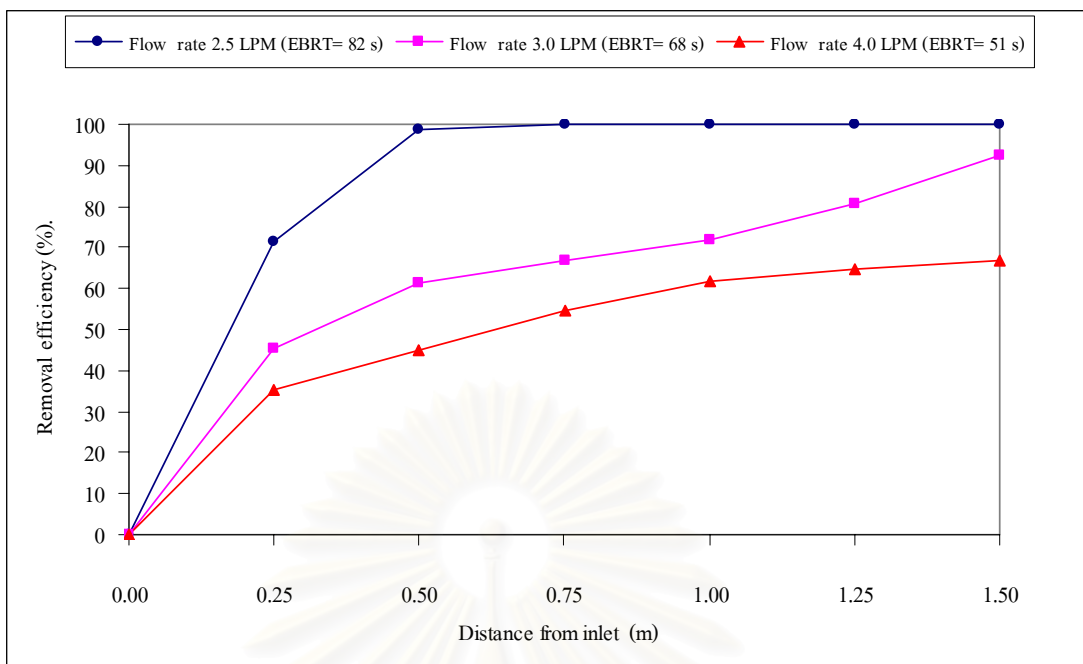
รูปที่ 4.5-4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่ระดับความสูงต่างๆ ของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล. เมื่ออัตราไหลอากาศ 2.50 ลิตรต่อนาที ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูที่มีความสูงตัวกลาง 0.5, 1.00 และ 1.50 เมตร มีประสิทธิภาพการบำบัด 62, 90 และ 100 % ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าความสูงที่ 1.00 และ 1.50 เมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่างกัน 10 % แต่ลดปริมาณตัวกลางได้ถึง 0.50 เมตร แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ความสูงที่เหมาะสมต้องพิจารณาถึงประเภทของตัวกลาง บางประเภทอาจใช้สูงน้อยกว่าหรือมากกว่า 1.00 เมตร เช่น ปุ๋ยหมักใช้ความสูง 0.75 เมตร แต่ จี้กบใช้ตัวกลางสูง 1.50 เมตร ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดไออะซิโตน 100 % เท่ากัน



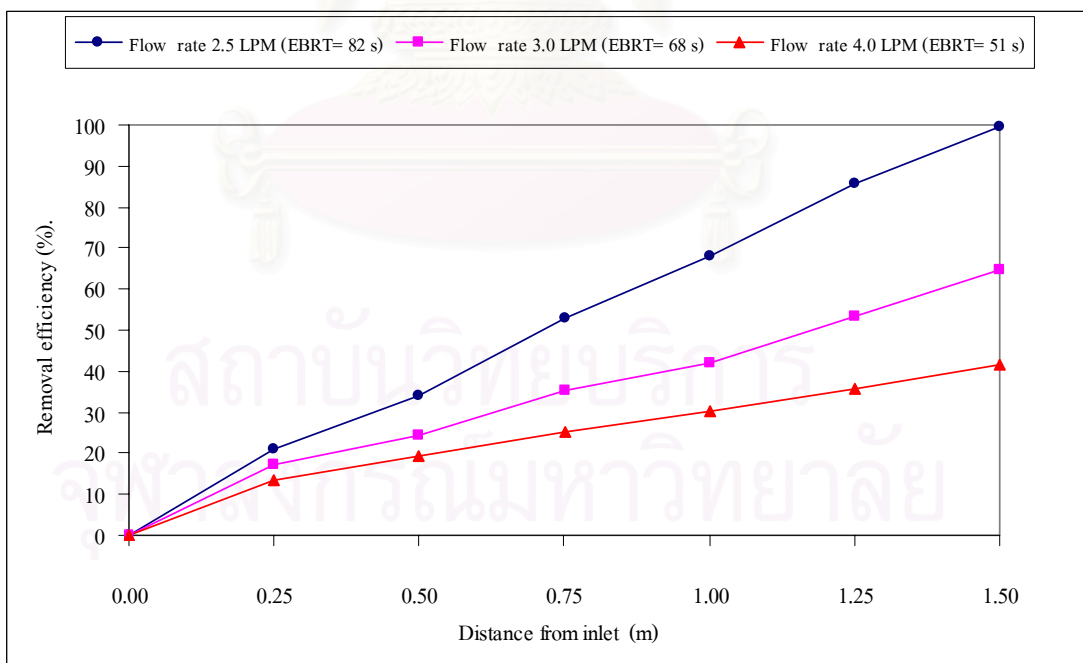
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล.



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินสีดา ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล.



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทนํ้าหนัก ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล.

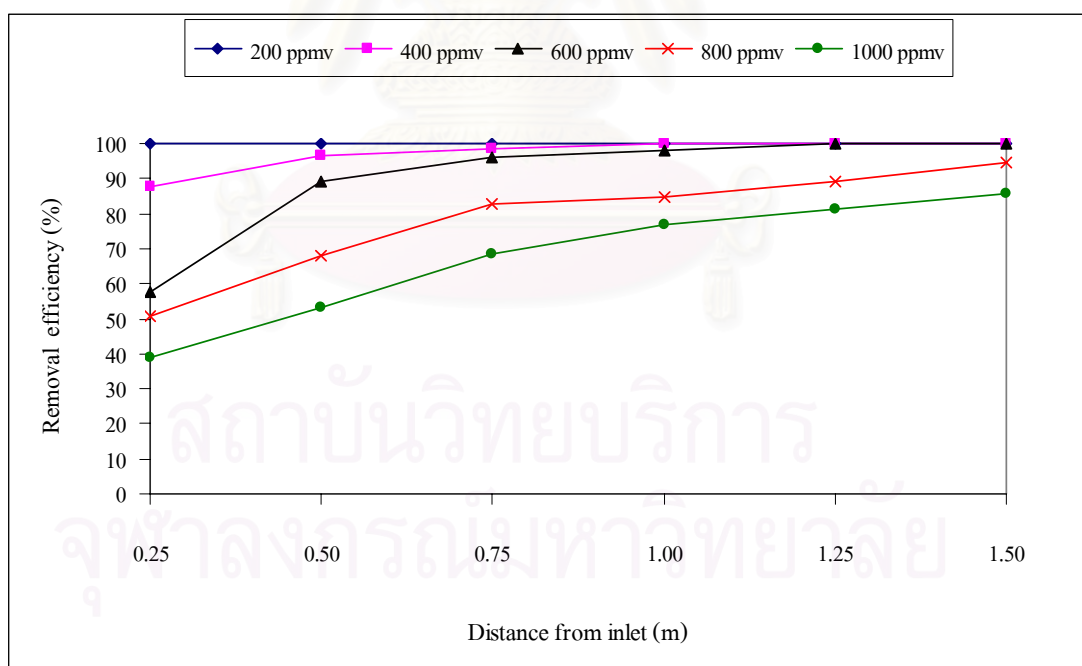


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทจี้กบ ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล.

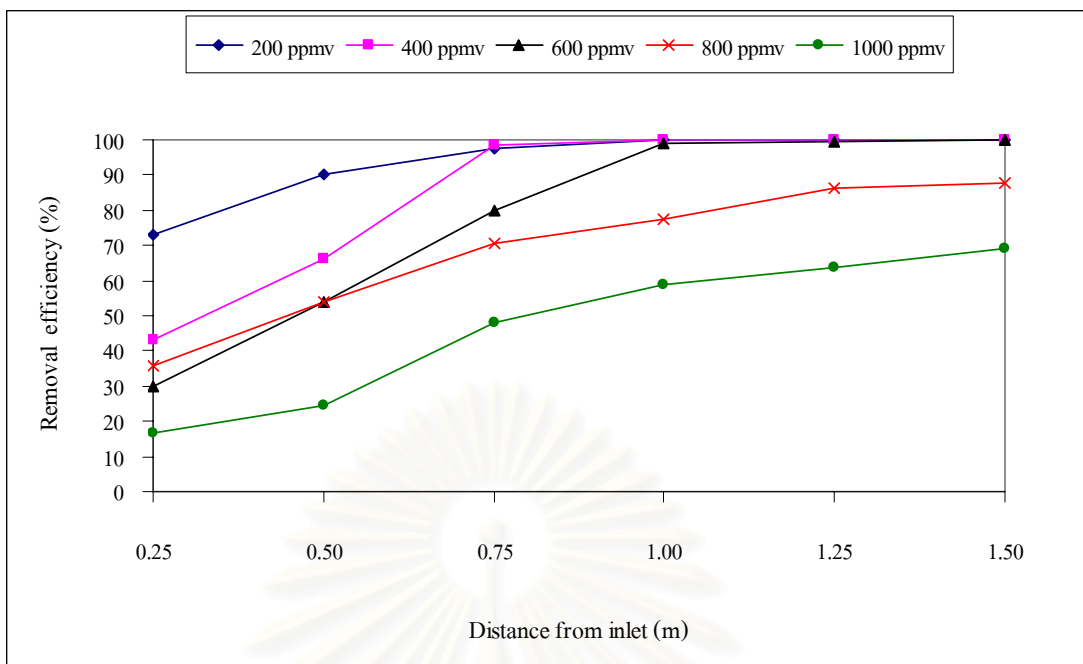
รูปที่ 4.9-4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่ระดับความสูงต่างๆ ของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท โดยมีอัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีเท่ากับระยะเวลาพัก 68 วินาที พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตนจาก 200 ถึง 1,000 สนล. ประสิทธิภาพการบำบัดที่ระดับความสูงตัวกลางเท่ากันมีค่าลดลง หากต้องการบำบัดไออะซิโตนความเข้มข้นต่ำกว่า 600 สนล. อัตราไหลอากาศที่ 3.0 ลิตรต่อนาที ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา และปุยหมัก สูง 1.00 เมตร สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพสูงกว่า 95 % กล่าวได้ว่า ความเข้มข้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ความสูงต่างๆ และยิ่งขึ้นกับประเภทของตัวกลางที่เลือกใช้

สรุปการออกแบบความสูงของตัวกลางเมื่อคำนวณปริมาตรตัวกลางที่ต้องใช้ การออกแบบความสูงที่เหมาะสมของตัวกลางเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยเกี่ยวข้องดังนี้

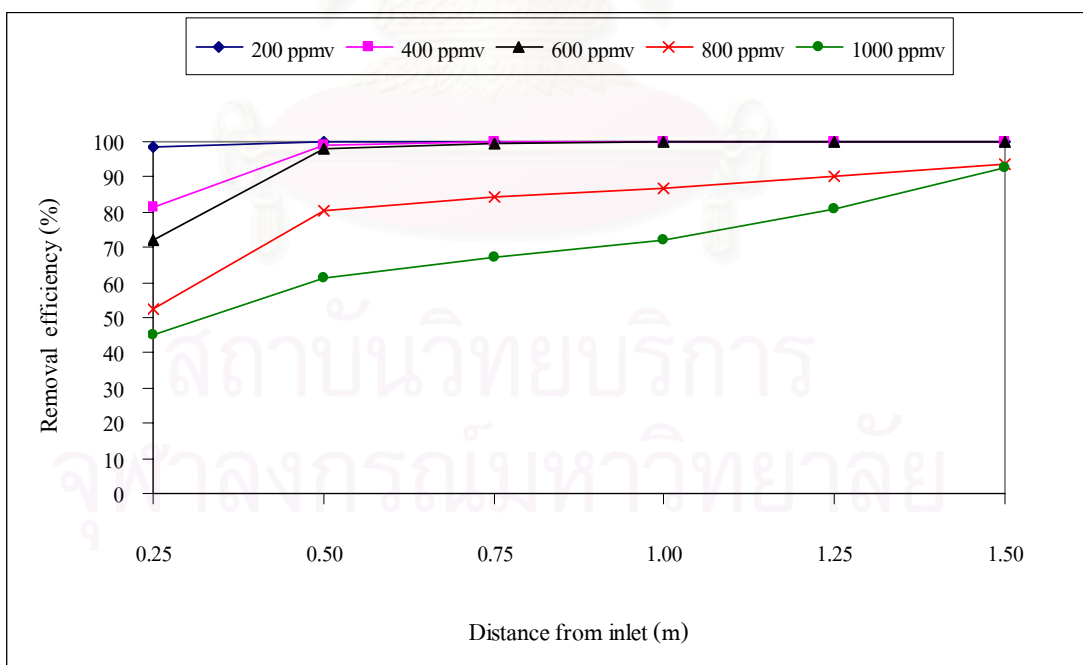
1) ระบบการกรองทางชีวภาพระบบเปิด หากออกแบบให้ชั้นตัวกลางคั่นและมีพื้นที่มากจะทำให้ควบคุมความชื้นได้ยากเนื่องจากการระเหยของน้ำสูง และการวิจัยใช้ชั้นตัวกลางลึก 1.5 เมตร ทำให้การควบคุมความชื้นกระทำได้ยาก คือ น้ำกระจายได้ไม่ทั่วถึงด้านล่าง และเกิดการอัดตัวของตัวกลางเนื่องจากน้ำหนักกดทับของตัวเองทำให้สูญเสียความดันได้ง่าย การออกแบบอาจใช้ความลึกตัวกลาง 1.0-1.5 เมตร เพื่อความเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการด้วย



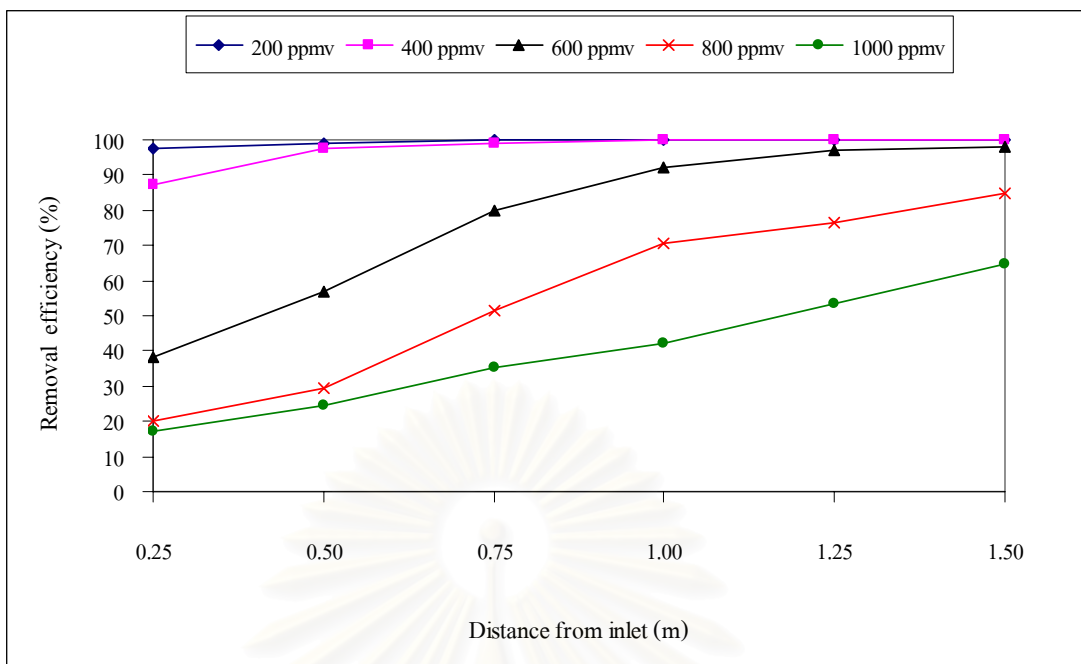
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน และประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูอัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีที่ความสูงต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินสีก๊าซอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีที่ความสูงต่างๆ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักก๊าซอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาทีที่ความสูงต่างๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลาง ประเภทจี้กบอัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่ออนาทีที่ความสูงต่างๆ

2) หากตัวกลางมีความสูงน้อยเกินไป อากาศเสียมีโอกาสไหลลัดวงจรออกจากระบบเร็วเกินไป โดยที่ยังไม่มีการบำบัด

3) ข้อเสียของตัวกลางขณะเดินระบบ

- ดินไบก้ามปู เนื่องจากเป็นดินที่เกิดจากการทับถมของใบและกิ่งคั้นก้ามปูทำให้ยังมีการเน่าเปื่อยอยู่ตลอดเวลา จากการสังเกตด้วยตาพบคราบสีดำคาดว่าเป็นการเน่าเปื่อยของใบและกิ่ง มีโอกาสทำให้เกิดการอัดตัวของตัวกลางบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์สูง

- ดินสีดา เนื่องจากเป็นดินที่ผสมด้วยเส้นใย และขุยมะพร้าวทำให้เมื่อเติมน้ำที่ด้านบนคอลัมน์เกิดการทรุดตัวอย่างชัดเจน และการสูญเสียความชื้นที่ผิวหน้าตัวกลางสูง

- จี้กบ เมื่อใช้อัตราไหลอากาศสูงทำให้ตัวกลางบริเวณด้านล่างของตัวกลางแห้ง ซึ่งเป็นการสูญเสียปริมาตรตัวกลางได้ การรักษาความชื้นตัวกลางบริเวณส่วนล่างจะทำยาก ดังนั้นอาจต้องการออกแบบระบบเติมน้ำบริเวณช่วงกลางและล่าง

### 4.2.3 อิทธิพลของอัตราไหลอากาศและเวลากักพักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

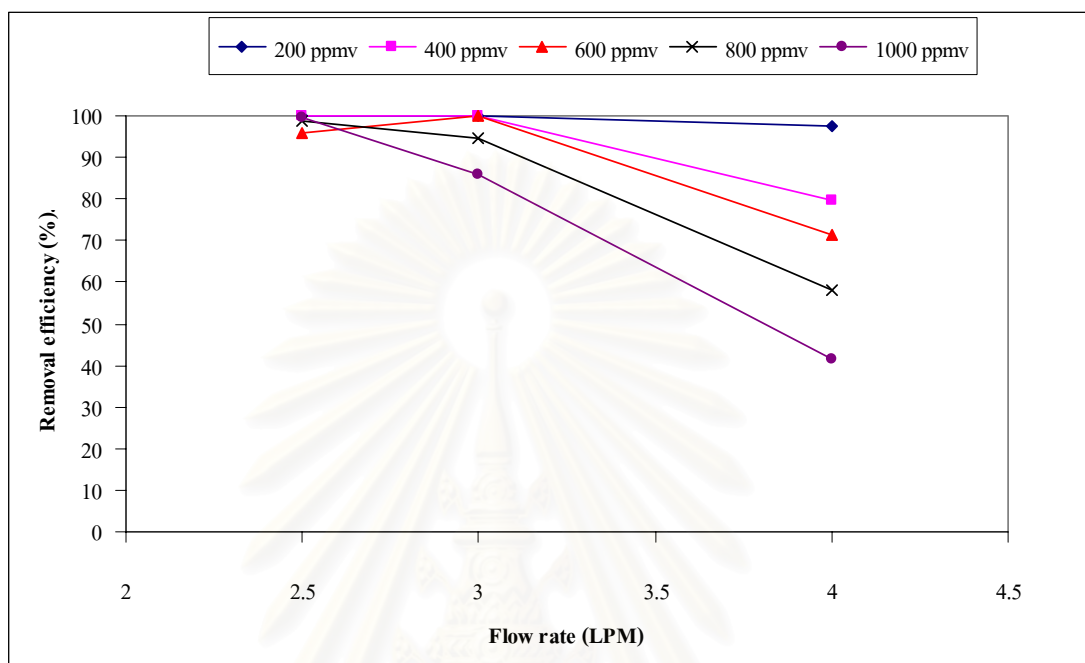
รูปที่ 4.13-4.16 และ 4.17-4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศ เวลา กักพัก และประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นไออะซิโตนในช่วง 200-1,000 สนล. พบว่า เมื่ออัตราไหลอากาศที่ 2.5 ลิตรต่อนาที ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา และปุ๋ยหมัก มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึง 100 % ยกเว้น จี๊บกบมีประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 80 % หากเพิ่มอัตราการไหลเป็น 4.0 ลิตรต่อนาที พบว่า ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา และจี๊บกบ มีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือต่ำกว่า 50 % ส่วนปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพเหลือ 66 % หากต้องบำบัดไออะซิโตน 1,000 สนล. ให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า 90 % ต้องใช้ระยะเวลาพัก 68 วินาที สำหรับตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ในขณะที่ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา และจี๊บกบ ต้องใช้ระยะเวลาพัก 82 วินาที กล่าวได้ว่า ตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด เนื่องจาก ใช้เวลากักพักที่ต่ำและมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ช่วยให้ระบบเครื่องกรองชีวภาพใช้ระยะเวลาพักเพียง 68 วินาที อันเนื่องมาจากกระบวนการดูดซับมลพิษของน้ำที่ผิวตัวกลางได้อย่างรวดเร็วโดยขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำของมลพิษ ซึ่งอะซิโตนมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี หลังจากนั้นจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพจะทำการย่อยสลายมลพิษต่อไป และหากความเข้มข้นของมลพิษในน้ำที่ผิวตัวกลางสูงกว่าความเข้มข้นมลพิษในอากาศจนไม่อยู่ในสถานะสมดุลของก๊าซ มลพิษจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นอากาศเสียจะไหลผ่านตัวกลางโดยไม่มีการบำบัด จนกว่าจุลินทรีย์จะย่อยสลายมลพิษให้ลดลงทำให้มลพิษสามารถละลายลงผิวน้ำได้ ระบบก็จะทำงานได้ตามปกติ

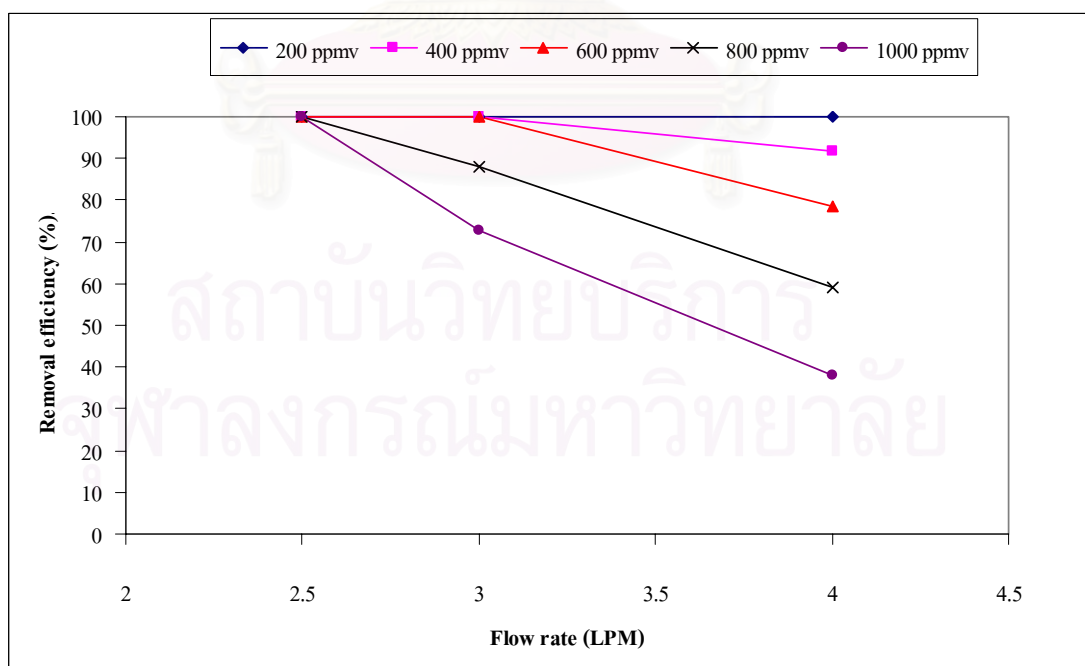
รูปที่ 4.21-4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลและความเข้มข้นไออะซิโตนที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท เนื่องจากการแปรผันอัตราไหลอากาศและความเข้มข้น พบว่า ที่ความเข้มข้นไออะซิโตนเท่ากัน เมื่อเพิ่มอัตราไหลอากาศที่ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และเมื่ออัตราไหลคงที่การเพิ่มความเข้มข้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเช่นกัน โดยวันที่ทำการเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตนครั้งละ 200 สนล. มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอย่างชัดเจน แต่ระบบจะเริ่มปรับตัวกับความเข้มข้นใหม่และประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มคงที่หลังจากเปลี่ยนความเข้มข้นภายในระยะเวลา 2-4 วัน

สรุปผลการทดลองว่า ระยะเวลาพักมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งการคำนวณระยะเวลาพักจะไม่นำค่าความพรุนของตัวกลางมาใช้ เนื่องจาก ปกติการออกแบบจะกำหนดให้อัตราไหลอากาศคงที่ หากตัวกลางมีความพรุนต่างกันจะส่งผลให้ระยะเวลาพักที่คำนวณโดยใช้ค่าความพรุนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการนำไปใช้งาน จึงไม่นิยมนำค่าความพรุนของตัวกลางมาใช้ ผลการทดลองพบว่า หากต้องการให้เครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 % ต้องใช้เวลากักพัก 68 วินาทีสำหรับ

ตัวกลางประเภทปุยหมัก และใช้ระยะเวลาพัก 82 วินาที สำหรับตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา และซีกบ กล่าวได้ว่า ปุยหมักมีประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุด และประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มคงที่หลังจากเพิ่มความเข้มข้นภายใน 2-4 วัน

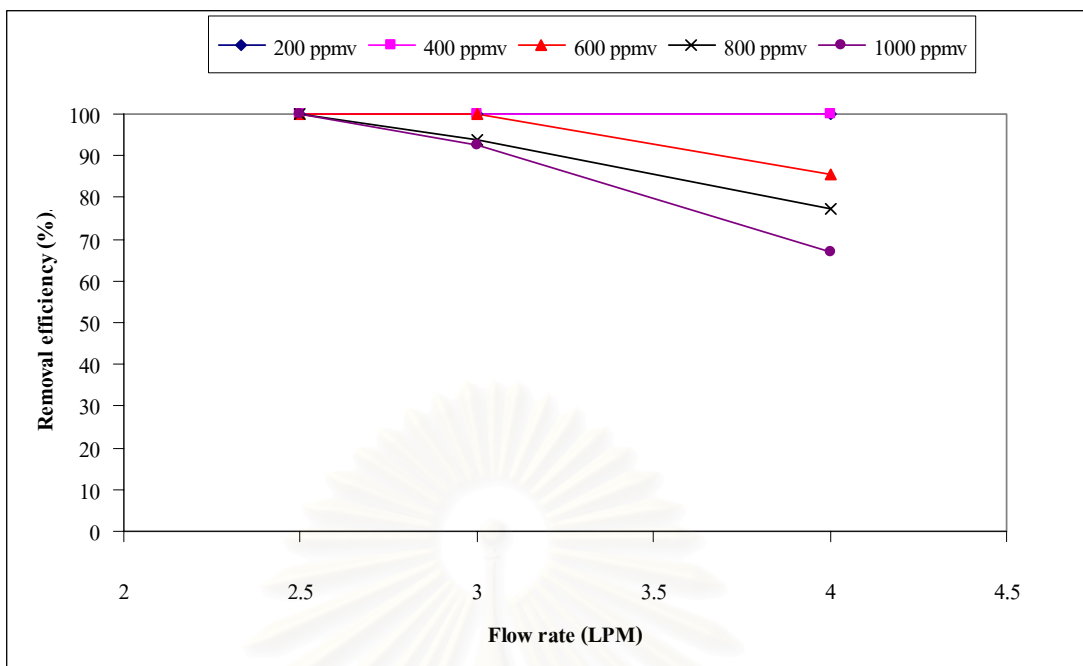


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูที่ความเข้มข้นต่างๆ

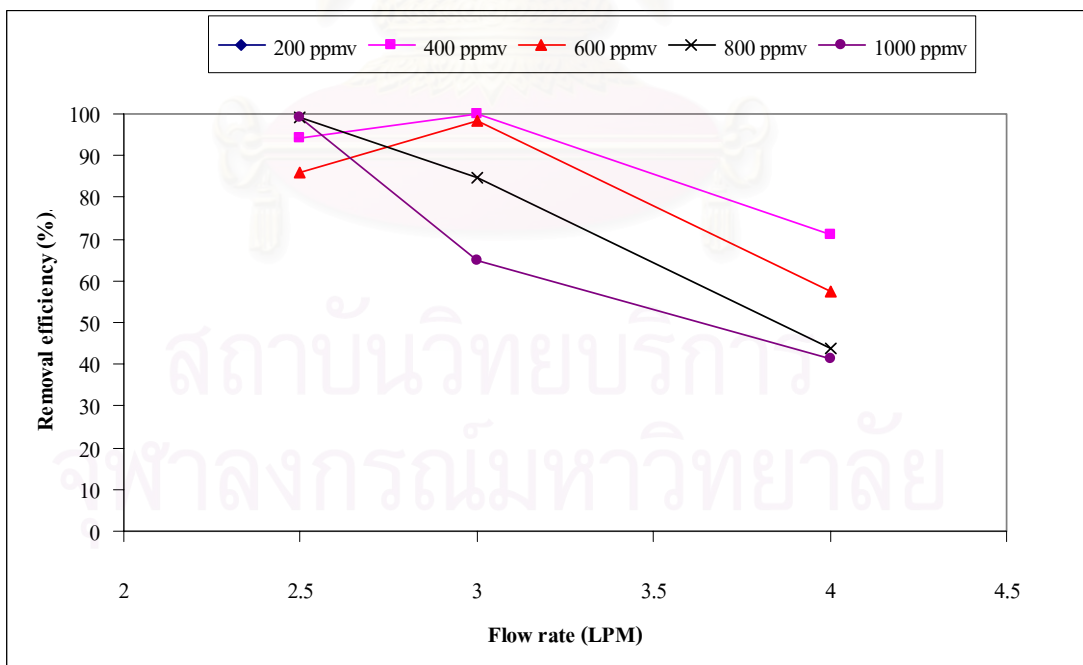


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภทดินสีดาที่ความเข้มข้นต่างๆ

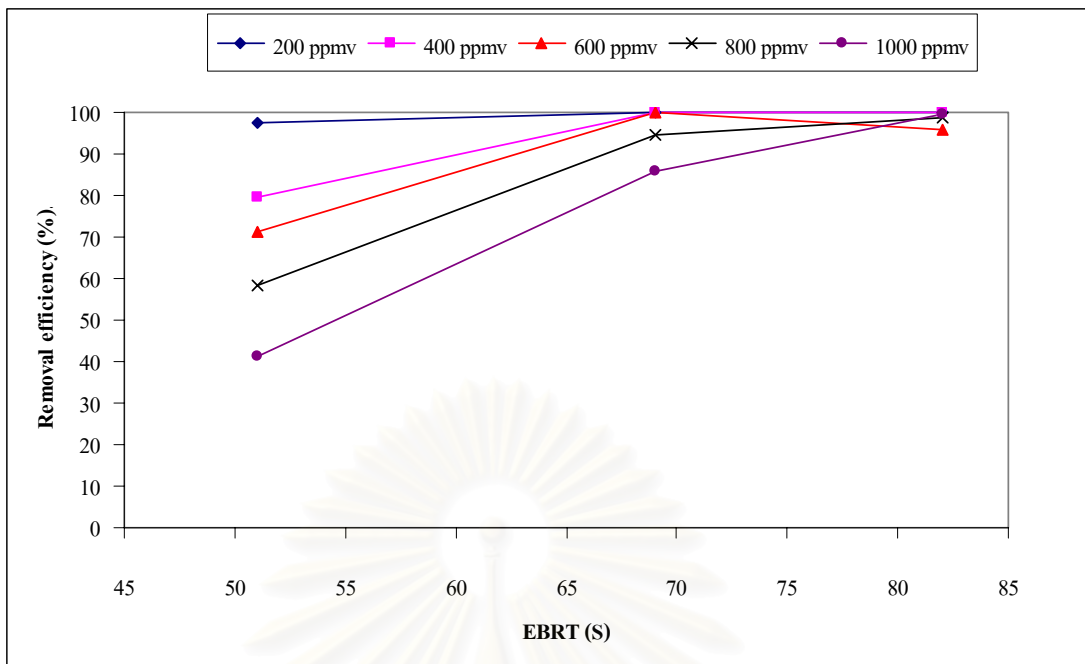




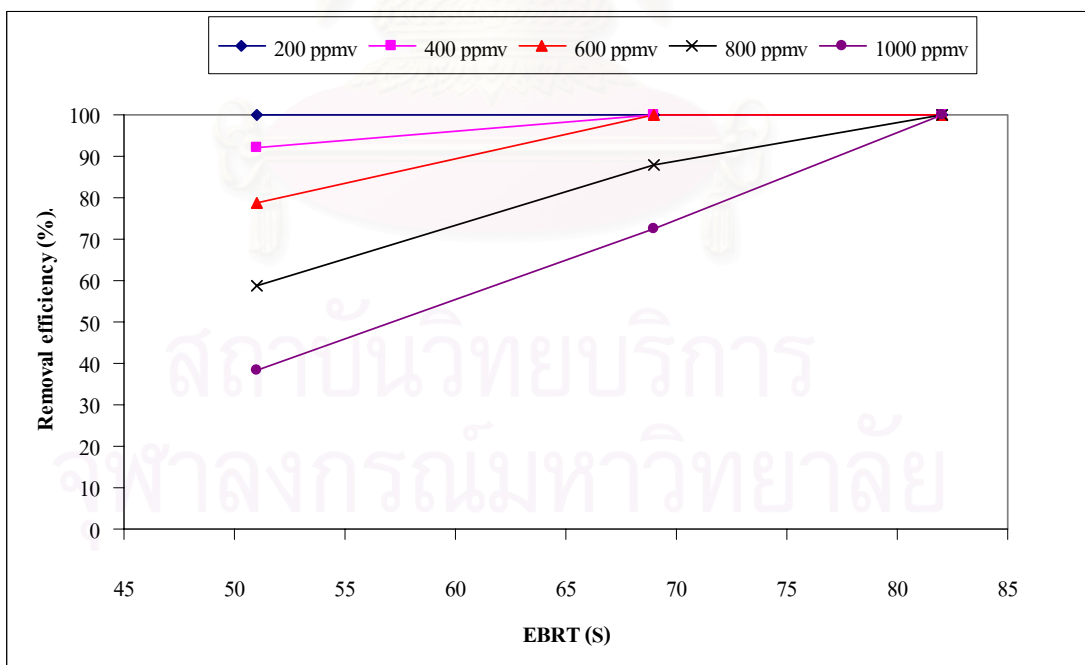
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท  
ปุยหมักที่ความเข้มข้นต่างๆ



