

การพัฒนาตัวกรองชีวภาพสำหรับสลายไอน์ของไดเบนซิฟูแรน



นายไพฑูรย์ ทวีรุจิโรจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF BIOFILTER FOR DEGRADATION OF DIBENZOFURAN VAPOR

Mr. Paitoon Thaveeruchiroj

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Industrial Microbiology

Department of Microbiology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาตัวกรองชีวภาพสำหรับสลายไอของไดเบนไซฟูแรน

โดย

นายไพฑูรย์ ทวีรุจิโรจน์

สาขาวิชา

จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไขษิตานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ ธนียวัน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไขษิตานนท์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา จันทร์ทองจิ้น)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปาหนัน เจริญสำราญ)

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพฑูรย์ ทวีรุจิโรจน์: การพัฒนาตัวกรองชีวภาพสำหรับสลายไอของไดเบนโซฟูแรน. (DEVELOPMENT OF BIOFILTER FOR DEGRADATION OF DIBENZOFURAN VAPOR) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการเจริญและย่อยสี Remazol Brilliant Blue R (RBBR) ของรา จำนวน 8 สายพันธุ์ โดยเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Czapek Dox และ mineral medium ที่เติมสี RBBR พบว่ารา *Phanerochaete sordida* (CK1), *Phanerochaete ericina* (CK2) และ *Athelia pellicularis* (T3) มีความสามารถในการเจริญและย่อยสี RBBR ได้ดีที่สุด ราเหล่านี้สามารถเจริญได้บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และ mineral medium รา T3 สามารถย่อยสลายไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนได้ดีที่สุดคือ 64 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนระหว่างขุยมะพร้าวต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเหลว 1 ต่อ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร

เมื่อใช้ตัวกรองอากาศชีวภาพซึ่งทำด้วยท่ออะคลิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.0 เซนติเมตร ความสูง 2 เมตร และใช้ขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox เป็นตัวกลาง โดยศึกษาเป็นเวลา 6 วัน ควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบที่แท้จริงเป็น 0.337 ลิตรต่อนาที ทำให้มีระยะเวลาที่ไอระเหยของ ไดเบนโซฟูแรนสัมผัสกับตัวกลาง 595 วินาที พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนมีค่าไม่เกิน 24 ppmv ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด 75 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนมีค่าสูงสุด 0.49 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....จุลชีววิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต.....ไพฑูรย์ ทวีรุจิโรจน์.....
สาขาวิชา.....จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....สุภัทรา โฆษิตานนท์.....
ปีการศึกษา.....2550.....

4772414823 : MAJOR INDUSTRIAL MICROBIOLOGY

KEY WORD: DIBENZOFURAN / BIOFILTRATION / BIODEGRADATION / WHITE ROT FUNGI

PAITON THAVEERUCHIROJ: DEVELOPMENT OF BIOFILTER FOR DEGRADATION OF DIBENZOFURAN VAPOR. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D., 104 pp.

Eight strains of white rot fungi were tested for their ability of growth and Remazol Brilliant Blue R (RBBR) decolorization in double layers agar of Czapek Dox and malt extract agar, and mineral salts medium (MM) contained RBBR. Among these strains, *Phanerochaete sordida* (CK1), *Phanerochaete ericina* (CK2) and *Athelia pellicularis* (T3) showed the highest growth rate and RBBR decolorization ability. The fungi grew well on the ground coconut coir with either Czapek Dox or mineral medium. For dibenzofuran degradation ability, T3 showed the highest dibenzofuran degradation ability (64%) by using medium:ground coconut coir ratio of 1:10 w/v.

Bench-scale biofilter was constructed for studying dibenzofuran removal from dibenzofuran vapor stream with T3 grown on the biofilter medium. Biofiltration of dibenzofuran vapor was carried out for 6 days at constant flow rate of 0.337 l/min and the contact time of 595 seconds. At the inlet concentration not exceed 24 ppmv, the maximum removal efficiency (RE) of 75% was observed. The maximum elimination capacity (EC_{max}) obtained from this study was 0.49 g/m³/hr.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Microbiology.....Student's signature.....Paiton Thaveeruchiroj.....
Field of study.....Industrial Microbiology....Advisor's signature.....C. Kositanont.....
Academic year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไขษิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา-คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆ ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนได้กรุณาปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น รวมถึงกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ ฐนิยวัน ที่กรุณารับเป็นประธาน ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา จันทองจิ้น และอาจารย์ ดร. ปาหนัน เรืองสำราญ ที่กรุณารับเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ คำปรึกษา-คำแนะนำ และกำลังใจ ตลอดจนปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาจุลชีววิทยาทุกท่าน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาจุลชีววิทยาที่กรุณาอำนวยความสะดวกและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้อุดหนุนวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความสะดวกต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ปัทมาพร ประชุมรัตน์ พี่กิตติภัทร ลิ้มประเสริฐ พี่กรรณทิมา สระอุบล พี่จันทรนาถ พลขำนิ พี่เอกนรินทร์ คุณปิยรัตน์ หมื่นศรีชัย ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา-คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา และขอบคุณน้องๆ ที่ห้อง 453 ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนบนภาควิชาจุลชีววิทยาแห่งนี้ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและญาติๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ประวัติความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทัศนวิสัยวรรณกรรม.....	
2.1 สารไดออกซิน.....	4
2.2 การศึกษาเกี่ยวกับการคัดแยกจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารกลุ่มไดออกซิน....	14
2.3 การกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหย.....	20
2.4 การกำจัดสารมลพิษโดยระบบการกรองด้วยตัวกลางชีวภาพ.....	23
2.5 การศึกษาเกี่ยวกับตัวกรองชีวภาพ.....	33
3. อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินการทดลอง.....	
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 เคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	43
4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	
4.1 ราชที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
4.2 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญและย่อยสลาย RBBR ในอาหาร เลี้ยงแข็ง.....	48

บทที่

4.3 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญบนขุยมะพร้าว.....	57
4.4 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายไคเบนโซฟูแรนในระดับขวด ทดลอง.....	62
4.5 การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของไคเบนโซฟู แรนในตัวกรองอากาศแบบ Bench Scale Biofilter.....	66
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	77
5.2 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก.....	90
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	95
ภาคผนวก ง.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	104

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	ค่า I-TEF ของไอโซเมอร์สารไดออกซิน.....	10
2.2	ความเป็นพิษของสาร 2,3,7,8-TCDD ในสัตว์ทดลอง.....	11
2.3	การจำแนกชนิดของระบบการกรองชีวภาพ (Biofiltration).....	24
2.4	ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษชนิดต่าง ๆ.....	32
3.1	ปัจจัย จุดตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้วัด.....	46
4.1	ราคาที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
5.1	ผลการทดลองบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟิวแรนด้วยตัวกรองอากาศชีวภาพ.....	78



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างของ (1) dibenzo-p-dioxin และ (2) dibenzofuran.....	4
2.2	สูตรโครงสร้างของ 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin.....	5
2.3	ปริมาณสารไดออกซินที่คนในทวีปอเมริกาเหนือได้รับในแต่ละวัน.....	9
2.4	โครงสร้างของ Remazol Brilliant Blue R.....	13
2.5	สารมัธยันตรที่ เกิดจากการย่อยสลายสาร 2,7-DCDD (A) และ 2,7-DCDF (B)	19
2.6	เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารมลพิษตามช่วงความเข้มข้นและช่วงอัตราการไหลของก๊าซต่าง ๆ กัน.....	22
2.7	ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพ.....	24
2.8	ลักษณะของ Biotrickling Filter	25
2.9	ลักษณะของ Bioscrubber	26
2.10	การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ.....	27
2.11	การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา และการขนส่ง (transport) ภายในเครื่องกรองชีวภาพ.....	27
2.12	กลไกโดยรวมภายในเครื่องกรองชีวภาพ.....	28
3.1	Bench Scale Biofilter	46
4.1	ความสามารถในการเจริญของราบนอาหารแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox- malt extract ที่เติมสี่ RBBR.....	49
4.2	ความสามารถในการย่อยสี่ของราบนอาหารแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox- malt extract ที่เติมสี่ RBBR.....	50
4.3	การย่อยสี่ RBBR บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Czapek Dox-malt extract ของรา T3 และ N2.....	50
4.4	เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการย่อยสี่ RBBR ของรา CK1, CK2 และ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox- malt extract ที่เติมสี่ RBBR.....	52
4.5	ความสามารถในการเจริญของราบนอาหารแข็ง Mineral Medium ที่เติมสี่ RBBR.....	53

รูปที่	หน้า
4.6 ความสามารถในการย่อยสลายของราบนอาหารแข็ง Mineral Medium ที่เติมสี RBBR.....	54
4.7 การย่อยสลาย RBBR บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral medium ของรา T3 และ N2.....	54
4.8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการย่อยสลาย RBBR ของรา CK1, CK2 และ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral Medium ที่เติมสี RBBR.....	56
4.9 ความสามารถในการเจริญของราบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox.....	58
4.10 ความสามารถในการเจริญของราบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium.....	60
4.11 เปรียบเทียบการเจริญของรา CK1, CK2 และ T3 บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium.....	62
4.12 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนโดยรา CK1 เมื่อเลี้ยงบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ.....	63
4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนโดยรา CK2 เมื่อเลี้ยงบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ.....	64
4.14 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนโดยรา T3 เมื่อเลี้ยงบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ.....	65
4.15 ความสามารถในการดูดซับไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนของตัวกลางในชุดกรองชีวภาพชุดควบคุม.....	67
4.16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศที่เข้าและออกจากตัวกรองอากาศชีวภาพ	69
4.17 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าและออกจากตัวกรองอากาศชีวภาพ.....	70
4.18 ความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนในระบบ.....	72
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนและประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของไดเบนซิฟูแรน.....	74
4.20 ความสามารถในการบำบัดไอระเหยของไดเบนซิฟูแรนของระบบ.....	75

รูปที่	หน้า	
ง-1	Mass Spectrum ของไดเบนไซฟูแรนจากผลการทดลองที่ 4.4 เมื่อเลี้ยงรา T3 ในขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1ต่อ 10.....	98
ง-2	เปรียบเทียบ Mass Spectrum ในรูปที่ ง-1 กับฐานข้อมูล.....	99
ง-3	Mass Spectrum ของไดเบนไซฟูแรนจากผลการทดลองที่ 4.4 เมื่อเลี้ยงรา T3 ในขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral medium อัตราส่วน 1ต่อ 10.....	100
ง-4	เปรียบเทียบ Mass Spectrum ในรูปที่ ง-3 กับฐานข้อมูล.....	101
ง-5	Chromatogram และ Mass Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของได เบนไซฟูแรนที่จุดเข้าระบบด้วย GC-MS.....	102
ง-6	Chromatogram และ Mass Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของได เบนไซฟูแรนที่จุดออกกระบบด้วย GC-MS.....	103

คำย่อ

DD	=	dibenzo- <i>p</i> -dioxin
DF	=	dibenzofuran
CDD	=	chlorodibenzo- <i>p</i> -dioxin
CDF	=	chlorodibenzofuran
DCDD	=	dichlorodibenzo- <i>p</i> -dioxin
DCDF	=	dichlorodibenzofuran
TCDD	=	tetrachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxin
PCDDs	=	polychlorinated dibenzo- <i>p</i> -dioxins
PCDFs	=	polychlorinated dibenzofurans
RBBR	=	Remazol Brilliant Blue R
MM	=	Mineral Salt Medium
w/v	=	น้ำหนักต่อปริมาตร
GC-MS	=	Gas chromatography-Mass spectrophotometer
RE	=	Removal Efficiency
EC	=	Elimination Capacity
EC _{max}	=	Maximum Elimination Capacity
EBRT	=	Empty Bed Residence Time
g/m ³ /hr	=	กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
g/m ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
m ³ /hr	=	ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
ng/ml	=	นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมา

การพัฒนาของประเทศไทยทั้งในด้านการคมนาคมที่มีการใช้เชื้อเพลิง และการขยายตัวของอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารเคมีจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไดออกซินที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นผลที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้คลอรีนในกระบวนการผลิต อาทิ โรงงานผลิตพลาสติกจำพวก PVC ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก โรงงานผลิตกระดาษที่ใช้คลอรีนและสารประกอบคลอรีนในกระบวนการฟอกกระดาษ ซึ่งสารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับลิกนินในเยื่อไม้เกิดเป็นสารไดออกซินขึ้น ทั้งยังเกิดจากโรงงานผลิตสารเคมีพวกคลอรีเนต เช่น phenols และ PCBs เป็นต้น ไดออกซินยังอาจเกิดได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันหรือถ่านหิน และสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของไดออกซินสู่สิ่งแวดล้อมได้มากที่สุด คือ การเผาไหม้ขยะที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ไดออกซินยังสามารถเกิดได้จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด รวมทั้งการเกิดไฟฟ้าได้ด้วย (สิริกุล วัฒนานนท์กิจ, 2546) สารไดออกซินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin (PCDDs) และ polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) สารไดออกซินที่มีความสำคัญซึ่งมีความเป็นพิษร้ายแรงที่สุดคือ 2,3,7,8-tetrachloro dibenzo-*p*-dioxin (2,3,7,8-TCDD) สารไดออกซินมีความคงตัวยาวนานในสิ่งแวดล้อม ละลายน้ำได้น้อย แต่ละลายในไขมันได้ดี ดังนั้นหากมีการปนเปื้อนทั้งในดิน น้ำและอากาศ หรือปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ก็สามารถที่จะแพร่เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้

การย่อยสลายสารไดออกซินโดยจุลินทรีย์พบได้ทั้งในแบคทีเรีย รา และยีสต์ แต่ที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางที่สุดคือแบคทีเรีย เนื่องจากแบคทีเรียมีความสามารถในการย่อยสลายสารได้เร็วและสามารถคัดแยกเชื้อได้ง่ายกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น แต่เมื่อมีการศึกษาถึงวิถีการย่อยสลายสารไดออกซินของแบคทีเรีย พบว่าการย่อยสลายสารประกอบที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ สารผลิตภัณฑ์บางอย่างที่ได้มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นจึงมีการสนใจศึกษาการย่อยสลายสารไดออกซินโดยรา จากการศึกษพบว่ารามีความสามารถในการย่อยสลายสารไดออกซินได้สมบูรณ์กว่าการย่อยโดยแบคทีเรีย และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ก็ไม่มีความเป็นพิษเหมือนในแบคทีเรีย แต่จะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่า การศึกษาการย่อยสลายสารไดออกซินมักจะทำการศึกษาใน

สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับไดออกซินแต่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ เช่น สารประกอบไบฟีนิล (biphenyl) สารไดเบนโซฟูแรน (dibenzofuran) เป็นต้น

ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป รวมถึงโรงเผาขยะที่ได้มาตรฐาน จะมีการกำจัดไอของสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือเผาขยะ โดยใช้วิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับโดยใช้ตัวกลาง (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) การควบแน่น (Condensation) การเผาเป็นเถ้า (Incineration) รวมไปถึงการใช้ระบบเมมเบรน (Membrane system) ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถกำจัดสารมลพิษได้ดี แต่ก็มีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายสูง และในบางวิธีจำเป็นต้องนำของเสียไปกำจัดในภายหลัง

นอกจากวิธีข้างต้นแล้ว การบำบัดสารมลพิษทางอากาศโดยการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ (Biofiltration) ก็เป็นวิธีที่มีการศึกษาและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ทั้งยังให้ผลในการบำบัดที่ดี ในการทำงานของตัวกรองชีวภาพนี้ จะมีการผ่านไอของสารมลพิษเข้าสู่ตัวกรองชีวภาพ จากนั้นไอของสารมลพิษจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในตัวกลาง เมื่อสารมลพิษถูกบำบัดจนสิ้นสุดกระบวนการแล้ว จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุ (Williams และคณะ, 1992) ในการดำเนินระบบการกรองด้วยตัวกรองชีวภาพนั้น ตัวกลางเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ ตัวกลางที่ใช้ระบบมีทั้งตัวกลางอินทรีย์ (Organic) และตัวกลางอนินทรีย์ (Inorganic) สารเคมีที่บำบัดโดยวิธีนี้ได้ดี เช่น สารประกอบออกซิเจน (Oxygenated Compound) เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) อัลดีไฮด์ (Aldehyde) สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic Compound) เช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) และสารประกอบคลอรีน (Chlorinated Compound) เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นต้น

ในการศึกษาการย่อยสลายสารไดออกซินของราในเบื้องต้น จะใช้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็น analogue ของไดออกซิน เป็นแหล่งคาร์บอนในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการคัดแยกเชื้อจากดินตัวอย่าง และจากการศึกษาของ ปัทมาพร ประชุมรัตน์ (2546) ได้ทำการคัดแยกราที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารไดเบนโซฟูแรน พบว่าได้ร่าหลายชนิดที่มีความสามารถย่อยสลายไดเบนโซฟูแรนได้ดี งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารคล้ายไดออกซินของราแต่ละชนิด และนำร่าที่มีความสามารถสูงที่สุดในการศึกษามาสร้างเป็นตัวกรองอากาศต้นแบบเพื่อใช้ในการกำจัดไอระเหยของสารไดเบนโซฟูแรน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาเครื่องกรองชีวภาพโดยใช้ร่าที่คัดแยกได้จากดินเป็นแหล่งจุลินทรีย์
2. ศึกษาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการกำจัดไอระเหยของไดเบนโซฟูแรน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดสอบแอกติวิตีของราในการย่อยสลายสารที่มีลักษณะคล้ายไดออกซินโดยใช้ RBBR
2. ประเมินประสิทธิภาพเพื่อหาสายพันธุ์ที่ย่อยสลายสารไดเบนโซฟูแรนได้ดีที่สุด
3. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารไดเบนโซฟูแรน
4. สร้างตัวกรองอากาศ และประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดไดเบนโซฟูแรน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวกรองอากาศชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีราที่สามารถย่อยสลายไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนและสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาตัวกรองชีวภาพต่อไป



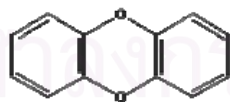
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 สารไดออกซิน

สารไดออกซินเป็นสารในกลุ่มสารประกอบคลอรีน (polychlorinated aromatic hydrocarbon) ที่โครงสร้างทางเคมีมีลักษณะเป็นวงแหวน 3 วง (Tricyclic member ring) โดยมีวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) 2 วง เชื่อมต่อกันด้วยอะตอมของออกซิเจน สารไดออกซินแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins (PCDDs) และ polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) สารทั้ง 2 กลุ่มนี้จะมีความแตกต่างตรงบริเวณเชื่อมต่อกันของวงแหวนเบนซีน กล่าวคือ ในสารกลุ่ม PCDDs นั้น วงแหวนเบนซีนทั้งสองจะเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอม ทำให้วงแหวนตรงกลางมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม ในขณะที่กลุ่ม PCDFs วงแหวนเบนซีนจะเชื่อมต่อกันผ่านออกซิเจนเพียงอะตอมเดียว ทำให้วงแหวนตรงกลางมีลักษณะเป็นห้าเหลี่ยม (วิทยา สังข์ทอง, 2545) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้อะตอมของไฮโดรเจนยังสามารถถูกแทนที่โดยอะตอมของคลอรีนและโบรมีนได้ตั้งแต่ 1-8 อะตอม และการแทนที่โดยอะตอมของคลอรีนนี้ ทำให้เกิดสารอนุพันธ์ (homologue)-ขึ้น สารในกลุ่ม dibenzo-*p*-dioxin และ dibenzofuran นี้สามารถเกิดสารอนุพันธ์ได้ 8 อนุพันธ์ตามจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกแทนที่โดยคลอรีนหรือโบรมีน (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) สารไดออกซินที่มีความเป็นพิษสูงที่สุดจะเกิดการแทนที่โดยอะตอมของคลอรีน 4 ตำแหน่งคือ 2,3,7,8-tetrachloro dibenzo-*p*-dioxin (2,3,7,8-TCDD) (World Health Organization, 1989) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