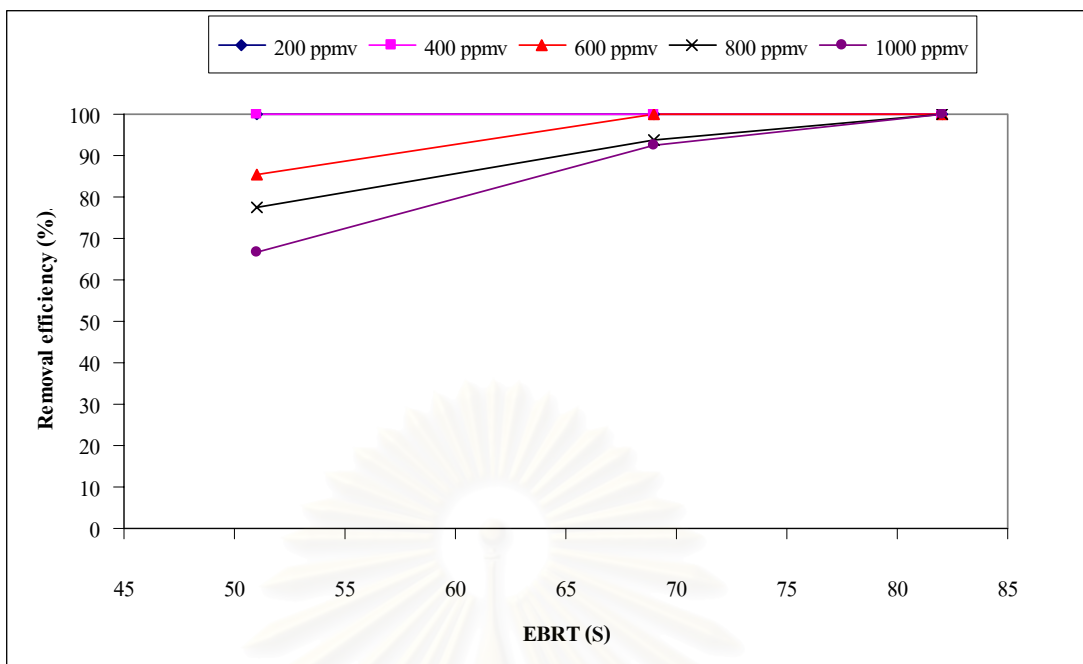
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลอากาศและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท  
ซีบกบที่ความเข้มข้นต่างๆ



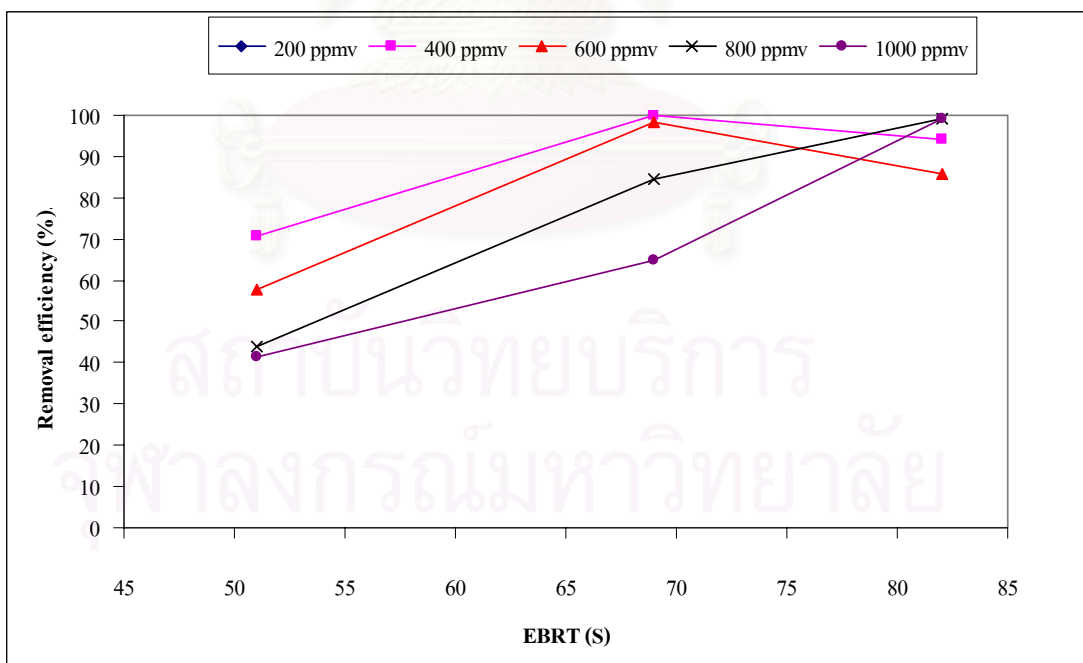
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปูที่ความเข้มข้นต่างๆ



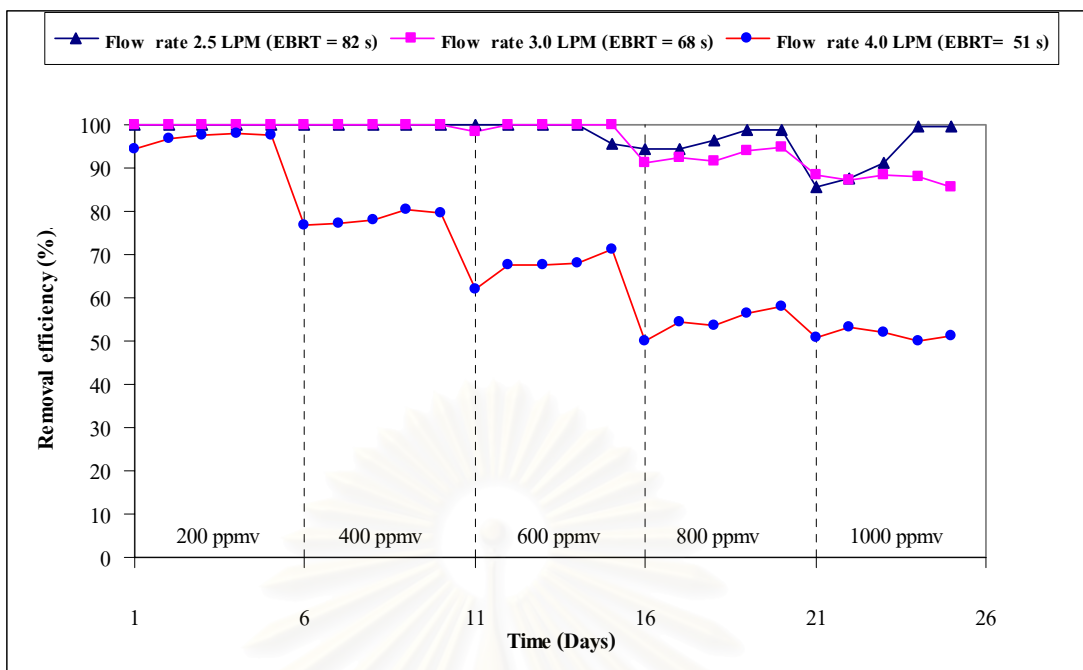
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท ดินสีดำที่ความเข้มข้นต่างๆ



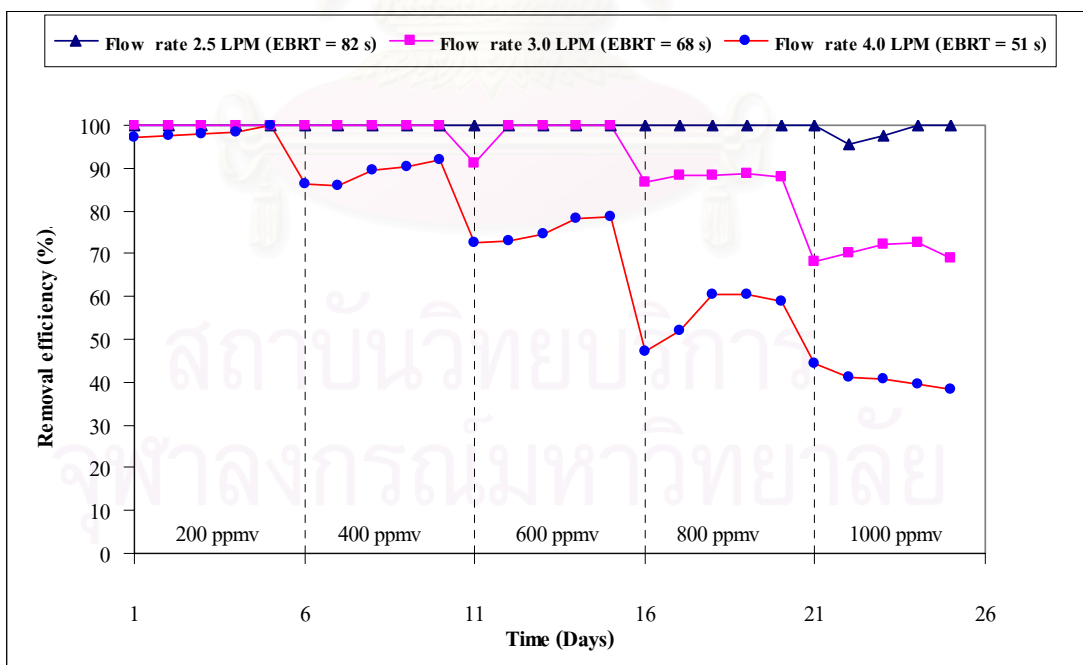
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท  
ปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นต่างๆ



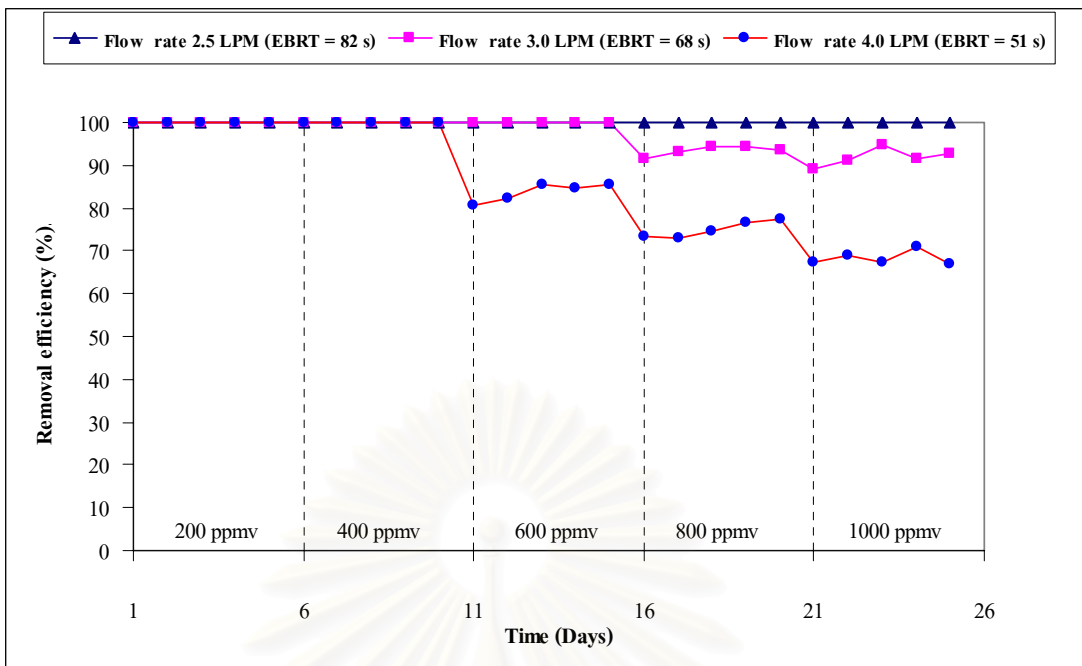
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางประเภท  
จี้กบที่ความเข้มข้นต่างๆ



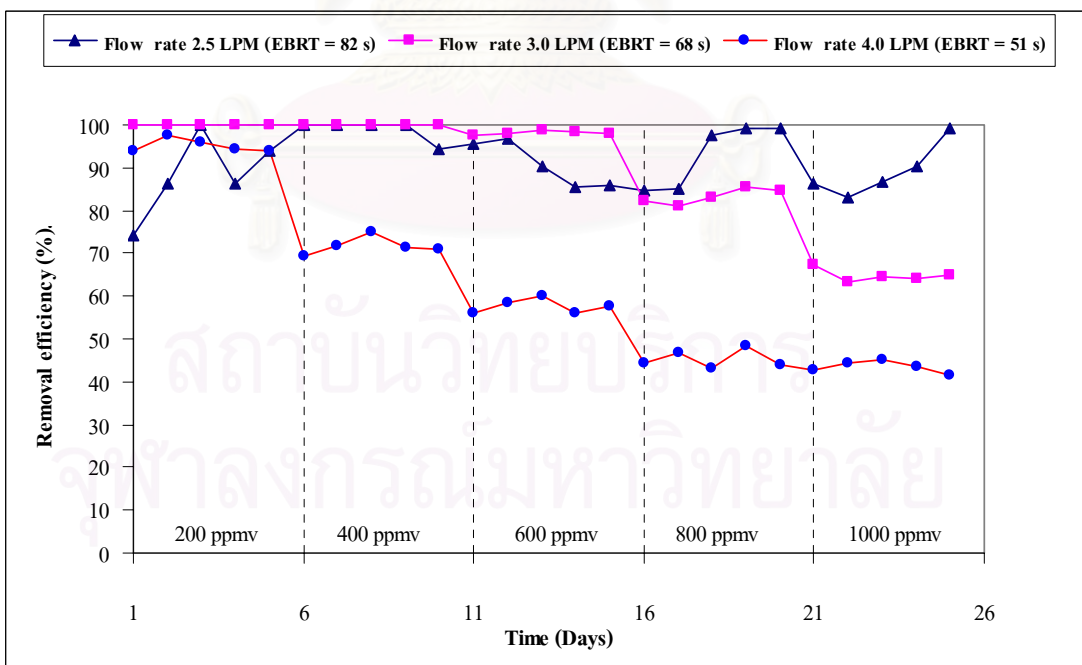
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทดินสีดา



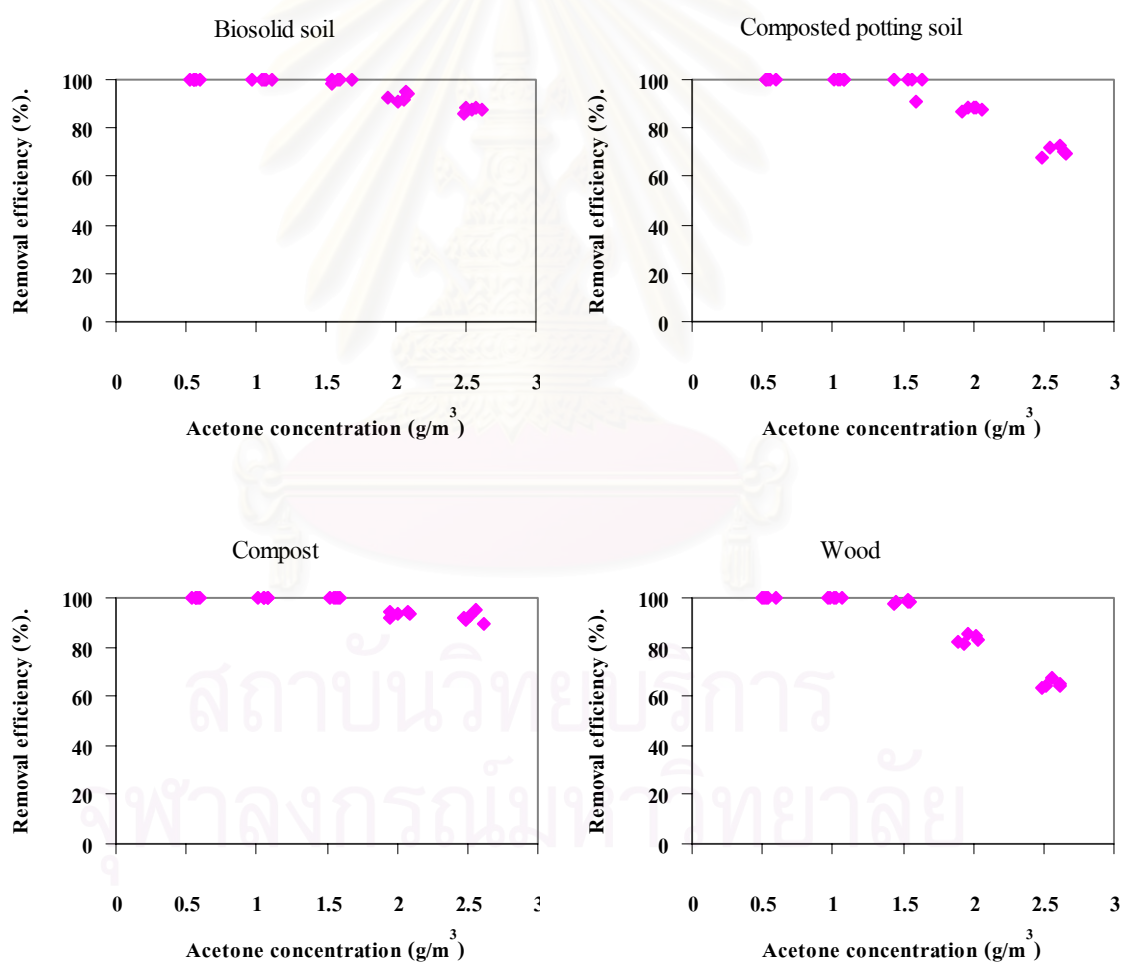
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหล่อากาศ และประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทปฏิกิริยา



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหล่อากาศ และประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเวลาการทดลองของตัวกลางประเภทซีเมนต์

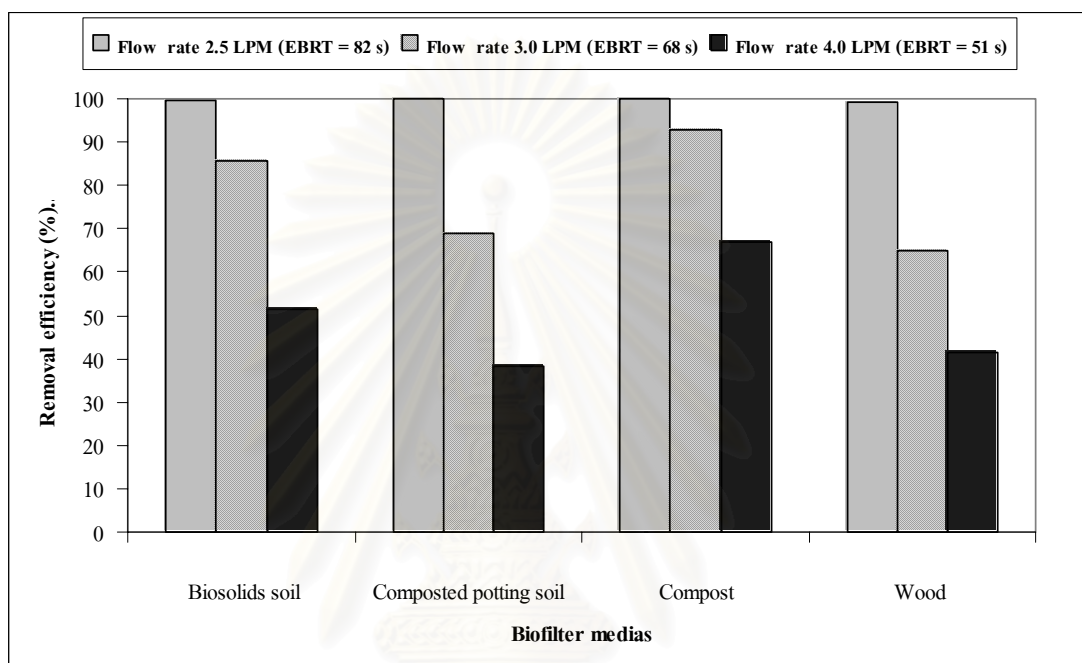
#### 4.2.4 อิทธิพลของความเข้มข้นไออะซิโตนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตนและประสิทธิภาพการบำบัด พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.5-2.5 กรัมต่อลบ.ม. (200-1,000 สนล.) ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าลดลง ตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 2.5 กรัมต่อลบ.ม. ปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 % ส่วนดินใบก้ามปู ดินสีดา และขี้กบ มีประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 85, 70 และ 65 % ตามลำดับ โดยสรุปว่าเมื่ออัตราไหลอากาศคงที่ การเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตนจาก 200-1,000 สนล. ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยตัวกลางแต่ประเภทมีประสิทธิภาพการบำบัดไม่เท่ากัน โดยเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดจากสูงไปต่ำของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ได้ดังนี้ ปุ๋ยหมัก > ดินใบก้ามปู > ดินสีดา > ขี้กบ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตนและประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล. และอัตราไหลอากาศต่างๆพบว่าในการบำบัดไออะซิโตนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ระยะเวลาพัก 68 วินาทีสำหรับตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ในขณะที่ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดา และขี้กบ ต้องใช้ระยะเวลาพัก 82 วินาที โดยปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด



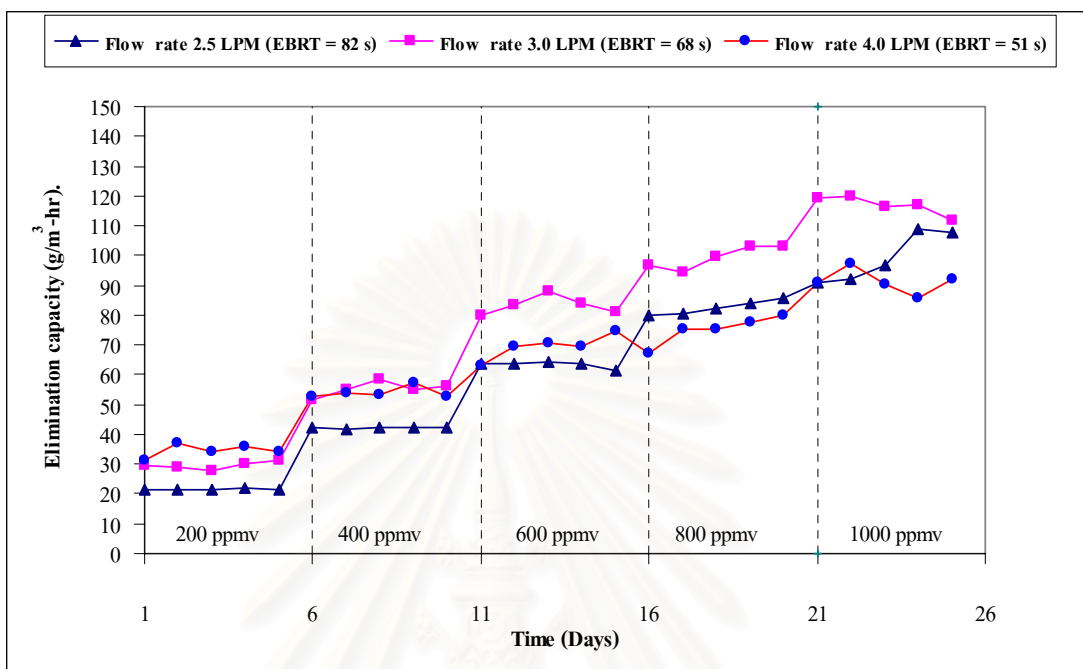
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ที่ความเข้มข้นไออะซิโตน 1,000 สนล. และที่อัตราไหลอากาศต่างๆ

#### 4.3 ความสามารถในการกำจัด (Elimination capacity, EC)

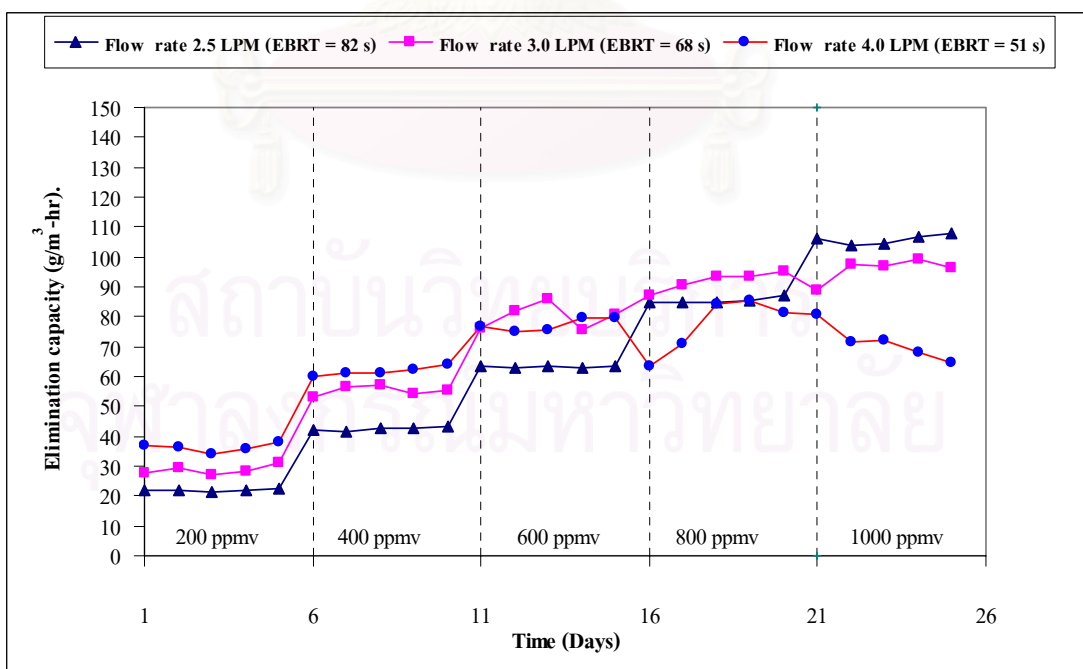
ความสามารถในการกำจัด คือ มวลของสารมลพิษที่ถูกกำจัดออกไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีประโยชน์ใช้ในการออกแบบระบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพที่มีปริมาตรตัวกลาง ความเข้มข้นของมลพิษ ระยะเวลาพัก ที่แตกต่างกันได้

รูปที่ 4.27-4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถในการกำจัด พบว่า ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู เมื่อเพิ่มอัตราไหลอากาศ จาก 2.5 เป็น 4.0 ลิตรต่อนาที ในช่วงความเข้มข้นไออะซิโตน 200-400 สนล. ส่งผลให้ค่าความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 57 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ในขณะที่ช่วงความเข้มข้นไออะซิโตน 600-1,000 สนล. ค่าความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง เป็นเพราะว่า ระบบไม่สามารถกำจัดไออะซิโตนได้ทัน โดยตัวกลางแต่ละประเภทมีความสามารถในการกำจัดไม่เท่ากัน

ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและภาวะบรรทุก จากการทดลองของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท เมื่อเพิ่มอัตราไหลอากาศสูงขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดไออะซิโตนมีแนวโน้มคงที่

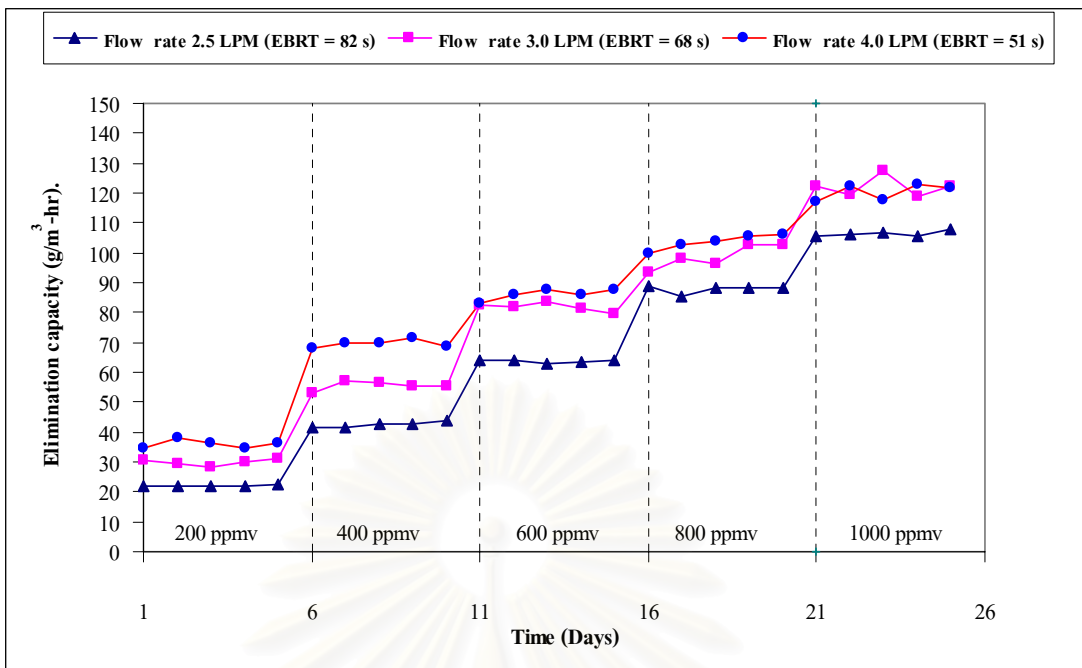


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู

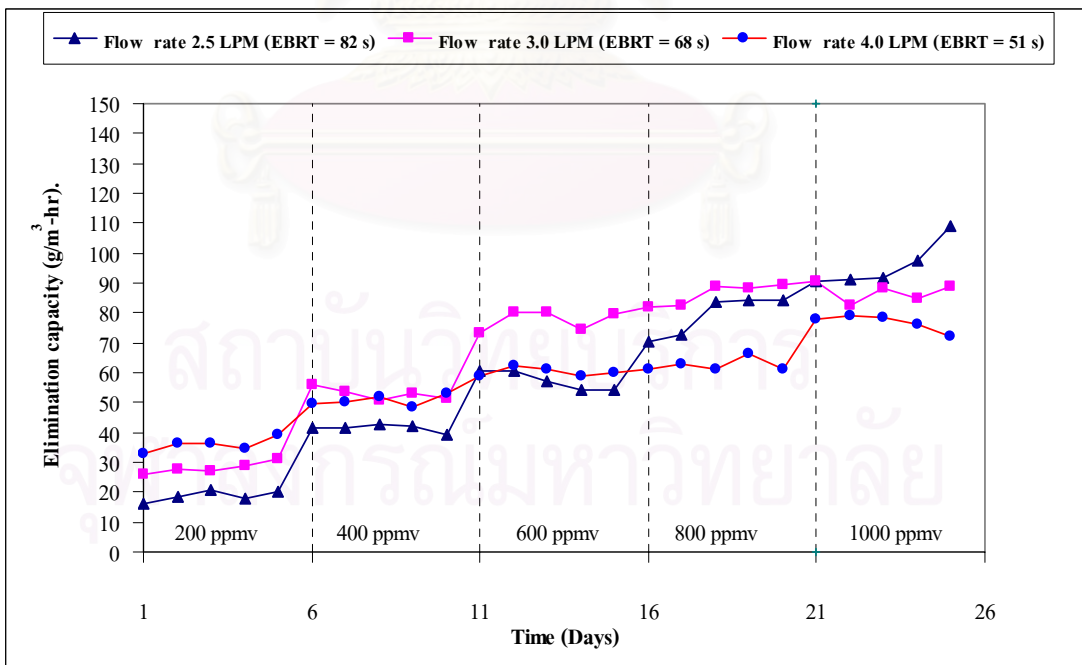


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตราไหลอากาศ และความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทดินสีดา



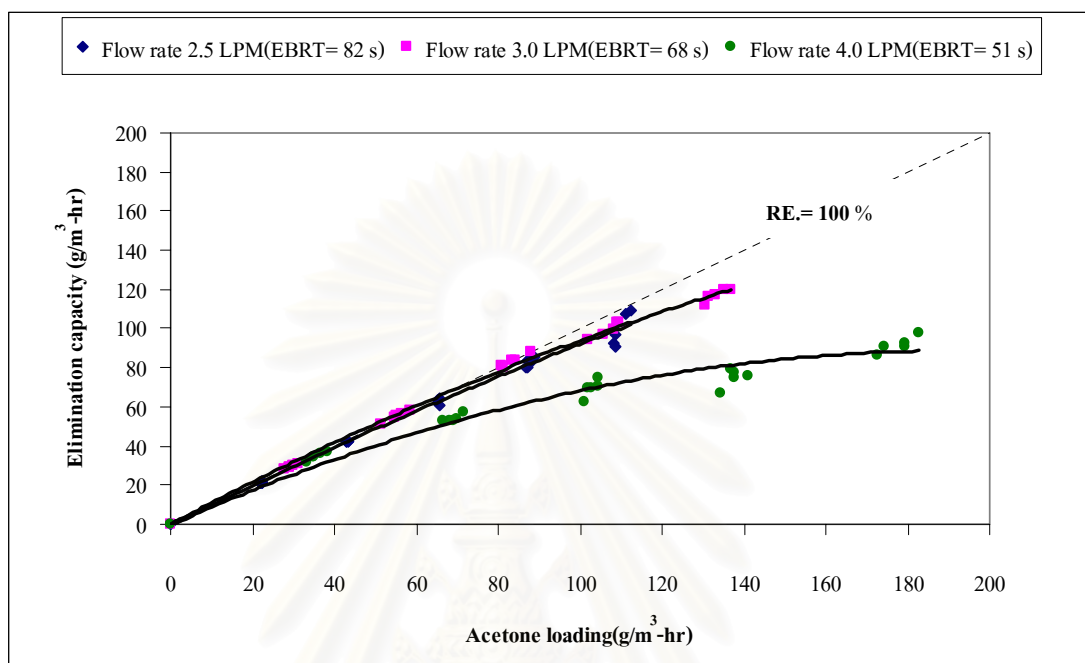


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตรานำไหลอากาศ และความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทปฏิกิริยา

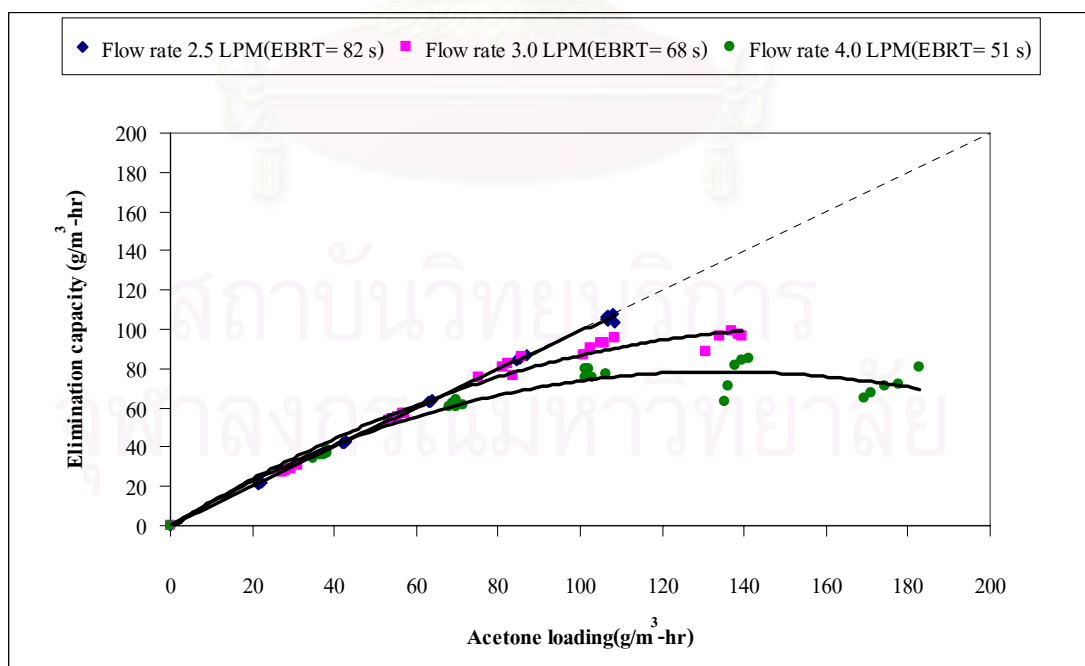


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน อัตรานำไหลอากาศ และความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทจุ่ม

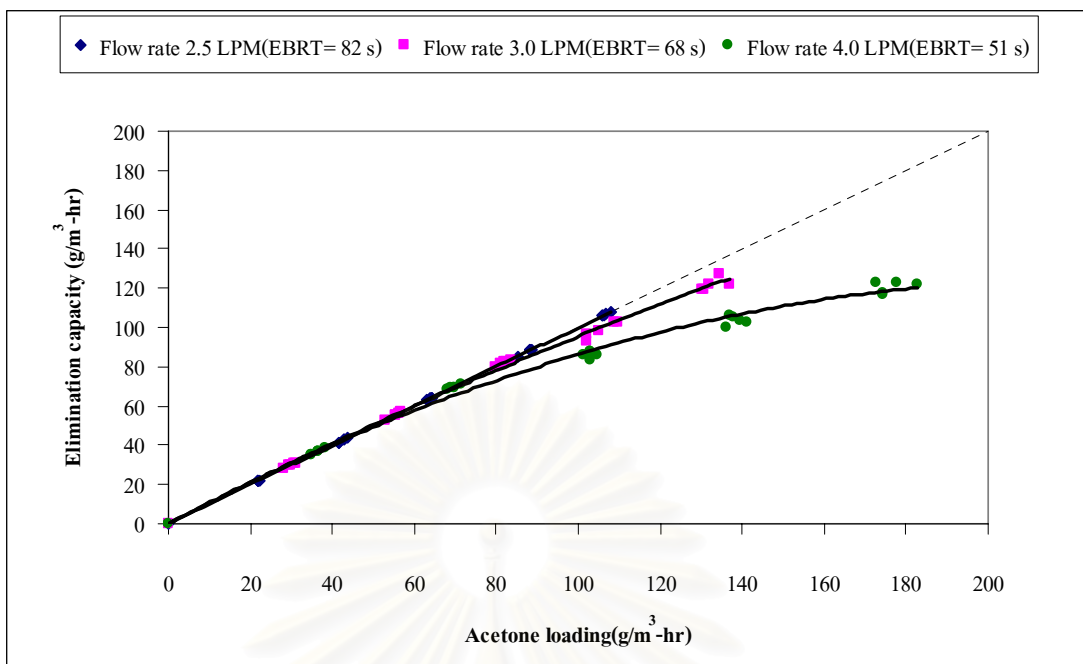
รูปที่ 4.31-4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและความสามารถในการกำจัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทที่ระยะเวลาพักแตกต่างกัน พบว่า ที่ภาระบรรทุกเท่ากัน ความสามารถในการกำจัดไออะซิโตนมีแนวโน้มลดลงเมื่อลดเวลาพัก และตัวกลางแต่ละประเภทมีความสามารถในการกำจัดไม่เท่ากัน โดยปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด



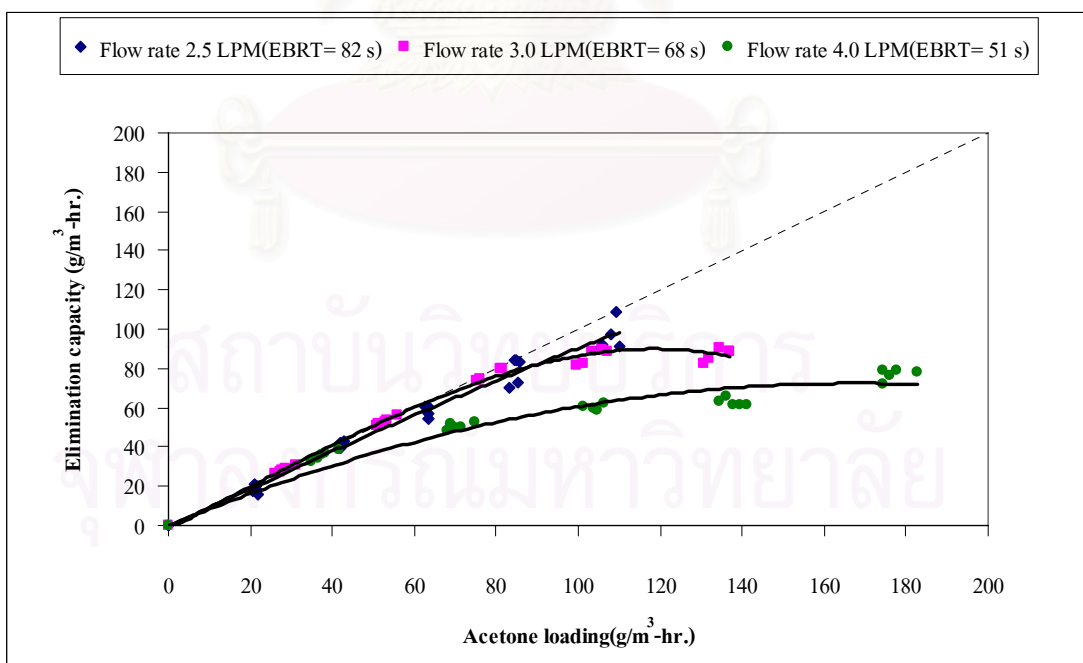
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและความสามารถในการกำจัดที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและความสามารถในการกำจัดที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทดินสีดา



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและความสามารถในการกำจัดที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทปฏิกิริยา



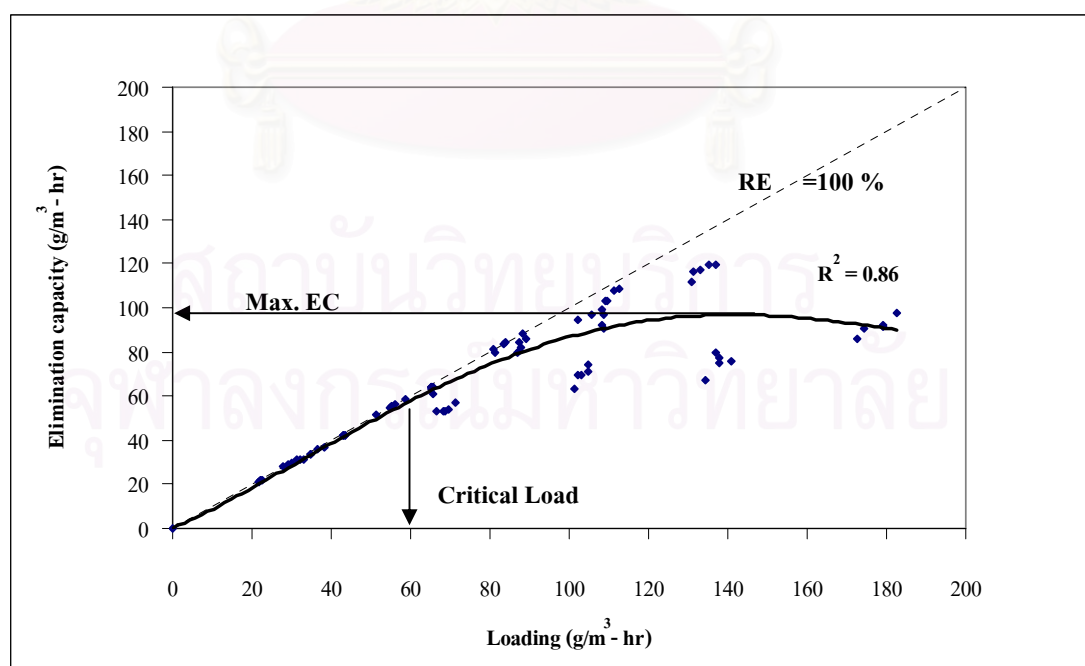
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกและความสามารถในการกำจัดที่เวลากักพักต่างๆของตัวกลางประเภทซีที

#### 4.3.1 ความสามารถในการกำจัดสูงสุดและภาระบรรทุกวิกฤติ

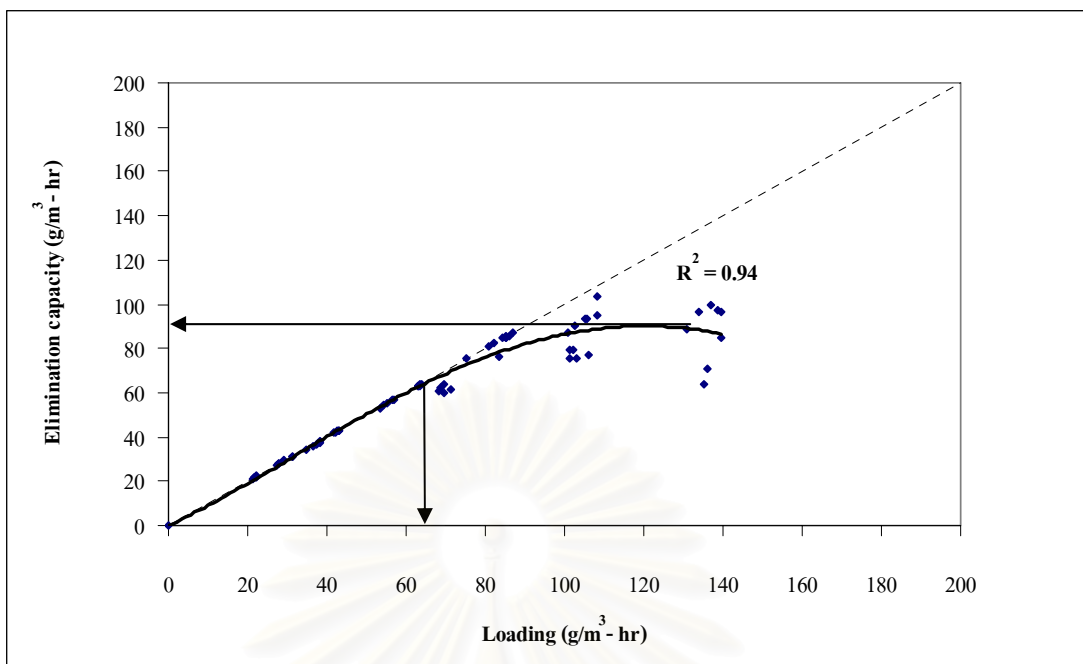
ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด คือ ค่าภาระบรรทุกที่เครื่องกรองชีวภาพมีความสามารถในการกำจัดมลพิษสูงสุด โดยไม่สามารถกำจัดเพิ่มได้อีกเนื่องจากสภาวะอัตราบรรทุกมลพิษที่สูงเกินที่จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารมลพิษได้ และค่าภาระบรรทุกวิกฤติ คือ ค่าภาระบรรทุกของระบบ ณ จุดแรกของกราฟที่ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มต่ำกว่า 100 % รูปที่ 4.35-4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุกและค่าความสามารถในการกำจัด โดยกราฟจากความสัมพันธ์นี้สามารถหาค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด และค่าภาระบรรทุกวิกฤติได้ซึ่งตัวกลางแต่ละประเภทจะมีค่าไม่เท่ากัน สรุปค่าตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด และค่าภาระบรรทุกวิกฤติ

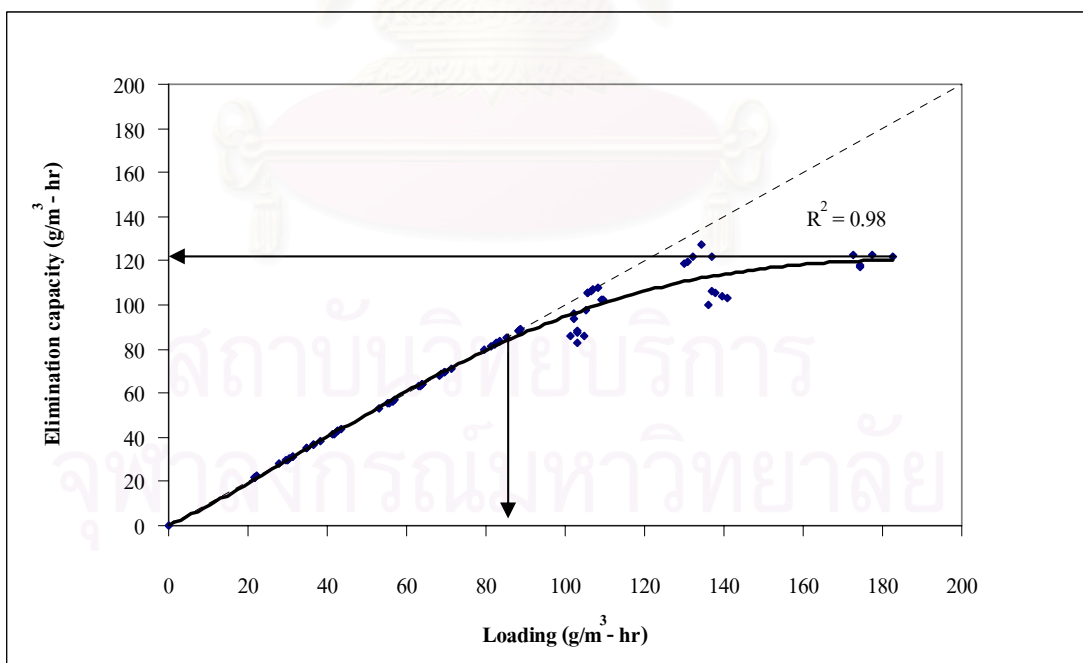
ประเภทตัวกลาง	ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	ค่าภาระบรรทุกวิกฤติ (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)
ดินใบก้ามปู	97	60
ดินสิดา	90	63
ปุ๋ยหมัก	120	83
ซีกบ	83	45



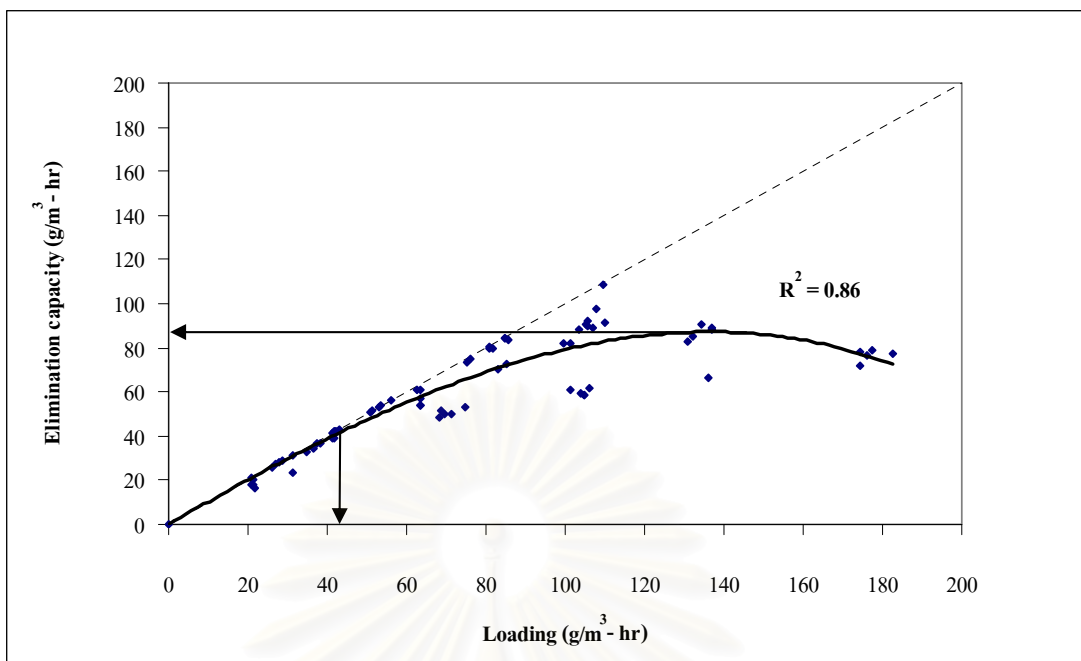
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุก และค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุก และค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง  
ประเภทดินสีดา



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุก และค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลาง  
ประเภทปุ๋ยหมัก

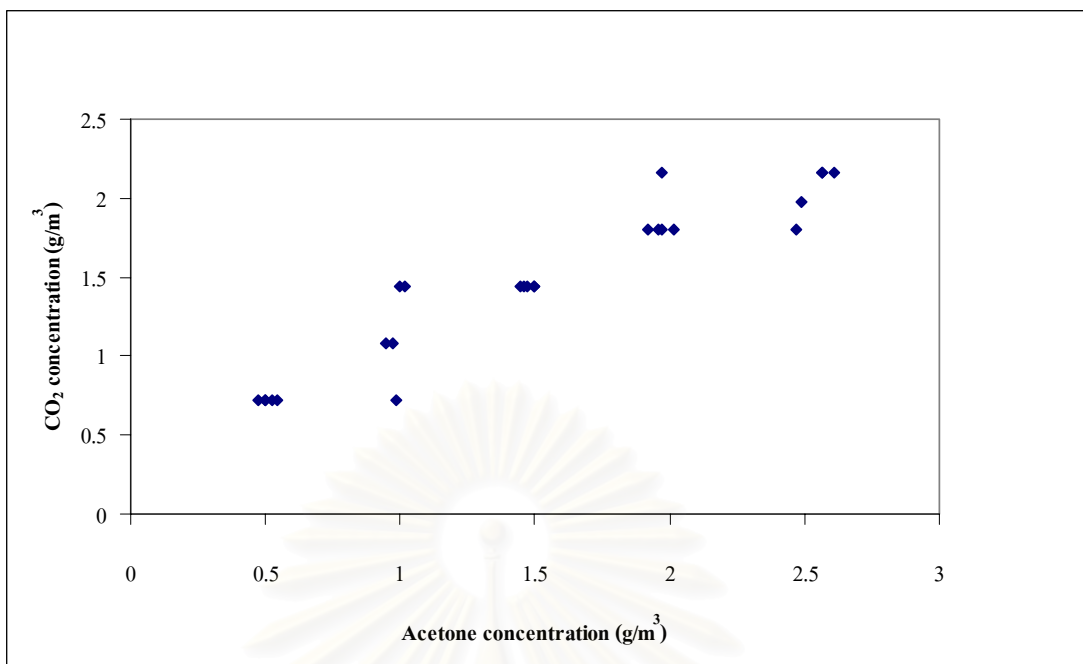


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระบรรทุก และค่าความสามารถในการกำจัดของตัวกลางประเภทจี้กบ

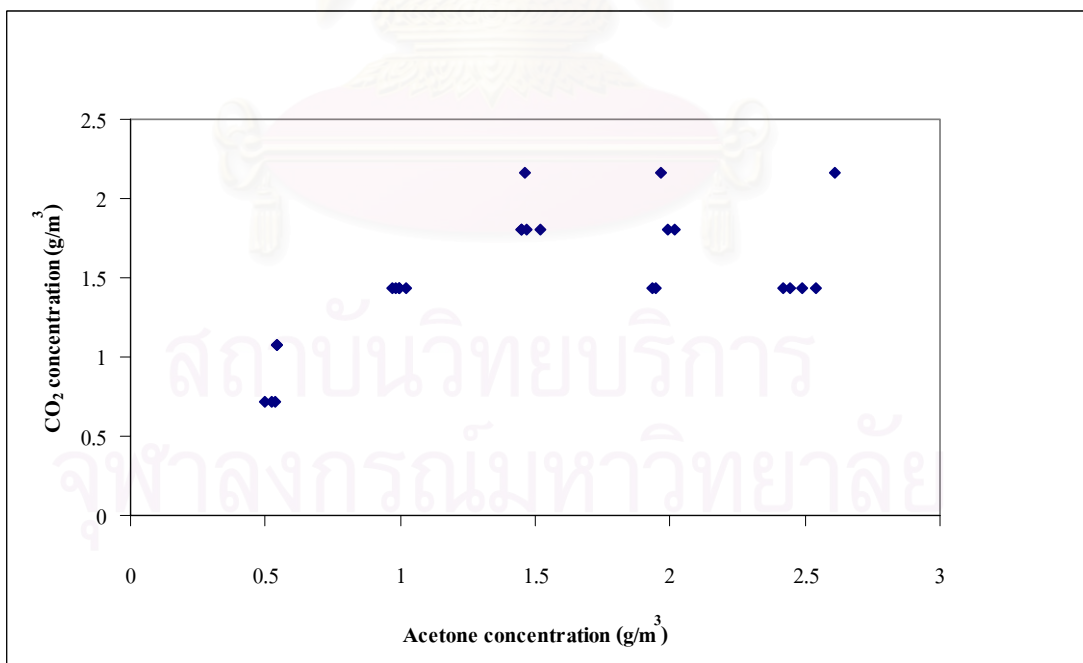
#### 4.4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ระบบการกรองชีวภาพกำจัดสารมลพิษประเภทสารอินทรีย์ โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็น น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ใหม่ ดังนั้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จึงเป็นข้อมูลหนึ่งในการติดตามการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

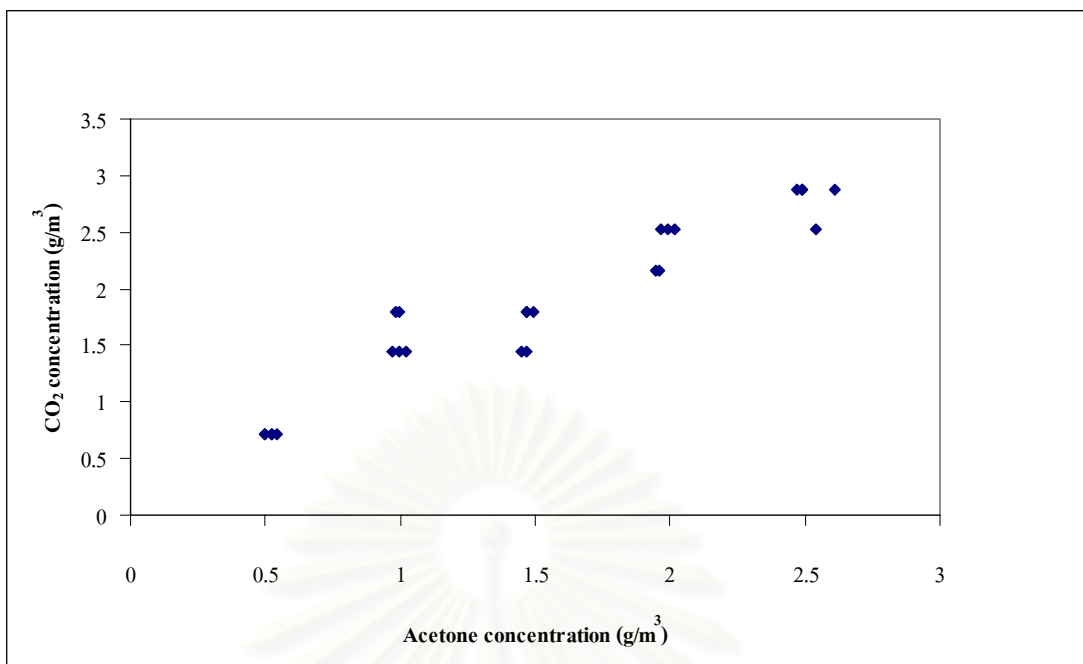
รูปที่ 4.39-4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที พบว่าตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และจี้กบ เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 2.1, 2.2, 2.9 และ 2.1 กรัมต่อลบ.ม. ตามลำดับ โดยการเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไออะซิโตนถึงประมาณ 2 กรัมต่อลบ.ม. เป็นความเข้มข้นอะซิโตนที่เครื่องกรองชีวภาพกำจัดเพิ่มมากกว่านี้ไม่ได้



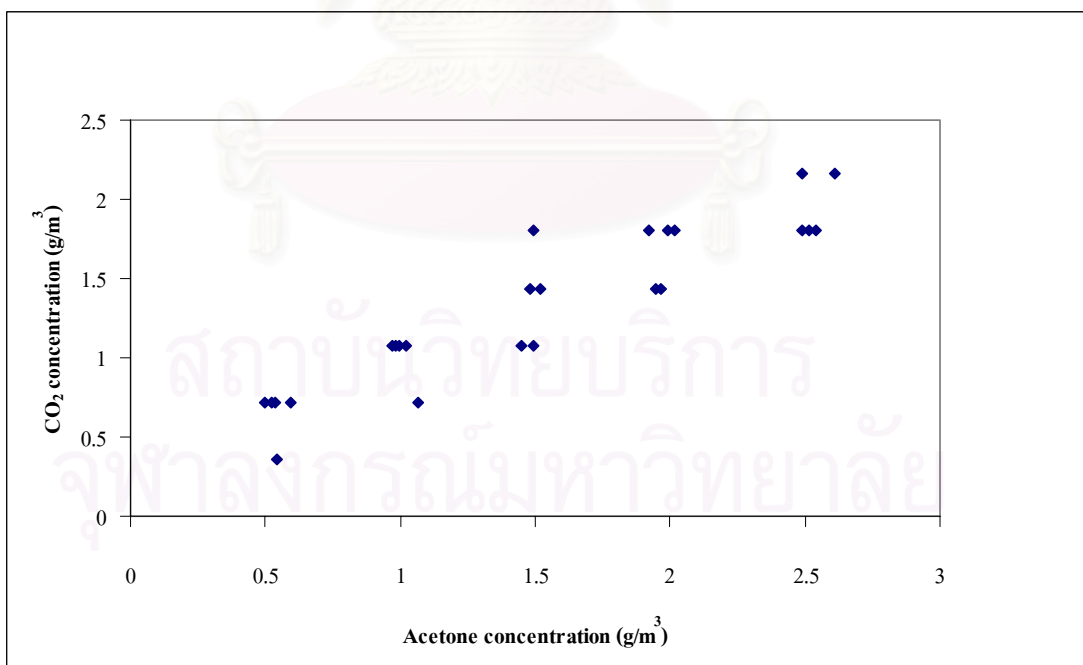
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น ไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที



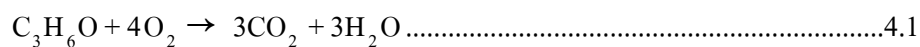
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที



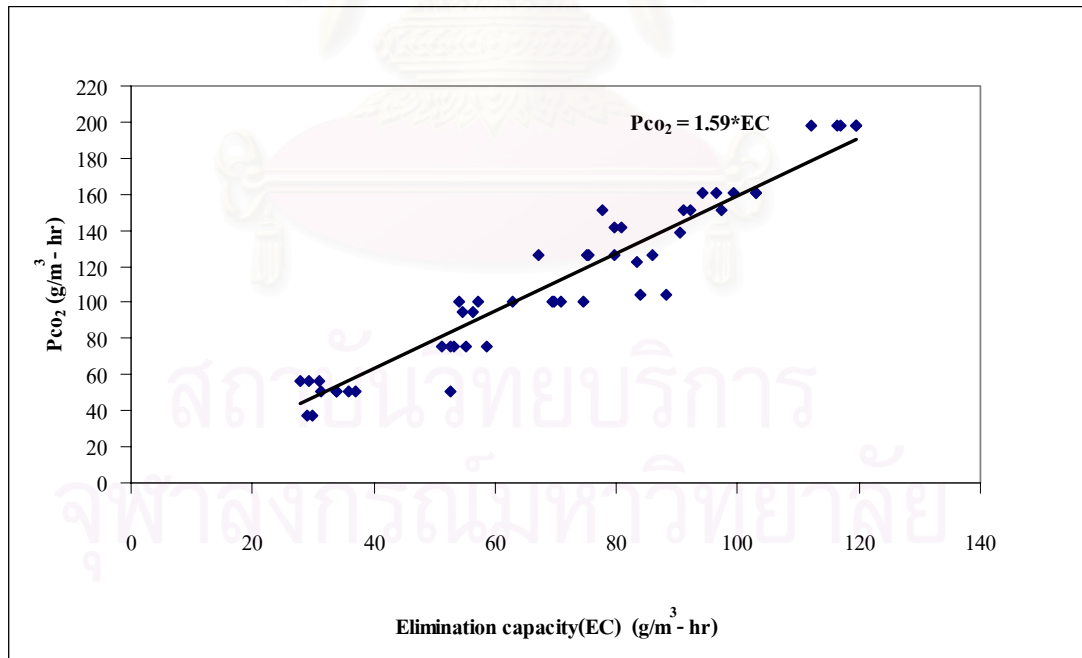
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไออะซิโตน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทขี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที



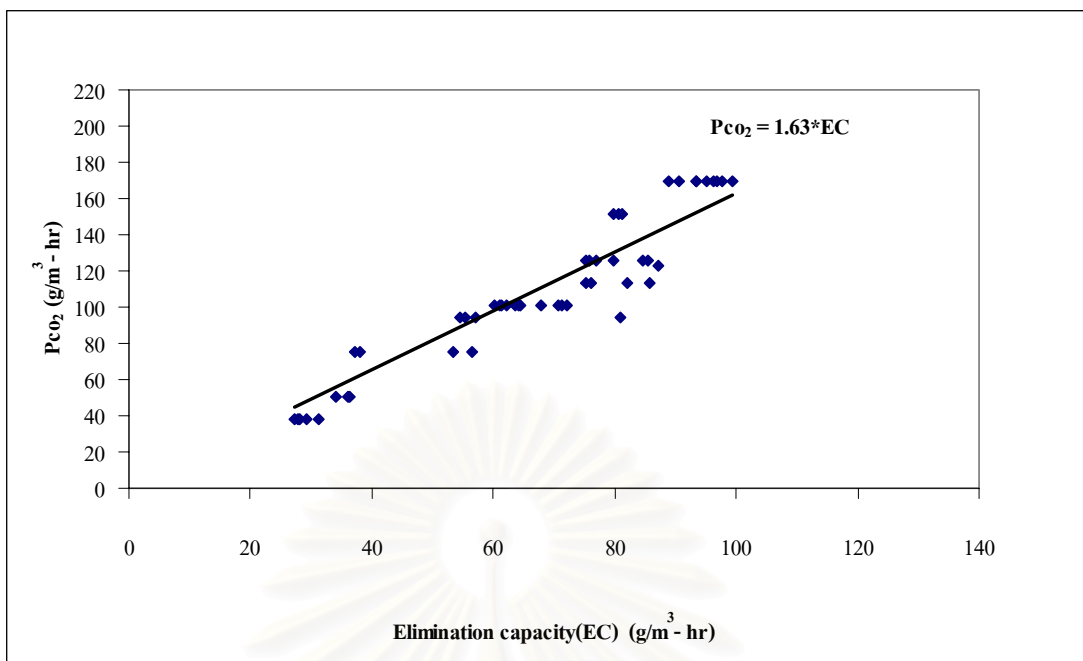
สมการที่ 4.1 เป็นสมการออกซิเดชันของอะซิโตนทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 2.27 กรัมต่อ 1 กรัมอะซิโตน