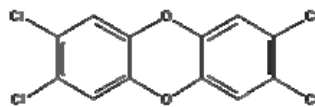


(1)



(2)

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ (1) dibenzo-*p*-dioxin และ (2) dibenzofuran



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของ 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin

2.1.1 สมบัติของ 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin

ชื่อสามัญ	TCDD
ชื่อเคมี	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxin หรือ 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo[b,e](1,4) dioxin
สูตรโมเลกุล	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂
น้ำหนักโมเลกุล	321.96
จุดหลอมเหลว	305-306 องศาเซลเซียส
ความดันไอ	7.40 x 10 ⁻¹⁰ มม.ปรอทที่ 25 องศาเซลเซียส
การละลาย	ละลายในน้ำ 1.9 x 10 ⁻⁵ มก./ลิตร ละลายใน methanol 10 มก./ลิตร ละลายใน acetone 110 มก./ลิตร ละลายใน benzene 570 มก./ลิตร
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึกสีขาวรูปเข็ม

2.1.2 ความคงตัวของสารไดออกซิน

ไดออกซินจัดเป็นสารเคมีที่มีความคงตัวสูงมาก แต่ก็ถูกทำลายได้ด้วยแสงแดด (photodegradation) โดยในภาวะปกติที่ไดออกซินไม่มีการสัมผัสแสงแดดหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะมีครึ่งชีวิต (half-life) นานประมาณ 10 ปี แต่ถ้าไดออกซินสัมผัสกับแสงแดดแล้วครึ่งชีวิตจะลดลงเหลือประมาณ 1-3 ปี นอกจากนี้ไดออกซินยังสามารถละลายได้ดีในไขมัน เมื่อผนวกกับการที่มีความคงตัวสูงแล้ว ไดออกซินจึงตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้นาน ทำให้เมื่อได้รับไดออกซินเข้าไปในร่างกายก็จะเกิดการสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดไปตามลำดับห่วงโซ่อาหารได้

ทั้งนี้มีการรายงานว่าสารไดออกซินที่สะสมในร่างกายมนุษย์มีครึ่งชีวิตเฉลี่ย 7.1 ปี (จากรูวรรณ วิริยะหิรัญไพบูลย์, 2542)

2.1.3 แหล่งกำเนิดของสารไดออกซิน

สารไดออกซินเกิดได้จากหลายแหล่ง ทั้งการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การเกิดจากการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ แต่ส่วนใหญ่ไดออกซินมักเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเกิดโดยกระบวนการที่ไม่ตั้งใจจากกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ ไดออกซินที่เป็นผลจากกระบวนการผลิตที่มีคลอรีนเข้ามาเกี่ยวข้อง การเผาขยะที่มีพลาสติกชนิดพีวีซี ซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในบางกรณีก็ทำให้มีไดออกซินเป็นผลพลอยได้ กรมควบคุมมลพิษได้จำแนกแหล่งการเกิดไดออกซินไว้ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542; จารูวรรณ วิริยะหิรัญไพบูลย์, 2542)

1. เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้คลอรีนในกระบวนการผลิต

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้คลอรีนหรือสารประกอบที่มีคลอรีนในกระบวนการผลิต ได้แก่ โรงงานผลิตและฟอกสีกระดาษ โรงงานโลหะ โรงงานผลิตสารรักษาเนื้อไม้ รวมถึงโรงเลื่อยไม้ ในโรงงานผลิตและฟอกสีกระดาษนั้น จะมีการใช้คลอรีนและสารประกอบคลอรีนในกระบวนการฟอกสีกระดาษ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับลิกนินในเยื่อไม้ทำให้เกิดไดออกซินขึ้นได้ ส่วนในโรงงานโลหะจะมีการใช้น้ำมันและตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบในการกลึงหรือตัดโลหะก็ทำให้เกิดไดออกซินได้เช่นกัน นอกจากนี้การผลิตสาร pentachlorophenol ซึ่งเป็นสารรักษาเนื้อไม้จากโรงงานผลิต และการใช้สารนี้ในโรงเลื่อยไม้ รวมถึงโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกและมีการใช้อุณหภูมิในการทำงานสูง ๆ ล้วนมีโอกาสเกิดไดออกซินได้ทั้งสิ้น

2. เกิดจากกระบวนการผลิตสารเคมีกลุ่ม chlorinated hydrocarbon

ไดออกซินอาจเกิดได้จากกระบวนการผลิตสารเคมีบางชนิด ซึ่งโดยมากได้แก่ สารประกอบคลอรีน (chlorinated hydrocarbon) หลาย ๆ ชนิด ได้แก่ สารรักษาเนื้อไม้ ยาฆ่าแมลง สารซักล้าง หรือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น pentachlorophenol, hexachlorobenzene และ polychlorinated biphenyls (PCBs) นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตสารเคมีอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่ไม่ก่อให้เกิดไดออกซินโดยตรง ก็อาจทำให้เกิดสารตั้งต้นของการเกิดไดออกซินขึ้นได้เช่นกัน

3. เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม และจากการคมนาคม ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดไดออกซินปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะการใช้น้ำมันเบนซินที่มีการเติมสารประกอบ tetraethyl lead จะมีการเติมสารประกอบคลอรีน 1,2-dichloroethane เพื่อกำจัดสารตะกั่ว ดังนั้นการใช้น้ำมันเบนซินชนิดนี้ถ้าเป็นแหล่งกำเนิดไดออกซินได้ด้วย นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินก็สามารถเกิดไดออกซินขึ้นได้เช่นกัน

4. เกิดจากการเผาขยะแบบไม่สมบูรณ์

เนื่องจากไดออกซินเป็นสารที่ทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ได้ ดังนั้นการเผาขยะที่มีสารอินทรีย์ และสารเคมีโดยเฉพาะสารที่มีวงแหวนเบนซีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดไดออกซินได้ แต่การเผาขยะดังกล่าวที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะทำให้ไดออกซินสลายตัวไปได้ นอกจากนี้ไดออกซินในธรรมชาติส่วนใหญ่ (95%) มาจากการเผาไหม้ขยะที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ

5. เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า (กฤษณา ชัชพงศ์, 2542)

2.1.4 การกระจายของไดออกซินสู่สิ่งแวดล้อม (สิริกุล วัฒนานนท์กิจ, 2546)

ไดออกซินสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทางขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด แต่ไม่ว่าจะแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยทางใดก็ตามก็จะมีการตกค้างและสะสมในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ทั้งสิ้น การกระจายของไดออกซินสู่สิ่งแวดล้อมอาจจำแนกได้ 4 ทาง ได้แก่ การกระจายลงสู่แหล่งน้ำ พื้นดิน อากาศ และการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. การกระจายลงสู่แหล่งน้ำ

ไดออกซินสามารถแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำได้จากหลายสาเหตุ ทั้งจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตและฟอกสีกระดาษและเยื่อกระดาษ โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมหนังและเส้นใย โรงงานผลิตสารรักษาเนื้อไม้ เป็นต้น การชะล้างจากบริเวณที่ปนเปื้อนไดออกซินหรือผลิตภัณฑ์ที่ปนเปื้อน เช่น การชะล้างจากบริเวณที่มีการใช้ยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช หรือการชะล้างจากบริเวณทิ้งกากของเสีย เป็นต้น นอกจากนี้การทิ้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลอรีนและน้ำทิ้งจากครัวเรือนก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการกระจายของไดออกซินได้เช่นกัน

2. การกระจายสู่พื้นดิน

ไดออกซินแพร่กระจายสู่พื้นดินได้หลายทาง กล่าวคือ การทิ้งไดออกซินหรือการทิ้งผลิตภัณฑ์ที่ปนเปื้อนไดออกซิน การใช้สารเคมีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไดออกซิน การสะสมของไดออกซินที่เกิดตามธรรมชาติตามพื้นดิน หรือการสะสมไดออกซินจากอากาศสู่พื้นดิน ซึ่งไดออกซินที่สะสมในพื้นดินนี้จะเข้าไปปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร (food chain) และเกิดการถ่ายทอดไปสู่พืชและสัตว์ตามลำดับขั้นต่อไป

3. การกระจายในอากาศ

การกระจายของไดออกซินในชั้นบรรยากาศอาจเกิดได้จาก 2 แหล่ง คือ แหล่งที่มีการปลดปล่อยไอระเหยของไดออกซินอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่คือโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ และแหล่งที่มีการปลดปล่อยไอระเหยของไดออกซินเป็นครั้งคราว เช่น การใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีไดออกซินหรือสารตั้งต้นของไดออกซินเจือปนอยู่ และเมื่อมีการกระจายของไดออกซินแล้วจะสามารถเคลื่อนย้ายไปไกลจากแหล่งกำเนิดได้มาก แหล่งกำเนิดไอระเหยของไดออกซิน เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง การปิ้งหรือย่าง โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ความร้อนสูง โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้คลอรีนหรือสารประกอบคลอรีน เป็นต้น

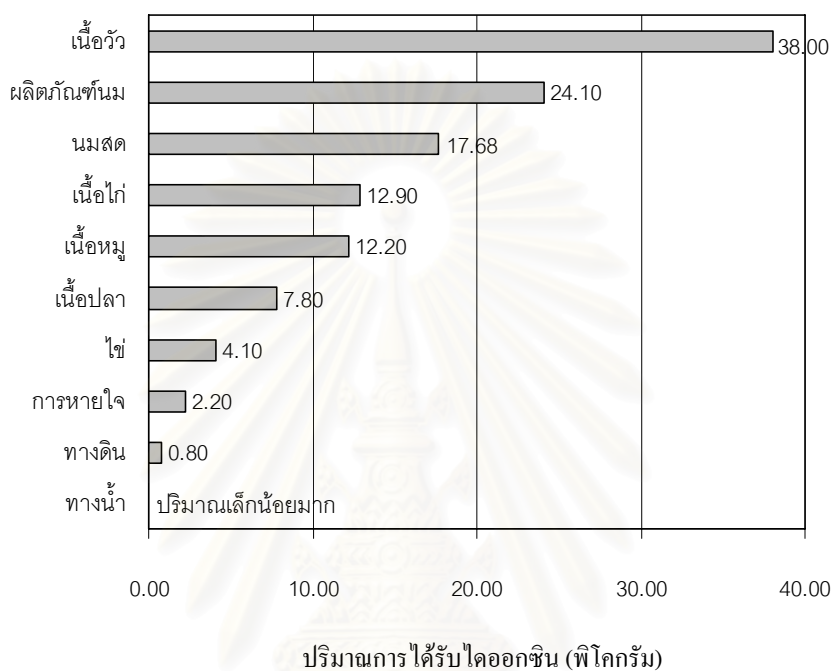
4. การปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่มีการปนเปื้อนไดออกซินส่วนใหญ่จะเป็นเป็นสารประกอบประเภทคลอรีนอินทรีย์ (Organochlorine) และผลิตภัณฑ์ที่ใช้คลอรีนในการผลิต เช่น กระดาษและเยื่อกระดาษ ผลิตภัณฑ์ที่มีการปนเปื้อนไดออกซินสูง ได้แก่ สารประกอบคลอรีน ฟีนอลและอนุพันธ์ เช่น pentachlorophenol (PCP), 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T) และ PCBs ที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า นอกจากนี้มีการศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณสาร PCDDs/PCDFs ในผลิตภัณฑ์เคมีและสิ่งทอหลายชนิด พบว่าสาร pentachlorophenol เป็นสารที่มีการปนเปื้อน PCDDs/PCDFs สูงมาก

2.1.5 การรับสารไดออกซินของมนุษย์ (สิริกุล วัฒนานนท์กิจ, 2546)

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ไดออกซินมีความใกล้ชิดกับชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก ดังนั้นการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์จึงมีโอกาสสัมผัสหรือได้รับไดออกซินได้หลายทาง ทั้งการสัมผัสทางผิวหนัง การหายใจ การบริโภค เมื่อรวมกับการที่ไดออกซินเป็นสารที่คงตัวสูงและละลายได้ดีในไขมัน จึงทำให้ไดออกซินเกิดการสะสมได้ในสิ่งมีชีวิตตามลำดับห่วงโซ่อาหาร

เมื่อมนุษย์บริโภคพืชและสัตว์ก็จะมีโอกาสได้รับไดออกซินเข้าสู่ร่างกาย ไดออกซินที่มนุษย์ได้รับมาจากอาหารที่รับประทานในแต่ละวันถึง 97.5 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณไดออกซินได้รับขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและปริมาณของไดออกซินที่สะสมอยู่ในอาหาร ตัวอย่างการได้รับไดออกซินของคนในทวีปอเมริกาเหนือ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปริมาณสารไดออกซินที่คนในทวีปอเมริกาเหนือได้รับในแต่ละวัน (สิริกุล วัฒนานนท์กิจ, 2546)

2.1.6 ความเป็นพิษของสารไดออกซิน

ไดออกซินเป็นกลุ่มของสารพิษที่มีได้หลายไอโซเมอร์ ความเป็นพิษของแต่ละไอโซเมอร์จะมีไม่เท่ากัน ไดออกซินที่มีความเป็นพิษมากที่สุดอยู่ในรูป 2,3,7,8-TCDD แต่การจะรายงานค่าความเป็นพิษของไดออกซินแต่ละไอโซเมอร์นั้นไม่สามารถระบุปริมาณเป็นการเฉพาะของแต่ละไอโซเมอร์ได้ ดังนั้น International Toxicity Equivalency Factors (I-TEF) จึงได้กำหนดค่าความเป็นพิษของไดออกซินแต่ละไอโซเมอร์ในรูปของความสัมพันธ์กับ 2,3,7,8-TCDD โดยกำหนดให้ค่าความเป็นพิษของ 2,3,7,8-TCDD มีค่าเท่ากับ 1 (วิทยา สังข์ทอง, 2545) ค่าความเป็นพิษของไดออกซินแต่ละไอโซเมอร์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า I-TEF ของสารไดออกซินแต่ละไอโซเมอร์

ไอโซเมอร์	ค่าความเป็นพิษ (I-TEF)
2,3,7,8-TetraCDD	1
1,2,3,7,8-PentaCDD	0.5
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0.1
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0.1
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0.01
OctaCDD	0.001
2,3,7,8-TetraCDF	0.1
1,2,3,7,8-PentaCDF	0.05
2,3,4,7,8-PentaCDF	0.5
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0.1
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0.1
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	0.1
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0.01
OctaCDF	0.001

ที่มา: สิริกุล วัฒนานนท์กิจ, 2546

สำนักงานวิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้จัดให้สาร 2,3,7,8-TCDD เป็นสารก่อมะเร็งประเภทที่ 1 นอกจากนี้มีการศึกษาทดลองความเป็นพิษของกลุ่มสารดังกล่าวโดยใช้สัตว์ทดลองหลายชนิด พบว่าความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของสาร 2,3,7,8-TCDD ในสัตว์ทดลอง

ความเป็นพิษ (ปริมาณที่ทำให้เกิด LD ₅₀ /ED ₅₀)	ชนิด	LD ₅₀ /ED ₅₀ ของ 2,3,7,8-TCDD
ความเป็นพิษเฉียบพลัน		
LD ₅₀ (ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)	หนูตะเภา	0.6-2.0
	หนูเม้าส์	114-284
	หนูแรท	22-45
ความเป็นพิษกึ่งเรื้อรัง		
น้ำหนักตัวลดลง (ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)	หนูแรท	0.05
	หนูตะเภา	0.0056
thymic atrophy (ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)	หนูแรท	0.09
immunotoxicity (นาโนโมล/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)	หนูเม้าส์	0.65,0.77
teratogenicity (ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)	หนูเม้าส์	3.4

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2542

2.1.7 ผลของสารไดออกซินต่อมนุษย์และสัตว์

ไดออกซินสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง และความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน ความเป็นพิษทั้ง 2 ลักษณะมีรายละเอียดดังนี้

2.1.7.1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน ผู้ป่วยที่สัมผัสกับไดออกซินในปริมาณมาก จะเกิดอาการเบื่ออาหาร น้ำหนักลด เกิดแผลในกระเพาะอาหาร ตับอักเสบ และอาจรุนแรงจนถึงขั้นเสียชีวิตในที่สุด

2.1.7.2. ความเป็นพิษเรื้อรัง ผู้ป่วยที่ได้รับไดออกซินสะสมไว้ในร่างกาย จะเกิดโรคหรือความผิดปกติแก่ร่างกายได้หลายลักษณะดังต่อไปนี้

1) Chloracne เป็นโรคที่เกิดจากการสัมผัสกับไดออกซินชนิดแรกที่ถูกค้นพบ ผู้ป่วยจะมีอาการผิวน้ำแตก (skin eruptions) เกิดถุงน้ำ (cysts) และตุ่มหนอง (pustules) คล้าย

สิว มักเกิดตามใบหน้าและลำตัวโดยเป็นอย่างรุนแรง การศึกษาในหนูทดลองพบว่าไดออกซินเพียง 23 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัวหนู ก็ส่งผลให้เกิดอาการนี้ได้ ส่วนไดออกซินที่ทำให้ผู้ป่วยเกิด Chloracne อาจมีค่าน้อยกว่า 96 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว หรืออาจสูงเกินกว่า 3,000 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว แต่ผู้ป่วยมักมีปริมาณไดออกซินเฉลี่ยเป็น 7 เท่าของค่าเฉลี่ยไดออกซินที่พบในประชากรอเมริกัน

2) โรคเบาหวาน (diabetes) การศึกษาในทหารอเมริกันที่รบในประเทศเวียดนาม พบว่า มีทหารเป็นโรคเบาหวานเพิ่มสูงกว่าปกติและตรวจพบปริมาณไดออกซินในร่างกายตั้งแต่ 99 ถึง 140 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว

3) ส่งผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย (immune system) การศึกษาในลิงมาร์โมเซต (Marmoset monkeys) และในหนูทดลอง พบว่าการสะสมของไดออกซินในร่างกายเพียง 10 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว จะมีผลให้ปริมาณเม็ดเลือดขาวลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ภูมิคุ้มกันทำงานผิดปกติไป

4) ส่งผลต่อระบบสืบพันธุ์และฮอร์โมน ในเพศชายไดออกซินจะมีผลให้ขนาดอัณฑะและจำนวนเชื้ออสุจิลดลง ส่วนผลต่อระดับฮอร์โมนนั้นพบว่าผู้ชายที่มีไดออกซินอยู่ในกระแสเลือด จะมีระดับเทสโทสเตอโรนรวมทั้งฮอร์โมนเพศชายชนิดอื่น ๆ ลดลง