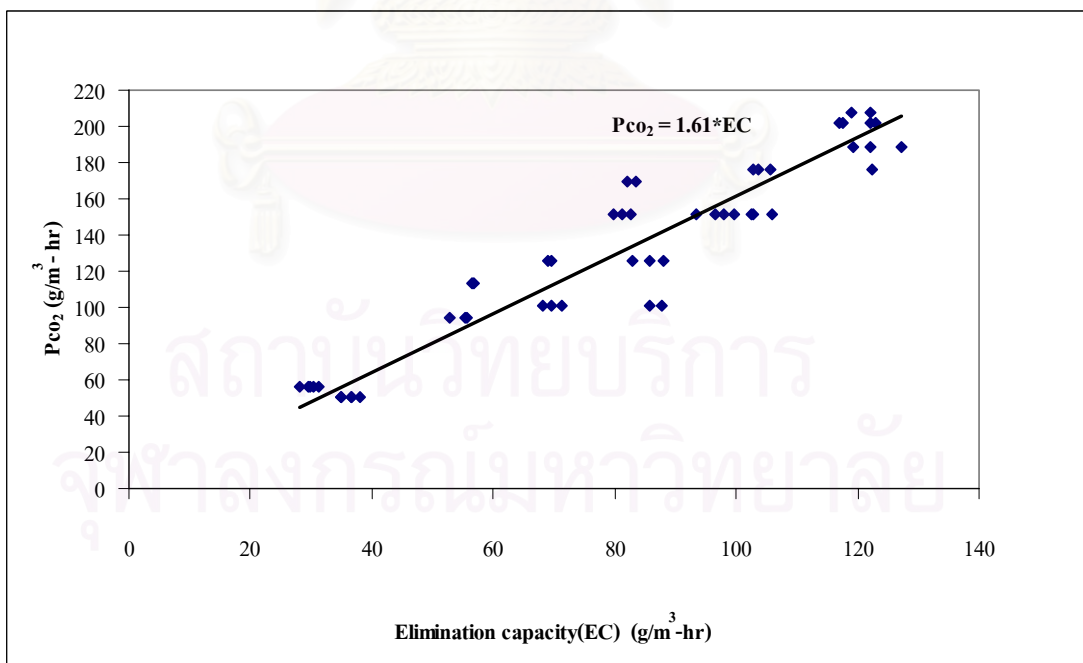
รูปที่ 4.43-4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ค่าความสามารถในการกำจัดอะซิโตนของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท มีค่าประมาณ 1.6 หมายถึง มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อมวลของอะซิโตนที่ถูกกำจัด เท่ากับ 1.6 ซึ่งน้อยกว่าการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสมการออกซิเดชันอะซิโตน (2.27 gCO<sub>2</sub>/gAcetone) เนื่องจากมวลของคาร์บอนที่หายไป และมีบางส่วนถูกนำไปสร้างเซลล์โดยจุลินทรีย์ บางส่วนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในฟิล์มชีวภาพในรูป HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> และ CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> เป็นต้น (Delhomenie และคณะ, 2002) ซึ่งกล่าวได้ว่า การกำจัดไออะซิโตนโดยเครื่องกรองชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ



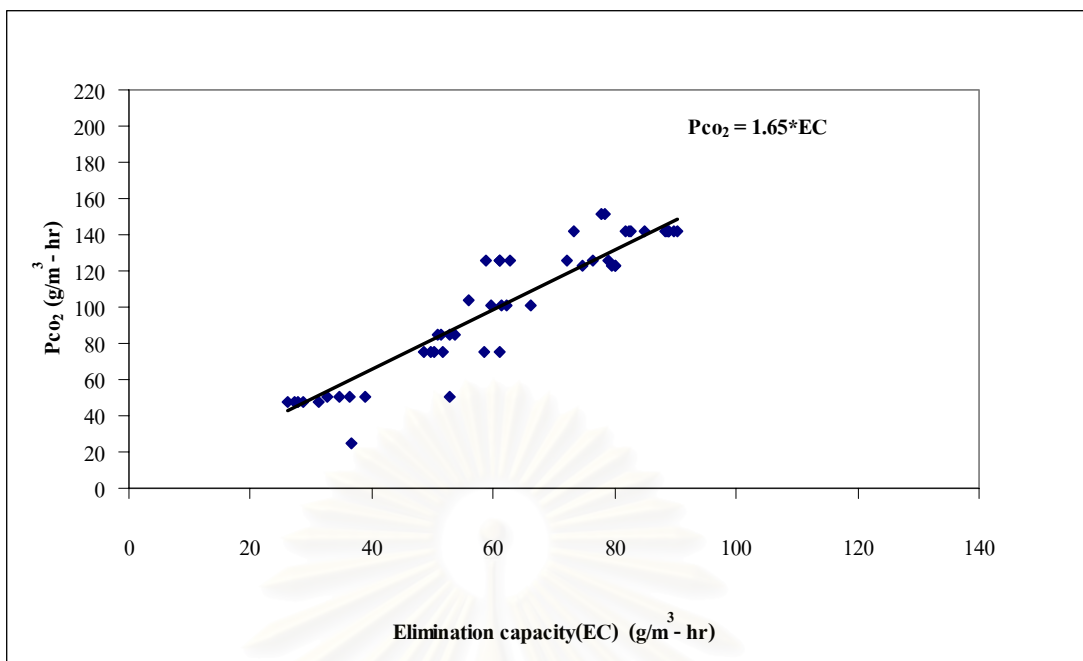
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิด  
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทดินสีดา



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิด  
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดและอัตราการเกิด  
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวกลางประเภทจี้กบ

#### 4.5 สมดุลคาร์บอน

การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวชั่วคราว (Pseudo-steady-state) (Chang และ Lu, 2003) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.2

$$Q_A C_{GI} = Q_A C_{GO} + Q_A C_{C,out} + \alpha Q_L C_B + \beta Q_L C_L \dots\dots\dots 4.2$$

- เมื่อ
- $Q_A$  = อัตราไหลอากาศ
  - $C$  = ความเข้มข้นของคาร์บอน
  - $Q_A C_{GI}$  = อัตรามวลของคาร์บอนซึ่งเป็นไอของอะซิโตนที่เข้าระบบ
  - $Q_A C_{GO}$  = อัตรามวลของคาร์บอนซึ่งเป็นไอของอะซิโตนที่ออกจากระบบ
  - $Q_A C_{C,out}$  = อัตรามวลของคาร์บอนซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบ
  - $\alpha Q_L C_B$  = อัตราการใช้มวลคาร์บอนของมวลชีวภาพ
  - $\beta Q_L C_L$  = อัตรามวลของคาร์บอนที่อยู่ในน้ำชะตัวกลาง

โดยที่  $\alpha$  คืออัตราส่วนของคาร์บอนในมวลชีวภาพ ( $C_5H_7NO_2$ ) มีค่า 60/113 เท่ากับ 0.53 และสามารถประมาณค่า  $C_B$  ได้จากการทดสอบค่าของแข็งระเหยง่าย (VSS) ของน้ำชะตัวกลาง

โดยที่  $\beta$  คืออัตราส่วนของคาร์บอนต่อSCODในน้ำชะจากสมการ 4.1 มีค่า 36/128 เท่ากับ 0.28 และสามารถประมาณค่า  $C_L$  ได้จากการวิเคราะห์ SCODของน้ำชะตัวกลาง

โดย % Recovery ในตารางที่ 4.6-4.9 หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเทอมขวามือต่อเทอมซ้ายมือของสมการที่ 4.2 เป็นค่าร้อยละของคาร์บอนที่ออกจากระบบ

ผลการทดลอง เนื่องจากไม่เกิดน้ำชะออกจากระบบจึงตัดเทอมของมวลคาร์บอนที่อยู่ในน้ำชะออกและสามารถคำนวณสมดุลคาร์บอนได้ ดังตารางที่ 4.6-4.9 พบว่า มวลคาร์บอนในอะซิโตนประมาณร้อยละ 75 ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมวลของคาร์บอนที่หายไปมีบางส่วนนำไปสร้างเซลล์โดยจุลินทรีย์ และอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในฟิล์มชีวภาพ ส่วนค่า Recovery ที่เกิน 100 % เป็นผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.6 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู

Run	Q LPM	ACEin ppmv	ACEout ppmv	CO <sub>2</sub> produced ppmv	QxACEin mg-C/min	QxACEout mg-C/min	QxCO <sub>2</sub> mg-C/min	Recovery %
1	3.0	250	0	600	1.10	0.00	0.88	80
2	3.0	452	0	1000	2.00	0.00	1.47	74
3	3.0	650	0	1500	2.87	0.00	2.21	77
4	3.0	875	47	1700	3.87	0.21	2.50	70
5	3.0	1050	150	3000	4.64	0.66	4.42	109*
6	4.0	210	5.3	400	1.24	0.03	0.79	66
7	4.0	400	82	600	2.36	0.48	1.18	71
8	4.0	630	180	800	3.71	1.06	1.57	71
9	4.0	825	345	1000	4.86	2.03	1.96	82
10	4.0	1080	525	1200	6.36	3.09	2.36	86
ค่าเฉลี่ย								75
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน								6.49

หมายเหตุ : % Recovery =  $(QxCO_2 + QxACEout) \times 100 / QxACEin$

\* เป็นค่าที่อยู่นอกกลุ่ม (Outliers)

ตารางที่ 4.7 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทดินสีดำ

Run	Q LPM	ACEin ppmv	ACEout ppmv	CO <sub>2</sub> produced ppmv	QxACEin mg-C/min	QxACEout mg-C/min	QxCO <sub>2</sub> mg-C/min	Recovery %
1	3.0	250	0	400	1.10	0.00	0.59	53*
2	3.0	445	0	1000	1.97	0.00	1.47	75
3	3.0	650	0	1200	2.87	0.00	1.77	62
4	3.0	870	105	1800	3.84	0.46	2.65	81
5	3.0	1120	347	1800	4.95	1.53	2.65	85
6	4.0	230	0	600	1.35	0.00	1.18	87
7	4.0	420	34	800	2.47	0.20	1.57	72
8	4.0	610	130	1000	3.59	0.77	1.96	76
9	4.0	830	341	1200	4.89	2.01	2.36	89
10	4.0	1021	631	800	6.01	3.72	1.57	88
ค่าเฉลี่ย								79
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน								9.17

ตารางที่ 4.8 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก

Run	Q LPM	ACEin ppmv	ACEout ppmv	CO <sub>2</sub> produced ppmv	QxACEin mg-C/min	QxACEout mg-C/min	QxCO <sub>2</sub> mg-C/min	Recovery %
1	3.0	250	0	600	1.10	0.00	0.88	80
2	3.0	446	0	1000	1.97	0.00	1.47	75
3	3.0	640	0	1000	2.83	0.00	1.47	52*
4	3.0	880	56	1600	3.89	0.25	2.36	67
5	3.0	1070	68	2200	4.73	0.30	3.24	75
6	4.0	220	0	400	1.30	0.00	0.79	61
7	4.0	415	0	1000	2.44	0.00	1.96	80
8	4.0	620	90	1000	3.65	0.53	1.96	68
9	4.0	825	178	1200	4.86	1.05	2.36	70
10	4.0	1100	365	1600	6.48	2.15	3.14	82
ค่าเฉลี่ย								73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน								7.12

ตารางที่ 4.9 สมดุลคาร์บอนของตัวกลางประเภทจี้กบ

Run	Q LPM	ACEin ppmv	ACEout ppmv	CO <sub>2</sub> produced ppmv	QxACEin mg-C/min	QxACEout mg-C/min	QxCO <sub>2</sub> mg-C/min	Recovery %
1	3.0	250	0	500	1.10	0.00	0.74	67
2	3.0	413	0	1100	1.82	0.00	1.62	89
3	3.0	650	12	1100	2.87	0.05	1.62	58
4	3.0	850	130	1100	3.75	0.57	1.62	58
5	3.0	1100	387	1100	4.86	1.71	1.62	69
6	4.0	250	15	400	1.47	0.09	0.79	59
7	4.0	450	131	400	2.65	0.77	0.79	59
8	4.0	625	265	800	3.68	1.56	1.57	85
9	4.0	840	472	1000	4.95	2.78	1.96	96
10	4.0	1050	615	1000	6.18	3.62	1.96	90
ค่าเฉลี่ย								73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน								15.27

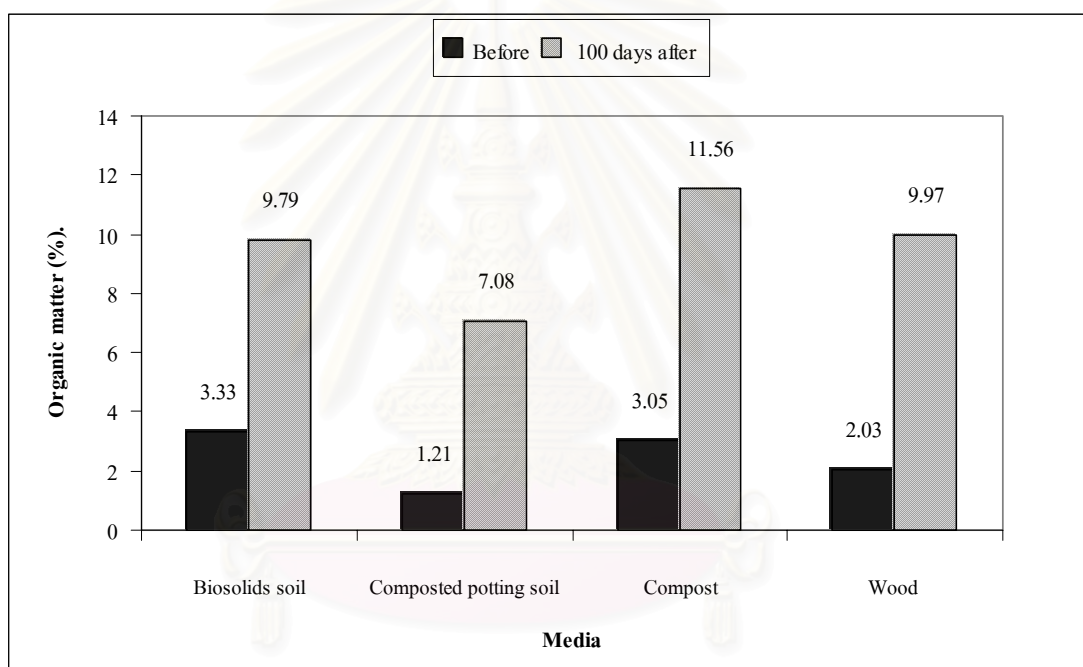
#### 4.6 ปริมาณจุลินทรีย์

ปริมาณจุลินทรีย์เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่น่ามาติดตาม ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ โดยผลวิเคราะห์เป็นการบอกปริมาณจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพที่เกิดขึ้นจริง แต่ข้อเสีย คือค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง และวิธีวิเคราะห์ค่อนข้างยุ่งยาก ในการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ครั้งนี้ทำการส่งวิเคราะห์ที่ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการนับปริมาณจุลินทรีย์หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดำ ปุ๋ยหมัก และจี้กบ มีปริมาณจุลินทรีย์  $4.4 \times 10^6$ ,  $9.1 \times 10^6$ ,  $5.5 \times 10^6$  และ  $4.7 \times 10^6$  CFU/gram ตามลำดับ Devinny และคณะ (1999) พบปริมาณจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพในช่วง  $10^8$ - $10^9$  CFU/gram โดยปริมาณจุลินทรีย์ที่ได้จากการทดลองอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าที่พบในเครื่องกรองชีวภาพ ซึ่งมีความเป็นไปได้อันเนื่องจากการเพิ่มภาวะบรรทุกสูงเกินไปจนถึงขั้นเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และอีกสาเหตุหนึ่ง คือ ได้ส่งตัวอย่างวิเคราะห์เพียง 1 ตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้อาจจะเป็นตัวแทนที่ไม่เหมาะสม

#### 4.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่น่ามาใช้เป็นสิ่งที่ติดตาม ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพที่สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย รวดเร็ว และประหยัด ข้อเสียคือ ผลที่ได้เป็นการ

บอกประสิทธิภาพอย่างคร่าวๆ โดยที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงในเครื่องกรองชีวภาพซึ่งสารอินทรีย์บางส่วนคือปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.47 แสดงปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนและหลังการเดินระบบ 100 วัน พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นหลังจากเดินระบบอย่างชัดเจน เช่น ตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นจาก 3.05 เป็น 11.56 % กล่าวได้ว่าปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหลังจากเดินระบบ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดและค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด คือ ปุ๋ยหมักเกิดปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงที่สุดทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง ทั้งนี้ปริมาณจุลินทรีย์ที่ตรวจพบในปุ๋ยหมักมีค่าน้อยซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ซึ่งคาดว่าเกิดจากตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์เพียง 1 ตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้ อาจจะเป็นตัวแทนที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.47 ปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนและหลังการเดินระบบของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

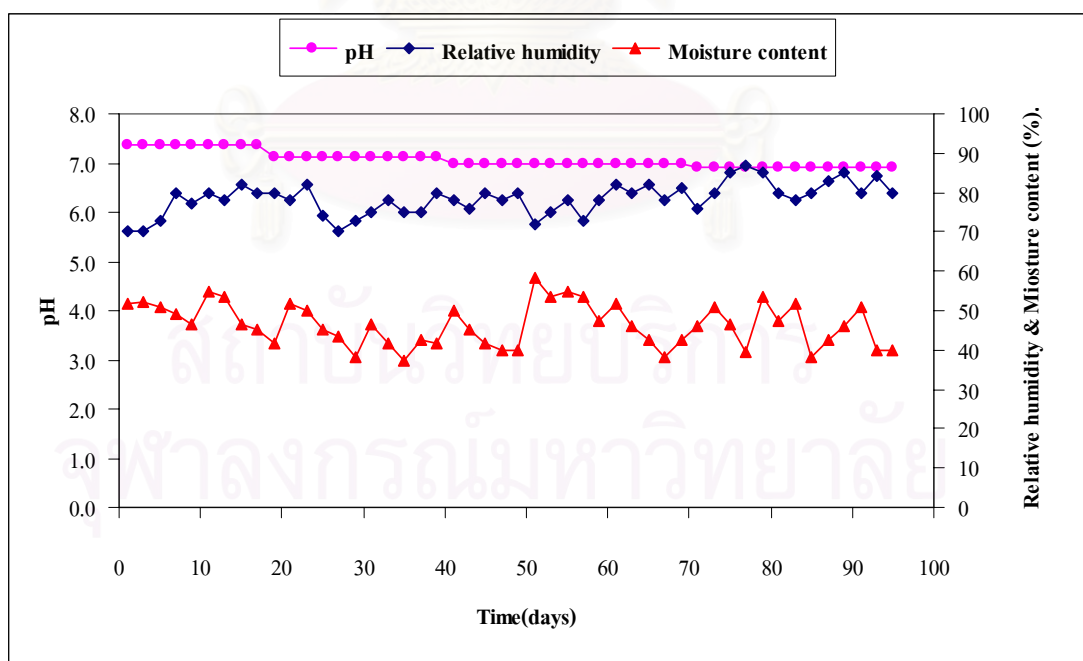
#### 4.8 ความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ พีเอช และอุณหภูมิ

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ความชื้นของตัวกลาง เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เนื่องจาก จุลินทรีย์จะทำงานและดำรงชีพได้ดีในสถานะน้ำ และอยู่ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม โดยการรักษาระดับความชื้นตัวกลางในระบบคือการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบให้สูงกว่า 95 % (Leson และ Winer, 1991) หรือต้องมีระบบการเติมน้ำเพื่อทดแทนปริมาณน้ำที่สูญเสียไป ในการทดลองออกแบบชุดสร้างคามชื้นสัมพัทธ์อากาศโดยการพ่นอากาศลงน้ำทำให้มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ประมาณ 80-85 %

จากรูปที่ 4.48-4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นของตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบ และพีเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

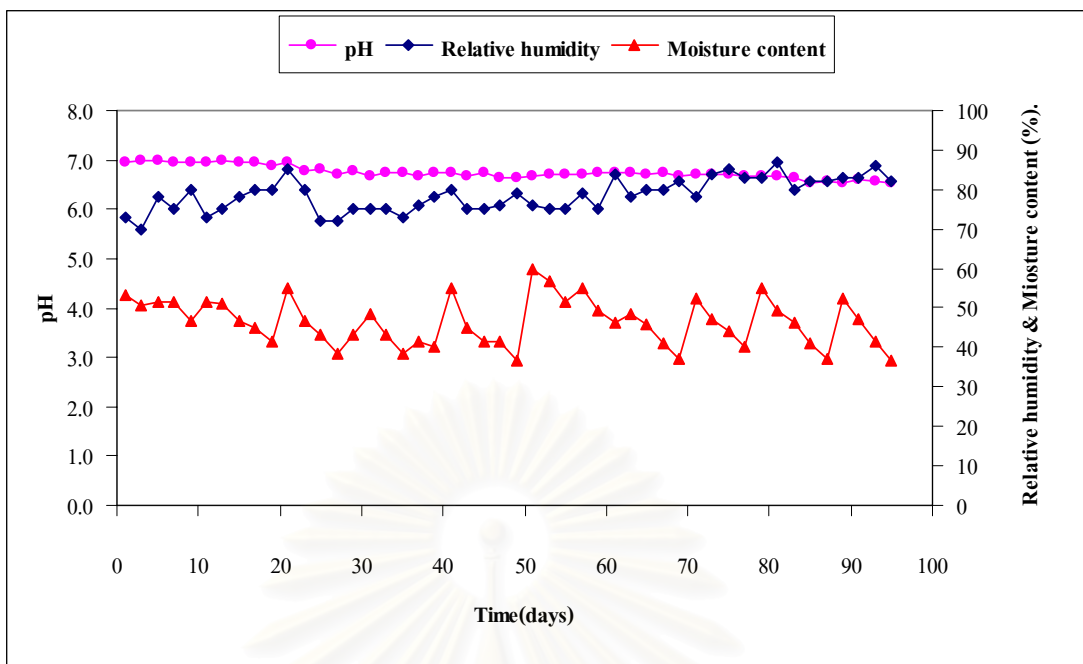
พบว่าการรักษาระดับความชื้นตัวกลางให้อยู่ในช่วงเหมาะสม โดยทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าระบบและการเติมน้ำ ตัวกลางประเภทดินสีดาเป็นตัวกลางที่มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นมากที่สุด และค่าความชื้นของตัวกลางอยู่ในช่วง 30-70 % ค่าพีเอชของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทมีค่าลดลงเล็กน้อยหลังจากเดินระบบประมาณ 100 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.5-6.0 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ยังคงมีปัญหากับการควบคุมความชื้นให้ทั่วถึงและสม่ำเสมอตลอดทั้งชุดการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบการทดลอง เช่นการเติมน้ำกระทำได้ที่จุดเก็บตัวอย่างอากาศและจุดวัดค่าพารามิเตอร์ทั่วไป ทำให้น้ำที่เติมไม่ทั่วถึงหรืออาจมากจนเกินไปในบริเวณที่เติม โดยค่าความชื้นในชุดการทดลองจะแตกต่างกัน เช่นในตัวกลางประเภทดินสีดาบริเวณส่วนล่างของชุดการทดลองจะมีความชื้นสูง ส่วนด้านบนจะมีความชื้นต่ำ เนื่องจากด้านบนสัมผัสกับอากาศทำให้สูญเสียความชื้นได้ง่าย ตัวกลางประเภทขี้กบบริเวณส่วนล่างของชุดการทดลองจะสูญเสียความชื้นง่ายกว่าตัวกลางประเภทอื่นเป็นผลมาจากอากาศเสียที่เข้าระบบทำให้ขี้กบแห้ง ส่วนตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและดินใบก้ามปูสามารถรักษาความชื้นได้ดี

อุณหภูมิของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทตลอดช่วงการทดลองอยู่ระหว่าง 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิห้องทดลอง โดยถือว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกรองชีวภาพ

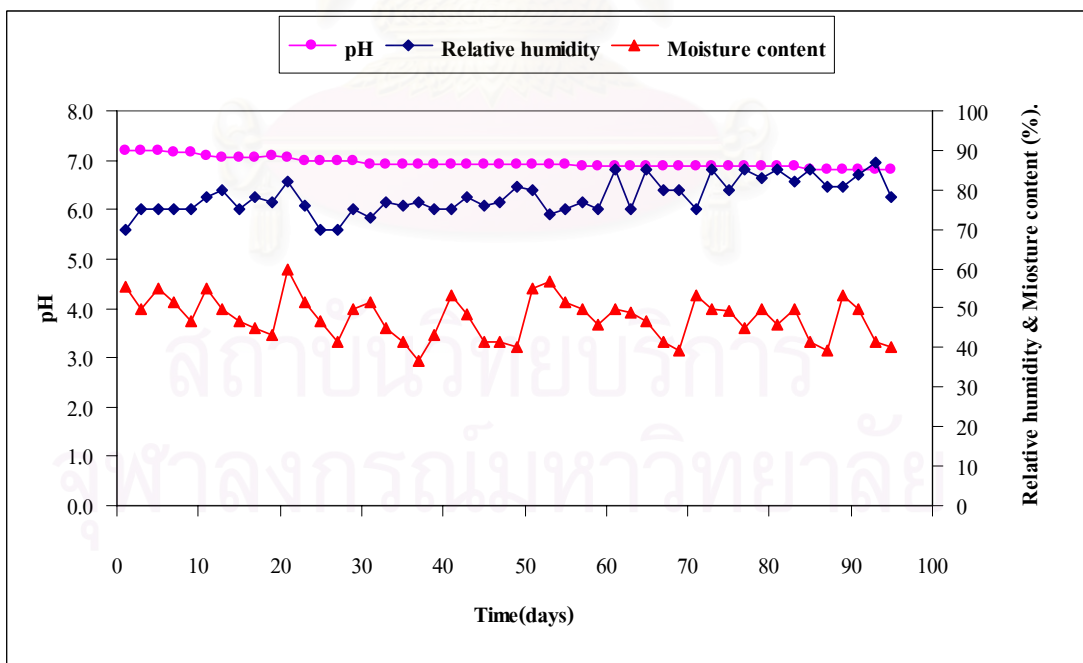


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบและพีเอช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู

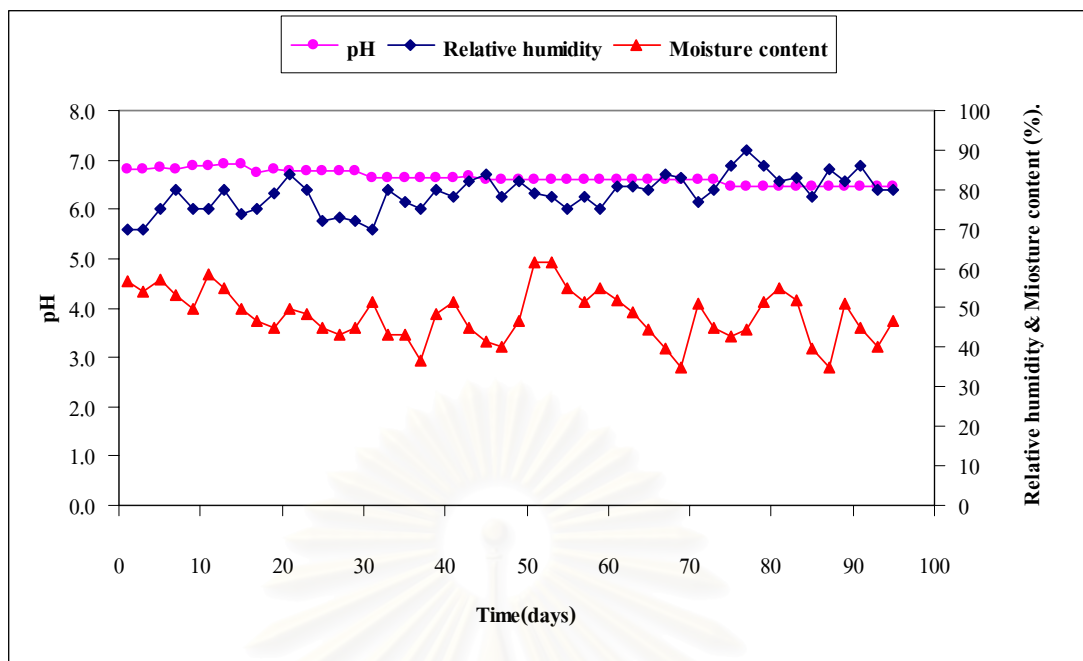




รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระบบและ  
ฟิโอส ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทดินสีดำ



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระบบและ  
ฟิโอส ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก



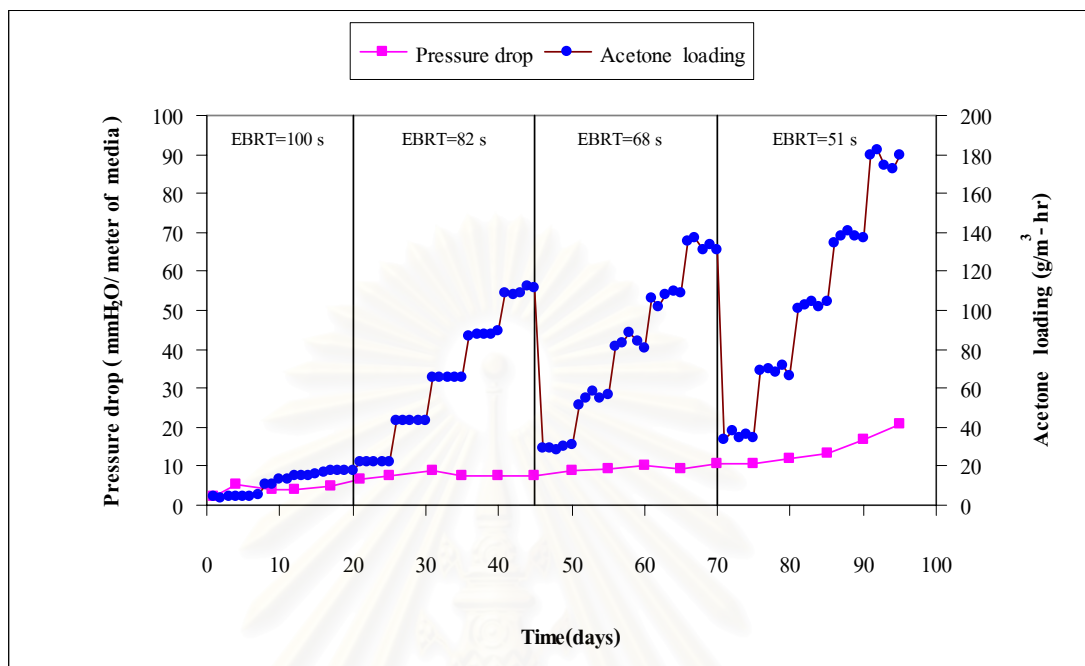
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นตัวกลาง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบและพืช ในช่วงระยะเวลาเดินระบบของตัวกลางประเภทขี้กบ