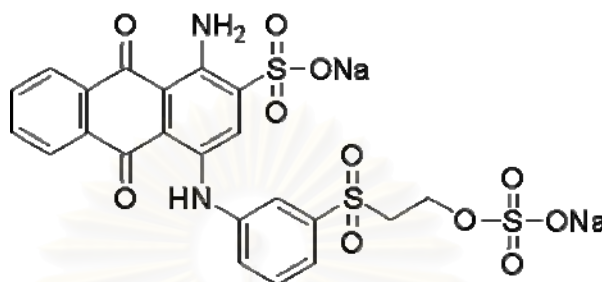
5) ภาวะเยื่อบุผนังมดลูกอักเสบ (endometriosis) การทดลองในลิง (Rhesus monkeys) เพศเมีย พบว่าเมื่อลิงได้รับไดออกซินสูงกว่าค่าเฉลี่ยในคนอเมริกัน 5 เท่า จะมีภาวะเยื่อบุผนังมดลูกอักเสบ และความผิดปกตินี้ยังพบในสตรีอเมริกันอย่างน้อย 5 ล้านคน

6) ความพิการของทารก พฤติกรรมและการเรียนรู้ผิดปกติ พบความผิดปกติแต่กำเนิดของบุตรของทหารอเมริกันที่รบในสงครามเวียดนามหลายระบบ คือระบบประสาท หัวใจ ไต ผิวหนัง และช่องปาก (ริมฝีปากแหว่งและเพดานโหว่) เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาในลูกลิงพบว่าเมื่อได้รับไดออกซินเพียง 42 นาโนกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว จะมีผลทำให้การเรียนรู้ผิดปกติ

7) กระตุ้นให้เกิดมะเร็งบางชนิดในมนุษย์และสัตว์ทดลอง เช่น มะเร็งของเนื้อเยื่ออ่อน มะเร็งต่อมน้ำเหลือง มะเร็งเม็ดโลหิตขาว เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการคาดว่าการได้รับไดออกซินปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ทำให้โอกาสเกิดมะเร็งเต้านมในเพศหญิงเพิ่มขึ้น กลไกการเกิดมะเร็งในมนุษย์ยังไม่ทราบแน่นอน แต่การศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าสาร 2,3,7,8-TCDD ทำให้เกิดมะเร็งได้ในสัตว์ โดย 2,3,7,8-TCDD จะมีผลยับยั้งการเน่าสลายของเซลล์ กระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์และส่งเสริมให้เกิดมะเร็ง (tumor promotion)

2.1.8 สีรีมาซอล บริลเลียนท์ บลู อาร์ (Remazol Brilliant Blue R, RBBR)

เป็นสารอนุพันธ์ของ sulfonated anthracene มีโครงสร้างคล้ายกับสาร polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) และมีโครงสร้างคล้ายกับลิกนิน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ Remazol Brilliant Blue R

สมบัติของสี Remazol Brilliant Blue R

สูตรโมเลกุล	$C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$
น้ำหนักโมเลกุล	626.5
การละลาย	ละลายในน้ำ 10-50 มก./ลิตรที่ 21 องศาเซลเซียส
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผงละเอียด มีสีน้ำเงินเข้ม

การศึกษาเกี่ยวกับไดออกซินนั้น ในหลาย ๆ ประเทศยังไม่สามารถศึกษาเกี่ยวกับไดออกซินได้โดยตรง เนื่องจากความเป็นพิษที่มีสูง จึงทำได้เพียงการศึกษาเกี่ยวกับสารที่มีโครงสร้างคล้ายไดออกซินเท่านั้น สี RBRR เป็นหนึ่งในสารหลาย ๆ ชนิดที่มีโครงสร้างคล้ายไดออกซิน จึงมีการใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวก เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า และการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

Vyas และ Molitoris ในปี ค.ศ. 1995 และ Shin และคณะ ในปี ค.ศ. 1997 ได้ทดลองใช้สี RBRR ในการศึกษาการย่อยสลายลิกนิน ถัดมาในปี ค.ศ. 2002 Sato และคณะ สามารถคัดกรองหาที่สามารถย่อยสี RBRR ได้หลายสายพันธุ์และหาที่คัดแยกได้สามารถย่อยสลาย 2,7-DCDD ในการทดลองถัดมาได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยลิกนิน สามารถย่อยสารมลพิษที่มีโครงสร้างบางส่วนคล้ายลิกนินได้ด้วย เช่น PAHs, chlorinated phenols, PCBs, dioxins, pesticides รวมถึงสีย้อมต่าง ๆ ด้วย (Pointing, 2001)

2.2 การศึกษาเกี่ยวกับการคัดแยกจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารกลุ่มไดออกซิน

การย่อยสลายสารไดออกซินโดยจุลินทรีย์พบได้ทั้งในแบคทีเรีย รา และยีสต์ แต่เนื่องจากแบคทีเรียมีความสามารถในการเจริญได้เร็วและสามารถเพาะเลี้ยงเชื้อได้ง่ายกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น จึงทำให้การศึกษาการย่อยสลายไดออกซินส่วนมากเกิดขึ้นในแบคทีเรีย การศึกษาในระยะแรกมีเพียง Kearny และคณะ (1972) และ Matsumura และ Benezet (1973) ที่ศึกษาจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลาย 2,3,7,8-TCDD ที่สหรัฐอเมริกาใช้ในสงครามเวียดนาม (agent orange) เนื่องจากพบผู้ป่วยจากการสัมผัสกับสารนี้เป็นจำนวนมาก แต่ภายหลังจากเหตุการณ์ระเบิดของโรงงานเคมีในเมือง Seveso ประเทศอิตาลี ในปี ค.ศ. 1976 ที่ทำให้มีการกระจายของไดออกซินเป็นบริเวณกว้างและพบผู้ป่วยจากการได้รับไดออกซินเป็นจำนวนมาก จึงเป็นผลให้นักวิทยาศาสตร์ตื่นตัว ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับไดออกซินมีมากขึ้น

Cerniglia และคณะ (1979) ศึกษาการย่อยสลายสารไดเบนโซฟิวแรนโดยพบว่าการย่อยสลายไดเบนโซฟิวแรนในราและแบคทีเรียมีความแตกต่างกันคือ การย่อยสลายไดเบนโซฟิวแรนของแบคทีเรียจะให้สารที่ไม่มีน้ำหนักตัวและให้สารมัธยันตรที่เป็นพิษหลายชนิด ส่วนการย่อยสลายไดเบนโซฟิวแรนโดยราจะให้สารมัธยันตรที่มีความคงตัวสูงและถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่นที่ไม่มีความเป็นพิษได้ และสารมัธยันตรนี้มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับสารมัธยันตรที่เกิดจากการย่อยสลายสารพิษในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่ไม่สามารถระบุว่าเป็นสารใดได้ จากนั้น Phillippi และคณะ (1982) ได้ศึกษาสารมัธยันตรที่เกิดจากการย่อยสลาย 2,3,7,8-TCDD โดยแบคทีเรีย พบสารที่มีสภาพขั้วสูงกว่า 2,3,7,8-TCDD และจากการวิเคราะห์โดย GC-MS ทำให้ทราบว่าเป็นสาร 1-hydroxy-2,3,7,8-TCDD ซึ่งมีความคงตัวในสิ่งแวดล้อม การศึกษาต่อมาจึงทราบว่าสารชนิดนี้มีความไวต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ดังนั้นสารมัธยันตรนี้จึงมีการสะสมในสิ่งแวดล้อมได้น้อย

จากการศึกษาการย่อยสลายของไดเบนโซฟิวแรนของ HONG และคณะ (1999) พบว่าสารอนุพันธ์จากการย่อยไดเบนโซฟิวแรนมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ กรดซาลิซิลิก (Salicylic acid) แคทเทคคอล (Catechol) กรดเจนทิซิก (Gentisic acid) และสารชนิดอื่นที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ และพบว่าการสะสมของสารแคทเทคคอลในปริมาณสูงที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อหลังจาก 6 วัน

2.2.1 การย่อยสลายสารกลุ่มไดออกซินโดยแบคทีเรีย

Cerniglia และคณะ (1979) และ Klecka และ Gibson (1979) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไดออกซิน ไดเบนโซฟิวแรน และสารอนุพันธ์โดยแบคทีเรีย 2 กลุ่มคือ *Pseudomonas* sp. และ *Beijerinckia* (ต่อมาคือ *Sphingomonas*) พบว่าการย่อยสลายไดออกซิน ไดเบนโซฟิว

แรน และสารอนุพันธ์จะเกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์และให้ dead-end product เพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าแบคทีเรียจะทำปฏิกิริยาบริเวณตำแหน่งที่ 1,2 และ 2,3 ของวงแหวนอะโรมาติก ทำให้ได้สาร cis-1,2-dihydrodiol เกิดขึ้นซึ่งเหมือนกับการย่อยสลายเบนซีน โทลูอีน และ biphenyl และสารประกอบอะโรมาติกอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบเอนไซม์ dihydrodiol dehydrogenase ในแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสามารถแตกวงแหวนอะโรมาติกแล้วให้สารสีเหลืองของ 2-hydroxymuconate-semialdehyde

Foght และ Westlake (1988) ได้คัดแยกแบคทีเรียกลุ่ม *Pseudomonas* sp. จากผลิตภัณฑ์รักษาเนื้อไม้ เพื่อศึกษาการย่อยสลายสารกลุ่มไดออกซินที่ไม่มีการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่ฮาโลเจน การย่อยสลายวิธีนี้เรียกว่าวิธี mineralization พบว่าสามารถย่อยสลายสารจำพวก non-halogenated และสารอนุพันธ์ที่มีหมู่คลอรีนบางชนิดได้สมบูรณ์กว่าวิธีเดิม ต่อมาแบคทีเรียกลุ่ม *Pseudomonas* นี้ถูกจัดกลุ่มใหม่เป็น *Sphingomonas* โดยใช้วิธีวิเคราะห์ลำดับ 16s rDNA (Moore และคณะ 1993)

Strubel และคณะ (1989 และ 1991) คัดแยกแบคทีเรีย *Brevibacterium* sp. DPO 1361 ที่สามารถย่อยสลายไดเบนซิฟูแรนได้โดยวิธี mineralization หลังจากนั้นแบคทีเรียนี้ถูกจัดจำแนกใหม่เป็นแบคทีเรียสกุล *Terrabacter* โดย Schmid และคณะ (1997)

Engesser และคณะ (1989 และ 1990), Fortnagel และคณะ (1989 และ 1990), Harm และคณะ (1990), Schmidt และคณะ (1992 a), Strubel และคณะ (1991) และ Wittich และคณะ (1992) รายงานการย่อยสลายสาร diaryl ether โดยพบว่าสารตัวกลาง 3-methyldiphenyl ether จะถูกย่อยสลายโดยวิธีเดียวกับสารมัธยันตร์ที่เป็น phenol และ 4-methylcatechol โดยวิธี ortho-cleavage ที่ผิดปกติ ซึ่งจากการศึกษาต่อมาพบว่าเกิดจาก angular dioxygenation ของ diaryl ether ส่วนสารประกอบที่เป็นสารอนุพันธ์ของสารกลุ่มไดออกซินซึ่งมีอะตอมของสารอื่นเช่น N, S จะถูกทำปฏิกิริยาโดย angular dioxygenase เช่นเดียวกัน

Pfeifer และคณะ (1989) รายงานว่าการย่อยสลาย DE ในช่วงต้นจะคล้ายกับวิธี catabolic ภายใต้ปฏิกิริยา dioxygenation, dihydrogenation ของ dinarydrodiol จากนั้นจะมีปฏิกิริยา meta-cleavage เกิดขึ้นภายหลังจากมี 2,3-dihydroxydiphynanyl ether เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่ง C1 และ C2 ทำให้เกิด ester ขึ้น และระหว่างที่เกิดปฏิกิริยานี้พบว่ามี phenol และ 2-pyrone-6-carboxylic acid ซึ่งเป็น dead-end product เกิดขึ้น (Pfeifer และคณะ ,1993) Phenol เป็นสารที่ถูกบ่งชี้ว่าเป็นสารมัธยันตร์ตัวหนึ่งในการย่อยสลาย DE โดยแบคทีเรีย *Pseudomonas cruciviae* โดยที่แบคทีเรียสายพันธุ์นี้จะสร้างสาร 2-phynoxy muconic acid ออกมาระหว่างการเจริญ ซึ่งสารนี้เป็น ortho-cleavage product ของ 2,3-dihydroxydiphynanyl ether (Takase และคณะ,1986) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลาย

3-carboxydiphynanyl ether โดยแบคทีเรียกลุ่ม *Pseudomonas* ซึ่งให้สารผลิตภัณฑ์เป็น phenol ซึ่งเป็น dead-end product ที่ต้องกำจัดต่อไป (Topp และ Akntar, 1990, 1991)

Fortnagel และคณะ(1990) ศึกษาการย่อยสลายไดเบนโซฟูแรนโดยแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. สายพันธุ์ HH69 และ mixed culture HH27 พบว่าเชื้อสามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเติม DF เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวในภาวะที่มีอากาศ หลังจากการเลี้ยงพบกรดซาลิซิลิก (salicylic acid) และกรดเจนทิซิก (gentisic acid) สะสมอยู่ในน้ำเลี้ยงเชื้อของสายพันธุ์ HH69 และกรดทั้ง 2 ชนิดที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ ถูกย่อยสลายไปหลังจากแบคทีเรียหยุดการเจริญ นอกจากนี้ยังพบ 2,3-trihydroxydiphynanyl ในอาหารเลี้ยงเชื้อของสายพันธุ์กลายของ HH69

Monna และคณะ (1993) คัดแยกแบคทีเรียสายพันธุ์ *Staphylococcus auricalans* เพื่อศึกษาการย่อยสลายไดเบนโซฟูแรน โดยพบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์นี้สามารถย่อยสลายสารไดออกซิน และสารกลุ่มที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกันได้โดยวิธี mineralization เช่นกัน

Ishiguro (2000) คัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลาย DF และ DD จากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกเยื่อกระดาษโดยใช้ DD เป็นสารทดสอบ พบแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ที่ย่อยสลาย DD ได้ คือ *Pseudomonas acruiginosa* และ *Xanthomonas maltophilla* และยังพบว่าสามารถย่อยสลาย DF ได้ด้วย การศึกษาต่อมาพบว่าแบคทีเรีย *P. acruiginosa* มีอัตราการเจริญสูงในอาหารที่มี DF หรือ DD เป็นแหล่งคาร์บอน แต่อัตราการเจริญลดลงเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มี 1-chlorodibenzo-p-dioxin, 2-CDD และ 2,8-DCDD เชื้อจะมีอัตราการเจริญต่ำเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มี 2,6-DCDD และ 1,2,3,4-TCDD และไม่สามารถเจริญได้ในอาหารที่มี octachlorodibenzo-p-dioxin ซึ่งจากผลการทดลองนี้พอจะสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอะตอมคลอรีนของ DD จะส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลาย DD และอัตราการย่อยสลายยังขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญของเชื้อด้วย อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลาย 1,2,3,4-TCDD ของเชื้อมีสูงแต่กลับพบว่าเชื้อมีอัตราการเจริญต่ำ ส่วนการย่อยสลาย DF นั้น เมื่อตรวจสอบสารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลาย DF โดยแบคทีเรีย *P. acruiginosa* ด้วยวิธี GC-MS พบว่ามี hydroxy DF, 2-hydroxy-3-allyl-benzofuran และ 2-caboxyvinyloxyphenyl acetic acid เกิดขึ้น ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิธีการย่อยสลาย DD ต่อไป นอกจากนี้ Becher และคณะ (2000) พบว่าแบคทีเรีย *Ralstonia* sp.SBUG 290 สามารถย่อยสลาย DF ได้ และพบว่าเมื่อการย่อยสลายเกิดโดยสมบูรณ์จะได้สาร salicylic acid เป็นสารผลิตภัณฑ์

lida และคณะ (2002) คัดแยกเชื้อจุลินทรีย์สกุล *Rhodococcus*, *Microbacterium* และ *Terrabacter* โดยพบว่าจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถใช้ไดเบนโซฟูแรนเป็นทั้งแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน

2.2.2 การย่อยสลายสารไดออกซินโดยยีสต์และรา

Guengerich (1995 และ 1997) ศึกษากระบวนการเอนไซม์ cytochrome P-450 oxidase ซึ่งเป็น haemoprotein ของสิ่งมีชีวิตชั้นสูง (eukaryote) ที่ใช้ในการกำจัดสารพิษประเภทสารประกอบอะโรมาติกและ xenobiotic จากการศึกษาในราพบว่าราสามารถเติมหมู่ไฮดรอกซีให้กับสารประกอบอะโรมาติกได้โดยตรงหรือภายใต้ปฏิกิริยา hydrolysis ของ epoxides ที่เกิดโดยระบบเอนไซม์นี้ นอกจากนี้ยังศึกษาการสังเคราะห์สารประเภท steroids การใช้ประโยชน์จากระบบ cytochrome P-450 ของจุลินทรีย์ในการกำจัดสารพิษในสิ่งแวดล้อมด้วย

Cerniglia และคณะ (1979) ศึกษาการย่อยสลาย DF โดยใช้รา *Cunninghamella elegans* และแบคทีเรีย *Beijerinckia* sp. B8/36 สายพันธุ์กลายได้สาร 2,3-dihydroxy-2,3-dihydrodibenzofuran พบว่ากลไกในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยราจะออกซิไดซ์ DF ได้สาร dibenzofuran 2,3-epoxide และสารดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนไปเป็น trans-2,3-dihydroxy-2,3-dihydrodibenzofuran ส่วนแบคทีเรียจะออกซิไดซ์ DF ได้สาร cis-1,2-dihydroxy-1,2-dihydrodibenzofuran และ cis-2,3-dihydroxy-2,3-dihydrodibenzofuran

Schauer และคณะ (1993) ศึกษาการย่อยสลาย DE โดยยีสต์ *Cryptococcus humiculus* SBUG 517 พบว่าเมื่อย่อยสลาย DE แล้วจะให้สารผลิตภัณฑ์ที่เป็นฟินอล นอกจากนี้ยังพบว่ายีสต์ *Trichosporon beigeli* สามารถย่อยสลาย DE โดยปฏิกิริยา hydroxylation และได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันตามความจำเพาะต่อตำแหน่งของสารตั้งต้นที่ย่อยสลาย (Wittich, 1998)

Hammer และคณะ (1998) ศึกษาการย่อย DF ในยีสต์ *Trichosporon mucoides* SBUG 801 พบว่ายีสต์ชนิดนี้สามารถย่อย DF ได้ดี และพบสารมัธยันตร์หลัก 6 ชนิด โดยเป็นสารในกลุ่ม monohydroxylated dibenzofurans 4 ชนิดด้วยกัน และการศึกษาต่อมาพบว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะได้ 2,3-dihydroxydibenzofuran ซึ่งเมื่อเกิด ortho cleavage แล้วจะได้ 2-(1-carboxy methylidene)-2,3-dihydrobenzo[b]furanylidene glycolic acid

การย่อยสลาย 2,3,7,8-TCDD โดยรา *Phanerochaete crysosporium* ถูกศึกษาเป็นครั้งแรกโดย Bumpas และคณะ (1985) พบว่าราสายพันธุ์นี้สามารถสร้างเอนไซม์ย่อยลิกนินเพื่อย่อยสลาย 2,3,7,8-TCDD ได้อย่างช้า ๆ จนได้ CO₂ ภายใต้ภาวะขาดไนโตรเจน การศึกษาต่อมาในระบบที่มีการจำกัดปริมาณไนโตรเจน (nitrogen-limited) ของการเลี้ยงรา *P. crysosporium* เพื่อย่อยสลายสาร PAHs หลายชนิดพบว่าระบบเอนไซม์ ligninase ที่ใช้ในการย่อยสลาย DD มีการแตกพันธะอีเธอร์และเกิดปฏิกิริยา hydroxylation บริเวณด้านข้างซึ่งนำไปสู่การเกิด catechol และ higher hydroxylated derivatives (Bumpas และคณะ, 1989)