#### 4.9 ความดันลด

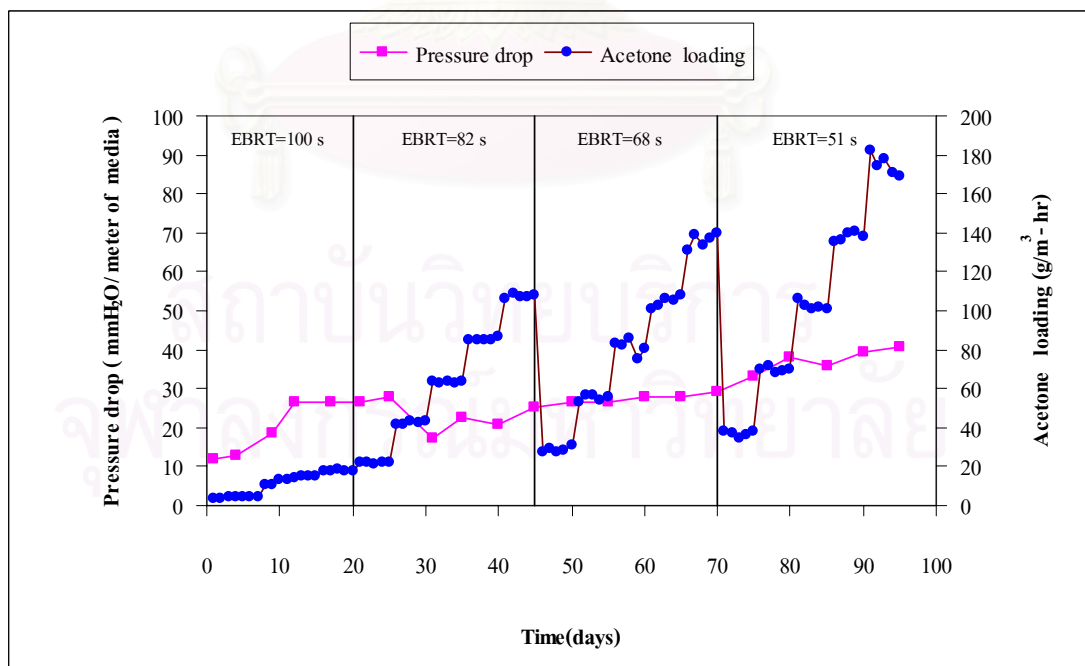
ค่าความดันลดเป็นพารามิเตอร์ชี้วัดการสูญเสียความดันอากาศที่เข้าระบบ ระบบที่มีค่าความดันลดสูงทำให้ปั๊มอากาศทำงานหนักขึ้น เพื่อให้รักษาอัตราไหลอากาศที่ต้องการกำจัดให้คงที่ ทำให้ต้องเสียดำเนินการเดินเครื่องปั๊มดูดอากาศและอาจทำให้ระบบล้มเหลวในที่สุด ดังนั้น จึงไม่ควรเลือกใช้ตัวกลางที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดันอากาศสูงหากจำเป็นต้องใช้อาจทำการปรับปรุงคุณสมบัติ โดยการเติมวัสดุเพิ่มความพรุน เช่น เศษไม้ เป็นต้น

รูปที่ 4.52-4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด ค่าการระบรทุกอะซิโตน และค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท พบว่า เมื่อเพิ่มการระบรทุกอะซิโตน ค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการอัดตัวของตัวกลางและการอุดตันของจุลินทรีย์ ค่าความดันลดที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง รูปที่ 4.56 แสดงค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท เมื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท พบว่า ตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ดินสิดา และปุ๋ยหมัก มีค่าความดันลด 21, 40 และ 13 มิลลิเมตรของน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ตัวกลางประเภทขี้กบ มีค่าน้อยที่สุดคือ 7 มิลลิเมตรของน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตรหลังเดินระบบประมาณ 100 วันซึ่งเป็นผลดีต่อค่าดำเนินการของระบบ โดยค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเดินระบบ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุตัวกลางต้องพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานและค่าความดันลดควบคู่กันไป ค่าความดันลดของเครื่องกรอง

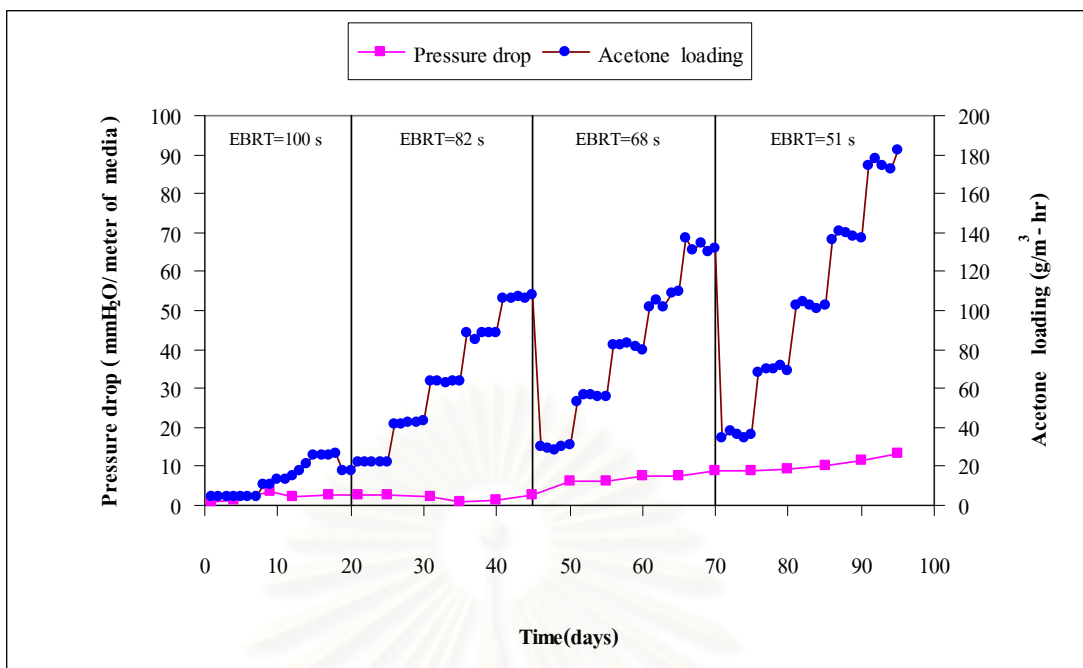
ชีวภาพที่เหมาะสม ไม่ควรเกิน 100 มิลลิเมตรน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร (Devanny และคณะ, 1999) สรุปว่าตัวกลางทั้ง 4 ประเภทอยู่ในสภาพใช้งานได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการสูญเสียความดัน



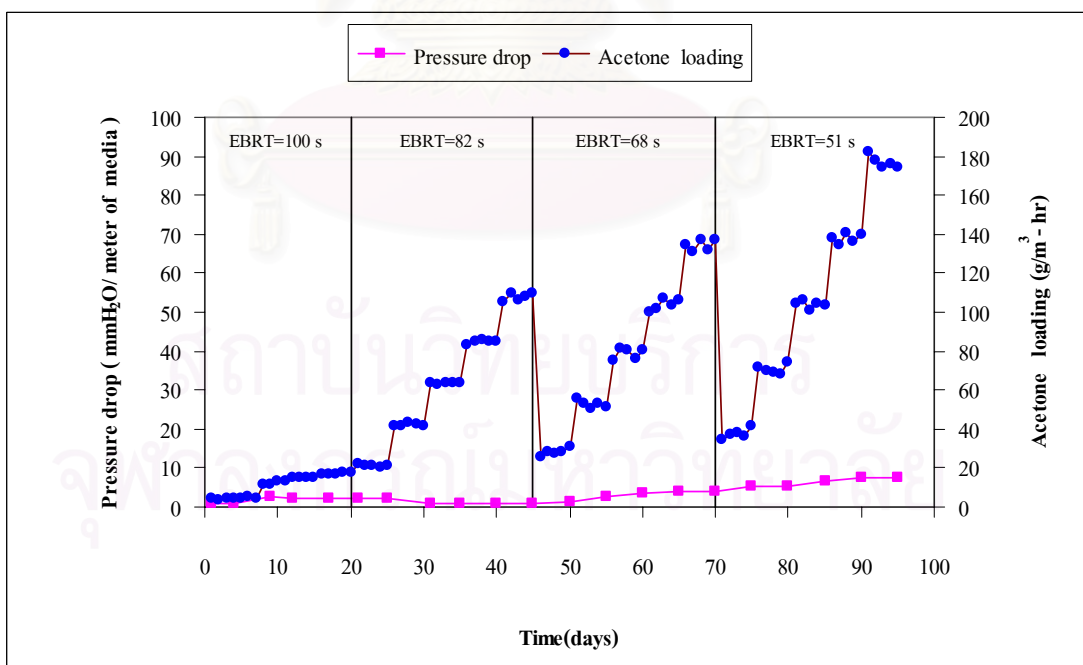
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าความดันลดของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู



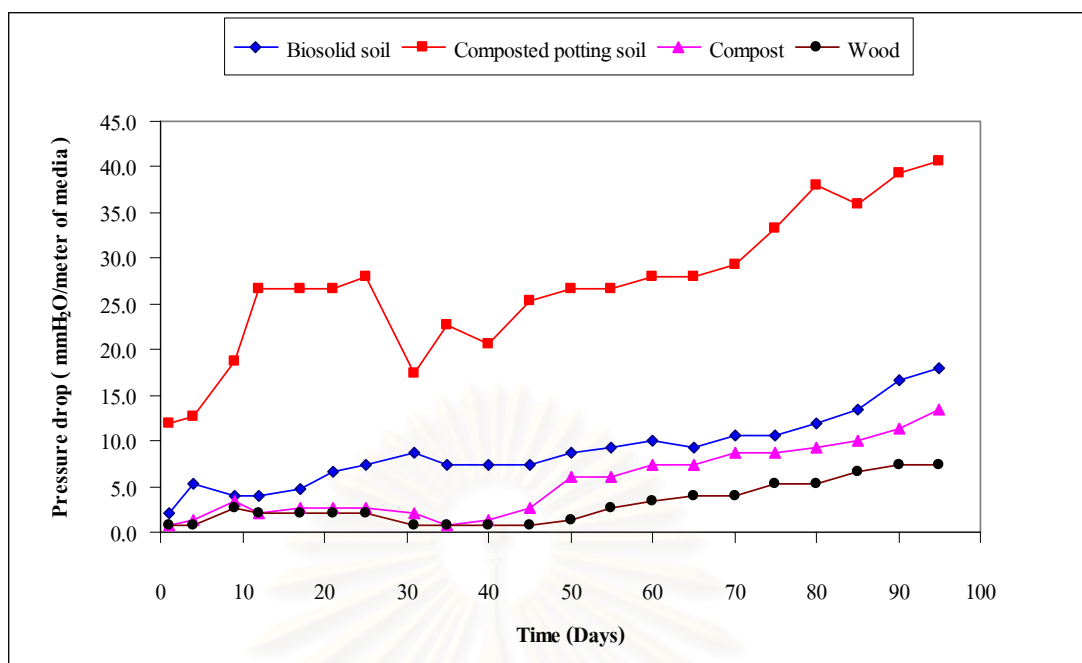
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าความดันลดของตัวกลางประเภท ดินสีดา



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าความดันลดของตัวกลางประเภท  
ปุยหมัก



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและค่าความดันลดของตัวกลางประเภท  
ซีกบ



รูปที่ 4.56 เปรียบเทียบค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

#### 4.10 การทรุดตัวของตัวกลาง

การทรุดตัวทำให้ปริมาตรของตัวกลางลดลง ส่งผลให้เวลากักพิกลดลงและทำให้ค่าความดันลดเพิ่มขึ้น ผลการทดลอง พบว่า หลังจากเดินระบบประมาณ 100 วัน ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ มีการทรุดตัว เท่ากับ 3.5, 5, 2.5 และ 4 ซม. ตามลำดับ คิดเป็น 2.33, 3.33, 1.66 และ 2.66 % ตามลำดับ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับความสูงตัวกลางเริ่มต้น สรุปว่า ในช่วงเวลาการทดลองตัวกลางทั้ง 4 ประเภทมีการทรุดตัวน้อยมาก

#### 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท

ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท ดังตารางที่ 4.10 เมื่อบำบัดไออะซิโตนในช่วง 200-1,000 สนล. โดยแปรผันอัตราไหลอากาศที่ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาที โดยเป้าหมายของระบบควรมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 % ดังนั้นระยะเวลา กักพิกลที่เหมาะสม คือ ระยะเวลา กักพิกลที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด 90 % พบว่า ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู และดินสีดา มีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน แต่ดินสีดาทำให้เกิดการสูญเสียความดันอากาศที่สูงกว่า โดยตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท เนื่องจากใช้เวลากักพิกลเพียง 68 วินาที ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 120 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ค่าภาระบรรจุทุกวิกฤติ เท่ากับ 83 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. และค่าความดันลดเพียง 13 มิลลิเมตรน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร เมื่อเดินระบบไปประมาณ 100 วัน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความดันลดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ และ

มีผลกระทบกับประสิทธิภาพการบำบัดต่อไป เนื่องจากหากการแพร่กระจายของอากาศไม่ทั่วถึงทำให้โอกาสการสัมผัสระหว่างมลพิษกับฟิล์มชีวภาพลดน้อยลง

สรุปว่า ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นตัวกลางผสม โดยมีปัจจัยส่งเสริมมาจากคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าตัวกลาง 3 ประเภทที่ใช้ทดลอง โดยปุ๋ยหมักมีปริมาณ N, P และ K ที่สูงกว่า อีกทั้งปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่ก่อนในปุ๋ยหมักก็มีในปริมาณที่สูงและหลากหลายสายพันธุ์ อันเนื่องมาจากปุ๋ยหมักที่ใช้ทดลองทำการหมักนานกว่า 6 เดือน ซึ่งทำให้ปุ๋ยหมักมีความเสถียรจึงทำให้ปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท  
(เวลากักพักที่ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 %)

ประเภทตัวกลาง	เวลากักพัก (วินาที)	ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุด (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	ค่าภาระบรรทุกวิกฤติ (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	ค่าความดันลด (มม.น้ำต่อความสูง ตัวกลาง 1 เมตร)
ดินใบก้ามปู	82	97	60	21
ดินสีดา	82	90	63	40
ปุ๋ยหมัก	68	120	83	13
ซีกบ	82	83	45	7

#### 4.12 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา

พารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ การทำงานของเครื่องกรองชีวภาพที่ออกแบบการวิจัยที่ต่างกัน เช่น ช่วงความเข้มข้น อัตราไหล่อากาศ ระยะเวลาพัก ปริมาตรตัวกลาง เป็นต้น คือ ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดและค่าภาระบรรทุกวิกฤติ จึงรวบรวมผลการวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ตามตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าภาระบรรทุกวิกฤติและค่าความสามารถในการกำจัดอะซิโตน

ประเภทตัวกลาง	ภาระบรรทุกวิกฤติ (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	ความสามารถในการ กำจัดสูงสุด (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	อ้างอิง
ดินใบก้ามปู	60	97	ผลการวิจัยนี้
ดินสีดา	63	90	ผลการวิจัยนี้
ปุ๋ยหมัก	83	120	ผลการวิจัยนี้
ซีกบ	45	83	ผลการวิจัยนี้
Compost-based	N/A	164	Ottengraf, 1987 อ้างถึงใน Devinny และคณะ, 1999

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าการบรรเทาพิษทุกวิถีและค่าความสามารถในการกำจัดอะซิโตน

ประเภทตัวกลาง	การบรรเทาพิษทุกวิถี (กรัมต่อลบ.ม.-ชม)	ความสามารถใน การกำจัดสูงสุด (กรัมต่อลบ.ม.-ชม)	อ้างอิง
Mixture of compost and polystyrene beads	N/A	100 - 150	ClairTech, 1991 อ้างถึงใน Deshusses และ Johnson, 2000
Mixture of compost and polystyrene beads	N/A	40 - 45	Dharmavaram และคณะ, 1993 อ้างถึงใน Deshusses และ Johnson, 2000
Compost-based	229	229	Briggs, 1996 อ้างถึงใน Devinny และคณะ, 1999
Compost-based	20-25	67	Johnson และ Deshusses, 1997 อ้างถึงใน Devinny และคณะ, 1999
Mixture of compost and porous clay particles	N/A	82	Tang และคณะ, 1997
Mixture of compost and polystyrene beads	120	N/A	Gilmore และ Briggs, 1997 อ้างถึงใน Deshusses และ Johnson, 2000
Mixture of mushroom compost and wood chips	21-23	65-70	Deshusses และ Johnson, 2000

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การทำงานเครื่องกรองชีวภาพควรเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางประเภทเดียวกัน ดังนั้น ปุ๋ยหมักจึงใกล้เคียงที่สุดที่จะนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า ผลการวิจัยค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดในการกำจัดอะซิโตนที่ได้จากการวิจัยมีค่า 120 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ซึ่งอยู่ในช่วงผลการศึกษาที่ผ่านมา คือ 40-229 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. และค่าการบรรเทาพิษทุกวิถีที่ได้จากการวิจัยมีค่า 83 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ซึ่งอยู่ในช่วงผลการศึกษาที่ผ่านมา คือ 20-120 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. เหตุผลที่มีค่าต่างกันเนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น อุณหภูมิในช่วงขณะการวิจัย การควบคุมสภาวะแวดล้อมขณะเดินระบบ เช่น ความชื้น พีเอช วัสดุตัวกลาง ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการวิจัยทำมาจากเศษอ้อยซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งทางด้านกายภาพและส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการบำบัดไออะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพในครั้งนี้ สามารถสรุปการวิจัย และมีข้อเสนอแนะในการศึกษาและวิจัยต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไออะซิโตน เพื่อศึกษาประเภทของตัวกลางที่เหมาะสม โดยตัวกลางที่ใช้ศึกษาทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และ จีบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นอะซิโตน อัตราไหล่อากาศ ระยะเวลาพัก เพื่อเป็นเกณฑ์การออกแบบเครื่องกรองชีวภาพเบื้องต้น โดยสรุปสภาวะการทำงานและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลอง

พารามิเตอร์	ดินใบก้ามปู	ดินสีดา	ปุ๋ยหมัก	จีบ
อุณหภูมิ (°C)	25-35	25-35	25-35	25-35
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	80-85	80-85	80-85	80-85
พีเอช	6-8	6-7	6-8	6-7
ความเข้มข้นอะซิโตน (สนล.)	200-1,000	200-1,000	200-1,000	200-1,000
ภาระบรรจุ (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	4-182	4-182	4-182	4-182
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	49-100	38-100	66-100	41-100
ระยะเวลาพักที่ประสิทธิภาพการบำบัด 90% (วินาที)	82	82	68	82
ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	97	90	120	83
ค่าภาระบรรจุวิกฤติ (กรัมต่อลบ.ม.-ชม.)	60	63	83	45
ค่าความดันลดที่ 100 วัน (มม.น้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 ม.)	21	40	13	7
การทรุดตัวของตัวกลาง (%)	2.33	3.33	1.66	2.66



การวิจัยนี้ออกแบบให้แปรผันความเข้มข้นอะซิโตนในช่วง 200-1,000 สนล. และอัตราไหลอากาศ 2.5, 3.0 และ 4.0 ลิตรต่อนาทีซึ่งเท่ากับเวลากักพัก 82, 68 และ 51 วินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวกลางทั้ง 4 ประเภทได้แก่ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และขี้กบ พบว่า

1) ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวกลางผสมสำหรับเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดไออะซิโตน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพ อันได้แก่ ความพรุน ปริมาณธาตุอาหาร N, P และ K ที่เหมาะสม ส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพการบำบัดสูง ค่าความสามารถในการกำจัดสูงและมีการสูญเสียความดันต่ำ

2) สำหรับตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ที่ความเข้มข้นอะซิโตน 1,000 สนล. การลดระยะเวลา กักพักจาก 68 วินาที เป็น 51 วินาที มีผลทำให้เครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง จาก 92 % เหลือเพียง 66 % สรุปได้ว่า การลดเวลากักพักทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

3) สำหรับตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ที่เวลากักพัก 68 วินาที ความเข้มข้นไออะซิโตนที่ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 สนล. มีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 100, 100, 100, 94 และ 92 % ตามลำดับ สรุปได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นอะซิโตนทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเช่นกัน

4) หากต้องการให้เครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90 % จะต้องใช้ระยะเวลา กักพัก 68 วินาทีสำหรับตัวกลางหลักประเภท ปุ๋ยหมัก ในขณะที่ ตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู ดินสีดา และขี้กบ ต้องใช้ระยะเวลา กักพัก 82 วินาที

5) ตัวกลางหลักประเภท ปุ๋ยหมัก ดินใบก้ามปู ดินสีดา และขี้กบ มีค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 120, 97, 90 และ 83 กรัมต่อลบ.ม.-ชม.ตามลำดับ และมีค่าการะบรทุกวิกฤติ เท่ากับ 83, 60, 63 และ 45 กรัมต่อลบ.ม.-ชม. ตามลำดับ

6) มวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลอะซิโตนที่ถูกกำจัดของตัวกลางทั้ง 4 ประเภท มีค่าประมาณ 1.6 และจากสมดุลคาร์บอนพบค่า Recovery ประมาณ 75 % โดยมวลของคาร์บอนในการทดลองที่หายไปนั้นคาดว่าบางส่วนถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ และอยู่ในรูปของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในฟิล์มชีวภาพ สิ่งนี้บ่งบอกว่า การกำจัดไออะซิโตนโดยเครื่องกรองชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

7) ค่าความดันลดของตัวกลางหลักประเภทขี้กบ ปุ๋ยหมัก ดินใบก้ามปู และดินสีดา มีค่าเท่ากับ 7, 13, 21 และ 40 มิลลิเมตรน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ หลังจากเดินระบบ ประมาณ 100 วัน

## 5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรม

- 1) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ในการใช้บำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในภาคอุตสาหกรรมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
- 2) สามารถนำผลการวิจัยที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นการออกแบบหรือพัฒนาการวิจัยระบบเครื่องกรองชีวภาพต่อไป

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางผสมเช่น ขนาดอนุภาค ความพรุน เป็นต้นหรือค้นคว้าวัสดุตัวกลางผสมใหม่เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า
- 2) ออกแบบและวางแผนการควบคุมรักษาระดับความชื้นที่เหมาะสม เช่น อัตราการเติมน้ำ ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่ชัดเจน
- 3) ทำการศึกษาในระบบเครื่องกรองชีวภาพในระดับ Pilot scale และ ใช้ระยะเวลาที่นานพอสมควรเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลต่างๆ เช่น ค่าความดันลดที่สูงจนทำให้ระบบเสียหายหรือไม่คุ้มค่าดำเนินการระบบ ตลอดจนศึกษาการแก้ปัญหาการอุดตันของตัวกลาง
- 4) ศึกษาการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแบบผสมหลายชนิดเพื่อให้สอดคล้องกับอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งปล่อยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายหลายชนิด เนื่องจาก ระบบเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ผสมหลายชนิดจะเกิดการยับยั้งการกำจัดซึ่งกันและกัน
- 5) กรณีออกแบบระบบปิด อาจทำการศึกษาการเปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าของอากาศ โดยสลับการไหลขึ้นและไหลลง ซึ่งคาดว่าจะช่วยแก้ไขการอุดตันของจุลินทรีย์ในส่วนล่างของเครื่องชีวภาพ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

เจตนา จิรวัชรเดช. ประสิทธิภาพการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนโดยใช้ระบบบำบัดด้วยดิน (อีเอ พีเอส). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ควบคุมมลพิษ, กรม. โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ). กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ, 2544.

สุโรชา พูลสวัสดิ์. การกำจัดไอของโซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม(สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

เสริมศักดิ์ ทั้งมั่งมี. ประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอินโดยเครื่องกรองชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

ศุลกากร, กรม. สถิติการนำเข้า – ส่งออก[Online]. 2544-2547. แหล่งที่มา:  
<http://www.customs.go.th> [2005, April 13]

เอกชัย เลิศผดุงวิทย์. การกำจัดโซลีนด้วยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

### ภาษาอังกฤษ

Adu, B., and Otten, L. Modeling the biofiltration characteristics of volatile compounds. Proceedings of the 89th annual meeting and exhibition of the air & waste management association. Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association, 1996. Cited in Delhomenie, M. -C., Bibeau, L., and Heitz, M. A study of the impact of particle size and adsorption phenomena in a compost-based biological filter. Chemical Engineering Science[Online].2002. Available from:  
<http://www.sciencedirect.com>[2004, June16]

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Acetone[Online]. 1995. Available from: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts21.html> [2004, June 16]

- Briggs, T. G. Biofiltration of air containing volatile organic chemicals from bath manufacturing operations. Reynolds, F. E., Ed., The Reynolds Group, Tustin, CA, 1996. Cited in Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. Biofiltration for Air Pollution Control. Lewis Publishers, 1999.
- Bohn, H., and Bohn, R. Soil Beds Weed out Air Pollutants. Chemical Engineering. 95(1988): 73-76.
- Cardenas-Gonzales, B., Ergas, S. J., and Switzenbaum, M. S. Characterization of compost biofiltration media. Journal of the Air & Waste Management Association 49(1999): 784-793.
- Chang, K., and Lu, C. Biofiltration of isopropyl alcohol and acetone mixtures by a trickle-bed air biofilter. Process Biochemistry[Online].2003. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2004, June 16]
- ClairTech, B. V. Biofilter pilot test for acetone emission reduction at Du Pont Howson in Soest (The Netherlands). Primary report ClairTech; Woudenberg, The Netherlands, 1991. Cited in Deshusses, M. A., and Johnson, C. T. Development and Validation of a Simple Protocol To Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOC Treatment. Environ. Sci. Technol. 34(2000): 461-467.
- Den, W., Huang, C., and Li, C. -H. Biotrickling filtration for control of volatile organic compounds from microelectronics industry. Journal of Environmental Engineering 129(2003): 610-619.
- Den, W. Evaluating gas phase biofilter performance in treating chlorinated VOCs from industrial emissions: Principles, modeling and design. PhD thesis, Dept. of Civil Engineer, Univ. of Southern California, Los Angeles., 2001. Cited in Den, W., Huang, C., and Li, C. -H. Biotrickling filtration for control of volatile organic compounds from microelectronics industry. Journal of Environmental Engineering. 129(2003): 610-619.
- Delhomenie, M. -C., Bibeau, L., Bredin, N., Roy, S., Broussau, S., Brzezinski, R., Kugelmass, J. L., and Heitz, M. Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost - based bed. Advances in Environmental Research. [Online].2002. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2005, April 13]
- Delhomenie, M. -C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R., and Heitz, M. A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors. Chemical Engineering Science[Online].2003. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2005, April 13]

- Delhomenie, M. -C., Bibeau, L., and Heitz, M. A study of the impact of particle size and adsorption phenomena in a compost-based biological filter. Chemical Engineering Science[Online].2002. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2004, June16]
- Deshusses, M. A., and Johnson, C. T. Development and Validation of a Simple Protocol To Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOC Treatment. Environ. Sci. Technol. 34(2000): 461-467.
- Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. Biofiltration for Air Pollution Control. Lewis Publishers, 1999.
- Dharmavaram, S., Casey, J., Timmermans, T., and Lith, C. In Proceedings of the 86th Annual Meeting and Exhibition Air & Waste Management Association, Paper 93-WP-52C.01; Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, 1993. Cited in Deshusses, M. A., and Johnson, C. T. Development and Validation of a Simple Protocol To Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOC Treatment. Environ. Sci. Technol. 34(2000): 461-467.
- Elmrini, H., Bredin, N., Shareefdeen, Z., and Heitz, M. Biofiltration of xylene emission : bioreactor response to variations in the pollutant inlet concentration and gas flow rate. Chemical Engineering Journal.[Online].2004. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2005, April 13]
- Gilmore, G. L., and Briggs, T. G. In Proceedings of the 90th Annual Meeting and Exhibition Air & Waste Management Association, Paper 97-RA71C.02; Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, 1997. Cited in Deshusses, M. A., and Johnson, C. T. Development and Validation of a Simple Protocol To Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOC Treatment. Environ. Sci. Technol. 34(2000): 461-467.
- Gostomski, P. A., Sisson, J. B., and Cherry, R. S. Water Content Dynamics in Biofiltration : The Role of Humidity and Microbial Heat Generation. Journal of the Air & Waste Management Association 47(1997): 936-944.
- Hodge, S. D., and Devinny, S. J. Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration. Journal of Environmental Engineering 121(1995): 21-32.
- Hunter, P., and Oyama, S. T. Control of Volatile Organic Compound Emissions. USA: John Wiley & Sons, 2000.

- Hwang, S. -J., Tang, H. -M., and Wang, W. -C. Modeling of acetone biofiltration process. Environmental Progress 16(1997): 187-192.
- Johnson, C. T., and Deshusses, M. A. Quantitative Structure-activity relationships for VOC biodegradation in biofilters. Battelle Press, 1997. cited in Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. Biofiltration for Air Pollution Control. Lewis Publishers, 1999.
- Jorio, H., Bibeau, L., Viel, G., and Heitz, M. Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance. Chemical Engineering Journal[Online].2000. Available from: <http://www.sciencedirect.com>[2004, June 16]
- Leson, G., and Winer, A. M. Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions. Journal of the Air & Waste Management Association 41(1991): 1045-1054.
- Lith, C. V., Leson, G., and Michelsen, R. Evaluation Design Option for Biofilters. Journal of the Air & Waste Management Association. 47(1997): 37-48.
- Nevers, N. D. Air Pollution Control Engineering. 2 nd ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000.
- Ottengraf, S. P. P. Biological Systems for Waste Gas Elimination. Elsevier Science, Amsterdam, 1987. Cited in Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. Biofiltration for Air Pollution Control. Lewis Publishers, 1999.
- Rafson, H. J. Odor and VOC Control Handbook. New York: McGraw-Hill, 1998.
- Tang, H. -M., Hwang, S. -J., and Wang, W. -C. Degradation of acetone in a biofilter. Environmental Engineering Science 14(1997): 219-226.
- U.S. Environmental Protection Agency. Acetone[Online]. 2004. Available from: <http://www.epa.gov>[2004, June 16]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

ประเภทตัวกลาง	นน.กระบอกตวง 100 ml(กรัม)	นน.กระบอกตวง + นน.ตัวกลาง (กรัม)	นน.กระบอกตวง + นน.ตัวกลาง + น้ำ(กรัม)	ความหนาแน่น กรัมต่อลบ.ซม.	ความพรุน %	pH
ดินใบก้ามปู						
1	36.58	82.84	139.87	0.463	57.03	7
2	36.58	83.34	137.81	0.468	54.47	7
3	36.58	83.52	138.29	0.469	54.77	7
<b>ค่าเฉลี่ย</b>				<b>0.467</b>	<b>55.42</b>	<b>7.00</b>
<b>SD</b>				<b>0.004</b>	<b>1.40</b>	<b>0.00</b>
ดินสีดา						
1	36.58	84.25	142.53	0.477	58.28	7.5
2	36.58	85.02	141.67	0.484	56.65	7.4
3	36.58	88.97	143.69	0.524	54.72	7
<b>ค่าเฉลี่ย</b>				<b>0.495</b>	<b>56.55</b>	<b>7.30</b>
<b>SD</b>				<b>0.025</b>	<b>1.78</b>	<b>0.26</b>

## ก.1(ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

ประเภทตัวอย่าง	นน.กระบอกตวง 100 ml (กรัม)	นน.กระบอกตวง + นน.ตัวอย่าง(กรัม)	นน.กระบอกตวง + นน.ตัวอย่าง + น้ำ(กรัม)	ความหนาแน่น กรัมต่อลบ.ซม.	ความพรุน %	pH
ปูยหมัก						
1	36.57	106.72	144.25	0.702	37.53	6.7
2	36.58	104.57	146.55	0.680	41.98	6.9
3	36.58	108.73	147.2	0.722	38.47	6.8
<b>ค่าเฉลี่ย</b>				<b>0.701</b>	<b>39.33</b>	<b>6.80</b>
<b>SD</b>				<b>0.021</b>	<b>2.35</b>	<b>0.10</b>
ซีกบ						
1	36.58	47.97	132.77	0.114	84.80	-
2	36.58	49.13	135.65	0.126	86.52	-
3	36.57	45.97	133.75	0.094	87.78	-
<b>ค่าเฉลี่ย</b>				<b>0.111</b>	<b>86.37</b>	-
<b>SD</b>				<b>0.016</b>	<b>1.50</b>	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ก1(ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุน

ประเภทตัวกลาง		น้ำหนักกระบอกตวง 100 ml (กรัม)	น้ำหนักกระบอกตวง +น้ำหนักตัวกลาง (กรัม)	น้ำหนักกระบอกตวง +น้ำหนักตัวกลาง+น้ำ (กรัม)	ความหนาแน่น กรัมต่อลบ.ซม.	ความพรุน %
เศษไม้	1	35.5	45.47	138.01	0.100	92.54
	2	37.24	46.32	138.23	0.091	91.91
	3	37.16	48.23	140.01	0.111	91.78
ค่าเฉลี่ย					<b>0.100</b>	<b>92.08</b>
SD					<b>0.010</b>	<b>0.41</b>
ปื๋ยคอก	1	36.88	53.31	125.12	0.164	71.81
	2	36.91	55.00	124.95	0.181	69.95
	3	37.27	55.33	123.62	0.181	68.29
ค่าเฉลี่ย					<b>0.175</b>	<b>70.02</b>
SD					<b>0.009</b>	<b>1.76</b>
ตะกอนจุลินทรีย์	1	36.58	131.31	152.31	0.947	21.00
	2	36.87	130.43	151.86	0.936	21.43
	3	36.93	129.87	150.95	0.929	21.08
ค่าเฉลี่ย					<b>0.937</b>	<b>21.17</b>
SD					<b>0.009</b>	<b>0.23</b>

ก.2 ผลการทดสอบขนาดคละของตัวกลางประเภท ดินใบก้ามปู

เบอร์ ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	นน. ตะแกรง	นน.ค้ำ ตะแกรง	นน.ดินที่ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำสะสม	เปอร์เซ็นต์ ผ่านสะสม
	มม.	กรัม	กรัม	กรัม			
3/8"	9.51	549.7	608.9	59.2	19.67	19.67	80.33
# 4	4.76	590.5	651.3	60.8	20.20	39.87	60.13
# 8	2.38	434.9	497.8	62.9	20.90	60.76	39.24
# 16	1.19	398.6	447.7	49.1	16.31	77.08	22.92
# 30	0.595	360.8	391.4	30.6	10.17	87.24	12.76
# 50	0.297	333.1	351.9	18.8	6.25	93.49	6.51
# 100	0.149	320.5	330.3	9.8	3.26	96.74	3.26
PAN		281.3	291.1	9.8	3.26	100.00	0.00
				301.0	100.00		

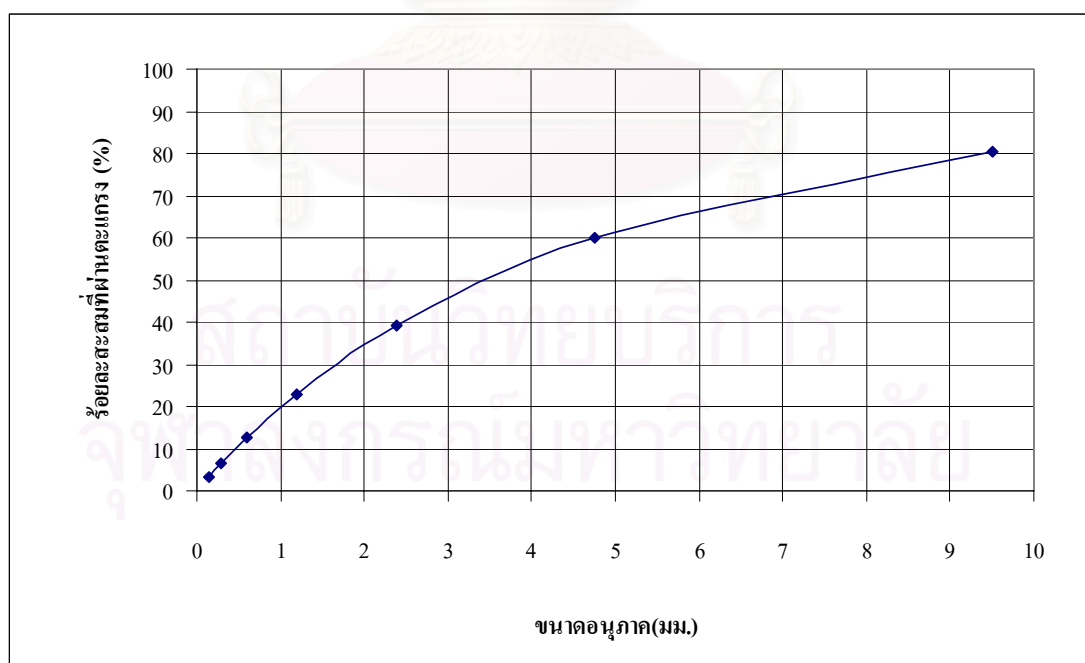
ก.2(ต่อ) ผลการทดสอบขนาดคละของตัวกลางประเภท ดินสีดา

เบอร์ ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	นน. ตะแกรง	นน.ค้ำ ตะแกรง	นน.ดินที่ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำสะสม	เปอร์เซ็นต์ ผ่านสะสม
	มม.	กรัม	กรัม	กรัม			
3/8"	9.51	549.6	550.1	0.5	0.15	0.15	99.85
# 4	4.76	591	621.7	30.7	9.40	9.55	90.45
# 8	2.38	435	509.1	74.1	22.68	32.23	67.77
# 16	1.19	398.5	456.8	58.3	17.85	50.08	49.92
# 30	0.595	360.5	401.2	40.7	12.46	62.53	37.47
# 50	0.297	332.4	383.7	51.3	15.70	78.24	21.76
# 100	0.149	316.9	358.1	41.2	12.61	90.85	9.15
PAN		281.3	311.2	29.9	9.15	100.00	0.00
				326.7	100.00		

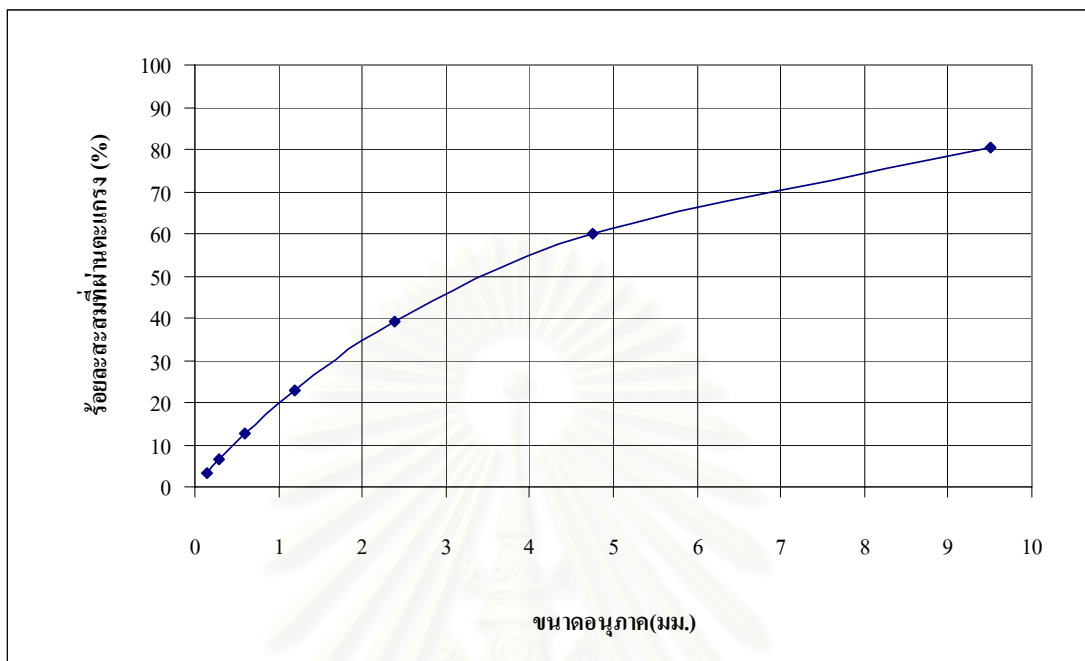
ก.2(ต่อ) ผลการทดสอบขนาดคละของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก

เบอร์ ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	นน. ตะแกรง	นน.ค้ำ ตะแกรง	นน.คืนที่ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำ	เปอร์เซ็นต์ ค้ำสะสม	เปอร์เซ็นต์ ผ่านสะสม
	มม.	กรัม	กรัม	กรัม			
3/8"	9.51	549.6	569.1	19.5	5.37	5.37	94.63
# 4	4.76	590.9	662.8	71.9	19.79	25.16	74.84
# 8	2.38	435	514.3	79.3	21.83	46.99	53.01
# 16	1.19	398.5	454.9	56.4	15.52	62.51	37.49
# 30	0.595	360.5	404	43.5	11.97	74.48	25.52
# 50	0.297	332.2	379.8	47.6	13.10	87.59	12.41
# 100	0.149	316.6	347.6	31	8.53	96.12	3.88
PAN		281.2	295.3	14.1	3.88	100.00	0.00
				363.3	100.00		

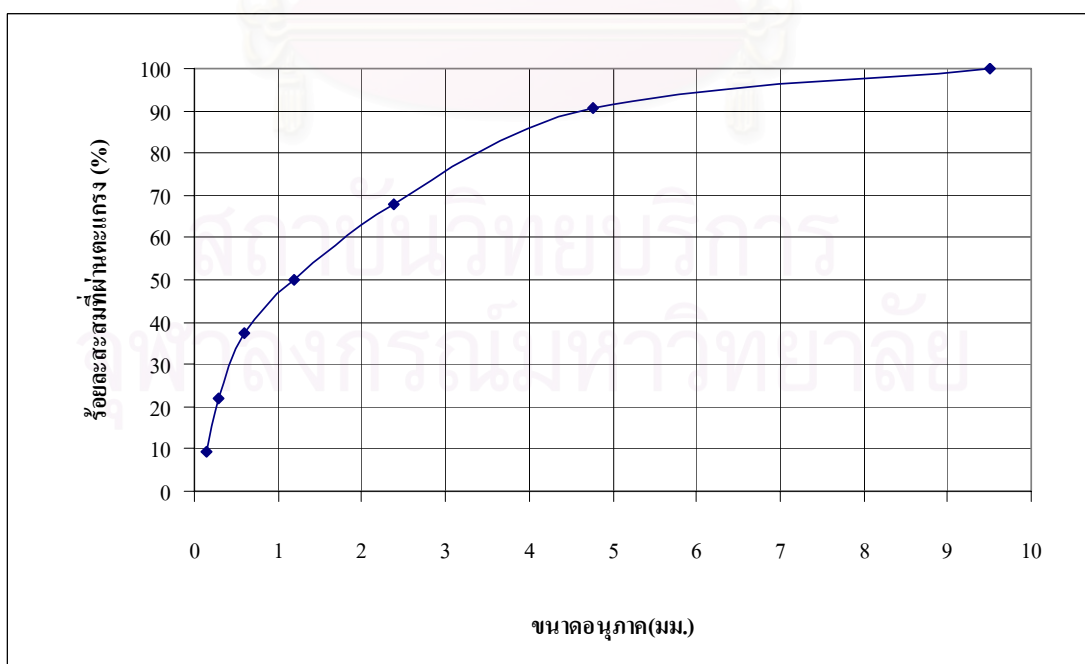
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงและขนาดอนุภาค ของตัวกลางประเภท  
ดินใบก้ามปู



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่ผ่านตะแกรงและขนาดอนุภาค ของตัวกลางประเภท ดินสีดา



ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่ผ่านตะแกรงและขนาดอนุภาค ของตัวกลางประเภท ปุ๋ยหมัก



ก.6 ปริมาณความชื้นและอินทรีย์วัตถุก่อนเดินระบบ

ประเภทตัวกลาง		น้ำหนักถั่ว	นน.ถั่ว+ดิน	นน.ถั่ว+ ดินแห้ง	นน.ถั่ว+ ดินแห้ง	นน.ถั่ว + ถั่ว	%ความชื้น	%ที่ถั่ว	%อินทรีย์วัตถุ
ดินใบก้ามปู	1	83.5831	134.1272	115.5867	91.4871	88.3262	13.82	96.54	3.46
	2	72.8712	130.1711	108.9065	81.4462	78.0207	16.34	95.79	4.21
	3	71.9108	127.2008	106.7782	77.1319	75.337	16.06	97.67	2.33
	เฉลี่ย						15.40		3.33
	SD						1.38		0.95
ดินสีดำ	1	78.8764	128.8649	114.3376	86.4741	85.3689	11.27	98.72	1.28
	2	72.0142	123.3545	108.7627	78.751	77.8206	11.83	98.82	1.18
	3	78.6312	127.3324	113.3398	86.4893	85.4703	10.99	98.82	1.18
	เฉลี่ย						11.36		1.21
	SD						0.43		0.06

ก.6(ต่อ) ปริมาณความชื้นและอินทรีย์วัตถุก่อนเดินระบบ

ประเภทตัวกลาง		น้ำหนักถั่ว	นน.ถั่ว + ดิน	นน.ถั่ว + ดินแห้ง	นน.ถั่ว+ดินแห้ง	นน.ถั่ว+ถั่ว	%ความชื้น	%ที่ถั่ว	%อินทรีย์วัตถุ
ปุ๋ยหมัก	1	79.4201	131.5573	105.3289	85.4718	82.8768	19.94	96.96	3.04
	2	67.1074	135.3502	101.3346	73.2891	70.7523	25.13	96.54	3.46
	3	78.1763	145.6711	112.1394	83.5382	81.3116	23.02	97.33	2.67
	เฉลี่ย						22.70		3.05
	SD						2.61		0.40
ขี้กบ	1	85.8809	99.5893	96.1728	96.1728	94.0755	3.43	97.82	2.18
	2	67.1178	78.4561	75.8971	75.8971	74.4679	3.26	98.12	1.88
	3	78.9015	89.1982	85.9523	85.9523	84.2164	3.64	97.98	2.02
	เฉลี่ย						3.44		2.03
	SD						0.19		0.15



ก.7 ปริมาณความชื้นและอินทรีย์วัตถุหลังเดินระบบ

ประเภทตัวกลาง		นน.ถั่ว	นน.ถั่ว + ดิน	นน.ถั่ว + ดินแห้ง	นน.ถั่ว + ขี้เถ้า	% ความชื้น	% ขี้เถ้า	% อินทรีย์วัตถุ
1.ดินใบ		กรัม	กรัม	กรัม	กรัม			
ก้ามปู	บน	67.1065	119.1541	83.7446	75.4123	29.72	90.05	9.95
		78.6291	128.1690	95.0908	87.1954	25.81	91.70	8.30
		64.5483	121.0940	83.1314	73.8948	31.35	88.89	11.11
	กลาง	67.9139	123.5228	87.5852	78.8664	29.09	90.05	9.95
		71.8753	118.3533	87.3106	80.0918	26.23	91.73	8.27
		72.8676	137.5602	94.2930	83.7589	31.45	88.83	11.17
	ล่าง	72.0056	130.7354	91.7355	82.0200	29.83	89.41	10.59
		78.1630	130.4221	96.2484	87.8259	26.20	91.25	8.75
		67.1388	119.1101	84.2996	75.8519	29.23	89.98	10.02
	ค่าเฉลี่ย					<b>28.77</b>		<b>9.79</b>
	SD					<b>2.18</b>		<b>1.12</b>
2.ดินสีดำ								
	บน	72.8300	131.2720	96.3660	90.1881	26.59	93.59	6.41
		70.8367	129.6480	94.6575	88.3455	26.99	93.33	6.67
		79.4191	139.0433	103.4644	96.6766	25.59	93.44	6.56
	กลาง	46.9501	100.2771	67.6813	61.8086	32.51	91.32	8.68
		78.8734	140.4357	104.0070	97.7528	25.94	93.99	6.01
		76.5852	137.9071	100.2926	93.2149	27.28	92.94	7.06
	ล่าง	83.5809	142.9182	107.0463	99.5904	25.10	93.03	6.97
		71.7380	137.6865	97.7296	90.0150	29.02	92.11	7.89
		48.9493	95.1418	66.9281	61.9554	29.65	92.57	7.43
	ค่าเฉลี่ย					<b>27.63</b>		<b>7.08</b>
	SD					<b>2.37</b>		<b>0.82</b>

ก.7(ต่อ) ปริมาณความชื้นและอินทรีย์วัตถุหลังเดินระบบ

ประเภทตัวกลาง		นน. ถ้วย	นน.ถ้วย +ดิน	นน.ถ้วย + ดินแห้ง	นน.ถ้วย + ไม้เถ้า	% ความชื้น	% ไม้เถ้า	% อินทรีย์วัตถุ
3.ปุ๋ยหมัก		กรัม	กรัม	กรัม	กรัม			
	บน	67.1054	135.0911	96.1817	84.1889	28.80	87.53	12.47
		78.6288	142.7882	105.1085	94.0886	26.39	89.52	10.48
		64.5471	137.3594	89.1361	77.3156	35.11	86.74	13.26
	กลาง	67.9124	133.3143	96.2120	84.6323	27.83	87.96	12.04
		71.8739	134.0720	94.8906	83.6760	29.22	88.18	11.82
		76.5836	137.1262	99.4992	88.3669	27.44	88.81	11.19
	ล่าง	83.5785	138.8674	105.6055	94.7129	23.95	89.69	10.31
		78.1621	133.4771	100.4029	89.7077	24.78	89.35	10.65
		67.1374	120.8712	89.5742	78.9557	25.89	88.15	11.85
	ค่าเฉลี่ย					<b>27.71</b>		<b>11.56</b>
	SD					<b>3.28</b>		<b>0.99</b>
4.จี้กบ								
	บน	72.8215	119.4316	83.2511	76.6773	30.29	92.10	7.90
		70.8288	119.1159	82.2248	74.4666	30.97	90.56	9.44
		79.4164	119.3081	88.4530	82.8873	25.86	93.71	6.29
	กลาง	46.9480	90.7700	56.9824	50.0246	37.22	87.79	12.21
		78.8688	127.8704	90.3522	82.2534	29.34	91.04	8.96
		72.8629	130.0262	85.9400	76.9210	33.91	89.51	10.49
	ล่าง	72.0038	123.6641	84.3952	75.5211	31.75	89.49	10.51
		71.7321	130.8355	85.3434	76.0652	34.77	89.13	10.87
		48.9461	95.9188	60.3152	52.4603	37.12	86.98	13.02
	ค่าเฉลี่ย					<b>32.36</b>		<b>9.97</b>
	SD					<b>3.75</b>		<b>2.09</b>



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout						Removal Efficiency						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.5
1	206	0.49	21.95	2.7	0	0	0	0	0	98.69	100	100	100	100	100	126.9	64.3	42.6	32.0	25.6	21.3
2	208	0.49	22.16	2.4	0	0	0	0	0	98.85	100	100	100	100	100	128.3	64.9	43.0	32.3	25.8	21.5
3	205	0.49	21.84	4.5	0	0	0	0	0	97.80	100	100	100	100	100	125.1	63.9	42.4	31.8	25.5	21.2
4	211	0.50	22.48	5.2	0	0	0	0	0	97.54	100	100	100	100	100	128.4	65.8	43.6	32.7	26.2	21.8
5	208	0.49	22.16	2.4	0	0	0	0	0	98.85	100	100	100	100	100	128.3	64.9	43.0	32.3	25.8	21.5
6	405	0.96	43.15	5.9	0	0	0	0	0	98.54	100	100	100	100	100	249.1	126.4	83.7	62.9	50.3	42.0
7	404	0.96	43.04	33.5	3.1	0	0	0	0	91.71	99.23	100	100	100	100	231.2	125.1	83.5	62.7	50.2	41.9
8	409	0.97	43.57	24.6	14.6	0	0	0	0	93.99	96.43	100	100	100	100	239.9	123.1	84.6	63.5	50.8	42.4
9	405	0.96	43.15	7.5	3.4	0	0	0	0	98.15	99.16	100	100	100	100	248.1	125.3	83.7	62.9	50.3	42.0
10	407	0.97	43.36	80.8	12.4	0	0	0	0	80.15	96.95	100	100	100	100	203.6	123.1	84.2	63.2	50.6	42.2
11	613	1.45	65.31	256	189	96.3	17.4	0	0	58.24	69.17	84.29	97.16	100	100	222.8	132.3	106.8	92.5	76.2	63.5
12	614	1.46	65.41	230	150	67.6	9.7	0	0	62.54	75.57	88.99	98.42	100	100	239.7	144.8	113.0	93.9	76.3	63.7
13	617	1.46	65.73	109	7.1	0	0	0	0	82.33	98.85	100	100	100	100	317.1	190.3	127.6	95.8	76.7	64.0
14	614	1.46	65.41	282	57.7	0	0	0	0	54.07	90.60	100	100	100	100	207.2	173.6	127.0	95.4	76.3	63.7
15	616	1.46	65.63	356	163	112	68.6	47.5	25.9	42.21	73.54	81.82	88.86	92.29	95.80	162.3	141.3	104.2	85.0	70.7	61.2

ข.1(ต่อ) ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	816	1.94	86.93	593	497	294	208	153	46.7	27.33	39.09	63.97	74.51	81.25	94.28	139.2	99.5	107.9	94.4	82.4	79.8
17	820	1.95	87.36	579	484	300	210	148	46	29.39	40.98	63.41	74.39	81.95	94.39	150.4	104.8	107.5	94.7	83.6	80.2
18	825	1.96	87.89	568	467	302	195	114	30.9	31.15	43.39	63.39	76.36	86.18	96.25	160.4	111.7	108.2	97.8	88.4	82.3
19	820	1.95	87.36	462	345	171	83.8	42.6	9	43.66	57.93	79.15	89.78	94.80	98.90	223.4	148.2	134.2	114.3	96.7	84.1
20	835	1.98	88.96	460	350	167	70.4	44.5	9.2	44.91	58.08	80.00	91.57	94.67	98.90	234.1	151.3	138.1	118.8	98.3	85.6
21	1020	2.42	108.67	685	546	447	362	285	146	32.84	46.47	56.18	64.51	72.06	85.69	209.1	147.9	118.5	102.2	91.4	90.6
22	1015	2.41	108.13	657	555	423	342	255	125	35.27	45.32	58.33	66.31	74.88	87.68	223.4	143.5	122.4	104.5	94.5	92.3
23	1021	2.42	108.77	637	527	343	184	143	88.2	37.61	48.38	66.41	81.98	85.99	91.36	239.7	154.1	140.2	130.0	109.2	96.7
24	1055	2.50	112.39	616	506	288	100	27.6	5.3	41.61	52.04	72.70	90.52	97.38	99.50	274.0	171.3	158.6	148.3	127.8	108.9
25	1043	2.47	111.12	501	390	238	99.4	25.1	3.4	51.97	62.61	77.18	90.47	97.59	99.67	338.3	203.8	166.5	146.6	126.6	107.8

ข.2 ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	235	0.56	29.25	11.2	7.9	0	0	0	0	95.2	96.6	100	100	100	100	167.6	85.0	58.3	43.8	35.0	29.2
2	233	0.55	29.01	11.3	2.7	0	0	0	0	95.1	98.8	100	100	100	100	166.0	86.2	57.8	43.4	34.7	29.0
3	224	0.53	27.89	9.7	3.4	0	0	0	0	95.6	98.4	100	100	100	100	160.5	82.6	55.6	41.7	33.4	27.8
4	240	0.57	29.88	10.7	2.7	0	0	0	0	95.5	98.8	100	100	100	100	171.7	88.8	59.5	44.7	35.8	29.8
5	250	0.59	31.12	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	187.2	93.6	62.0	46.6	37.3	31.1
6	412	0.98	51.29	87.8	47.3	6.9	0	0	0	78.6	88.5	98.3	100	100	100	242.8	136.6	100.5	76.8	61.5	51.2
7	443	1.05	55.15	71.9	27.5	6.9	0	0	0	83.7	93.7	98.4	100	100	100	278.0	155.6	108.2	82.6	66.1	55.1
8	470	1.11	58.51	92.5	29.4	5.5	0	0	0	80.3	93.7	98.8	100	100	100	282.7	165.0	115.3	87.6	70.1	58.5
9	440	1.04	54.77	55.5	16.1	2.7	0	0	0	87.3	96.3	99.3	100	100	100	288.0	158.7	108.5	82.0	65.6	54.7
10	452	1.07	56.27	56.6	14.8	5.7	0	0	0	87.4	96.73	98.7	100	100	100	296.2	163.7	110.7	84.2	67.4	56.2
11	652	1.55	81.17	301	124	51.5	29.3	21.5	11.2	53.8	80.98	92.1	95.5	96.7	98.2	262.9	197.7	149.0	116.1	94.1	79.7
12	669	1.59	83.28	285	98.2	16	7.8	5.5	0	57.4	85.32	97.6	98.8	99.1	100	287.6	213.8	162.1	123.2	99.0	83.2
13	708	1.68	88.14	284	111	25	14.7	2.7	0	59.8	84.32	96.4	97.9	99.6	100	317.6	223.6	169.5	129.2	105.3	88.1
14	675	1.60	84.03	292	84	22.4	12.3	1.7	0	56.7	87.56	96.6	98.1	99.7	100	286.9	221.3	162.0	123.5	100.5	84.0
15	650	1.54	80.92	276	72	26.5	11.4	0	0	57.5	88.92	95.9	98.2	100	100	280.1	216.4	154.7	119.0	97.0	80.9

ข.2(ต่อ) ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	850	2.02	105.81	473	309	233	169	135	74.3	44.3	63.6	72.5	80.1	84.1	91.2	282.4	202.6	153.1	126.9	106.7	96.5
17	820	1.95	102.08	453	287	213	142	116	63.2	44.7	65.0	74.0	82.6	85.8	92.2	274.9	199.6	150.6	126.4	105.1	94.2
18	870	2.06	108.30	498	343	138	124	91.2	72.1	42.7	60.5	84.1	85.7	89.5	91.7	278.6	197.3	181.7	139.1	116.2	99.3
19	880	2.09	109.55	430	283	151	130	91.8	53.1	51.1	67.8	82.8	85.2	89.5	93.9	337.1	223.6	180.9	139.8	117.6	102.9
20	875	2.08	108.93	430	280	151	134	93.5	47	50.8	68.0	82.7	84.6	89.3	94.6	333.3	222.8	179.7	138.1	116.6	103.0
21	1085	2.57	135.07	708	487	309	246	189	126	34.7	55.1	71.5	77.3	82.5	88.3	282.4	223.9	192.6	156.4	133.7	119.3
22	1100	2.61	136.94	678	503	326	298	201	139	38.3	54.2	70.3	72.9	81.7	87.3	316.1	223.6	192.1	149.5	134.2	119.6
23	1055	2.50	131.33	680	500	317	271	200	121	35.5	52.6	69.9	74.3	81.0	88.5	280.9	207.8	183.2	146.1	127.6	116.2
24	1070	2.54	133.20	660	476	351	291	185	130	38.3	55.5	67.2	72.8	82.7	87.8	307.1	222.4	178.4	145.2	132.1	117.0
25	1050	2.49	130.71	640	492	331	245	198	150	39.0	53.1	68.4	76.6	81.1	85.7	307.1	209.0	178.4	150.1	127.2	112.0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.3 ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปู ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

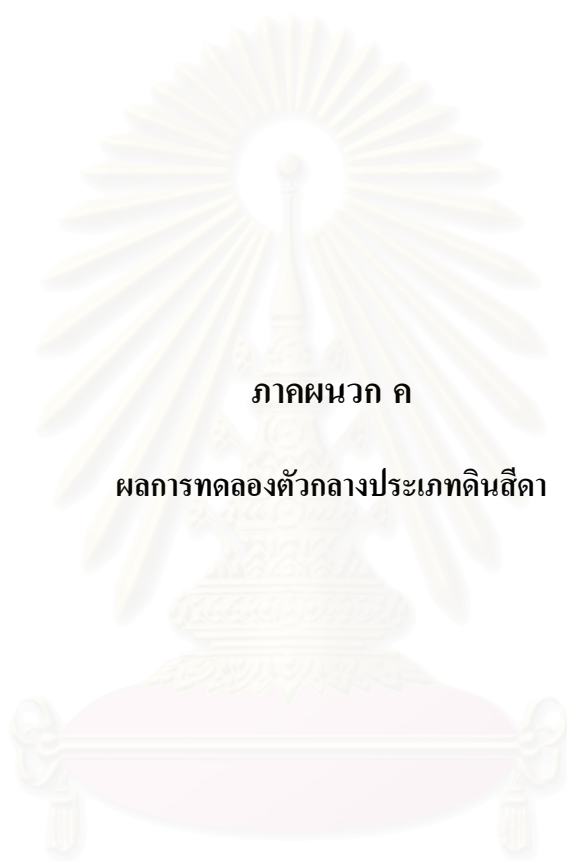
Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	200	0.47	33.20	154	131	117	89	64	11	23.0	34.5	41.5	55.5	68.0	94.5	45.9	34.4	27.4	27.6	27.0	31.3
2	230	0.55	38.18	167	145	131	107	73	7.8	27.3	36.9	43.0	53.4	68.2	96.6	62.9	42.4	32.7	30.5	31.2	36.8
3	210	0.50	34.86	171	147	128	97	53	5.3	18.5	30.0	39.0	53.8	74.7	97.4	38.9	31.4	27.1	28.0	31.2	33.9
4	220	0.52	36.52	175	151	133	104	61	4.2	20.4	31.3	39.5	52.7	72.2	98.0	44.9	34.4	28.8	28.8	31.6	35.8
5	210	0.50	34.86	165	146	125	98	63	5.3	21.4	30.4	40.4	53.3	70.0	97.4	44.9	31.9	28.1	27.8	29.2	33.9
6	415	0.98	68.88	325	294	254	215	198	97	21.6	29.1	38.8	48.1	52.2	76.6	89.8	60.4	53.2	49.7	43.2	52.7
7	420	1.00	69.71	341	307	261	205	181	95	18.8	26.9	37.8	51.1	56.9	77.3	78.9	56.4	52.6	53.4	47.5	53.9
8	410	0.97	68.05	324	287	249	200	184	90	20.9	30.0	39.2	51.2	55.1	78.0	85.9	61.4	53.2	52.2	44.9	53.1
9	430	1.02	71.37	353	309	267	203	177	85	17.9	28.1	37.9	52.7	58.8	80.2	76.9	60.4	53.9	56.4	50.3	57.2
10	400	0.95	66.39	321	284	231	197	156	82	19.7	29.0	42.2	50.7	61.0	79.5	78.9	57.9	55.9	50.4	48.5	52.7
11	610	1.45	101.25	503	448	387	334	295	231	17.5	26.5	36.5	45.2	51.6	62.1	106.8	80.9	73.8	68.6	62.7	62.9
12	620	1.47	102.91	516	475	404	347	261	200	16.7	23.3	34.8	44.0	57.9	67.7	103.8	72.4	71.5	67.8	71.4	69.7
13	630	1.49	104.57	495	425	386	358	285	203	21.4	32.5	38.7	43.1	54.7	67.7	134.8	102.3	80.7	67.6	68.6	70.8
14	615	1.46	102.08	476	400	353	295	237	197	22.6	34.9	42.6	52.0	61.4	67.9	138.8	107.3	86.7	79.5	75.2	69.3
15	630	1.49	104.57	475	417	371	300	232	181	24.6	33.8	41.1	52.3	63.1	71.2	154.8	106.3	85.7	82.0	79.2	74.5



ข.3(ต่อ) ผลการทดลองของตัวกลางประเภทดินไบก้ามปุ๋ย ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	810	1.92	134.45	700	633	571	505	452	405	13.5	21.8	29.51	37.6	44.2	50.0	109.8	88.4	79.1	75.8	71.2	67.2
17	830	1.97	137.77	736	654	585	513	448	377	11.3	21.2	29.5	38.1	46.0	54.5	93.8	87.9	81.1	78.8	76.0	75.1
18	850	2.02	141.09	725	646	577	500	433	395	14.7	24.0	32.1	41.1	49.0	53.5	124.8	101.8	90.3	87.0	83.0	75.5
19	830	1.97	137.77	695	620	555	483	401	362	16.2	25.3	33.1	41.8	51.6	56.3	134.8	104.8	91.0	86.2	85.4	77.6
20	825	1.96	136.94	675	622	565	514	464	345	18.1	24.61	31.5	37.7	43.7	58.1	149.8	101.3	86.0	77.3	71.8	79.6
21	1080	2.56	179.26	831	785	710	641	588	531	23.0	27.3	34.2	40.6	45.5	50.8	248.7	147.3	122.4	109.1	97.9	91.1
22	1100	2.61	182.58	856	805	742	675	595	513	22.1	26.8	32.5	38.6	45.9	53.3	243.7	147.3	118.5	105.6	100.5	97.4
23	1050	2.49	174.28	819	745	703	655	583	504	22.0	29.0	33.0	37.6	44.4	52.0	230.7	152.3	114.8	98.2	92.9	90.6
24	1040	2.47	172.62	792	733	685	612	575	522	23.8	29.5	34.1	41.1	44.7	49.8	247.7	153.3	117.5	106.4	92.5	85.9
25	1080	2.56	179.26	784	743	705	643	597	525	27.4	31.2	34.7	40.4	44.7	51.3	295.6	168.3	124.1	108.6	96.1	92.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	210	0.50	21.79	143	64.2	3.7	0	0	0	31.90	69.43	98.24	100	100	100	41.8	45.5	42.6	32.6	26.1	21.7
2	212	0.50	21.99	116	5.2	0	0	0	0	45.28	97.55	100	100	100	100	59.9	64.5	43.8	32.9	26.3	21.9
3	205	0.49	21.27	83.8	7.4	0	0	0	0	59.12	96.39	100	100	100	100	75.6	61.6	42.4	31.8	25.5	21.2
4	210	0.50	21.79	113	60.3	9.4	0	0	0	46.19	71.29	95.52	100	100	100	60.5	46.7	41.5	32.6	26.1	21.7
5	215	0.51	22.30	128	67.8	2.6	0	0	0	40.47	68.47	98.79	100	100	100	54.3	45.9	43.9	33.4	26.7	22.3
6	405	0.96	42.01	209	149	39.7	5.5	0	0	48.40	63.21	90.20	98.64	100	100	122.3	79.9	75.5	62.0	50.3	42.0
7	403	0.96	41.81	283	177	7.3	0	0	0	29.78	56.08	98.19	100	100	100	74.9	70.5	81.8	62.6	50.1	41.8
8	414	0.98	42.95	248	144	7.5	0	0	0	40.10	65.22	98.19	100	100	100	103.6	84.2	84.1	64.3	51.5	42.9
9	410	0.97	42.53	226	98.8	3.6	0	0	0	44.88	75.90	99.12	100	100	100	114.8	97.1	84.0	63.7	51.0	42.5
10	415	0.98	43.05	351	200	11.2	0	0	0	15.42	51.81	97.30	100	100	100	39.9	67.1	83.5	64.4	51.6	43.0
11	614	1.46	63.70	421	321	39.9	0	0	0	31.43	47.72	93.50	100	100	100	120.4	91.4	118.7	95.4	76.3	63.7
12	606	1.44	62.87	402	276	51.4	0	0	0	33.66	54.46	91.52	100	100	100	127.3	103.0	114.7	94.1	75.4	62.8
13	613	1.45	63.59	393	168	4.4	0	0	0	35.89	72.59	99.28	100	100	100	137.3	138.9	125.9	95.2	76.2	63.5
14	608	1.44	63.07	361	88.1	4.9	0	0	0	40.63	85.51	99.19	100	100	100	154.1	162.2	124.7	94.4	75.6	63.0
15	610	1.45	63.28	325	64.9	3.8	0	0	0	46.72	89.36	99.38	100	100	100	177.9	170.1	125.4	94.7	75.8	63.2