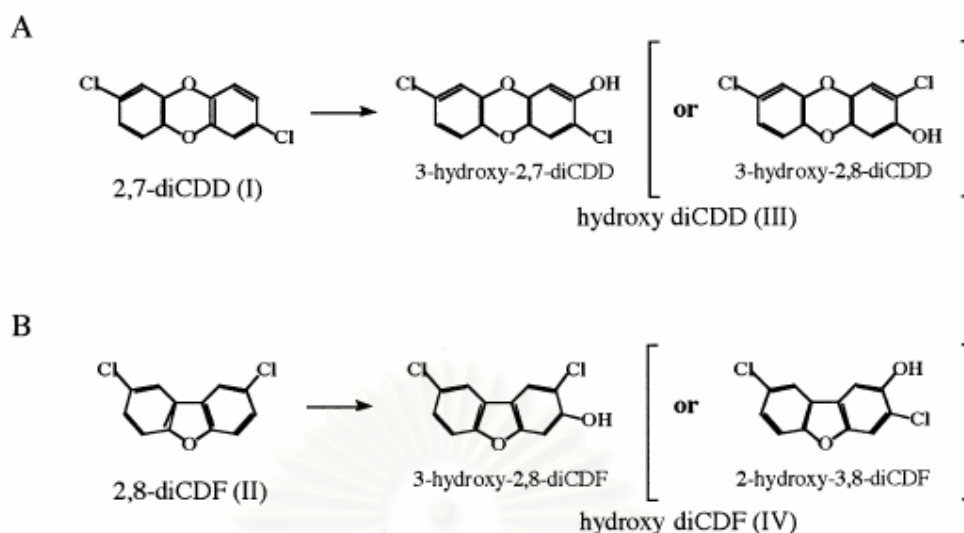
Hammel และคณะ (1986) ศึกษารายละเอียดของระบบการทำงานของเอนไซม์ lignin peroxidase ของรา โดยพบว่ามี cationic radical เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย DD นอกจากนี้ยังพบว่ามี 2-CDD ถูกย่อยโดยการเกิด oxidation บริเวณวงแหวนอะโรมาติก

Valli และคณะ (1992) ศึกษาการกำจัดคลอรีนโดยใช้สารสาร 2,7-DCDD ซึ่งมีความเป็นพิษต่ำกว่า 2,3,7,8-TCDD โดย *P.cryosporium* พบว่าคลอรีน 1 อะตอมจะถูกดึงออกจากโมเลกุลของสารพร้อมกับการเกิดสาร 4-chlorocatechol นอกจากนี้ยังพบ dimethyl ether ซึ่งเป็นสารมัธยันตร์ของสาร 4-chlorocatechol และจะเกิดปฏิกิริยา demethylated อีกครั้ง โดยเอนไซม์ lignin peroxidase หรือ manganese-dependent peroxidase ทำให้เกิดสาร 4-chlorocatechol อีกครั้ง นอกจากนี้ยังพบ chloroquinone จำนวนเล็กน้อย รวมทั้งสาร 1,2,4-trihydroxybenzene monomethyl ether ด้วย

Hofmann และคณะ (1992) ศึกษาการย่อยสลายไดเบนฟูแรนโดยราสกุล *Fusarium* โดยพบว่าราชนิดนี้สามารถใช้ไดเบนฟูแรนเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้ ต่อมา Hammel และ Schauer (1997) ศึกษาการย่อยสลายไดเบนโซฟูแรนโดยราสกุล *Circinella*, *Cunninghamella*, *Mortierella*, *Mucor*, *Chaetomium*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Chrysosporium*, *Fusarium*, *Paecilomyces*, *Papulaspora*, *Penicillium*, *Phaeostilbella*, *Trichoderma* พบสารมัธยันตร์ที่มีความแตกต่างกันหลายชนิด เช่น monohydroxydibenzofuran ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ monooxygenase, dihydroxydibenzofuran, รวมไปถึงสารมัธยันตร์อื่น ๆ ที่ละลายน้ำได้ดีเกิดขึ้น

Takada และคณะ (1996) โดยทดลองใช้ 2,3,7,8-TCDD, DF และสารประกอบ DF, DD ที่มีหมู่ฮาโลเจนแตกต่างกันเป็นสารตั้งต้นให้เชื้อ *Phanerochaete sordida* ย่อยสลาย พบว่าเชื้อราใช้เวลา 7 วันในการย่อยสลาย 10-60% ของสารตั้งต้น ซึ่งอัตราการย่อยสลายขึ้นกับปริมาณและชนิดของสารที่ย่อยสลาย

Mori และ Kondo (2002) ศึกษาการย่อยสลายสาร DD และ DF ที่มีหมู่ฮาโลเจนเข้ามาจับโดยใช้รา *Phlebia lindetneri* ซึ่งเป็นราในกลุ่ม white rot fungi พบว่าราสามารถย่อยสาร 2,7-DCDD ได้ 16.5 เปอร์เซ็นต์ และย่อย 2,7-DCDF ได้ 5.8 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 5 วัน และจากการศึกษาสารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ GC-MS พบว่าสารมีปริมาณน้อยมาก และระบุชนิดของสารว่าเป็น hydroxy-DCDD และ hydroxy-DCDF ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเติมหมู่ hydroxy ให้กับสาร 2,7-DCDD และ 2,7-DCDF โดยรา *P. lindetneri* ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สารมัธยันตร์ที่เกิดจากการย่อยสลายสาร 2, 7-DCDD (A) และ 2, 7-DCDF (B)
(Mori และ Kondo, 2002)

Hiratsuka และคณะ (2005) ศึกษาการย่อยสลายสารไบฟีนิล (Biphenyl) ไบฟีนิลีน (Biphenylene) ไดเบนโซฟูแรน ไดเบนโซพาราไดออกซิน และไดฟีนิลอีเทอร์ โดยรา *Phanerochaete chrysosporium* และเอนไซม์ Lignin peroxidase (Lignin peroxidase; LiP) โดยพบว่ามีเพียงไบฟีนิลีนและไดเบนโซพาราไดออกซินเท่านั้นที่ถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ Lignin peroxidase ส่วนสารอีก 3 ชนิดจะถูกย่อยสลายผ่านวิถีเอนไซม์ไซโตโครมพี 450 (cytochrome P450) ทำให้สรุปได้ว่าสารประกอบเหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายได้โดย 2 กระบวนการคือวิถีเอนไซม์ Lignin peroxidase และวิถีเอนไซม์ไซโตโครมพี 450

Lan และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพของเอนไซม์ Lignin peroxidase ในรา *Phanerochaete chrysosporium* โดยพบว่าเมื่อให้เอนไซม์ Lignin peroxidase ทำงานร่วมกับ เอนไซม์ Glucose oxidase จะส่งผลให้การย่อยสลายสีซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกเกิดได้ดีขึ้น และอธิบายว่าเกิดจากการที่เอนไซม์ Glucose oxidase มีการสร้างไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ขึ้น ซึ่งมีผลให้เอนไซม์ Lignin peroxidase ทำงานได้ดีขึ้น

2.3 การกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหย (สุโรชา พูลสวัสดิ์. 2546)

สารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายในอากาศได้ที่อุณหภูมิและความดันปกติ เช่น คาร์บอนหรี น้ำยาฟอกสี สารตัวทำละลายในพิมพ์ ไอเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำยาซักแห้ง น้ำยาสำหรับย้อมผมและน้ำยาดัดผม สารฆ่าแมลง และสารที่เกิดจากเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งอาจปะปนในอากาศ น้ำดื่ม อาหารได้ สารอินทรีย์ระเหยบางชนิดจะมีผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหยจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม การกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหยนี้อาจทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.3.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือการยึดเกาะกันโดยไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารมลพิษกับผิวสัมผัสของตัวดูดซับสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือการที่โมเลกุลของสารมลพิษยึดเกาะกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal) โดยไม่มีการทำปฏิกิริยาใด ๆ ระหว่างกัน ดังนั้นการเกิดกระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) คือการที่โมเลกุลของสารมลพิษยึดติดกับตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent) การดูดซับทางเคมีนี้จะเกิดได้ช้ากว่าการดูดซับทางกายภาพมากและเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ ในการดูดซับนี้จะเกิดความคู่กันทั้งสองกระบวนการ

ตัวดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งนิยมใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหยที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือการใช้ไอน้ำช่วย แต่ประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการบำบัดครั้งถัดไปจะลดต่ำลง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในกระบวนการดูดซับจะเพิ่มขึ้น วิธีนี้จึงไม่เป็นที่แพร่หลาย (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2544; Lang และ Jager, 1992)

2.3.2 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นการทำให้โมเลกุลของสารมลพิษละลายในตัวดูดซึม (absorbent) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของเหลว กระบวนการดูดซึมนี้อาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษกับสารดูดซึมหรือไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันก็ได้ เช่น การดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfurdioxide)

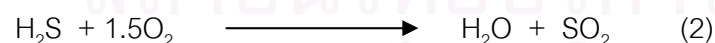
จากอากาศเสียโดยการใช้น้ำมันในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้สารแคลเซียมซัลเฟต แต่การใช้น้ำเป็นสารดูดซึมนั้นส่วนใหญ่จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีแต่สารมลพิษจะละลายในน้ำเท่านั้น (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2544; Lang และ Jager, 1992)

2.3.3 การควบแน่น (Condensation)

การควบแน่นคือการทำให้สารมลพิษที่อยู่ในภาวะก๊าซกลายสภาพไปอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งโดยการลดอุณหภูมิ วิธีการนี้นิยมใช้ในโรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี และโรงงานผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือการควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรงนั้นของเหลวที่ใช้ในการลดอุณหภูมินั้นต้องมีอุณหภูมิต่ำ ก๊าซจะเกิดการควบแน่นและปะปนไปกับของเหลวที่ใช้ลดอุณหภูมิ ซึ่งจะก่อให้เกิดน้ำเสีย หรือของเสียที่ต้องนำไปบำบัดต่อ และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงอีกด้วย (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2544; Lang และคณะ, 1992)

2.3.4 การสันดาป (Combustion)

การสันดาปหรือการเผาไหม้เป็นการทำให้สารมลพิษกลายสภาพไปเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีการนี้มักใช้ในการกำจัดสารมลพิษส่วนที่เผาไหม้ไม่หมดในไอเสียจากเตาเผา ซึ่งได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ รวมไปถึงไอระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์ และก๊าซต่าง ๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น เบนซีน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ แต่ในบางกรณีหลังจากการเผาไหม้แล้วจะให้สารมลพิษตัวอื่น ๆ ออกมาแทนที่ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงชนิดของสารที่จะกำจัดโดยวิธีนี้ด้วย



ปัจจัยที่สำคัญในการเกิดการสันดาป ได้แก่ การให้ปริมาณออกซิเจนที่มากเพียงพอ อุณหภูมิ และเวลาในห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม การสันดาปบางกรณีอาจจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ช่วยทำให้การสันดาปเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและใช้อุณหภูมิในการสันดาปต่ำลง (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2544; Lang และ Jager, 1992)

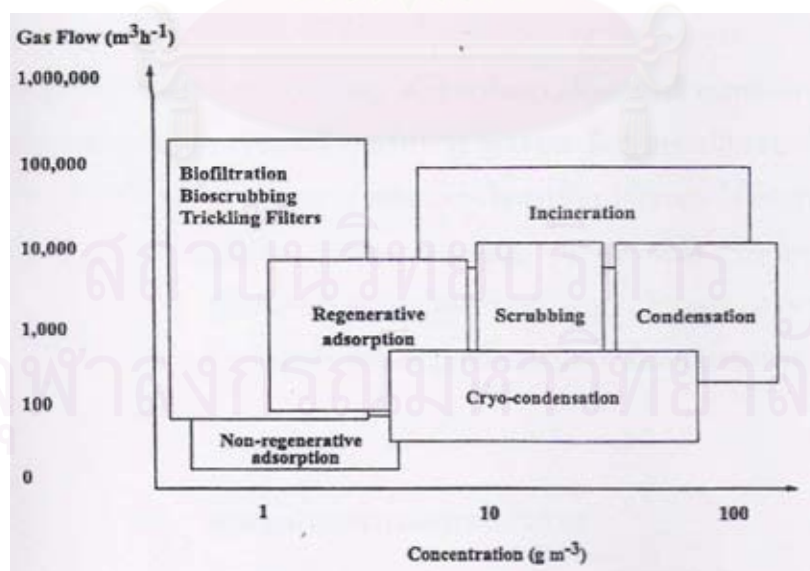
2.3.5 ระบบเมมเบรน (Membrane System)

ระบบเมมเบรนเป็นระบบที่ใช้ในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหยโดยอาศัยหลักความแตกต่างของความดัน ทำให้เกิดการแยกของสารผ่านเยื่อเลือกผ่าน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ให้ผลการบำบัดที่ดีแต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง จึงไม่เป็นที่แพร่หลาย (Devinny และคณะ, 1999)

2.3.6 ระบบการกรองด้วยตัวกลางชีวภาพ (Biofiltration)

เป็นระบบที่ใช้วิธีการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในอากาศด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม และใช้ออกซิเจน ซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ การทำงานของระบบนี้มีข้อดีคือมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ เป็นวิธีที่ไม่เป็นอันตราย และไม่ก่อให้เกิดสารมลพิษข้างเคียงอื่น ๆ ไม่ต้องใช้สารเคมีแต่อาจจะต้องเติมสารอาหารบางอย่างเพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบเจริญ หรืออาจเติมเพื่อเป็นการช่วยในการบำบัดสารมลพิษด้วย (Devinny และคณะ, 1999)

ในปี 1999 Devinny และคณะ ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการที่ใช้ในการบำบัดสารมลพิษตามความเข้มข้น และอัตราการไหลของก๊าซ ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.6 เทคโนโลยีในการกำจัดไอของสารมลพิษตามช่วงความเข้มข้นและช่วงอัตราการไหลของก๊าซต่าง ๆ กัน (Devinny และคณะ, 1999)

2.4 การกำจัดสารมลพิษโดยระบบการกรองด้วยตัวกลางชีวภาพ (Biofiltration)

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการใช้ประโยชน์จากความสามารถในการย่อยสลายสารพิษของจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย และของเสียที่เป็นของแข็ง ในปี ค.ศ. 1950 ได้เริ่มมีนักวิทยาศาสตร์เริ่มประยุกต์ใช้ความสามารถของจุลินทรีย์ในการบำบัดอากาศเสียโดยใช้วิธีการกรองทางชีวภาพ เครื่องกรองชีวภาพรุ่นแรก ๆ จึงถูกสร้างขึ้นโดยใช้ตัวกลางเป็นดินที่มีรูพรุน และมีระบบกระจายอากาศอยู่ส่วนล่าง เมื่ออากาศเสียผ่านชั้นตัวกลางขึ้นมาจะถูกบำบัด ทำให้อากาศที่ออกจากระบบมีคุณภาพที่ดีขึ้น สำหรับโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มักเกิดกลิ่นเหม็นจากการบำบัดน้ำนั้น ก็ได้ใช้ระบบการกรองด้วยตัวกลางชีวภาพนี้บำบัดกลิ่นที่เกิดขึ้นโดยใช้ดินเป็นตัวกลาง (Devinny และคณะ, 1999) ระบบนี้จะใช้งานได้ดีค่อนข้างดีแต่ปัญหาที่เกิดขึ้นของระบบนี้คือมักมีการอุดตันของระบบกระจายอากาศ เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารจะมีการสร้างสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดเกิดขึ้น ทำให้ส่งผลต่อการเจริญและการอยู่รอดของจุลินทรีย์เอง และปัญหาชั้นตัวกลางแห้งทำให้ระบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้

เครื่องกรองชีวภาพเริ่มเป็นที่รู้จักและสนใจมากขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเห็นได้จากการที่เครื่องกรองชีวภาพถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษที่มีปริมาณสูงชัน และใช้ได้กับสารมลพิษหลายชนิดขึ้นด้วย ในประเทศเนเธอร์แลนด์และเยอรมนีได้มีการพัฒนาออกแบบระบบการกระจายอากาศใหม่โดยการเติมตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นตัวพอง เช่น เปลือกไม้หรือเม็ดพอลิสไตรีน เพื่อลดการอัดแน่นและยุบตัวของตัวกลาง ซึ่งทำให้ระบบนี้ใช้งานได้ดีขึ้นและได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานต่าง ๆ เช่น โรงงานบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตสารเคมี หรือโรงงานผลิตอาหารสัตว์ เป็นต้น (Leson และ Winer, 1991)

ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1980 ถึง 1990 การพัฒนาเครื่องกรองชีวภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากในยุโรปและอเมริกาเหนือ มีการนำระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาเพื่อควบคุมระบบ มีการออกแบบระบบเปิดเพื่อใช้ในการบำบัดกลิ่น ไอของสารอินทรีย์ระเหย และไอผสมของสารอินทรีย์ระเหย และได้มีการทดลองนำตัวกลางอินทรีย์ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เซรามิกส์ และอื่น ๆ มาผสมกับตัวกลางอินทรีย์เพื่อช่วยเพิ่มความพรุนของชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของตัวกลาง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคนิคและมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ด้วย (Devinny และคณะ, 1999)

2.4.1 ชนิดของระบบการกรองด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ระบบการกรองด้วยกระบวนการทางชีวภาพสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ดังตารางที่ 2.3

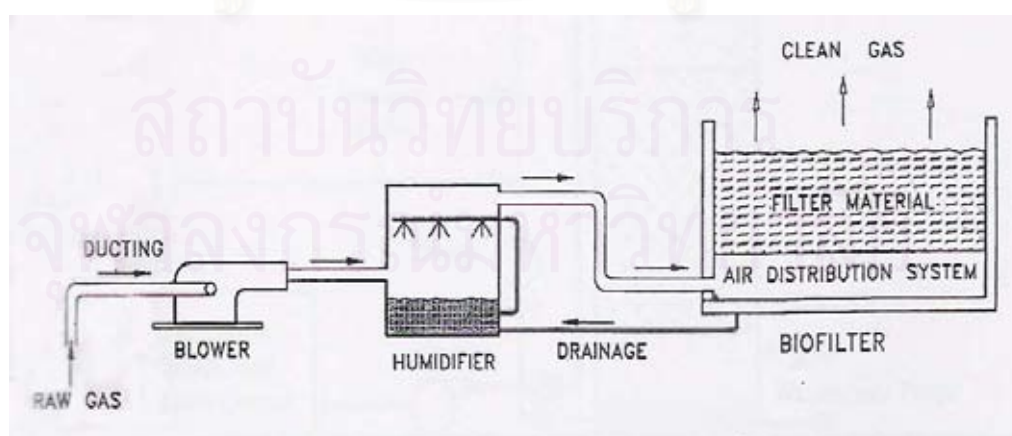
ตารางที่ 2.3 การจำแนกชนิดของระบบการกรองชีวภาพ (Biofiltration)

การดำเนินระบบ	จุลินทรีย์	การเคลื่อนที่ของน้ำ
ระบบกรองชีวภาพแบบดั้งเดิม	อยู่กับที่	ไม่เคลื่อนที่
ระบบกรองชีวภาพแบบหยด	อยู่กับที่	เคลื่อนที่
ระบบไบโอส cribเบอร์	แขวนลอยในระบบ	เคลื่อนที่

ที่มา: Devinny และคณะ, 1999

2.4.1.1 เครื่องกรองชีวภาพ (Biofilter)

เครื่องกรองชีวภาพจะอาศัยการยึดเกาะอยู่กับที่ของจุลินทรีย์กับตัวกลางที่มีรูพรุน โดยจุลินทรีย์จะยึดเกาะและเจริญเติบโตในไบโอฟิล์ม (Biofilm) บนพื้นผิวของตัวกลางหรืออาจจะมีอยู่ในน้ำที่อยู่รอบ ๆ ตัวกลางก็ได้ เครื่องกรองชีวภาพนี้เป็นระบบที่ใช้กระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ ร่วมกัน เช่น การดูดซับ การดูดซึม การย่อยสลาย ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพแสดงดังรูปที่ 2.7



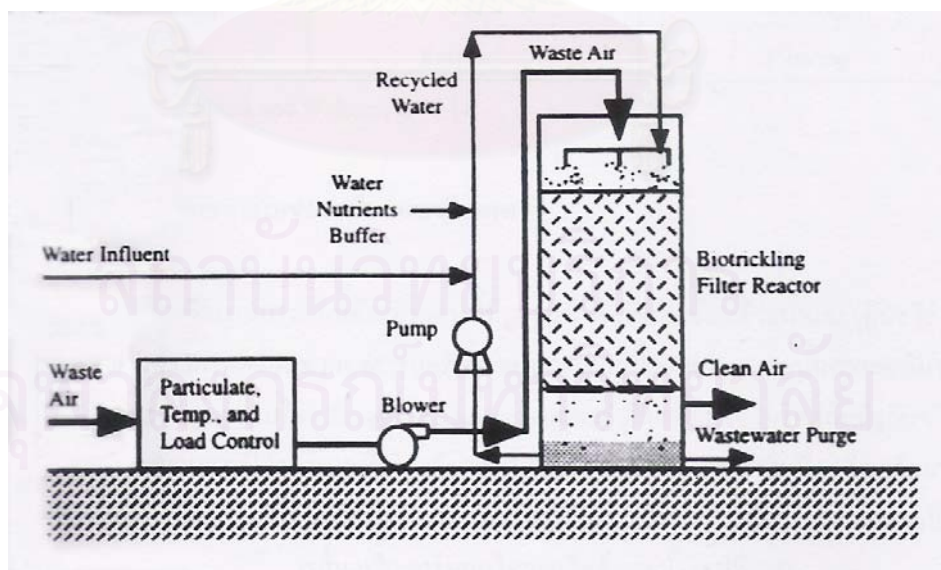
รูปที่ 2.7 ลักษณะของเครื่องกรองชีวภาพ (Leson และ Winer, 1991)

2.4.1.2 Biotrickling Filter

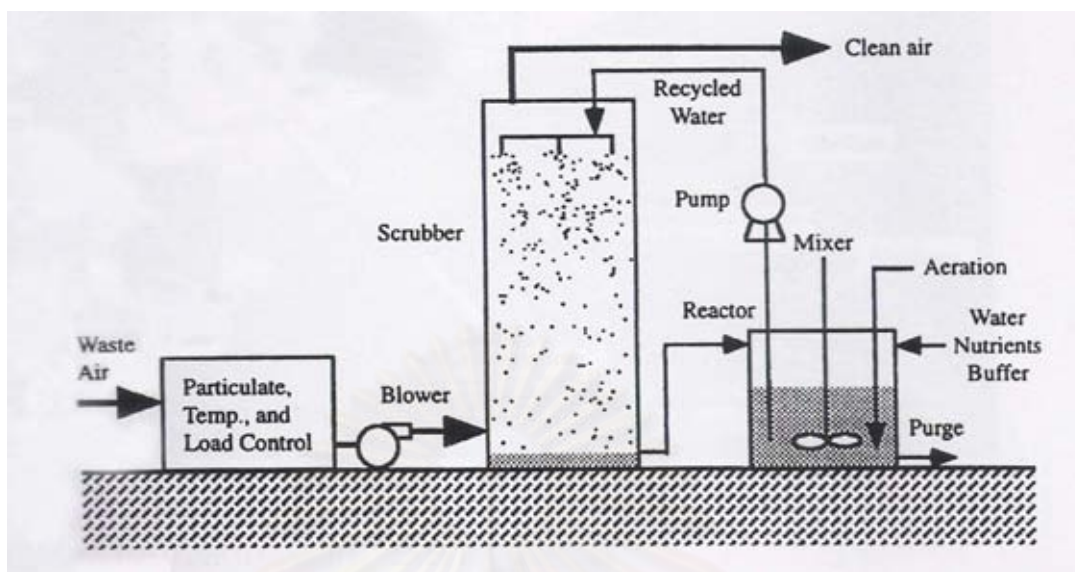
ระบบนี้จุลินทรีย์จะยึดติดกับตัวกลางอินทรีย์และมีจุลินทรีย์ในส่วนของน้ำ ทำหน้าที่ย่อยสลายไอเสียที่ถูกดูดซึมขณะผ่านระบบ การทำงานของระบบนี้จะมีการผ่านน้ำและอากาศเข้าสู่ระบบ ซึ่งสามารถทำได้ใน 2 ลักษณะคือ ผ่านน้ำและอากาศในทิศทางเดียวกัน หรือ ผ่านน้ำและอากาศในทิศสวนทางกันก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ขณะที่มีการหมุนเวียนน้ำในระบบเกิดขึ้นนั้นการเติมสารอาหารบางชนิดลงไปเพื่อให้เกิดภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน และหลักสำคัญของระบบ Biotrickling Filter นี้อยู่ที่การควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในระบบไม่ให้มีมากเกินไปเพื่อป้องกันการอุดตันของระบบ ลักษณะของ Biotrickling Filter แสดงดังรูปที่ 2.8

2.4.1.3 Bioscrubber

การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีนี้จะอาศัยหลักการดูดซึมสารพิษของน้ำก่อนที่สารมลพิษจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในส่วนน้ำ ระบบนี้มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่คล้ายวิธี Biotrickling Filter ส่วนน้ำที่ไหลผ่านระบบจะช่วยในการเติมอาหารและอากาศ ซึ่งช่วยให้สารมลพิษสามารถแพร่ไปสู่อิมโพล์มได้ดีขึ้น ลักษณะของ Bioscrubber แสดงดังรูปที่ 2.9



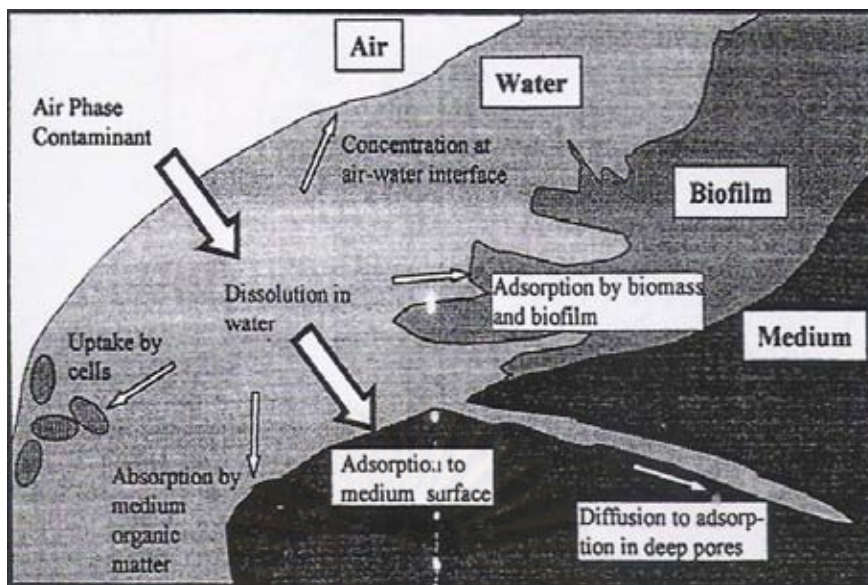
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ Biotrickling Filter (Devinny และคณะ, 1999)



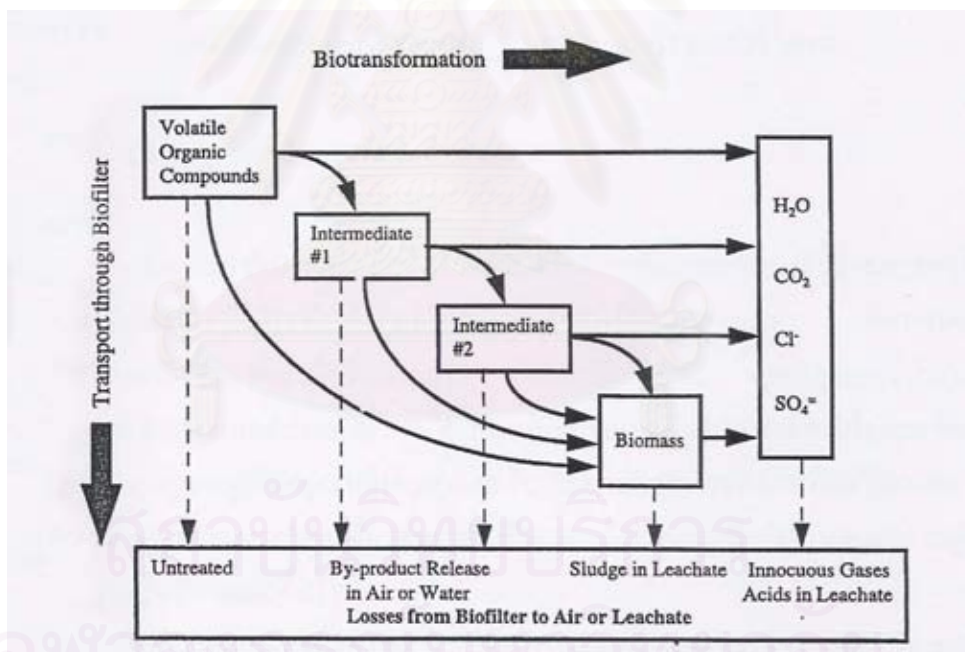
รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Bioscrubber (Devinny และคณะ, 1999)

2.4.2 กลไกการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

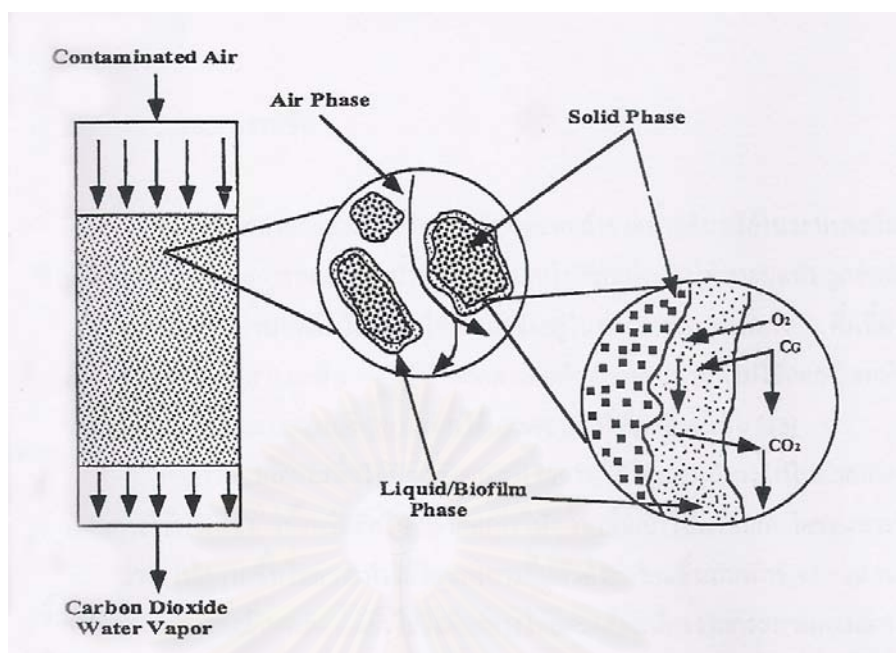
เครื่องกรองชีวภาพประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ตัวกลางที่มีรูพรุน น้ำหรือความชื้นที่อยู่รอบตัวกลาง และส่วนที่สำคัญที่สุดคือจุลินทรีย์ การทำงานของระบบจะได้ประสิทธิภาพสูงหรือไม่ นั้นจุลินทรีย์จะเป็นเครื่องบ่งชี้ที่ชัดเจนที่สุด ขั้นตอนแรกของการบำบัดด้วยวิธีการนี้คือการดูดซับโดยตัวกลาง เริ่มจากการที่สารมลพิษเคลื่อนตัวเข้าสู่ระบบกรองชีวภาพซึ่งจะสัมผัสกับน้ำที่เกาะอยู่รอบตัวกลาง สารมลพิษจะรวมตัวกับน้ำและจะถูกดูดซับโดย Exopolysaccharide ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นหรือไบโอฟิล์มที่จุลินทรีย์รวมตัวกันอยู่ (ดังรูปที่ 2.10) จากนั้นจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือย่อยสลายสารมลพิษ โดยวิธีการทางชีวภาพ (ดังรูปที่ 2.11) ทำให้สารมลพิษกลายเป็นมวลชีวภาพ (Biomass), ธาตุอาหารอื่น ๆ, คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (ดังรูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.10 การดูดซับภายในเครื่องกรองชีวภาพ (Devinny และคณะ, 1999)



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา และการขนส่ง (transport) ภายในเครื่องกรองชีวภาพ (Devinny และคณะ, 1999)



รูปที่ 2.12 กลไกโดยรวมภายในเครื่องกรองชีวภาพ (Devanny และคณะ, 1999)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพ

2.4.3.1 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์นับเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในเครื่องกรองชีวภาพเนื่องจากจะเป็นตัวกำจัดสารมลพิษ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีวภาพมีอยู่มากมายหลายชนิด การใช้งานจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ว่าจะบำบัดสารมลพิษชนิดใด (ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารมลพิษแสดงดังตารางที่ 2.4) ประสิทธิภาพในการบำบัดของจุลินทรีย์แต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันด้วย ทั้งนี้การเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน สารอาหาร ความชื้นที่เหมาะสม ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมด้วย (Leson และ Winer, 1991)

2.4.3.2 ความชื้น

ความชื้นของตัวกลางเป็นปัจจัยที่สำคัญ กล่าวคือหากขาดน้ำจุลินทรีย์ในระบบจะมีการเจริญเติบโตและกิจกรรมที่น้อยลง หรืออาจจะไม่สามารถมีชีวิตได้ การลดลงของน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารมลพิษของตัวกลางลดน้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้สารมลพิษถูกย่อยสลายลดลงด้วย ในกรณีที่มีน้ำมากเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาน้ำขัง

อยู่ในช่องว่างของตัวกลาง ทำให้พื้นที่ผิวของตัวกลางลดลงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ สารมลพิษลดลง และเกิดการก่อตัวของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนนี้ไม่สามารถจะย่อยสลายสารมลพิษได้ ทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลงและยังก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นด้วย (Quinlan และคณะ, 1999)

การเพิ่มความชื้นให้แก่เครื่องกรองชีวภาพอาจทำได้โดย การเติมน้ำลงไปในตัวกลางโดยตรงโดยการใช้หัวกระจายน้ำ หรืออาจใช้วิธีให้ความชื้นไปพร้อมกับไอของสารที่จะบำบัดก็ได้ (Williams และคณะ, 1992)

2.4.3.3 อุณหภูมิของอากาศที่เข้าระบบ

เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารมลพิษโดยกระบวนการทางชีววิทยา อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการรายงานว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C และเหมาะสมที่อุณหภูมิประมาณ 37°C หากอุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจจะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ (Williams และคณะ, 1992) และในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง $20\text{-}40^{\circ}\text{C}$ (Leson และ Winer, 1991) ในการศึกษาการบำบัดเอธิลอะซิเตท ในช่วงที่มีปริมาณสารเข้าระบบสูงมากพบว่าอุณหภูมิที่ทางออกของระบบจะเพิ่มถึง 20°C ซึ่งเป็นไปได้ว่าความร้อนเกิดจากการย่อยสลายเอธิลอะซิเตทแล้วระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม (Devanny และคณะ, 1999)

2.4.3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เนื่องจากจุลินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญในการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีกรองชีวภาพ ดังนั้นการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบจึงมีความสำคัญ และเนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถในการเจริญเติบโตและทำงานได้ดีในสภาพความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างอย่างรวดเร็วอาจส่งผลให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ตายได้โดยปกติแล้วค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวกลางที่ใช้ในระบบกรองชีวภาพจะมีค่าในช่วง 6-8 แต่ในการบำบัดสารบางชนิด เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogensulfide) จะเกิดกรดซัลฟูริกขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง วิธีแก้ปัญหานั้นต้นจึงมักใช้ตัวกลางที่มีความสามารถในการรักษาช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ค่อนข้างคงที่ (Williams และคณะ, 1992)

มีรายงานการทดลองใช้ระบบกรองชีวภาพบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากโรงบำบัดน้ำเสีย พบว่าเกิดกรดซัลฟูริกจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความแปรผันในช่วง 2-7 แต่พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดยังคงมากอยู่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

2.4.3.5 ความดันลด

ความดันลดคือความต่างระหว่างความดันเข้าสู่ระบบและความดันออกจากระบบ หากระบบมีความดันลดมากจะส่งผลให้อัตราการไหลเข้าของอากาศลดลง ความดันลดของตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน ความพรุนของตัวกลางหรือความสามารถของตัวกลางในการให้อากาศไหลผ่านจะเป็นตัวกำหนดค่าความดันลด ความพรุนของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของการดำเนินระบบขึ้นอยู่กับความชื้นและการย่อยสลายทางชีววิทยาในระบบที่ทำให้สภาพของตัวกลางเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นหากระบบมีความชื้นมากจะทำให้อากาศสามารถไหลผ่านตัวกลางได้น้อยลง ค่าความดันลดจึงสูงขึ้น อีกกรณีหนึ่งคือเมื่อระบบดำเนินไปช่วงเวลาหนึ่งแล้วเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ ทำให้มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลให้เกิดการอุดตันในตัวกลาง อากาศจึงไหลผ่านตัวกลางได้น้อยลงความดันลดจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน ค่าความดันลดนี้จึงมีประโยชน์ในการตรวจสอบการยุบตัวหรืออัดตัวของตัวกลาง ถ้าค่าความดันลดมีค่าสูงมากกว่าปกติควรมีการตรวจสอบความชื้นของระบบหรือควรมีการเปลี่ยนตัวกลางชุดใหม่แทน (Deviny และคณะ, 1999; Leson และ Winer, 1991; Williams และคณะ, 1992)

2.4.3.6 อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ

กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นช้ากว่ากระบวนการทางเคมี ดังนั้นจำเป็นต้องใช้เวลาในการสัมผัสของสารมลพิษกับตัวกลางและจุลินทรีย์เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบจะบอกถึงระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางได้ ถ้าอัตราไหลของอากาศเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นระยะเวลาของการสัมผัสระหว่างไอของสารพิษกับตัวกลางจะลดลง ระยะเวลาในการแพร่เข้าสู่ไบโอฟิล์มและเกิดการย่อยสลายก็จะลดลง ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลงด้วย (Deviny และคณะ, 1999)