ค.1(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	820	1.95	85.07	550	231	7.2	0	0	0	32.93	71.83	99.12	100	100	100	168.5	183.8	168.1	127.4	102.0	85.0
17	815	1.93	84.55	538	196	8.4	0	0	0	33.99	75.95	98.97	100	100	100	172.9	193.2	166.8	126.6	101.4	84.5
18	820	1.95	85.07	529	182	4.1	0	0	0	35.49	77.80	99.50	100	100	100	181.6	199.1	168.7	127.4	102.0	85.0
19	822	1.95	85.27	507	123	4.8	0	0	0	38.32	85.04	99.42	100	100	100	196.6	218.1	169.0	127.7	102.2	85.2
20	840	1.99	87.14	486	107	5.3	0	0	0	42.14	87.26	99.37	100	100	100	220.9	228.7	172.6	130.5	104.5	87.1
21	1025	2.43	106.33	660	380	12.4	0	0	0	35.61	62.93	98.79	100	100	100	227.8	201.3	209.4	159.2	127.5	106.3
22	1045	2.48	108.41	867	533	210	168	70.8	46.6	17.03	49.00	79.90	83.92	93.22	95.54	111.1	159.8	172.7	136.2	121.2	103.5
23	1030	2.44	106.85	842	609	221	135	32.6	23.4	18.25	40.87	78.54	86.89	96.83	97.73	117.3	131.4	167.3	139.0	124.0	104.4
24	1030	2.44	106.85	812	589	214	80.8	5.6	0	21.17	42.82	79.22	92.16	99.46	100	136.0	137.6	168.8	147.4	127.4	106.8
25	1040	2.47	107.89	763	563	220	93.6	6.9	0	26.63	45.87	78.85	91.00	99.34	100	172.9	148.8	169.6	147.0	128.5	107.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	223	0.53	27.76	73.8	11.4	0	0	0	0	66.91	94.89	100	100	100	100	111.7	79.2	55.3	41.5	33.2	27.7
2	235	0.56	29.25	90	25.8	0	0	0	0	61.70	89.02	100	100	100	100	108.6	78.3	58.3	43.8	35.0	29.2
3	220	0.52	27.39	72.1	11.1	0	0	0	0	67.23	94.95	100	100	100	100	110.7	78.2	54.6	41.0	32.8	27.3
4	225	0.53	28.01	80	23.4	7.3	0	0	0	64.44	89.60	96.76	100	100	100	108.6	75.5	54.0	41.9	33.5	28.0
5	250	0.59	31.12	67.4	25.1	6.5	0	0	0	73.04	89.96	97.40	100	100	100	136.7	84.2	60.4	46.6	37.3	31.1
6	428	1.02	53.28	249	134	4.6	0	0	0	41.82	68.69	98.93	100	100	100	134.0	110.1	105.1	79.8	63.9	53.2
7	455	1.08	56.64	264	140	5.9	0	0	0	41.98	69.23	98.70	100	100	100	143.0	117.9	111.4	84.8	67.9	56.6
8	458	1.09	57.02	262	129	5.2	0	0	0	42.79	71.83	98.86	100	100	100	146.8	123.2	112.4	85.4	68.3	57.0
9	437	1.04	54.40	257	150	4.8	0	0	0	41.19	65.68	98.90	100	100	100	134.8	107.5	107.2	81.4	65.2	54.4
10	445	1.06	55.40	253	151	5.8	0	0	0	43.15	66.07	98.70	100	100	100	143.8	110.1	109.0	82.9	66.4	55.4
11	670	1.59	83.41	462	367	80.5	70.8	66.9	59.4	31.04	45.22	87.99	89.43	90.01	91.13	155.8	113.4	146.3	111.7	90.0	76.0
12	660	1.57	82.16	440	328	11.2	6.8	0	0	33.33	50.30	98.30	98.97	100	100	164.8	124.3	161.0	121.8	98.5	82.1
13	690	1.64	85.90	518	422	17.1	1.3	0	0	24.93	38.84	97.52	99.81	100	100	128.8	100.3	167.0	128.4	103.0	85.9
14	605	1.44	75.32	458	325	124	2.7	0	0	24.30	46.28	79.50	99.55	100	100	110.1	104.8	119.41	112.3	90.3	75.3
15	650	1.54	80.92	457	298	131	5.7	1.8	0	29.69	54.15	79.85	99.12	99.72	100	144.5	131.8	128.8	120.1	96.7	80.9

ค.2(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	810	1.92	100.84	725	555	232	174	132	109	10.49	31.48	71.36	78.52	83.70	86.54	63.67	95.51	143.49	118.59	101.22	87.27
17	825	1.96	102.70	579	376	234	167	106	97	29.82	54.42	71.64	79.76	87.15	88.24	184.28	168.18	146.72	122.69	107.35	90.63
18	850	2.02	105.81	581	403	255	180	100	100	31.65	52.59	70.00	78.82	88.24	88.24	201.51	167.43	147.71	124.93	111.97	93.37
19	845	2.00	105.19	553	397	260	149	116	95	34.56	53.02	69.23	82.37	86.27	88.76	218.74	167.80	145.23	129.78	108.84	93.37
20	870	2.06	108.30	560	400	255	198	120	105	35.63	54.02	70.69	77.24	86.21	87.93	232.22	176.04	152.68	125.30	111.97	95.23
21	1050	2.49	130.71	914	825	531	469	351	335	12.95	21.43	49.43	55.33	66.57	68.10	101.88	84.28	128.84	108.33	104.36	89.01
22	1115	2.64	138.80	923	831	545	491	387	331	17.22	25.47	51.12	55.96	65.29	70.31	143.83	106.37	141.50	116.35	108.69	97.60
23	1075	2.55	133.82	904	756	551	431	397	298	15.91	29.67	48.74	59.91	63.07	72.28	128.10	119.48	130.08	120.08	101.22	96.73
24	1100	2.61	136.94	931	835	560	420	380	301	15.36	24.09	49.09	61.82	65.45	72.64	126.60	99.26	134.06	126.79	107.49	99.47
25	1120	2.66	139.43	935	846	581	463	409	347	16.52	24.46	48.13	58.66	63.48	69.02	138.59	102.63	133.81	122.50	106.15	96.23

ก.3 ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	230	0.55	38.18	135	100	65	22.7	12.5	6.7	41.30	56.52	71.74	90.13	94.57	97.09	94.89	64.92	54.62	51.54	43.30	37.06
2	225	0.53	37.35	120	98	73	26.7	15	5.8	46.67	56.44	67.56	88.13	93.33	97.42	104.88	63.42	50.31	49.30	41.80	36.38
3	210	0.50	34.86	132	85	65.7	18.4	7.5	4.6	37.14	59.52	68.71	91.24	96.43	97.81	77.91	62.43	47.76	47.63	40.31	34.09
4	220	0.52	36.52	151	111	51	20.1	5.7	3.2	31.36	49.55	76.82	90.86	97.41	98.55	68.92	54.44	55.94	49.70	42.66	35.99
5	230	0.55	38.18	130	84	54	12.7	3.1	0	43.48	63.48	76.52	94.48	98.65	100.00	99.88	72.91	58.26	54.02	45.17	38.18
6	420	1.00	69.71	310	211	154	115	87	57	26.19	49.76	63.33	72.62	79.29	86.43	109.87	104.38	88.05	75.83	66.29	60.25
7	430	1.02	71.37	325	237	148	97	60	60	24.42	44.88	65.58	77.44	86.05	86.05	104.88	96.39	93.34	82.79	73.65	61.41
8	410	0.97	68.05	300	213	125	89	51	43	26.83	48.05	69.51	78.29	87.56	89.51	109.87	98.38	94.34	79.80	71.46	60.92
9	415	0.98	68.88	274	251	187	116	81	40	33.98	39.52	54.94	72.05	80.48	90.36	140.83	81.90	75.47	74.34	66.49	62.24
10	420	1.00	69.71	270	205	154	94.6	53.7	34	35.71	51.19	63.33	77.48	87.21	91.90	149.82	107.37	88.05	80.90	72.92	64.07
11	640	1.52	106.23	487	379	316	264	211	176	23.91	40.78	50.63	58.75	67.03	72.50	152.82	130.35	107.24	93.48	85.40	77.02
12	620	1.47	102.91	453	346	298	259	203	167	26.94	44.19	51.94	58.23	67.26	73.06	166.80	136.84	106.58	89.75	83.01	75.19
13	610	1.45	101.25	444	365	273	200	158	154	27.21	40.16	55.25	67.21	74.10	74.75	165.80	122.35	111.55	101.93	89.98	75.69
14	615	1.46	102.08	455	345	214	178	140	135	26.02	43.90	65.20	71.06	77.24	78.05	159.81	134.84	132.73	108.64	94.56	79.67
15	610	1.45	101.25	431	311	232	194	156	130	29.34	49.02	61.97	68.20	74.43	78.69	178.79	149.32	125.12	103.42	90.38	79.67

ค.3(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	815	1.93	135.28	687	600	564	532	487	432	15.71	26.38	30.80	34.72	40.25	46.99	127.85	107.37	83.08	70.36	65.29	63.57
17	820	1.95	136.11	674	613	572	513	431	394	17.80	25.24	30.24	37.44	47.44	51.95	145.83	103.38	82.09	76.32	77.44	70.71
18	840	1.99	139.43	700	607	541	473	374	331	16.67	27.74	35.60	43.69	55.48	60.60	139.83	116.36	98.97	91.24	92.76	84.49
19	850	2.02	141.09	711	623	531	442	381	335	16.35	26.71	37.53	48.00	55.18	60.59	138.84	113.37	105.59	101.43	93.36	85.48
20	830	1.97	137.77	684	571	500	431	377	341	17.59	31.20	39.76	48.07	54.58	58.92	145.83	129.35	109.23	99.20	90.18	81.17
21	1100	2.61	182.58	875	813	783	705	661	614	20.45	26.09	28.82	35.91	39.91	44.18	224.73	143.33	104.93	98.20	87.39	80.67
22	1050	2.49	174.28	843	785	743	686	655	620	19.71	25.24	29.24	34.67	37.62	40.95	206.75	132.34	101.62	90.50	78.63	71.37
23	1070	2.54	177.60	865	800	712	684	644	635	19.16	25.23	33.46	36.07	39.81	40.65	204.76	134.84	118.50	95.96	84.80	72.20
24	1030	2.44	170.96	881	815	741	697	631	621	14.47	20.87	28.06	32.33	38.74	39.71	148.82	107.37	95.66	82.79	79.43	67.89
25	1020	2.42	169.30	873	831	756	700	685	631	14.41	18.53	25.88	31.37	32.84	38.14	146.83	94.39	87.38	79.56	66.69	64.57





ภาคผนวก ง

ผลการทดลองตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 ผลการทดลองตัวกลางประเภทใยหมัก ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	211	0.50	21.89	41.2	6.6	0	0	0	0	80.4	96.8	100	100	100	100	106.00	63.8	43.6	32.7	26.2	21.8
2	210	0.50	21.79	13.8	2.3	0	0	0	0	93.4	98.9	100	100	100	100	122.4	64.8	43.4	32.6	26.1	21.7
3	209	0.50	21.68	3.8	0	0	0	0	0	98.1	100	100	100	100	100	128.1	65.2	43.2	32.4	26.0	21.6
4	210	0.50	21.79	9.4	0	0	0	0	0	95.5	100	100	100	100	100	125.2	65.5	43.4	32.6	26.1	21.7
5	215	0.51	22.30	2.7	0	0	0	0	0	98.7	100	100	100	100	100	132.5	67.1	44.4	33.4	26.7	22.3
6	400	0.95	41.50	3.5	0	0	0	0	0	99.1	100	100	100	100	100	247.5	124.8	82.7	62.1	49.7	41.5
7	401	0.95	41.60	7.3	0	0	0	0	0	98.1	100	100	100	100	100	245.7	125.1	82.9	62.3	49.8	41.6
8	412	0.98	42.74	6.3	0	0	0	0	0	98.4	100	100	100	100	100	253.2	128.6	85.2	64.0	51.2	42.7
9	412	0.98	42.74	12.6	0	0	0	0	0	96.9	100	100	100	100	100	249.3	128.6	85.2	64.0	51.2	42.7
10	420	1.00	43.57	17.2	0	0	0	0	0	95.9	100	100	100	100	100	251.4	131.0	86.8	65.2	52.2	43.5
11	618	1.47	64.11	161	90.4	20.1	0	0	0	73.9	85.3	96.7	100	100	100	285.2	164.6	123.6	96.0	76.8	64.1
12	618	1.47	64.11	158	53.3	13	0	0	0	74.4	91.3	97.9	100	100	100	287.1	176.2	125.1	96.0	76.8	64.1
13	607	1.44	62.97	53.9	2.4	0	0	0	0	91.1	99.6	100	100	100	100	345.2	188.7	125.5	94.3	75.5	62.9
14	613	1.45	63.59	54.3	2.5	0	0	0	0	91.1	99.5	100	100	100	100	348.7	190.5	126.8	95.2	76.2	63.5
15	615	1.46	63.80	55.4	2.6	0	0	0	0	90.9	99.5	100	100	100	100	349.3	191.1	127.2	95.5	76.5	63.8

ง.1(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทขี้หมัก ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	855	2.03	88.70	182	4.2	0	0	0	0	78.7	99.5	100	100	100	100	420.1	265.5	176.8	132.8	106.3	88.7
17	823	1.95	85.38	174	6.3	0	0	0	0	78.8	99.2	100	100	100	100	405.1	254.9	170.2	127.8	102.3	85.3
18	850	2.02	88.18	134	5.3	0	0	0	0	84.2	99.3	100	100	100	100	446.9	263.6	175.8	132.0	105.7	88.1
19	852	2.02	88.39	111	3.8	0	0	0	0	86.9	99.5	100	100	100	100	462.5	264.7	176.2	132.3	106.0	88.3
20	850	2.02	88.18	98.4	4.2	0	0	0	0	88.4	99.5	100	100	100	100	469.1	264.0	175.8	132.0	105.7	88.1
21	1020	2.42	105.81	206	3.8	0	0	0	0	79.8	99.6	100	100	100	100	508.1	317.1	211.0	158.4	126.9	105.6
22	1025	2.43	106.33	326	137	80.4	31.1	10.8	0	68.2	86.6	92.1	96.9	98.9	100	436.3	277.1	195.4	154.4	126.1	106.3
23	1030	2.44	106.85	330	8.2	0	0	0	0	67.9	99.2	100	100	100	100	436.9	318.9	213.0	160.0	128.1	106.8
24	1020	2.42	105.81	308	24.5	0	0	0	0	69.8	97.6	100	100	100	100	444.4	310.7	211.0	158.4	126.9	105.8
25	1042	2.47	108.10	297	13.5	0	0	0	0	71.5	98.7	100	100	100	100	465.0	321.0	215.5	161.9	129.6	108.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2 ผลการทดลองตัวกลางประเภทปฏิกิริยาที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	245	0.58	30.50	10.8	4.8	0	0	0	0	95.5	98.0	100	100	100	100	175.4	89.9	60.8	45.6	36.5	30.5
2	237	0.56	29.50	15.9	0	0	0	0	0	93.2	100	100	100	100	100	165.6	88.7	58.8	44.1	35.3	29.5
3	225	0.53	28.01	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	168.5	84.2	55.8	41.9	33.5	28.0
4	240	0.57	29.88	2.7	0	0	0	0	0	98.8	100	100	100	100	100	177.7	89.8	59.5	44.7	35.8	29.8
5	250	0.59	31.12	4.1	0	0	0	0	0	98.3	100	100	100	100	100	184.2	93.6	62.0	46.6	37.3	31.1
6	425	1.01	52.91	26	2.3	0	0	0	0	93.8	99.4	100	100	100	100	298.9	158.3	105.5	79.2	63.4	52.9
7	457	1.08	56.89	47.4	5.5	0	0	0	0	89.6	98.8	100	100	100	100	306.8	169.1	113.4	85.2	68.2	56.8
8	453	1.07	56.39	42.3	5.3	0	0	0	0	90.6	98.8	100	100	100	100	307.6	167.6	112.4	84.4	67.6	56.3
9	445	1.06	55.40	66.8	5.3	0	0	0	0	84.9	98.8	100	100	100	100	283.3	164.6	110.4	82.9	66.4	55.4
10	446	1.06	55.52	83.8	5.1	0	0	0	0	81.2	98.8	100	100	100	100	271.3	165.1	110.7	83.1	66.5	55.5
11	663	1.57	82.54	198	6	2.7	0	0	0	70.1	99.1	99.5	100	100	100	348.3	246.0	163.9	123.6	98.9	82.5
12	659	1.56	82.04	184	11.3	0	0	0	0	72.0	98.2	100	100	100	100	355.8	242.6	163.6	122.8	98.3	82.0
13	670	1.59	83.41	200	1.2	0	0	0	0	70.1	99.8	100	100	100	100	352.0	250.5	166.3	124.9	100.0	83.4
14	653	1.55	81.29	175	9.7	0	0	0	0	73.2	98.5	100	100	100	100	358.0	240.9	162.1	121.7	97.4	81.2
15	640	1.52	79.67	180	12.7	2.6	0	0	0	71.8	98.0	99.5	100	100	100	344.5	234.9	158.2	119.3	95.5	79.6

ง.2(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทปฏิกิริยาที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	820	1.95	102.08	496	110	115	98.3	74.4	69.7	39.5	86.5	85.9	88.0	90.9	91.5	242.7	265.9	175.0	134.5	111.3	93.4
17	845	2.00	105.19	425	183	146	103	76.2	57.8	49.7	78.3	82.7	87.8	90.9	93.1	314.6	247.9	173.5	138.3	114.7	98.0
18	820	1.95	102.08	441	163	148	109	79.6	45.3	46.2	80.1	81.9	86.7	90.2	94.4	283.9	246.0	166.8	132.5	110.5	96.4
19	875	2.08	108.93	404	170	150	121	72.6	50.1	53.8	80.5	82.8	86.1	91.7	94.2	352.8	264.0	179.9	140.5	119.8	102.6
20	880	2.09	109.55	419	174	138	115	84.3	56	52.3	80.2	84.3	86.9	90.4	93.6	345.3	264.4	184.2	142.6	118.8	102.5
21	1100	2.61	136.94	615	467	339	286	191	119	44.0	57.5	69.1	74.0	82.6	89.1	363.3	237.0	188.9	151.7	135.7	122.1
22	1050	2.49	130.71	609	431	345	294	200	92	42.0	58.9	67.1	72.0	80.9	91.2	330.3	231.8	175.0	140.9	126.9	119.2
23	1080	2.56	134.45	611	451	368	300	184	57	43.4	58.2	65.9	72.2	82.9	94.7	351.3	235.6	176.7	145.4	133.7	127.3
24	1045	2.48	130.09	579	467	334	286	197	89	44.5	55.3	68.04	72.6	81.1	91.4	349.0	216.4	176.5	141.5	126.6	119.0
25	1060	2.51	131.96	581	408	350	298	203	78	45.1	61.5	66.9	71.8	80.8	92.6	358.8	244.2	176.2	142.0	127.9	122.2

ง.3 ผลการทดลองตัวกลางประเภทปฏึกที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.5	0.75	1.00	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	210	0.50	34.86	53	31	17.5	0	0	0	74.7	85.2	91.6	100	100	100	156.8	89.39	63.72	52.2	41.8	34.8
2	230	0.55	38.18	61	42	22.3	0	0	0	73.4	81.7	90.3	100	100	100	168.8	93.89	68.75	57.1	45.7	38.1
3	220	0.52	36.52	48	28	14.6	0	0	0	78.1	87.2	93.3	100	100	100	171.8	95.89	67.99	54.6	43.7	36.5
4	210	0.50	34.86	40	22.3	8.7	0	0	0	80.9	89.3	95.8	100	100	100	169.8	93.74	66.63	52.2	41.8	34.8
5	220	0.52	36.52	45	17.5	3.1	0	0	0	79.5	92.0	98.5	100	100	100	174.7	101.1	71.79	54.6	43.7	36.5
6	410	0.97	68.05	121	46.8	21	3.1	0	0	70.4	88.5	94.8	99.2	100	100	288.6	181.3	128.7	101.1	81.6	68.0
7	420	1.00	69.71	133	71	33.5	5.7	0	0	68.3	83.1	92.0	98.6	100	100	286.6	174.2	127.9	103.0	83.6	69.7
8	420	1.00	69.71	130	64	26.4	6.1	0	0	69.0	84.7	93.7	98.5	100	100	289.6	177.7	130.2	102.9	83.6	69.7
9	430	1.02	71.37	142	57	16.5	3.2	0	0	66.9	86.7	96.1	99.2	100	100	287.6	186.2	136.8	106.1	85.6	71.3
10	415	0.98	68.88	125	63	11.2	2.1	0	0	69.8	84.8	97.3	99.4	100	100	289.6	175.7	133.6	102.6	82.6	68.8
11	620	1.47	102.91	315	266	204	178	123	120	49.1	57.1	67.1	71.2	80.1	80.6	304.6	176.7	137.7	109.8	98.9	82.9
12	630	1.49	104.57	335	273	213	161	135	113	46.8	56.6	66.1	74.4	78.5	82.0	294.6	178.2	138.0	116.6	98.5	85.8
13	620	1.47	102.91	303	261	207	153	100	91	51.1	57.9	66.6	75.3	83.8	85.3	316.6	179.2	136.7	116.1	103.5	87.8
14	610	1.45	101.25	289	255	200	141	117	93	52.6	58.2	67.2	76.8	80.8	84.7	320.6	177.2	135.7	116.6	98.1	85.8
15	620	1.47	102.91	325	271	213	168	120	90	47.5	56.2	65.6	72.9	80.6	85.4	294.6	174.2	134.7	112.3	99.5	87.9

ง.3(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทปฏิกิริยาที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.5	0.75	1.00	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	820	1.95	136.11	486	405	363	300	257	219	40.7	50.6	55.7	63.4	68.6	73.2	333.6	207.2	151.2	129.2	112.0	99.7
17	850	2.02	141.09	504	431	385	316	266	231	40.7	49.2	54.7	62.8	68.7	72.8	345.5	209.2	153.9	132.7	116.2	102.7
18	840	1.99	139.43	512	425	343	295	233	215	39.0	49.4	59.1	64.8	72.2	74.4	327.6	207.2	164.5	135.4	120.8	103.7
19	830	1.97	137.77	482	400	321	279	200	194	41.9	51.8	61.3	66.3	75.9	76.6	347.5	214.7	168.4	136.9	125.4	105.5
20	825	1.96	136.94	495	397	300	266	208	187	40.0	51.8	63.6	67.7	74.7	77.3	329.6	213.7	173.7	138.9	122.8	105.9
21	1050	2.49	174.28	655	505	411	397	350	345	37.6	51.9	60.8	62.1	66.6	67.1	394.5	272.1	211.5	162.3	139.3	117.0
22	1070	2.54	177.60	686	525	456	401	368	332	35.8	50.9	57.3	62.5	65.6	68.9	383.5	272.1	203.2	166.3	139.7	122.5
23	1050	2.49	174.28	670	514	444	395	350	341	36.1	51.0	57.7	62.3	66.6	67.5	379.5	267.6	200.5	162.8	139.3	117.6
24	1040	2.47	172.62	650	535	451	405	369	300	37.5	48.5	56.6	61.0	64.5	71.1	389.5	252.2	194.9	157.8	133.5	122.8
25	1100	2.61	182.58	711	605	500	421	388	365	35.3	45.0	54.5	61.7	64.7	66.8	388.5	247.2	198.6	168.8	141.7	122.0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลการทดลองตัวกลางประเภทจี้กบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จ.1 ผลการทดลองตัวกลางประเภทซีบก ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	209	0.50	21.68	158	143	111	84.9	72.6	54.2	24.4	31.5	46.8	59.3	65.2	74.07	31.8	20.6	20.2	19.2	16.9	16.0
2	205	0.49	21.27	137	130	110	73.4	43.7	28.2	33.1	36.5	46.3	64.2	78.6	86.24	42.4	23.41	19.6	20.4	20.0	18.3
3	202	0.48	20.96	128	113	94.2	51.4	12.3	0	36.6	44.0	53.3	74.5	93.9	100	46.2	27.7	22.3	23.4	23.6	20.9
4	200	0.47	20.75	109	99.2	83.8	58.5	50.1	27.6	45.5	50.4	58.1	70.7	74.9	86.20	56.8	31.4	24.0	21.9	18.6	17.8
5	205	0.49	21.27	143	99.8	64.3	45.9	37.8	12.6	30.2	51.3	68.6	77.6	81.5	93.85	38.7	32.8	29.1	24.7	20.8	19.9
6	400	0.95	41.50	202	260	200	120	32.4	0	49.5	35.0	50.0	70.0	91.9	100	123.6	43.7	41.3	43.5	45.7	41.5
7	403	0.96	41.81	320	249	195	102	20.9	0	20.6	38.2	51.6	74.6	94.8	100	51.8	48.0	43.0	46.7	47.5	41.8
8	414	0.98	42.95	310	220	176	97	18.6	0	25.1	46.8	57.4	76.5	95.5	100	64.9	60.5	49.2	49.2	49.1	42.9
9	407	0.97	42.22	306	207	149	94.1	18.1	0	24.8	49.1	63.3	76.8	95.5	100	63.0	62.4	53.3	48.6	48.3	42.2
10	403	0.96	41.81	354	326	242	160	98.8	23.2	12.1	19.1	39.9	60.3	75.4	94.2	30.5	24.0	33.3	37.7	37.8	39.4
11	612	1.45	63.49	507	466	412	330	175	26.4	17.1	23.8	32.6	46.0	71.4	95.6	65.5	45.5	41.3	43.8	54.3	60.7
12	605	1.44	62.76	511	446	348	290	162	20.7	15.5	26.2	42.4	52.0	73.2	96.5	58.6	49.6	53.1	48.9	55.1	60.6
13	610	1.45	63.28	433	396	334	270	172	59.8	29.0	35.0	45.2	55.7	71.8	90.2	110.4	66.8	57.1	52.8	54.4	57.0
14	610	1.45	63.28	445	367	237	191	182	88.1	27.0	39.8	61.1	68.6	70.1	85.5	103.0	75.8	77.1	65.1	53.2	54.1
15	610	1.45	63.28	476	452	400	308	248	86.7	21.9	25.9	34.4	49.5	59.3	85.7	83.6	49.3	43.4	46.9	45.0	54.2

จ.1(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทจี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	800	1.90	82.99	661	568	421	362	298	124	17.3	29.0	47.3	54.7	62.7	84.5	86.7	72.4	78.4	68.0	62.4	70.1
17	823	1.95	85.38	638	550	409	321	153	124	22.4	33.1	50.3	61.0	81.4	84.9	115.4	85.2	85.6	78.0	83.3	72.5
18	825	1.96	85.59	613	536	385	242	148	21	25.7	35.0	53.3	70.6	82.0	97.4	132.3	90.2	91.0	90.5	84.2	83.4
19	816	1.94	84.65	528	475	351	154	88.3	6	35.2	41.7	56.9	81.1	89.1	99.2	179.7	106.4	96.2	102.8	90.5	84.0
20	817	1.94	84.76	530	454	342	131	74.6	7.2	35.1	44.4	58.1	83.9	90.8	99.1	179.1	113.3	98.2	106.5	92.3	84.0
21	1015	2.41	105.30	864	786	585	342	258	140	14.8	22.5	42.3	66.3	74.5	86.2	94.2	71.4	88.9	104.5	94.1	90.7
22	1060	2.51	109.96	893	796	571	356	281	180	15.7	24.9	46.1	66.4	73.4	83.0	104.2	82.4	101.1	109.3	96.9	91.2
23	1020	2.42	105.81	869	784	460	310	272	135	14.8	23.1	54.9	69.6	73.3	86.7	94.2	73.6	115.8	110.3	93.0	91.8
24	1040	2.47	107.89	887	803	595	429	360	99.7	14.7	22.7	42.7	58.7	65.3	90.4	95.5	73.9	92.0	94.9	84.6	97.5
25	1055	2.50	109.45	832	698	497	339	151	6.6	21.1	33.8	52.8	67.8	85.6	99.3	139.2	111.4	115.4	111.2	112.4	108.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.2 ผลการทดลองตัวกลางประเภทจี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppm	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	209	0.50	26.02	17.7	3.7	0	0	0	0	91.5	98.2	100	100	100	100	143.3	76.9	51.8	38.9	31.2	26.0
2	224	0.53	27.89	8.6	0	0	0	0	0	96.1	100	100	100	100	100	161.3	83.9	55.6	41.7	33.4	27.8
3	218	0.52	27.14	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	163.3	81.6	54.1	40.6	32.5	27.1
4	230	0.55	28.63	3.4	0	0	0	0	0	98.5	100	100	100	100	100	169.7	86.1	57.1	42.8	34.3	28.6
5	250	0.59	31.12	6.2	2.2	0	0	0	0	97.5	99.1	100	100	100	100	182.6	92.8	62.0	46.6	37.3	31.1
6	450	1.07	56.02	66	3	0	0	0	0	85.3	99.3	100	100	100	100	287.6	167.4	111.7	83.9	67.1	56.0
7	430	1.02	53.53	51.3	5.3	0	0	0	0	88.0	98.7	100	100	100	100	283.6	159.0	106.7	80.1	64.2	53.5
8	408	0.97	50.79	42.6	4.2	0	0	0	0	89.5	98.97	100	100	100	100	273.7	151.2	101.2	76.0	60.9	50.7
9	425	1.01	52.91	86	11.2	2.7	0	0	0	79.7	97.3	99.3	100	100	100	253.9	154.9	104.8	79.2	63.4	52.9
10	413	0.98	51.41	52.3	9.7	3.9	0	0	0	87.3	97.6	99.0	100	100	100	270.2	151.0	101.5	77.0	61.6	51.4
11	604	1.43	75.19	387	314	206	126	77.3	14.6	35.9	48.0	65.8	79.1	87.2	97.5	162.5	108.6	98.8	89.1	78.6	73.3
12	655	1.55	81.54	415	279	105	26.4	13.4	12.8	36.6	57.4	83.9	95.9	97.9	98.0	179.7	140.8	136.5	117.2	95.7	79.9
13	650	1.54	80.92	389	270	115	31.7	14.9	6.7	40.1	58.4	82.3	95.1	97.7	98.9	195.5	142.3	132.8	115.2	94.8	80.0
14	610	1.45	75.94	350	247	120	42	17.5	10	42.6	59.5	80.3	93.1	97.1	98.3	194.7	135.9	121.6	105.9	88.4	74.6
15	650	1.54	80.92	400	280	130	50	20	12	38.4	56.9	80.0	92.3	96.9	98.1	187.2	138.5	129.0	111.8	94.0	79.4

จ.2(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทจี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	800	1.90	99.59	667	570	409	238	197	143	16.6	28.7	48.8	70.2	75.3	82.1	99.6	86.1	97.0	104.7	90.0	81.7
17	815	1.93	101.46	676	581	416	264	200	154	17.0	28.7	48.9	67.6	75.4	81.1	104.1	87.6	99.0	102.7	91.8	82.2
18	860	2.04	107.06	681	605	386	241	215	146	20.8	29.6	55.1	71.9	75.0	83.0	134.0	95.5	117.6	115.4	96.3	88.8
19	830	1.97	103.33	661	584	391	239	197	119	20.3	29.6	52.8	71.2	76.2	85.6	126.6	92.1	108.9	110.2	94.5	88.5
20	850	2.02	105.81	681	600	411	250	200	130	19.8	29.4	51.6	70.5	76.4	84.7	126.6	93.6	108.9	111.8	97.0	89.6
21	1080	2.56	134.45	967	815	688	523	451	354	10.4	24.5	36.3	51.5	58.2	67.2	84.6	99.2	97.3	103.8	93.9	90.3
22	1050	2.49	130.71	897	785	654	498	439	387	14.5	25.2	37.7	52.5	58.1	63.1	114.6	99.2	98.3	102.9	91.2	82.5
23	1100	2.61	136.94	923	826	671	553	467	391	16.0	24.9	39.0	49.7	57.5	64.4	132.5	102.6	106.5	101.9	94.5	88.2
24	1060	2.51	131.96	900	801	645	526	435	379	15.0	24.4	39.1	50.3	58.9	64.2	119.8	97.0	103.0	99.5	93.3	84.7
25	1100	2.61	136.94	911	831	711	638	514	387	17.1	24.4	35.3	42.0	53.2	64.8	141.5	100.7	96.5	86.1	87.4	88.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