Arulneyam และ Swaminathan (2000) ได้ศึกษาการบำบัดไอของเอธานอลโดยใช้เม็ดพอลิสไตรีนผสมกับปุ๋ยหมักเป็นตัวกลาง โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated sludge) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบจะทำให้

ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าเพิ่มอัตราไหลของอากาศเข้าระบบให้มีค่าสูงมาก ๆ ระบบจะไม่สามารถบำบัดไอของเอทานอลได้เลย แม้ว่าความเข้มข้นของไอเอทานอลมีค่าต่ำก็ตาม

2.4.3.7 ความเข้มข้นเข้าระบบ

ความเข้มข้นเข้าระบบคือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของสารมลพิษที่จะผ่านเข้าสู่ระบบ ดังนั้นจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบโดยตรง โดยปกติแล้วตัวกรองชีวภาพจะมีความสามารถในการบำบัดสารที่มีความเข้มข้นเข้าระบบต่ำ ๆ ได้ดี และความสามารถในการบำบัดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าสูง ในกรณีที่ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นจะทำให้สารมลพิษสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้มากขึ้น เมื่อจุลินทรีย์นำสารมลพิษเหล่านั้นไปใช้มากขึ้นก็จะมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้รูพรุนของตัวกลางลดลงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของอากาศและเกิดภาวะการไหลของอากาศเป็นช่อง (Channeling หรือ Shortcut) ในตัวกลางได้ (Jorio และคณะ, 2000)

2.4.3.8 ชนิดของตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในตัวกรองชีวภาพแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ตัวกลางอินทรีย์ (Organic) หรือตัวกลางธรรมชาติ และตัวกลางสังเคราะห์หรือตัวกลางอนินทรีย์ (Inorganic) คุณสมบัติของตัวกลางที่ดีต้องสามารถเก็บกักน้ำได้เหมาะสม มีความพรุนทำให้อากาศไหลผ่านได้ดี สามารถทำให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้ดี และไม่ทำให้เกิดความดันลดมาก ตัวกลางที่มักนำมาใช้ได้แก่ ดิน ปุ๋ยหมัก ถ่านพีท ขุยมะพร้าว ถ่านกัมมันต์ และเม็ดพอลิสไตรีนที่เคลือบผิวด้วยคาร์บอน (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

2.4.3.9 สารอาหารในตัวกลาง

จุลินทรีย์แต่ละชนิดที่ใช้ในตัวกลางชีวภาพมีความสามารถในการใช้สารมลพิษเป็นแหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ยังต้องการสารอาหารอื่น ๆ ด้วย เช่น ไนโตรเจน โฟสเฟอรัส ซีลีเนียม ซัลเฟอร์ แคลเซียม แมกนีเซียม และอื่น ๆ เครื่องกรองชีวภาพจะทำงานได้ดีย่อมต้องมีสารอาหารให้จุลินทรีย์ใช้อย่างครบถ้วน ตัวกลางอินทรีย์จึงถูกใช้อย่างแพร่หลาย

โดยเฉพาะปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมัก ในกรณีที่ต้องใช้ตัวกลางสังเคราะห์จะมีการเติมสารอาหารเหล่านี้ลงไปด้วยเสมอ (Devinny และคณะ, 1999)

ตารางที่ 2.4 ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษชนิดต่าง ๆ

ชนิดของสารมลพิษ	จุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลาย	อ้างอิง
- Acetaldehyde, Butanone, other Aldehydes and Ketones	<i>Gordona corynebacterium</i> <i>Aspergillus niger</i>	Kim และคณะ, 1999
- Pinene	<i>Pseudomonas maltophilia</i> <i>Serratia marcescens</i>	Kim และคณะ, 1999
- Phenol	<i>Pseudomonas putida</i> <i>Candida tropicalis</i> <i>Fusarium floccuferium</i> <i>Trichosporon cutaneum</i>	Kim และคณะ, 1999
- Sulfide	<i>Bacillus</i> sp. <i>Streptomyces thiobacilli</i>	Cho และคณะ, 1991b
- Hydrogen sulfide	<i>Xanthomonas</i> sp. DY44	Cho และคณะ, 1992
- Dichloromethane	<i>Hyphomicrobium</i> sp. gj21 <i>Pseudomonas putida</i>	Zilli และคณะ, 1993
- 1,2-Dichloroethane	<i>Xanthobacter autotrophicus</i>	Zilli และคณะ, 1993
- Methanethiol, Dimethyl Sulfide, Dimethyl Disulfide	<i>Thiobacillus thioparus</i> Tkm <i>Thiobacillus thioparus</i> DW44 <i>Basidiomycete cephalosporium</i> <i>Penicillium</i> sp. <i>Aspergillus</i> sp. <i>Pseudomonas acidovorans</i> Dm2-11 <i>Trichoderma</i> sp. <i>Methylotrophic</i> sp. strian155	Zhang และคณะ, 1991a Cho และคณะ, 1991a Zhang และคณะ, 1992

2.5 การศึกษาเกี่ยวกับตัวกรองชีวภาพ

การศึกษาเกี่ยวกับตัวกรองชีวภาพได้รับความสนใจมาเป็นเวลานานแล้ว การศึกษาและพัฒนาเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีการที่มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ แต่มีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษสูง อีกทั้งสารมลพิษก็มีอยู่มากมายหลายชนิดที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการตื่นตัวและสนใจจะศึกษามากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเช่น

Leson และ Winer (1991) ศึกษาสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลาง พบว่าตัวกลางแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน และเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ และประสิทธิภาพการทำงานของตัวกรองชีวภาพ ดินเป็นวัสดุชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับตัวกรองชีวภาพ ต่อมาในปี ค.ศ. 1992 Williams และคณะ ได้รายงานว่าดินและปุ๋ยหมักเป็นตัวกรองชีวภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากอนุภาคของดินและปุ๋ยหมักมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้สัมผัสกับสารมลพิษได้มาก และมีสภาพความพรุนทำให้น้ำและอากาศไหลผ่านได้ดี

Zhu และคณะ (1998) ทดลองสร้างตัวกรองชีวภาพ โดยใช้เศษหญ้าเป็นตัวกลางและใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นแหล่งจุลินทรีย์ มีการแปรผันปริมาณถ่านกัมมันต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อทดลองกำจัดไธระเหยของเบนซีน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด (Removal Efficiency) มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราไหลของอากาศเข้าระบบเป็น 0.3 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของเบนซีนเป็น 75 ppm แต่เมื่อเพิ่มอัตราไหลของอากาศเข้าระบบหรือความเข้มข้นของเบนซีนแล้ว ตัวกรองชีวภาพที่มีถ่านกัมมันต์ผสมอยู่จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า และมีความเสถียรมากกว่า

Jorio และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดไธระเหยของไซลีน โดยใช้เม็ดพีทเป็นตัวกลาง และมีการเติมสารอาหารให้กับระบบทุกวัน พบว่าแบคทีเรียมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 92 ของการทดลอง ในการดำเนินระบบนี้มีการแปรผันอัตราไหลของอากาศเข้าระบบและความเข้มข้นของไซลีน พบว่าเมื่ออัตราไหลของอากาศเข้าระบบเป็น 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำให้มีระยะเวลาเก็บกัก (Empty Bed Residence Time, EBRT) เป็น 157 วินาที ระบบจะมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด (Maximum Elimination Capacity, EC_{max}) ที่ 67 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราไหลของอากาศหรือความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบ จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและความสามารถในการบำบัดของระบบมีค่าลดลง และเมื่อให้ความเข้มข้นของไซลีนเข้าระบบสูงกว่าภาวะที่ระบบมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด จะทำให้ความสามารถในการบำบัดของระบบมีค่าลดลง แสดงว่าจลนศาสตร์ของการย่อยไซลีนโดยจุลินทรีย์นั้นไม่เป็น zero-order เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไซลีนสูง ๆ จะมีผลยับยั้งกิจกรรม

ของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วย โดยพบว่ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ยังมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความสามารถในการบำบัดของระบบด้วย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์

Zilli และคณะ (2000) ได้ศึกษาการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของโกลูอินด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้เชื้อ *Acanitobacter sp.* NCIMB 9689 มีการแปรผันความเข้มข้นของโกลูอินในช่วง 0.1-4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันอัตราเร็วของอากาศในช่วง 17.8-255 เมตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของระบบจะสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีปริมาณสารเข้าระบบ (Mass Loading Rate) น้อยกว่า 113.7 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หากอัตราเร็วของอากาศเข้าระบบเป็น 127.5 เมตรต่อชั่วโมง จะทำให้ความสามารถในการบำบัดของระบบมีค่าสูงสุดที่ 242 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเมื่อความเข้มข้นของโกลูอินมีค่า 4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลงเหลือเพียง 23.8 เปอร์เซ็นต์

Lu และคณะ (2000) ศึกษากระบวนการ Trickling Bed Biofilter เพื่อบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเบนซีน โกลูอิน เอธิลเบนซีน และออร์โท-ไซลีน โดยใช้ถ่านหิน (Coal) เป็นตัวกลางและใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแอกทิเวเตดสลัดจ์ เมื่อให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของสารละลายเบนซีน โกลูอิน เอธิลเบนซีน และออร์โท-ไซลีนในปริมาณต่ำกว่า 64, 110, 53, และ 55 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบมีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของสารในปริมาณต่ำกว่า 96 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีทั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ของสารชนิดเดียวและสารผสม

สรารุท หาญทงศ์ (2543) ได้ทดลองใช้ตัวกรองชีวภาพบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเบนซีนและโกลูอิน โดยใช้ดินผสมปุ๋ยคอกเป็นตัวกลาง ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำอัดลม แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบคือ แบบดรัมและแบบหอดสูง 3 คอลัมน์ และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกศึกษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเก็บกักในระบบของตัวกรองแบบดรัมเป็น 12.2 วินาที และแบบหอดสูงเป็น 22.2 วินาที พบว่าที่อัตราไหลของอากาศเป็น 44.22 และ 33.27 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเป็น 86.1 และ 73.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ช่วงที่สองทดลองที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส ตัวกรองชีวภาพแบบดรัมเมื่อมีอัตราไหลของอากาศเป็น 80.13 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำให้มีระยะเวลาเก็บกักเป็น 6.7 วินาที พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนและโกลูอินเป็น 95 และ 93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนตัวกรองชีวภาพแบบหอดสูงเมื่อมีอัตราไหลของอากาศเป็น 73.7

ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำให้มีระยะเวลาเก็บกักเป็น 7.4 วินาที พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนมีค่า 86-92 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอีนมีค่า 93-94 เปอร์เซ็นต์

Aizpuru และคณะ (2001) ศึกษาการบำบัดไอผสมของสารอินทรีย์ระเหยพวกสารเพิ่มออกซิเจน (Oxygenated compound) สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) และสารประกอบคลอรีเนตเตท (Chlorinated compound) โดยใช้ถ่านพีท (peat) เป็นตัวกลาง และใช้จุลินทรีย์จากแอคติเวเต็ดสลัดจ์ จากการทดลองพบว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดเพิ่มออกซิเจนถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายก่อนสารประกอบอะโรมาติกและสารประกอบคลอรีเนตเตท จึงมีการตั้งสมมติฐานขึ้น 2 ข้อคือ แแบคทีเรียในระบบมีกลุ่มเดียวแต่สารที่ย่อยสลายได้ง่ายกว่าจะถูกบำบัดก่อน สมมติฐานอีกข้อหนึ่งคือมีการแข่งขันกันเองระหว่างแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่บำบัดเฉพาะสารอินทรีย์ระเหยชนิดเพิ่มออกซิเจนกับแบคทีเรียกลุ่มที่บำบัดสารประกอบอะโรมาติกและสารประกอบคลอรีเนตเตท โดยระบบมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด 120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Dhamwichukorn และคณะ (2001) ศึกษาการบำบัดไอระเหยของเมทานอล และแอลฟา-ไพอิน (α -pinene) ในตัวกรองชีวภาพที่ควบคุมอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีการแปรผันอัตราไหลของอากาศเข้าระบบ พบว่าในภาวะที่มีอาหารเพียงพอ แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ทั้งเมทานอลและแอลฟา-ไพอิน เมื่อระบบมีระยะเวลาเก็บกักนาน 10.85 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของเมทานอลมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดแอลฟา-ไพอินมีเพียง 23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดอัตราไหลของอากาศจนทำให้มีระยะเวลาเก็บกักเป็น 18.24 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของเมทานอลและแอลฟา-ไพอินมีค่า 95 เปอร์เซ็นต์ทั้ง 2 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการใช้สารลดแรงตึงผิว Celite R-635 ร่วมด้วย จะทำให้การย่อยสลายของแอลฟา-ไพอินเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

Yoon และ Park (2002) ศึกษาผลของความเข้มข้นที่เข้าระบบ ระยะเวลาที่ไอระเหยของสารสัมผัสกับตัวกลาง (ระยะเวลาเก็บกัก) และอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compound, VOCs) 4 ชนิด ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน ไซลีน และเอทิลเบนซีน โดยใช้ถ่านพีทเป็นตัวกลาง พบว่าเมื่อมีระยะเวลาเก็บกัก 3 นาที ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่า 65 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 และ 45 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบเพิ่มขึ้นเป็น 83 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด 93 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 74 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แต่เมื่อลดระยะเวลาเก็บกักเหลือ 1.5 นาที ความเข้มข้นเข้าระบบมีค่า 92 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเป็น 91 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 และ 32 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ และเมื่อลดระยะเวลาเก็บกักเหลือเพียง 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 68 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Moe และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพและความเสถียรของตัวกรองชีวภาพที่ใช้ราเป็นตัวย่อยสลายไอของสารอินทรีย์ระเหยผสม มีปริมาณสารที่เข้าสู่ระบบ 94.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำการทดลองเป็นเวลา 94 วันโดยแบ่งการทดลองออกเป็นช่วง ๆ ที่มีการให้สารเข้าสู่ระบบและมีการหยุดพักเป็นระยะ พบว่าตัวกรองชีวภาพนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้มีการให้สารมลพิษเข้าสู่ระบบไม่ต่อเนื่อง แสดงว่าตัวกรองชีวภาพนี้ค่อนข้างมีความเสถียร

Dehghanzaden และคณะ (2005) ทดลองใช้ตัวกรองชีวภาพเพื่อบำบัดไอระเหยของสไตรีน โดยใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลาง ความเข้มข้นของสไตรีนในระบบมีค่า 0.25 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีระยะเวลาเก็บกักในตัวกลาง 360 วินาที ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน พบว่าเมื่อปริมาณของสไตรีนเข้าสู่ระบบมีค่า 60 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะทำให้ระบบมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด (EC_{max}) 45 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเมื่อลดระยะเวลาเก็บกักเหลือ 60 และ 30 วินาที พบว่าความสามารถในการบำบัดสูงสุดลดลงเหลือเพียง 39 และ 27 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าถ้าความเข้มข้นในระบบมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จลนศาสตร์ของการย่อยสลายสไตรีนจะเป็นแบบ First-Order แต่หากความเข้มข้นในระบบมีค่ามากกว่า 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จลนศาสตร์ของการย่อยสลายสไตรีนจะเป็นแบบ Zero-Order

Liu และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดไอของสารอินทรีย์ระเหย 3 ชนิด ได้แก่ โทลูอีน ไอโซโพรพานอล และเอทิลอะซิเตต โดยใช้ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลาง พบว่าเมื่อระบบมีระยะเวลาเก็บกัก 45-90 วินาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความสามารถในการบำบัดเอทิลอะซิเตตและโพรพานอลสูงสุด 200 และ 120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของโทลูอีนมีค่าในช่วง 40-100 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้นในระบบ 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร สาเหตุที่น่าจะเกิดจากการยับยั้งของเอทิลอะซิเตตและไอโซโพรพานอล นอกจากนี้ยังพบว่าในระหว่างการดำเนินระบบมีการอัดตัวแน่นของตัวกลาง ทำให้เกิดช่องว่าง (Channeling) ในตัวกลาง ระบบมีค่า pH ลดลงและมีปริมาณไนโตรเจนในตัวกลางลดลง ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการเสื่อมของตัวกลาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและความสามารถในการบำบัดมีค่าลดลง

Rene และคณะ (2005) ทดลองสร้างตัวกรองชีวภาพเพื่อกำจัดไอระเหยของโทลูอีน โดยใช้ปุ๋ยหมักผสมเม็ดเซรามิก (Ceramic bead) เป็นตัวกลาง และใช้จุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสีย พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ระหว่าง 40-95 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถในการ

บำบัดของระบบมีค่าในช่วง 3.5-128 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยความแตกต่างของความสามารถในการบำบัดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโกลูอินในระบบ

จิรววัฒน์ กัณพยันต์ (2005) ศึกษาการบำบัดไธระเหยของอะซิโตนด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้ตัวกลางหลัก 4 ชนิดคือ ดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และซี้กบ (เศษไม้) โดยมีการผสมเศษไม้และปุ๋ยคอกในอัตราส่วนต่าง ๆ และใช้เชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน ในการทดลองมีการแปรผันอัตราไหลของอากาศและความเข้มข้นของอะซิโตน พบว่าตัวกลางแต่ละชนิดมีระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมแตกต่างกัน หากจะให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ตัวกลางชนิดปุ๋ยหมักจะต้องมีเวลาเก็บกัก 70 วินาที ส่วนตัวกลางชนิดดินใบก้ามปู ดินสีดา และซี้กบ ต้องมีระยะเวลาเก็บกัก 80 วินาที ความสามารถในการบำบัดสูงสุดของตัวกลางชนิดดินใบก้ามปู ดินสีดา ปุ๋ยหมัก และซี้กบ มีค่า 97, 90, 120 และ 83 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดลองนี้ปุ๋ยหมักมีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดอะซิโตนที่สุด นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดอัตราส่วนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อมวลของอะซิโตนที่หายไป ซึ่งมีค่า 1.6 แสดงว่าการบำบัดอะซิโตนเกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจริง

Singh และคณะ (2006) ทดลองบำบัดไธระเหยของโกลูอินด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้ Yellow-gram (*Cajanus cajan*) stems เป็นตัวกลาง และใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ทำการแปรผันอัตราไหลของอากาศในช่วง 0.18-0.24 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และแปรผันความเข้มข้นของโกลูอินเข้าระบบระหว่าง 2.56-4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราไหลของอากาศเข้าระบบมีค่า 0.18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และปริมาณโกลูอินเข้าระบบมีค่า 300 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มปริมาณโกลูอินเข้าระบบจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง และเมื่ออัตราไหลของอากาศเข้าระบบมีค่า 0.24 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงระบบมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด 342 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Kim และคณะ (2007) ศึกษาการย่อยสลายไธระเหยของไซลีนด้วยตัวกรองชีวภาพแบบ trickle bed ในการทดลองใช้เทคนิค periodic backwashing คือมีการเติมอาหารให้กับระบบสัปดาห์ละ 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เกิดภาวะขาดอาหาร 2 วัน มีการควบคุมปริมาณโกลูอินเข้าระบบ 46.9 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จากการติดตามลักษณะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์พบว่าในช่วงแรกจะมีการเจริญของจุลินทรีย์สูงบริเวณใกล้กับทางเข้าของสาร (inlet) แต่เมื่อเวลาผ่านไปการเจริญของจุลินทรีย์จะกระจายตัวตลอดตัวกลาง หลังจากเกิดภาวะขาดอาหาร 2 วันพบว่าประมาณ EPS เพิ่มขึ้น ในขณะที่มวลชีวภาพลดลง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

อยู่ จึงสรุปได้ว่าจุลินทรีย์จะมีการปรับตัวให้มีมวลชีวภาพและกิจกรรมอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมให้อยู่รอดได้ในภาวะขาดอาหาร

Dorado และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดไอระเหยของโทลูอินด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้ขุยมะพร้าวผสมกับไบสเปนเป็นตัวกลาง และใช้เชื้อจุลินทรีย์จากแอกทิเวเตดสลัดจ์ มีการควบคุมปริมาณโทลูอินเข้าระบบมีค่า 77 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และระยะเวลาเก็บกัก 60 วินาที พบว่าในวันที่ 1-50 ของการทดลองระบบจะมีแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์หลัก โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อการทดลองดำเนินไปเกิน 50 วัน พบว่าค่า pH ของระบบลดลงเหลือเพียง 3 เนื่องจากเกิดกรดเบนโซอิก (benzoic acid) ที่เกิดจากการย่อยโทลูอิน แต่ระบบกลับมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จึงนำจุลินทรีย์ในช่วงนี้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ (identified) พบว่าเป็นรา *Aureobasidium* sp. และ *Clonostachy* sp. จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโทลูอินของระบบส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของรา

Pandey และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดไอระเหยของไฟรีดินด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้เศษไม้ผสมปุ๋ยหมักเป็นตัวกลาง และใช้แบคทีเรีย *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN ในการบำบัด มีการควบคุมความชื้นของตัวกลางเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อปริมาณไฟรีดินเข้าระบบเป็น 434 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีระยะเวลาเก็บกัก 28.5 วินาที ระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์

Jeong และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดไอระเหยของไซลีนด้วยตัวกรองชีวภาพ โดยใช้ตัวกลางสังเคราะห์ และใช้แบคทีเรีย *Rhodococcus* sp. BTO62 ในการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไซลีนเข้าระบบ พบว่าระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีปริมาณไซลีนเข้าระบบ 21 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไซลีนเข้าระบบเป็น 148 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงเหลือ 55 เปอร์เซ็นต์ และยังมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพียงชนิดเดียว (sterile condition) กับภาวะที่ไม่มีการควบคุมเชื้อ (non-sterile condition) พบว่าในภาวะที่มี *Rhodococcus* sp. BTO62 (sterile condition) เพียงชนิดเดียวประสิทธิภาพในการบำบัดไซลีนมีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีความสามารถในการบำบัดไซลีนสูงสุด 41 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่ในภาวะที่ไม่มีการควบคุมเชื้อ (non-sterile) พบว่าความสามารถในการบำบัดไซลีนมีค่าสูงถึง 160 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งน่าจะเกิดจากการย่อยสลายของไซลีนจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นร่วมด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าในภาวะที่ให้ไอระเหยของไซลีนร่วมกับโทลูอิน จะมีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าการให้ไซลีนเพียงอย่างเดียว

จากตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงข้างต้น จะเห็นได้ว่าแม้สารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตรวมถึงมนุษย์ด้วย จะมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่การศึกษาเกี่ยวกับสารมลพิษยังมีค่อนข้างจำกัด งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงผลกระทบจากสารไดออกซินซึ่งมีความเป็นพิษสูงมาก แต่เนื่องจากในประเทศไทยไม่สามารถศึกษาทดลองเกี่ยวกับสารไดออกซินได้ จึงทำได้เพียงศึกษาจากสารที่มีโครงสร้างคล้ายไดออกซิน จากการทดลองของ บัทมาพร ประชุมรัตน์ (2546) ซึ่งคัดแยกสารที่มีความสามารถในการย่อยสลายไดเบนโซฟิวแรนได้หลายสายพันธุ์ ประกอบกับในปัจจุบันมีการให้ความสำคัญกับการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องกรองชีวภาพมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเครื่องกรองชีวภาพโดยใช้ราที่คัดแยกโดย บัทมาพร ประชุมรัตน์ เป็นแหล่งจุลินทรีย์ และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไอระเหยของไดเบนโซฟิวแรน เพื่อสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องกรองชีวภาพในขั้นต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องให้ความร้อน (Dry Bath Incubator) รุ่น MD-01N-220 ของบริษัท Major Science, ประเทศไต้หวัน
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) รุ่น EcoTempTW20 ของบริษัท Julabo Labortechnik GMBH, ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) รุ่น SS-325 ของบริษัท Tomy Seiko, ประเทศญี่ปุ่น
4. เครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated Centrifuge) รุ่น Avanti™ J-30I. ของบริษัท Beckman Coulter, ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated Centrifuge) รุ่น Kubota 6500 ของบริษัท Kubota, ประเทศญี่ปุ่น
6. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 20 ของบริษัท Spectronic Unicam, ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น SevenEasy ของบริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
8. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด (Analytical Balance) รุ่น L2200p ของบริษัท Sartorius, ประเทศเยอรมนี
9. เครื่องชั่งน้ำหนักหยาบ (Laboratory Balance) รุ่น PB3002 ของบริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
10. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer) รุ่น 502P-2 ของบริษัท PMC, ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. เครื่องผสมสาร (Vortex Mixer) รุ่น Vortex Genie-2 ของบริษัท Scientific Industry Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonicator) รุ่น Sonorex RK100 ของบริษัท Bandelin Electronic, ประเทศเยอรมนี
13. ตู้เขี่ยเชื้อแบบ Biohazard รุ่น Clean Model.V6 ของบริษัท Lab Service., Part., ประเทศไทย

14. ตู้อบฆ่าเชื้อ (Hot Air Oven) รุ่น UE600 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
15. ตู้อบแห้ง (Dryer) รุ่น UL-80 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
16. ตู้บ่มเชื้อควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) รุ่น INE 500 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
17. กล้องจุลทรรศน์ (Light Microscope) รุ่น CH30RF200 ของบริษัท Olympus Optical Co., Ltd., ประเทศญี่ปุ่น
18. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล (Digital Camera) รุ่น DSC-T70 ของบริษัท Sony, ประเทศญี่ปุ่น
19. ตัวกรองชนิด PTFE ขนาดความกว้างของรู 0.2 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร รุ่น Millex[®]-FG ของบริษัท Millipore Corporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา
20. ตัวกรองชนิด PTFE ขนาดความกว้างของรู 0.2 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร รุ่น F13-2020 ของบริษัท Chrom Tech Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา
21. กระบอกฉีดยาพลาสติกขนาด 1 มิลลิลิตร ของบริษัท Nissho Nipro, ประเทศญี่ปุ่น
22. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10, 20, 100, 200 และ 1,000 ไมโครลิตร ของบริษัท Gilson, ประเทศฝรั่งเศส
23. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นดิจิทัล (Digital Thermometer & Hygrometer) รุ่น DT-02, ประเทศจีน
24. เครื่องแก้วต่าง ๆ
25. ท่ออะคริลิก (Acrylic) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.0 เซนติเมตร ความสูง 2 เมตร และอุปกรณ์ประกอบคอลัมน์กรองอากาศ
27. ชุดเครื่องมือ Gas Chromatography รุ่น CP 3800-Mass spectrophotometer รุ่น Saturn 2200 ของบริษัท Varian ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 เคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
2. แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
3. โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) ของบริษัท Carlo Erba, ประเทศสเปน
4. โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) ของบริษัท Unilab, ประเทศออสเตรเลีย
5. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
6. โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
7. แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ของบริษัท Unilab, ประเทศออสเตรเลีย

8. แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
9. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ของบริษัท Mallinckrodt, ประเทศฝรั่งเศส
10. แคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ของบริษัท Riedel-de Haën, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
11. ผงมอลต์สกัด (malt extract) ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. ผงยีสต์สกัด (yeast extract) ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
13. เปปโตน (peptone) ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. ซูโครส (sucrose) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
15. กลูโคส (glucose) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
16. ฝุ่นผง ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
17. สีรีมาซอล บริลเลียนท์ บลู อาร์ (Remazol Brilliant Blue R) ของบริษัท Sigma Chemical, ประเทศสหรัฐอเมริกา
18. สีคูแมสซี บริลเลียนท์ บลู จี-250 (comassie brilliant blue G-250) ของบริษัท Fluka Chemie, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
19. โบวายน ซีรัม อัลบูมิน (bovine serum albumin) ของบริษัท Sigma Chemical, ประเทศสหรัฐอเมริกา
20. อลูมินา (alumina) ของบริษัท Sigma Chemical, ประเทศสหรัฐอเมริกา
21. เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
22. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ของบริษัท Carlo Erba, ประเทศสเปน
23. ไดเบนไซฟูแรน ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{O}$) ความบริสุทธิ์ $\geq 99\%$ ของบริษัท Fluka Chemie, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
24. ไดมethylซัลไฟด์ (CH_3SOCH_3) ของบริษัท Fluka Chemie, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
25. เมทานอล (CH_3OH) HPLC grade ของบริษัท Lab-scan, ประเทศไอร์แลนด์

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดสอบแอกติวิตีของราในการย่อยสลายสี RBBR

1. นำราที่คัดแยกโดย บัทยาพร ประชุมรัตน์ (2546) มาเลี้ยงบนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตรที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง potato dextrose agar (PDA) ป่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน
2. ถ่ายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร โดยเจาะริมขอบโคโลนีของรา เลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox - malt extract ที่เติมสี RBBR และอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral Salt Medium (MM) ที่เติมสี RBBR
3. ป่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 14 วัน
4. วัดค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีและค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณอาหารที่ถูกย่อย (Clear zone) ทุกวัน โดยหาค่าเฉลี่ยจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ 2 ด้านที่ตั้งฉากกัน (Chapman, 1974) ซึ่งวัดจากใต้โคโลนี บันทึกผลทุก 24 ชั่วโมง
5. เปรียบเทียบและคัดเลือกราที่สามารถเจริญเติบโตและมีความสามารถสูงในการย่อยสี RBBR ในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น เพื่อนำไปทำการทดลองขั้นต่อไป

3.3.2 การทดสอบความสามารถในการเจริญของราที่คัดเลือกบนขุยมะพร้าว

1. เตรียมขุยมะพร้าวที่ตากแห้งปริมาณ 2 กรัม ผสมกับอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox หรืออาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเลี้ยงเชื้อชนิดแบน หนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำขวดใส่อาหารเลี้ยงเชื้อนี้ไปเกลี่ยให้ขุยมะพร้าวอยู่ในระนาบในตู้ปลอดเชื้อ
2. ถ่ายเชื้อที่มีอายุ 7 วัน จากอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร โดยเจาะริมขอบโคโลนีของรา นำมาวางกลางขวดอาหารเลี้ยงเชื้อ
3. ป่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน
4. บันทึกการเจริญของเชื้อโดยวัดค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี โดยหาค่าเฉลี่ยจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ 2 ด้านที่ตั้งฉากกัน บันทึกผลทุก 24 ชั่วโมง
5. เปรียบเทียบและคัดเลือกราที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขุยมะพร้าว เพื่อนำไปทำการทดลองขั้นต่อไป

3.3.3 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายไคเบนโซฟูแรน

1. เตรียมขุยมะพร้าวที่ตากแห้งปริมาณ 2 กรัม ผสมกับอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox หรืออาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 โดยทำการแปรผันปริมาตร 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเลี้ยงเชื้อชนิดแบน หนึ่งขวดที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำขวดใส่อาหารเลี้ยงเชื้อนี้ไปเกลี่ยให้ขุยมะพร้าวให้แผ่ตามความกว้างของขวดในตู้ปลอดเชื้อ
2. นำราที่สามารถเจริญเติบโตและมีความสามารถสูงในการย่อยสลาย RBBR จากข้อ 3.3.1 และราที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขุยมะพร้าว จากข้อ 3.3.2 มาศึกษาต่อโดยเลี้ยงราในจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน
3. ถ่ายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร โดยเจาะริมขอบโคโลนีของรา นำมาวางกลางขวดอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นใส่ผลึกไคเบนโซฟูแรนที่ซังน้ำหนักแน่นอน ปิดด้วยจุกยาง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน
4. ทำชุดควบคุมเพื่อวัดการลดลงของไคเบนโซฟูแรนที่ไม่ได้เกิดจากการย่อยสลายของรา โดยเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเดียวกันที่มีการเติมผลึกไคเบนโซฟูแรนแต่ไม่ได้เติมเชื้อ แล้วบ่มในภาวะเดียวกับขวดทดลอง
5. เมื่อครบกำหนด 14 วัน นำขวดอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมเชื้อซึ่งเป็นชุดทดลอง และขวดอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุมไปวิเคราะห์หาไคเบนโซฟูแรนที่คงเหลือโดยวิธี Gas Chromatography (GC)

3.3.4 การเตรียมตัวกลางชีวภาพสำหรับตัวกรองชีวภาพ

1. เตรียมขุยมะพร้าวที่ตากแห้งผสมกับอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ในอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร ปริมาณ 270 กรัม โดยแบ่งใส่ถุงพลาสติก ถุงละ 30 กรัม จำนวน 9 ถุง หนึ่งขวดที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำถุงใส่อาหารเลี้ยงเชื้อนี้ไปเกลี่ยให้ขุยมะพร้าวแผ่ออกตามความกว้างของถุงในตู้ปลอดเชื้อ
2. นำราที่มีความสามารถย่อยไคเบนโซฟูแรนสูงที่สุดจากข้อ 3.3.3 มาเลี้ยงบนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตรที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสี RBBR บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

3. ถ่ายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสี RBBR มาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตรโดยเจาะริมขอบโคโลนีของรา บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

4. ถ่ายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง PDA โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตรโดยเจาะริมขอบโคโลนีของรา นำมาวางกลางถุงอาหารเลี้ยงเชื้อ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

5. เมื่อครบ 7 วัน นำเชื้อที่อยู่ในถุงอาหารเลี้ยงเชื้อไปบรรจุในตัวกรองอากาศชีวภาพ ใช้วิธีเขย่าเพื่อให้มีช่องว่างระหว่างตัวกลางให้น้อยที่สุด โดยไม่มีการบีบอัดตัวกลางเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการอุดตันของตัวกลาง

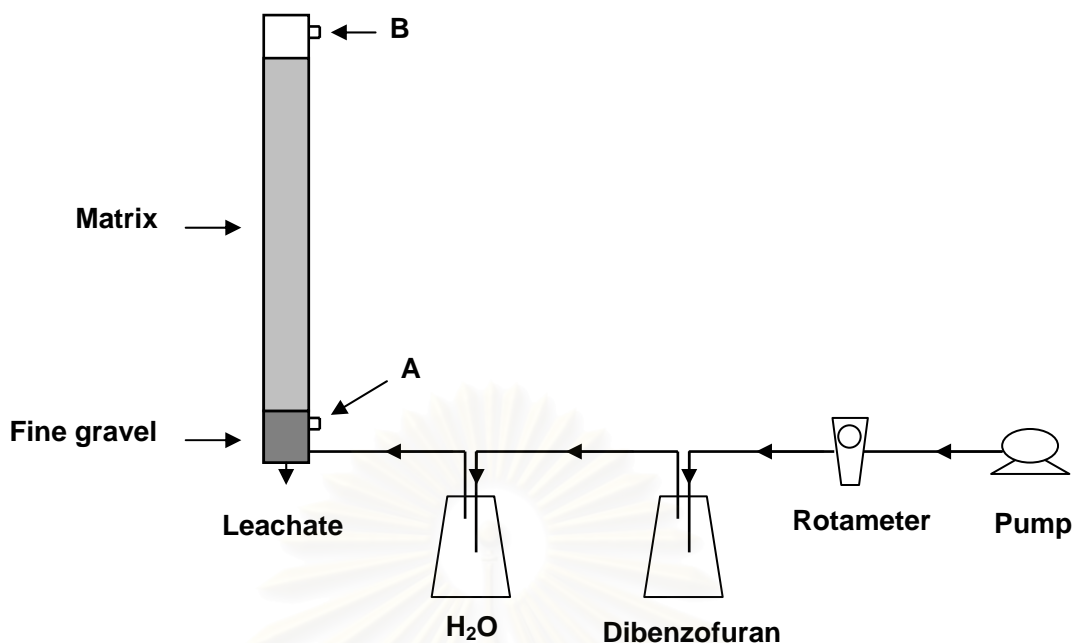
3.3.5 การสร้างตัวกรองอากาศแบบ Bench Scale Biofilter และการดำเนินระบบ

3.3.5.1 การติดตั้งตัวกรองอากาศระบบ Bench Scale Biofilter

จัดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย ท่ออะคลิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.0 เซนติเมตร ความยาว 2 เมตร โดยชั้นล่างเป็นชั้นกรวดสูง 20 เซนติเมตร ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวกลางและเป็นตัวช่วยกระจายอากาศให้ทั่วก่อนจะเข้าสู่ชั้นตัวกลาง มีจุดเก็บตัวอย่าง 2 จุด คือจุด A และ B

3.3.5.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

เดินระบบวันละ 7 ชั่วโมง การทำงานของระบบเริ่มจากปั๊มลมจะทำหน้าที่ผ่านอากาศไหลผ่าน Rotameter เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ 0.2 ลิตรต่อนาที และผ่านไปสู่อ่างชงน้ำบรรจุไดเบนไซฟูแรนที่ถูกรักษาความชื้นหรือความเข้มข้นด้วยเครื่องให้ความร้อน (Dry bath) ด้วยอุณหภูมิคงที่ จากนั้นอากาศจะพาไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนไปยังอ่างชงน้ำเพื่อลดอุณหภูมิก่อนเข้าระบบและเป็นการควบคุมความชื้นของระบบให้คงที่ จากนั้นจึงเข้าสู่ชุดการทดลอง



รูปที่ 3.1 Bench Scale Biofilter

3.3.5.3 การตรวจวัดค่าปัจจัยต่าง ๆ

วัดค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของตัวกรองอากาศ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัย จุดตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้วัด

ปัจจัย	อุปกรณ์วัดผล	จุดที่ตรวจผล
ความชื้นสัมพัทธ์	Hygrometer	จุด A และ B
อุณหภูมิ	Thermometer	จุด A และ B
ความสูงของตัวกลาง	ตลับเมตร	ความสูงตลอดตัวกลาง
pH ของตัวกลาง	pH paper	น้ำทิ้งส่วนเกิน
ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรน	GC-MS	จุด A และ B

3.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณไอของไดเบนโซฟูแรน

เก็บตัวอย่างไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนที่ทางเข้าระบบและทางออกจากระบบ ในแต่ละช่วงเวลาโดยเข็ม GC ชนิด Air-tight syringe มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (CP 3800) – Mass Spectrometry (Saturn 2200) ของบริษัท Varian โดยมีรายละเอียดดังนี้

Column	:	CP8944 (5% Phenyl-95% Dimethylpolysiloxane)
Column Type	:	WCOT Fused Silica
Stationary Phase	:	VF-5ms
Column Length	:	30 m
Inside Diameter	:	0.25 mm
Column Oven	:	80° C to 270° C at 20° C/min, 1 min
Carrier	:	Helium gas
Injector	:	Splitless, 270° C
Detector	:	Mass Spectrometry
Trap Temperature	:	150° C
Manifold	:	80° C
Transfer line	:	170° C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ราที่ใช้ในงานวิจัย

ราที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกไว้โดย ปัทมาพร ประชุมรัตน์ (2546) โดยมีทั้งหมด 8 สายพันธุ์ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1

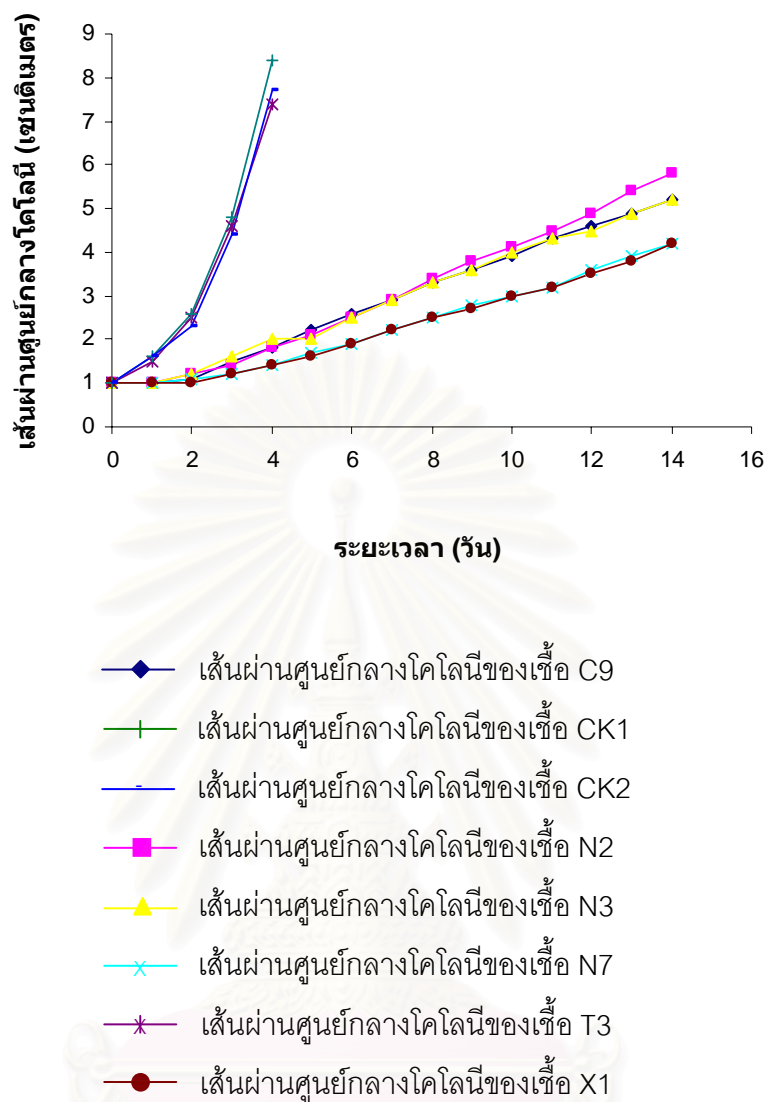
ตารางที่ 4.1 ราที่ใช้ในงานวิจัย

รหัสรา	สายพันธุ์
C9	<i>Trametes versicolor</i>
CK1	<i>Phanerochaete sordida</i>
CK2	<i>Phanerochaete ericina</i>
N2	<i>Marasmius cladophyllus</i>
N3	<i>Phanerochaete crysosporium</i>
N7	<i>Lentinus tigrinus</i>
T3	<i>Athelia pellicularis</i>
X1	<i>Polyporus tricholoma</i>

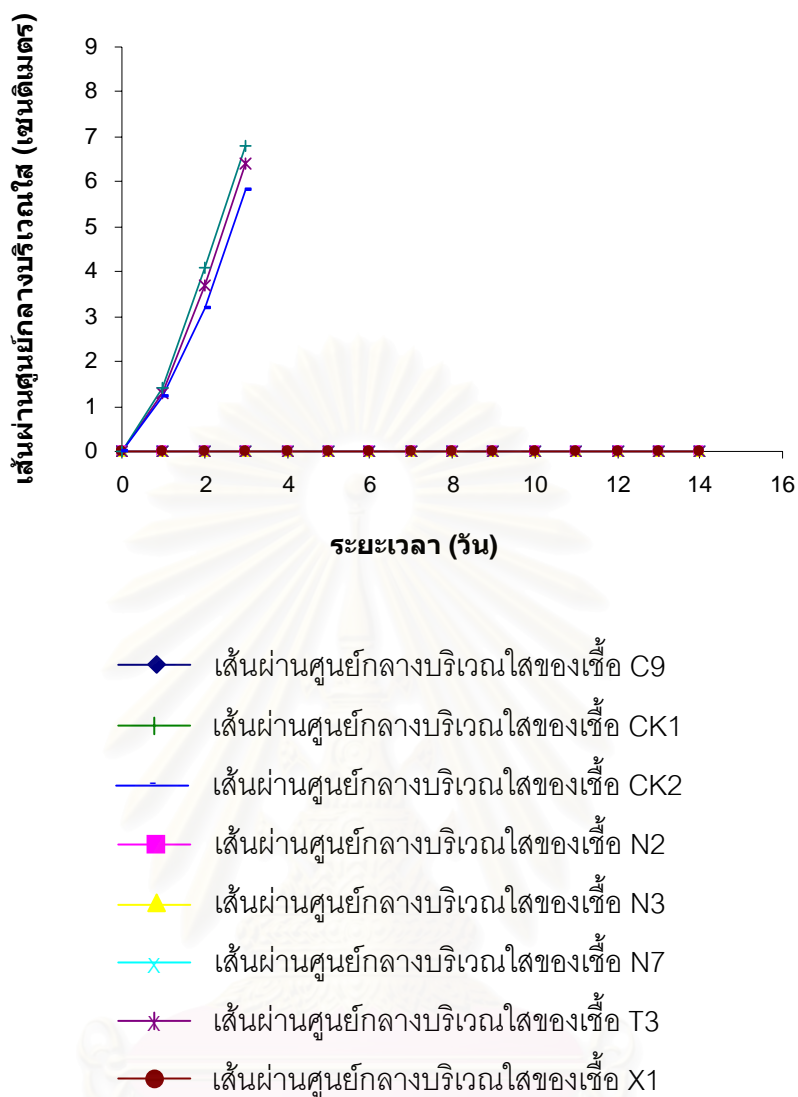
4.2 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญและย่อยสลาย RBBR ในอาหารเลี้ยงเชื้อ

4.2.1 การทดสอบการเจริญและย่อยสลาย RBBR ของรากับอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสีย RBBR

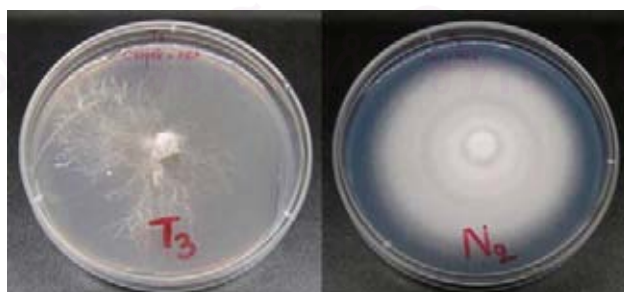
เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถของราในการย่อยสลาย RBBR ได้นำราทั้ง 8 สายพันธุ์คือ C9, CK1, CK2, N2, N3, N7, T3, และ X1 มาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสีย RBBR ตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.1 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ และลักษณะการย่อยสลาย RBBR แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ความสามารถในการเจริญของราบนอาหารแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสี่ RBBR



รูปที่ 4.2 ความสามารถในการย่อยสีของราบนอาหารแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสี RBBR



รูปที่ 4.3 การย่อยสี RBBR บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Czapek Dox-malt extract ของรา T3 และ N2

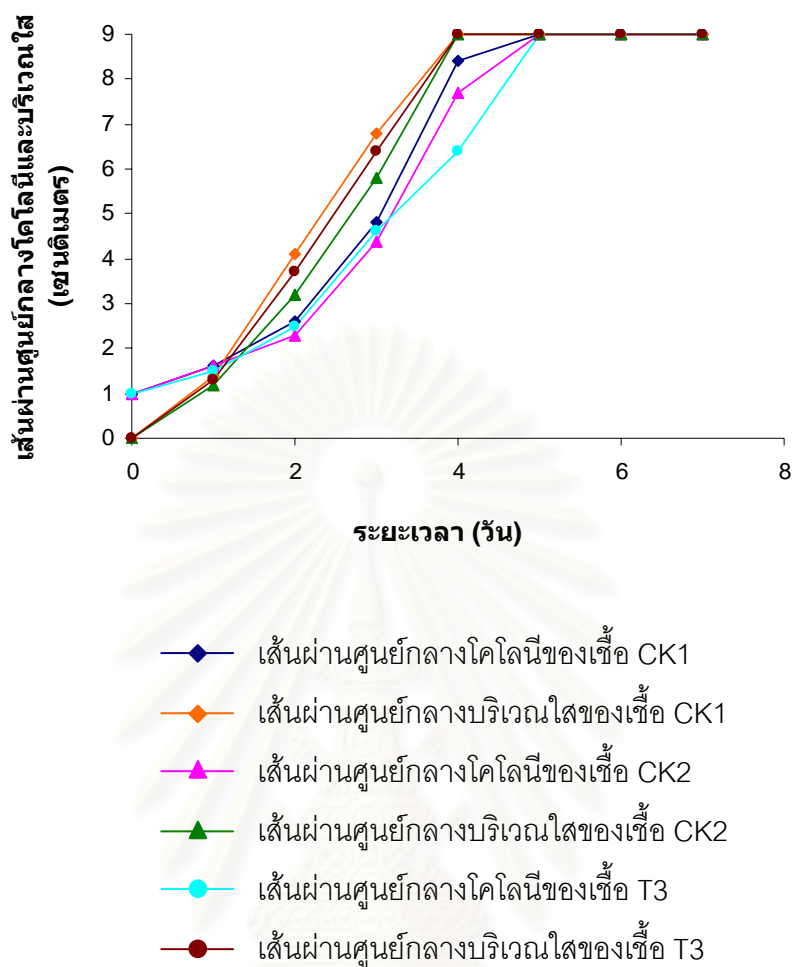
การวัดผลการเจริญและการย่อยสลาย RBBR ของราทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีราของ 2 ด้านที่ตั้งฉากกัน (Chapman, 1974) ส่วนการวัดผลการย่อยสลาย RBBR ทำได้โดยหาค่าเฉลี่ยของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใสของ 2 ด้านที่ตั้งฉากกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงว่าราทั้ง 8 สายพันธุ์มีความสามารถในการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดนี้ แต่มีอัตราการเจริญแตกต่างกัน สามารถแบ่งราได้เป็น 2 กลุ่มตามอัตราการเจริญคือ กลุ่มที่เจริญได้เร็วมี 3 สายพันธุ์ ได้แก่ รารหัส CK1, CK2 และ T3 ราในกลุ่มนี้เจริญได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองจนกระทั่งแผ่เต็มจานเพาะเชื้อในวันที่ 4 คิดเป็นอัตราการเจริญเฉลี่ย 2.25 เซนติเมตรต่อวัน กลุ่มที่เจริญได้ช้ากว่ามี 5 สายพันธุ์ ได้แก่ รารหัส C9, N2, N3, N7 และ X1 ราในกลุ่มนี้เจริญอย่างคงที่ตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองจนถึงวันที่ 14 ของการทดลอง โดยมีอัตราการเจริญเฉลี่ย 0.29-0.43 เซนติเมตรต่อวัน

ส่วนการทดลองความสามารถในการย่อยสลาย RBBR ของราทั้ง 8 สายพันธุ์ดังรูปที่ 4.2 พบว่ามีราเพียง 3 สายพันธุ์เท่านั้นที่มีความสามารถในการย่อยสลาย RBBR คือรารหัส CK1, CK2, และ T3 ส่วนราอีก 5 สายพันธุ์ที่เหลือคือ C9, N2, N3, N7 และ X1 ไม่พบการย่อยสลาย RBBR ภายใน 14 วันที่ทำการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเจริญกับความสามารถในการย่อยสลาย RBBR ของรา 3 สายพันธุ์ที่พบการย่อยสลาย RBBR ให้ผลดังรูปที่ 4.4 พบว่าการเจริญของรามีความสัมพันธ์กับย่อยสลาย RBBR กล่าวคือราที่มีการเจริญอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองซึ่งสอดคล้องกับผลการย่อยสลาย RBBR ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองเช่นเดียวกัน จึงเป็นไปได้ว่ารา CK1, CK2 และ T3 มีการสร้างเอนไซม์ออกมาย่อยสลาย RBBR ไปพร้อม ๆ กับการใช้น้ำตาลในอาหารเพื่อการเจริญ ส่วนรา C9, N2, N3, N7 และ X1 ที่มีเพียงการเจริญแต่ไม่พบการย่อยสลาย RBBR จึงน่าจะมีเพียงการใช้น้ำตาลในอาหารเพื่อการเจริญเท่านั้น

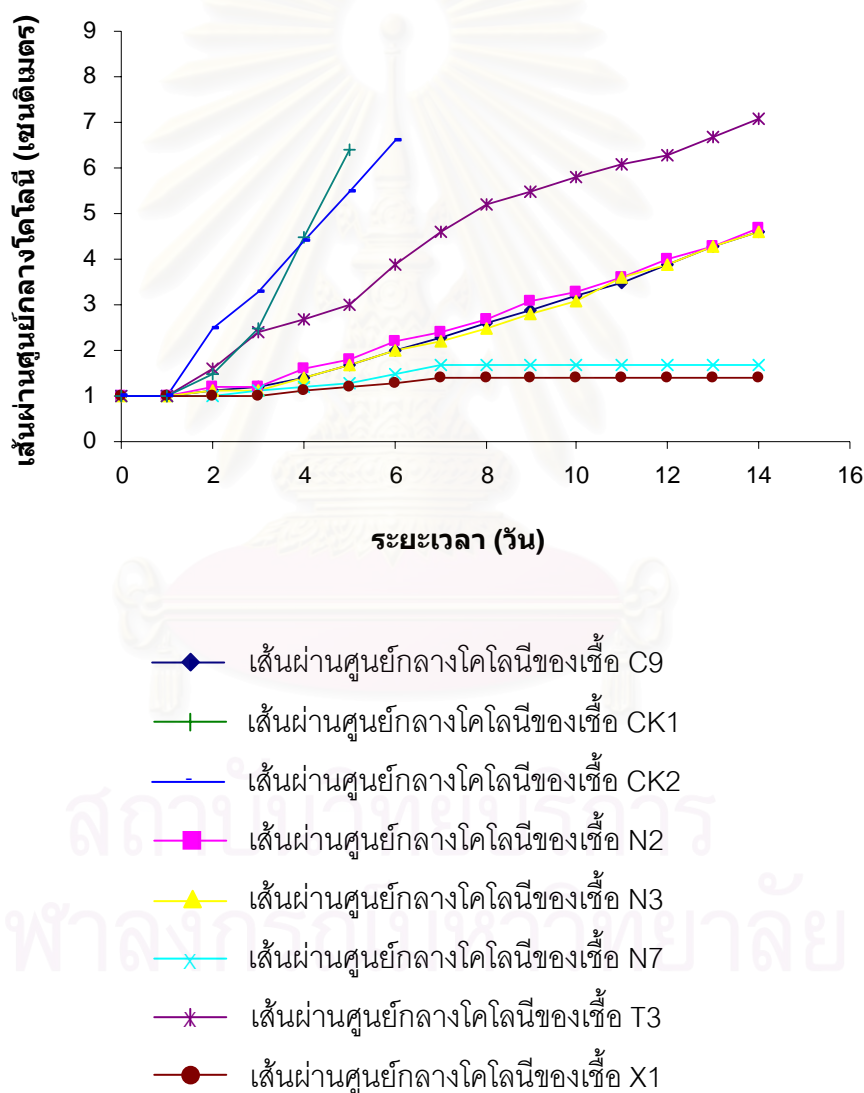
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



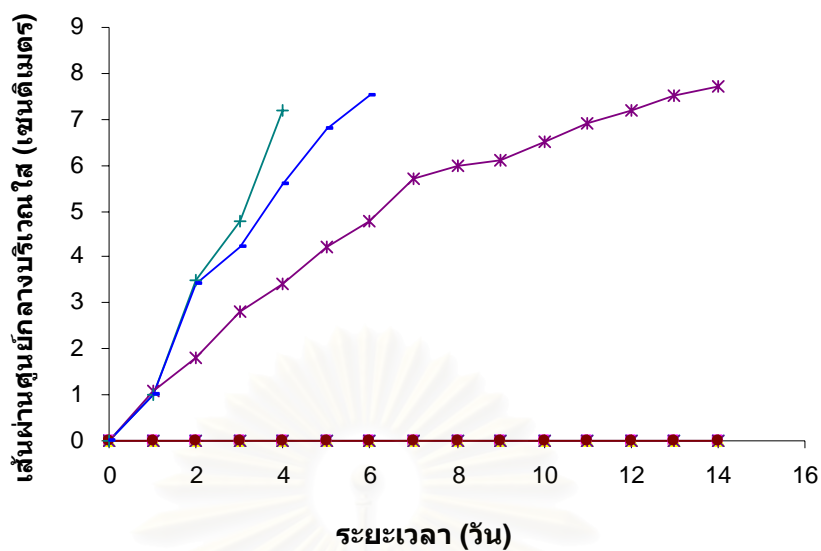
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการย่อยสลาย RBBR ของรา CK1, CK2 และ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract ที่เติมสปี RBBR

4.2.2 การทดสอบการเจริญและย่อยสรี RBBR ของรบบอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral Medium ที่เติมสรี RBBR

จากการทดสอบความสามารถในการเจริญและย่อยสรี RBBR ของราทั้ง 8 สายพันธุ์คือ C9, CK1, CK2, N2, N3, N7, T3, และ X1 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น mineral medium ที่เติมสรี RBBR ตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.1 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.5 ตามลำดับ และลักษณะการย่อยสรี RBBR แสดงดังรูปที่ 4.7

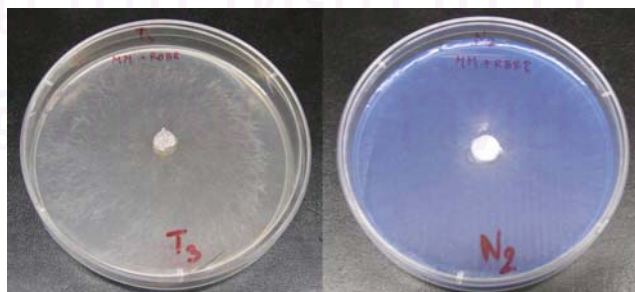


รูปที่ 4.5 ความสามารถในการเจริญของรบบอาหารแข็ง Mineral Medium ที่เติมสรี RBBR



- ◆ เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ C9
- + เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ CK1
- เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ CK2
- เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ N2
- ▲ เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ N3
- × เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ N7
- * เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ T3
- เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใสของเชื้อ X1

รูปที่ 4.6 ความสามารถในการย่อยสีของราบนอาหารแข็ง Mineral Medium ที่เติมสี RBBR



รูปที่ 4.7 การย่อยสี RBBR บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral medium ของรา T3 และ N2