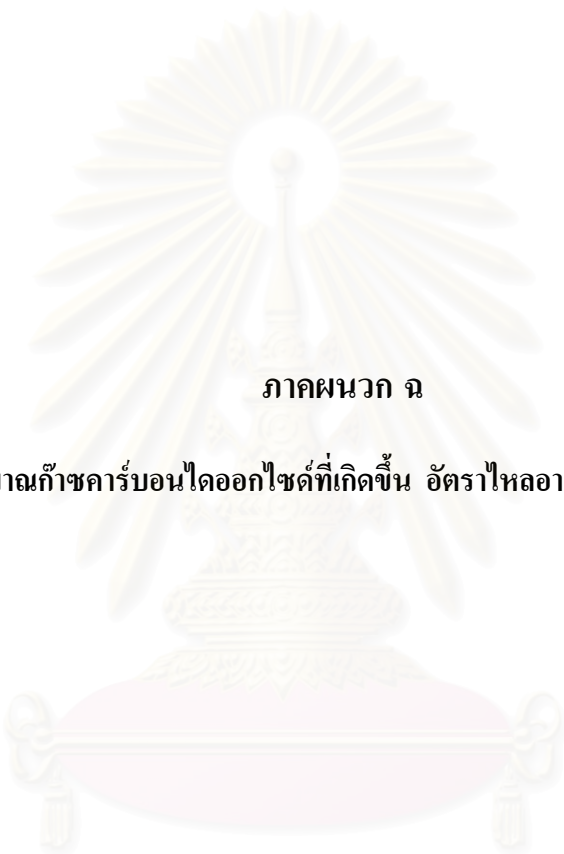
จ.3 ผลการทดลองตัวกลางประเภทจี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	210	0.50	34.86	146	117	78.4	41.5	25.8	13	30.4	44.2	62.6	80.2	87.7	93.8	63.9	46.4	43.5	41.8	36.6	32.7
2	225	0.53	37.35	156	124	62.3	38.1	17.6	5.7	30.6	44.8	72.3	83.0	92.1	97.4	68.9	50.4	53.8	46.4	41.2	36.4
3	230	0.55	38.18	161	131	57.7	34.9	26.4	9.3	30.0	43.0	74.9	84.8	88.5	95.9	68.9	49.4	57.0	48.5	40.5	36.6
4	220	0.52	36.52	158	118	67.9	33.5	22.7	12	28.1	46.3	69.1	84.7	89.6	94.5	61.9	50.9	50.3	46.3	39.2	34.5
5	250	0.59	41.50	160	123	63.7	46.8	39.4	15	36.0	50.8	74.5	81.2	84.2	94.0	89.8	63.4	61.6	50.5	41.9	39.0
6	430	1.02	71.37	289	265	213	176	148	131	32.7	38.3	50.4	59.0	65.5	69.5	140.8	82.4	71.8	63.1	56.1	49.6
7	420	1.00	69.71	268	244	207	182	135	118	36.1	41.9	50.7	56.6	67.8	71.9	151.8	87.9	70.5	59.1	56.7	50.1
8	415	0.98	68.88	256	237	200	175	146	103	38.3	42.8	51.8	57.8	64.8	75.1	158.8	88.8	71.1	59.6	53.5	51.7
9	410	0.97	68.05	264	241	209	179	136	117	35.6	41.2	49.0	56.3	66.8	71.4	145.8	84.4	66.5	57.4	54.5	48.6
10	450	1.07	74.69	297	265	236	197	154	131	34.0	41.1	47.5	56.2	65.7	70.8	152.8	92.3	70.8	62.9	58.9	52.9
11	630	1.49	104.57	466	421	386	334	300	276	26.0	33.1	38.7	46.9	52.3	56.1	163.8	104.3	80.7	73.5	65.6	58.7
12	640	1.52	106.23	475	438	375	326	294	266	25.7	31.5	41.4	49.0	54.0	58.4	164.8	100.8	87.7	78.0	68.8	62.0
13	610	1.45	101.25	423	376	331	300	275	243	30.6	38.3	45.7	50.8	54.9	60.1	186.7	116.8	92.3	77.0	66.6	60.9
14	630	1.49	104.57	481	428	374	326	293	277	23.6	32.0	40.6	48.2	53.4	56.0	148.8	100.8	84.7	75.5	67.8	58.5
15	625	1.48	103.74	493	447	398	364	307	265	21.1	28.4	36.3	41.7	50.8	57.6	131.8	88.8	75.1	64.8	63.3	59.7

จ.3(ต่อ) ผลการทดลองตัวกลางประเภทซีบกบ ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ACEin		Loading g/m <sup>3</sup> -hr	ACEout (ppmv)						Removal Efficiency (%)						Elimination Capacity (g/m <sup>3</sup> -hr)					
	ppmv	g/m <sup>3</sup>		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
16	830	1.97	137.77	672	611	565	539	496	461	19.0	26.3	31.9	35.0	40.2	44.4	157.8	109.3	87.7	72.3	66.4	61.2
17	810	1.92	134.45	644	603	564	516	473	432	20.4	25.5	30.3	36.3	41.6	46.6	165.8	103.3	81.4	73.0	67.0	62.7
18	850	2.02	141.09	705	657	601	576	523	482	17.0	22.7	29.2	32.2	38.4	43.2	144.8	96.3	82.4	68.1	65.0	61.0
19	820	1.95	136.11	637	585	529	476	447	422	22.3	28.6	35.4	41.9	45.4	48.5	182.7	117.3	96.3	85.5	74.2	66.0
20	840	1.99	139.43	694	628	573	515	493	472	17.3	25.2	31.7	38.6	41.3	43.8	145.8	105.8	88.3	80.8	69.0	61.0
21	1100	2.61	182.58	883	836	776	724	689	632	19.7	24.0	29.4	34.1	37.3	42.5	216.7	131.8	107.2	93.4	81.8	77.6
22	1070	2.54	177.60	902	847	795	736	652	594	15.7	20.8	25.7	31.1	39.0	44.4	167.8	111.3	91.0	83.0	83.2	79.0
23	1050	2.49	174.28	893	855	807	671	613	577	14.9	18.5	23.1	36.1	41.6	45.0	156.8	97.3	80.4	94.2	86.9	78.5
24	1060	2.51	175.94	915	874	819	755	681	600	13.6	17.5	22.7	28.7	35.7	43.4	144.8	92.8	79.7	75.8	75.4	76.3
25	1050	2.49	174.28	908	846	786	734	673	615	13.5	19.4	25.1	30.1	35.9	41.4	141.8	101.8	87.3	78.5	75.0	72.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.1 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูและดินสิดาที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ดินใบก้ามปู (C1)						ดินสิดา(C2)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
1	235	29.25	1200	600	600	56.66	223	27.76	1400	1000	400	37.78
2	233	29.01	1000	600	400	37.78	235	29.25	1400	1000	400	37.78
3	224	27.89	1200	600	600	56.66	220	27.39	1400	1000	400	37.78
4	240	29.88	1000	600	400	37.78	225	28.01	1400	1000	400	37.78
5	250	31.12	1200	600	600	56.66	250	31.12	1400	1000	400	37.78
6	412	51.29	1400	600	800	75.55	428	53.28	1800	1000	800	75.55
7	443	55.15	1400	600	800	75.55	455	56.64	1800	1000	800	75.55
8	470	58.51	1400	600	800	75.55	458	57.02	2000	1000	1000	94.44
9	440	54.77	1600	600	1000	94.44	437	54.40	2000	1000	1000	94.44
10	452	56.27	1600	600	1000	94.44	445	55.40	2000	1000	1000	94.44
11	652	81.17	2400	900	1500	141.66	670	83.41	2200	1000	1200	113.33
12	669	83.28	2200	900	1300	122.77	660	82.16	2200	1000	1200	113.33
13	708	88.14	2000	900	1100	103.88	690	85.90	2200	1000	1200	113.33



จ.1(ต่อ) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูและดินสีดาที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ดินใบก้ามปู (C1)						ดินสีดา(C2)					
	ACE	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
14	675	84.03	2000	900	1100	103.88	605	75.32	2200	1000	1200	113.33
15	650	80.92	2400	900	1500	141.66	650	80.92	2200	1000	1200	113.33
16	850	105.81	2600	900	1700	160.55	810	100.84	2300	1000	1300	122.77
17	820	102.08	2600	900	1700	160.55	825	102.70	2800	1000	1800	169.99
18	870	108.30	2600	900	1700	160.55	850	105.81	2800	1000	1800	169.99
19	880	109.55	2600	900	1700	160.55	845	105.19	2800	1000	1800	169.99
20	875	108.93	2600	900	1700	160.55	870	108.30	2800	1000	1800	169.99
21	1085	135.07	3000	900	2100	198.32	1050	130.71	2800	1000	1800	169.99
22	1100	136.94	3000	900	2100	198.32	1115	138.80	2800	1000	1800	169.99
23	1055	131.33	3000	900	2100	198.32	1075	133.82	2800	1000	1800	169.99
24	1070	133.20	3000	900	2100	198.32	1100	136.94	2800	1000	1800	169.99
25	1050	130.71	3000	900	2100	198.32	1120	139.43	2800	1000	1800	169.99

ฉ.1(ต่อ) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและจี้กบที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ปุ๋ยหมัก(C3)						จี้กบ(C4)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
1	245	30.50	1600	1000	600	56.66	209	26.02	1600	1100	500	47.22
2	237	29.50	1600	1000	600	56.66	224	27.89	1600	1100	500	47.22
3	225	28.01	1600	1000	600	56.66	218	27.14	1600	1100	500	47.22
4	240	29.88	1600	1000	600	56.66	230	28.63	1600	1100	500	47.22
5	250	31.12	1600	1000	600	56.66	250	31.12	1600	1100	500	47.22
6	425	52.91	2000	1000	1000	94.44	450	56.02	2200	1100	1100	103.88
7	457	56.89	2200	1000	1200	113.33	430	53.53	2000	1100	900	85.00
8	453	56.39	2200	1000	1200	113.33	408	50.79	2000	1100	900	85.00
9	445	55.40	2000	1000	1000	94.44	425	52.91	2000	1100	900	85.00
10	446	55.52	2000	1000	1000	94.44	413	51.41	2000	1100	900	85.00
11	663	82.54	2600	1000	1600	151.10	604	75.19	2600	1100	1500	141.66
12	659	82.04	2800	1000	1800	169.99	655	81.54	2400	1100	1300	122.77
13	670	83.41	2800	1000	1800	169.99	650	80.92	2400	1100	1300	122.77

ฉ.1(ต่อ) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและจี้บที่อัตราไหลอากาศ 3.0 ลิตรต่อนาที

Date	ปุ๋ยหมัก(C3)						จี้บ(C4)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
14	653	81.29	2600	1000	1600	151.10	610	75.94	2400	1100	1300	122.77
15	640	79.67	2600	1000	1600	151.10	650	80.92	2400	1100	1300	122.77
16	820	102.08	2600	1000	1600	151.10	800	99.59	2600	1100	1500	141.66
17	845	105.19	2600	1000	1600	151.10	815	101.46	2600	1100	1500	141.66
18	820	102.08	2600	1000	1600	151.10	860	107.06	2600	1100	1500	141.66
19	875	108.93	2600	1000	1600	151.10	830	103.33	2600	1100	1500	141.66
20	880	109.55	2600	1000	1600	151.10	850	105.81	2600	1100	1500	141.66
21	1100	136.94	3000	1000	2000	188.88	1080	134.45	2600	1100	1500	141.66
22	1050	130.71	3000	1000	2000	188.88	1050	130.71	2600	1100	1500	141.66
23	1080	134.45	3000	1000	2000	188.88	1100	136.94	2600	1100	1500	141.66
24	1045	130.09	3200	1000	2200	207.77	1060	131.96	2600	1100	1500	141.66
25	1060	131.96	3200	1000	2200	207.77	1100	136.94	2600	1100	1500	141.66



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช.1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูและดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ดินใบก้ามปู (C1)						ดินสีดา(C2)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
1	200	24.90	1200	800	400	50.37	230	28.63	1800	1200	600	75.55
2	230	28.63	1200	800	400	50.37	225	28.01	1600	1200	400	50.37
3	210	26.14	1200	800	400	50.37	210	26.14	1600	1200	400	50.37
4	220	27.39	1200	800	400	50.37	220	27.39	1600	1200	400	50.37
5	210	26.14	1200	800	400	50.37	230	28.63	1800	1200	600	75.55
6	415	51.66	1200	800	400	50.37	420	52.28	2000	1200	800	100.74
7	420	52.28	1600	800	800	100.74	430	53.53	2000	1200	800	100.74
8	410	51.04	1400	800	600	75.55	410	51.04	2000	1200	800	100.74
9	430	53.53	1600	800	800	100.74	415	51.66	2000	1200	800	100.74
10	400	49.80	1400	800	600	75.55	420	52.28	2000	1200	800	100.74
11	610	75.94	1600	800	800	100.74	640	79.67	2200	1200	1000	125.92
12	620	77.18	1600	800	800	100.74	620	77.18	2200	1200	1000	125.92
13	630	78.43	1600	800	800	100.74	610	75.94	2200	1200	1000	125.92

ช.1(ต่อ) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ของตัวกลางประเภทดินไบก้ามปูและดินสีดา ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ดินไบก้ามปู (C1)						ดินสีดา(C2)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
14	615	76.56	1600	800	800	100.74	615	76.56	2400	1200	1200	151.10
15	630	78.43	1600	800	800	100.74	610	75.94	2200	1200	1000	125.92
16	810	100.84	1800	800	1000	125.92	815	101.46	2000	1200	800	100.74
17	830	103.33	1800	800	1000	125.92	820	102.08	2000	1200	800	100.74
18	850	105.81	1800	800	1000	125.92	840	104.57	2200	1200	1000	125.92
19	830	103.33	2000	800	1200	151.10	850	105.81	2200	1200	1000	125.92
20	825	102.70	1800	800	1000	125.92	830	103.33	2400	1200	1200	151.10
21	1080	134.45	2000	800	1200	151.10	1100	136.94	2400	1200	1200	151.10
22	1100	136.94	2000	800	1200	151.10	1050	130.71	2000	1200	800	100.74
23	1050	130.71	1900	800	1100	138.51	1070	133.20	2000	1200	800	100.74
24	1040	129.47	1800	800	1000	125.92	1030	128.22	2000	1200	800	100.74
25	1080	134.45	2000	800	1200	151.10	1020	126.98	2000	1200	800	100.74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช.1(ต่อ) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและจี้บ ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

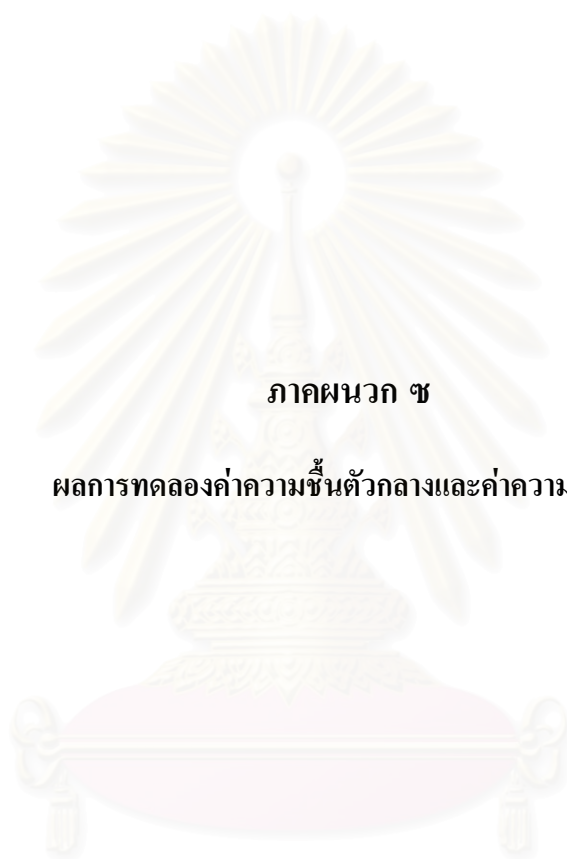
Date	ปุ๋ยหมัก(C3)						จี้บ(C4)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
1	210	26.14	1600	1200	400	50.37	210	26.14	1600	1200	400	50.37
2	230	28.63	1600	1200	400	50.37	225	28.01	1600	1200	400	50.37
3	220	27.39	1600	1200	400	50.37	230	28.63	1400	1200	200	25.18
4	210	26.14	1600	1200	400	50.37	220	27.39	1600	1200	400	50.37
5	220	27.39	1600	1200	400	50.37	250	31.12	1600	1200	400	50.37
6	410	51.04	2000	1200	800	100.74	430	53.53	1800	1200	600	75.55
7	420	52.28	2200	1200	1000	125.92	420	52.28	1800	1200	600	75.55
8	420	52.28	2000	1200	800	100.74	415	51.66	1800	1200	600	75.55
9	430	53.53	2000	1200	800	100.74	410	51.04	1800	1200	600	75.55
10	415	51.66	2200	1200	1000	125.92	450	56.02	1600	1200	400	50.37
11	620	77.18	2200	1200	1000	125.92	630	78.43	2200	1200	1000	125.92
12	630	78.43	2200	1200	1000	125.92	640	79.67	2000	1200	800	100.74
13	620	77.18	2000	1200	800	100.74	610	75.94	1800	1200	600	75.55

ช.1(ต่อ) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและขี้กบ ที่อัตราไหลอากาศ 4.0 ลิตรต่อนาที

Date	ปุ๋ยหมัก(C3)						ขี้กบ(C4)					
	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading	ACE Conc.	ACE Loading	CO <sub>2</sub> Measured	CO <sub>2</sub> Initial	CO <sub>2</sub> Produced	CO <sub>2</sub> Loading
	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr	ppmv	ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup> -hr
14	610	75.94	2000	1200	800	100.74	630	78.43	1800	1200	600	75.55
15	620	77.18	2200	1200	1000	125.92	625	77.81	2000	1200	800	100.74
16	820	102.08	2400	1200	1200	151.10	830	103.33	2000	1200	800	100.74
17	850	105.81	2600	1200	1400	176.29	810	100.84	2200	1200	1000	125.92
18	840	104.57	2600	1200	1400	176.29	850	105.81	2200	1200	1000	125.92
19	830	103.33	2600	1200	1400	176.29	820	102.08	2000	1200	800	100.74
20	825	102.70	2400	1200	1200	151.10	840	104.57	2200	1200	1000	125.92
21	1050	130.71	2800	1200	1600	201.47	1100	136.94	2400	1200	1200	151.10
22	1070	133.20	2600	1200	1400	176.29	1070	133.20	2200	1200	1000	125.92
23	1050	130.71	2800	1200	1600	201.47	1050	130.71	2400	1200	1200	151.10
24	1040	129.47	2800	1200	1600	201.47	1060	131.96	2200	1200	1000	125.92
25	1100	136.94	2800	1200	1600	201.47	1050	130.71	2200	1200	1000	125.92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ซ

ผลการทดลองค่าความชื้นตัวกลางและค่าความดันสด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซ.1 ผลการทดสอบค่าความชื้น

Date	Moisture Content (%)											
	ดินใบก้ามปู			ดินสีดา			ปุ๋ยหมัก			จี้กบ		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
1	45	50	60	50	50	60	50	57	60	50	60	60
3	42	55	60	45	47	60	45	50	55	50	53	60
5	50	53	50	50	50	55	50	55	60	55	57	60
7	47	50	50	50	45	60	50	50	55	50	55	55
9	45	45	50	45	45	50	45	45	50	50	50	50
11	50	55	60	50	50	55	50	55	60	55	60	60
13	53	50	57	50	53	50	45	50	55	57	55	53
15	45	45	50	45	45	50	45	45	50	50	55	45
17	40	45	50	40	45	50	40	45	50	45	50	45
19	40	40	45	40	40	45	40	45	45	40	45	50
21	50	50	55	50	55	60	55	60	65	50	50	50
23	50	50	50	40	50	50	50	50	55	45	45	55
25	45	45	45	40	45	45	45	45	50	45	40	50
27	40	45	45	35	40	40	40	40	45	40	40	50
29	35	40	40	40	45	45	45	50	55	45	45	45
31	45	45	50	45	50	50	50	50	55	50	50	55
33	40	40	45	40	45	45	45	40	50	40	45	45
35	37	35	40	35	35	45	40	40	45	40	45	45
37	40	43	45	40	45	40	35	35	40	30	40	40
39	40	40	45	40	40	40	45	40	45	50	45	50
41	45	50	55	50	55	60	50	55	55	45	55	55
43	40	45	50	40	45	50	45	50	50	40	45	50
45	40	40	45	40	40	45	40	40	45	40	40	45
47	35	40	45	40	40	45	40	40	45	35	40	45
49	40	40	40	35	35	40	40	40	40	45	45	50
51	50	60	65	55	60	65	50	55	60	55	60	70

## ช.1(ต่อ) ผลการทดสอบค่าความชื้น

Date	Moisture Content (%)											
	ดินใบก้ามปู			ดินสีดา			ปุ๋ยหมัก			ซีกบ		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
53	50	55	55	50	55	65	40	60	70	50	65	70
55	45	60	60	35	50	70	40	55	60	40	60	65
57	45	55	60	50	55	60	45	50	55	45	50	60
59	40	50	52	45	50	53	40	47	50	50	52	63
61	40	55	60	42	47	50	43	50	57	43	50	63
63	40	43	55	45	47	53	45	47	55	45	45	57
65	37	40	50	42	45	50	40	47	53	40	40	53
67	33	37	45	40	40	43	35	45	45	37	37	45
69	40	45	42	35	37	40	35	43	40	30	35	40
71	45	43	50	47	53	57	45	55	60	45	53	55
73	47	50	55	42	45	55	40	52	57	40	45	50
75	40	47	53	40	42	50	40	53	55	43	40	45
77	33	40	45	37	40	43	35	47	53	45	43	45
79	45	55	60	50	55	60	45	50	55	45	50	60
81	40	50	52	45	50	53	40	47	50	50	52	63
83	40	55	60	42	47	50	43	50	57	43	50	63
85	33	37	45	40	40	43	35	45	45	37	37	45
87	40	45	42	35	37	40	35	43	40	30	35	40
89	45	43	50	47	53	57	45	55	60	45	53	55
91	47	50	55	42	45	55	40	52	57	40	45	50
93	35	40	45	40	40	45	40	40	45	35	40	45
95	40	40	40	35	35	40	40	40	40	45	45	50

ช.2 ค่าความดันลดของตัวกลางประเภทดินใบก้ามปูและดินสิดา

วัน	ดินใบก้ามปู (C1)						ดินสิดา (C2)					
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	0	1	1	2	3	3	9	11	13	14	18	18
4	2	3	3	4	6	8	9	11	13	16	18	19
9	1	3	5	6	6	6	14	19	23	26	26	28
12	1	3	4	5	6	6	33	38	38	39	39	40
17	3	5	6	6	6	7	30	33	37	39	39	40
21	6	8	8		8	10	34	36	38	40	40	40
25	9	9	10	10	11	11	36	38	42	42	42	42
31	9	11	11	12	13	13	23	24	25	25	26	26
35	9	11	11	11	11	11	25	26	28	31	32	34
40	4	8	10	10	11	11	24	26	28	30	30	31
45	6	8	10	11	11	11	22	28	30	36	36	38
50	6	8	8	10	11	13	25	28	30	35	38	40
55	5	7	8	11	11	14	25	29	31	35	38	40
60	5	7	7	11	13	15	24	28	31	36	40	42
65	5	7	7	9	11	14	25	29	32	36	40	42
70	5	6	8	11	14	16	26	30	31	37	41	44
75	5	6	8	11	14	16	26	31	31	35	45	50
80	5	6	9	13	15	18	27	31	33	38	48	57
85	5	7	10	14	17	20	27	32	37	42	50	54
90	6	10	15	20	23	25	27	33	37	45	52	59
95	10	13	15	20	23	27	28	35	40	47	54	61
100	10	13	17	23	27	31	30	37	45	50	57	68

ซ.2(ต่อ) ค่าความดันลดของตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและจี้กบ

วัน	ปุ๋ยหมัก (C3)						จี้กบ (C4)					
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	3	3	3
4	0	1	1	1	1	2	0	0	1	1	1	1
9	1	2	3	4	4	5	1	2	3	3	3	4
12	1	2	3	3	3	3	1	1	1	2	2	3
17	1	2	3	3	4	4	1	1	1	2	2	3
21	2	2	2	3	3	4	1	2	2	2	2	3
25	3	3	3	3	4	4	1	2	2	2	3	3
31	1	1	2	2	2	3	0	0	0	0	1	1
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	1	1
45	1	1	2	4	4	4	0	0	0	0	1	1
50	1	2	3	3	5	9	0	0	0	1	1	2
55	1	2	3	4	6	9	0	0	0	1	2	4
60	1	2	3	4	7	11	0	0	0	1	3	5
65	1	2	3	4	7	11	0	0	1	3	5	6
70	2	3	6	4	8	13	0	0	1	3	5	6
75	2	3	6	5	9	13	0	1	1	3	5	8
80	2	3	6	5	9	14	0	1	1	3	7	11
85	2	4	6	5	11	15	0	1	2	5	7	12
90	2	4	7	6	13	17	0	1	3	5	11	15
95	2	4	7	7	15	20	1	2	5	7	13	17
100	2	4	7	11	17	20	1	2	7	11	15	21



**ภาคผนวก ฅ**

**ผลการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีไอช**

**สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

ฉ.1 ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีเอช

Date	Relative Humidity (%)				pH											
	C1	C2	C3	C4	ดินใบก้ามปู(C1)			ดินสีดา(C2)			ปุ๋ยหมัก(C3)			ขี้กบ(C4)		
					บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
1	70	73	70	70	7.4	7.5	7.2	7.0	7.0	6.9	7.2	7.2	7.2	6.8	6.8	6.8
3	70	70	75	70	7.4	7.5	7.2	7.0	7.0	7.0	7.2	7.2	7.2	6.8	6.8	6.8
5	73	78	75	75	7.4	7.5	7.2	7.0	7.0	7.0	7.2	7.2	7.2	6.8	6.9	6.8
7	80	75	75	80	7.4	7.5	7.2	6.9	7.0	7.0	7.2	7.2	7.1	6.8	6.8	6.8
9	77	80	75	75	7.4	7.5	7.2	6.9	7.0	7.0	7.2	7.2	7.1	6.9	6.8	6.9
11	80	73	78	75	7.4	7.5	7.2	6.9	7.0	7.0	7.2	7.0	7.1	6.9	6.9	6.8
13	78	75	80	80	7.4	7.5	7.2	7.0	7.0	7.0	7.2	7.0	7.0	6.9	6.9	6.9
15	82	78	75	74	7.4	7.5	7.2	6.9	7.0	7.0	7.2	7.0	7.0	6.9	6.9	6.9
17	80	80	78	75	7.4	7.5	7.2	7.0	7.0	6.9	7.2	7.0	7.0	6.6	6.9	6.7
19	80	80	77	79	7.2	7.2	7.0	6.8	7.0	6.8	7.2	7.0	7.1	6.7	6.9	6.8
21	78	85	82	84	7.2	7.2	7.0	6.9	7.0	7.0	7.2	7.0	7.0	6.8	6.7	6.8
23	82	80	76	80	7.2	7.2	7.0	6.7	6.8	6.8	7.0	7.0	7.0	6.8	6.7	6.8
25	74	72	70	72	7.2	7.2	7.0	6.8	6.8	6.8	7.0	7.0	7.0	6.8	6.7	6.8
27	70	72	70	73	7.2	7.2	7.0	6.8	6.8	6.5	7.0	7.0	7.0	6.8	6.7	6.8

ฉ.1(ต่อ) ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีเอช

Date	Relative Humidity (%)				pH											
	C1	C2	C3	C4	ดินใบก้ามปู(C1)			ดินสีดา(C2)			ปุ๋ยหมัก(C3)			ขี้กบ(C4)		
					บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
29	73	75	75	72	7.2	7.2	7.0	6.8	6.8	6.7	7.0	7.0	7.0	6.8	6.7	6.8
31	75	75	73	70	7.2	7.2	7.0	6.7	6.7	6.6	7.0	6.8	6.9	6.7	6.6	6.6
33	78	75	77	80	7.2	7.2	7.0	6.8	6.7	6.7	7.0	6.8	6.9	6.7	6.6	6.6
35	75	73	76	77	7.2	7.2	7.0	6.8	6.7	6.7	7.0	6.8	6.9	6.7	6.6	6.6
37	75	76	77	75	7.2	7.2	7.0	6.7	6.6	6.7	7.0	6.8	6.9	6.7	6.6	6.6
39	80	78	75	80	7.2	7.2	7.0	6.8	6.7	6.7	7.0	6.8	6.9	6.7	6.6	6.6
41	78	80	75	78	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.7	7.0	6.8	6.9	6.6		6.6
43	76	75	78	82	7.0	7.0	7.0	6.7	6.7	6.6	7.0	6.8	6.9	6.7	6.7	6.6
45	80	75	76	84	7.0	7.0	7.0	6.8	6.8	6.6	7.0	6.8	6.9	6.6	6.6	6.6
47	78	76	77	78	7.0	7.0	7.0	6.6	6.7	6.6	7.0	6.8	6.9	6.6	6.7	6.5
49	80	79	81	82	7.0	7.0	7.0	6.8	6.5	6.6	7.0	6.8	6.9	6.6	6.7	6.5
51	72	76	80	79	7.0	7.0	7.0	6.8	6.6	6.6	7.0	6.8	6.9	6.6	6.7	6.5
53	75	75	74	78	7.0	7.0	7.0	6.8	6.6	6.7	7.0	6.8	6.9	6.6	6.7	6.5
55	78	75	75	75	7.0	7.0	7.0	6.8	6.7	6.6	7.0	6.8	6.9		6.7	6.5



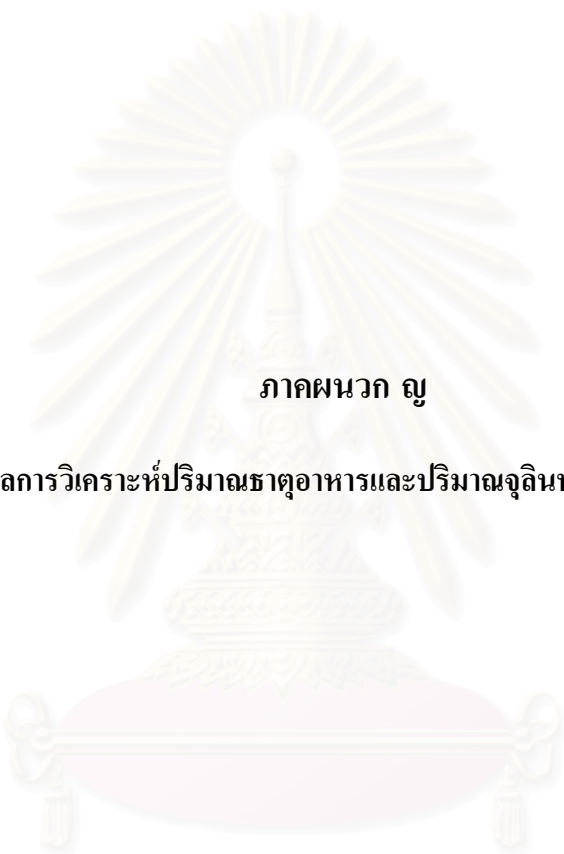
ฉ.1(ต่อ) ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีเอช

Date	Relative Humidity (%)				pH											
	C1	C2	C3	C4	ดินใบก้ามปู(C1)			ดินสีดา(C2)			ปุ๋ยหมัก(C3)			ขี้กบ(C4)		
					บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
57	73	79	77	78	7.0	7.0	7.0	6.6	6.8	6.7	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
59	78	75	75	75	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
61	82	84	85	81	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
63	80	78	75	81	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
65	82	80	85	80	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
67	78	80	80	84	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
69	81	82	80	83	7.0	7.0	7.0	6.7	6.8	6.5	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
71	76	78	75	77	7.0	6.9	6.8	6.7	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
73	80	84	85	80	7.0	6.9	6.8	6.7	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.6	6.7	6.5
75	85	85	80	86	7.0	6.9	6.8	6.7	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6	6.4
77	87	83	85	90	7.0	6.9	6.8	6.7	6.8	6.5	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6	6.4
79	85	83	83	86	7.0	6.9	6.8	6.7	6.8	6.5	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6	6.4
81	80	87	85	82	7.0	6.9	6.8	6.6	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6	6.4
83	78	80	82	83	7.0	6.9	6.8	6.6	6.8	6.6	6.8	6.8	7.0	6.4	6.6	6.4

ฉ.1(ต่อ) ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์อากาศและพีเอช

Date	Relative Humidity (%)				pH											
	C1	C2	C3	C4	ดินใบก้ามปู(C1)			ดินสีดา(C2)			ปุ๋ยหมัก(C3)			ขี้กบ(C4)		
					บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
85	80	82	85	78	7.0	6.9	6.8	6.5	6.6	6.5	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4
87	83	82	81	85	7.0	6.9	6.8	6.5	6.6	6.6	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4
89	85	83	81	82	7.0	6.9	6.8	6.6	6.5	6.5	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4
91	80	83	84	86	7.0	6.9	6.8	6.6	6.5	6.7	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4
93	84	86	87	80	7.0	6.9	6.8	6.6	6.6	6.5	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4
95	80	82	78	80	7.0	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.8	6.8	6.8	6.4	6.6	6.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ญ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานเลขที่ F80

Report No.

วันที่เสนอรายงาน 27/4/48

Date of report:

วันที่ส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ 20/4/48

Date of sample submitted:



# ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

แผ่นที่ 1

Sheet No.

ผู้ทำการวิเคราะห์ นายสมชาย กริฑาภิรมย์ และคณะ  
ผู้ทำการตรวจสอบ ดร.สุเทพ ทองแพ

ตัวอย่างของ คุณจิรวัดณี กั้นพันธ์

Sample submitted by:

ตัวอย่างจาก ตำบล

อำเภอ

จังหวัด

Sample No.	Laboratory No.	Total-N %	Total-P %	Total-K %
ตัวอย่าง 1 ดินใบก้ามปู	F80-1	2.59	0.10	0.64
ตัวอย่าง 2 ดินสีดา	-2	0.18	0.08	0.66
ตัวอย่าง 3 ปุ๋ยหมัก	-3	2.77	1.08	0.29
ตัวอย่าง 4 ปุ๋ยคอก	-4	2.21	0.76	0.96

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Department of Microbiology  
 Faculty of Science  
 Chulalongkorn University  
 Bangkok 10330, Thailand

Attention to:

Mr. Jirawat Kanpayan  
 Department of Environmental  
 Faculty of Engineering  
 Chulalongkorn University  
 Bangkok 10330

Date: April 4, 2005

Subject: Total plate count

Date sample received: March 28, 2005

Sample description: Soil NO. 1, 2, 3, 4

Method : Spread plate method

Report : Showed on table

Sample	Total Plate Count (CFU/gram)
I. ดินร่วน	$4.4 \times 10^6$
II. ดินสีดา	$9.1 \times 10^6$
III. ปุ๋ยหมัก	$5.5 \times 10^6$
IV. เศษไม้	$4.7 \times 10^6$

Note :

CFU = Colony Forming Unit

*T. Singhaboonpong*  
 (Thanit Singhaboonpong, B.Sc.)  
 Experimentalist

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรวัดน์ ก้นพยนต์ เกิดวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดชุมพร โดยสำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2543 เข้าทำงานบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา เมื่อ พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ.2546 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546 จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย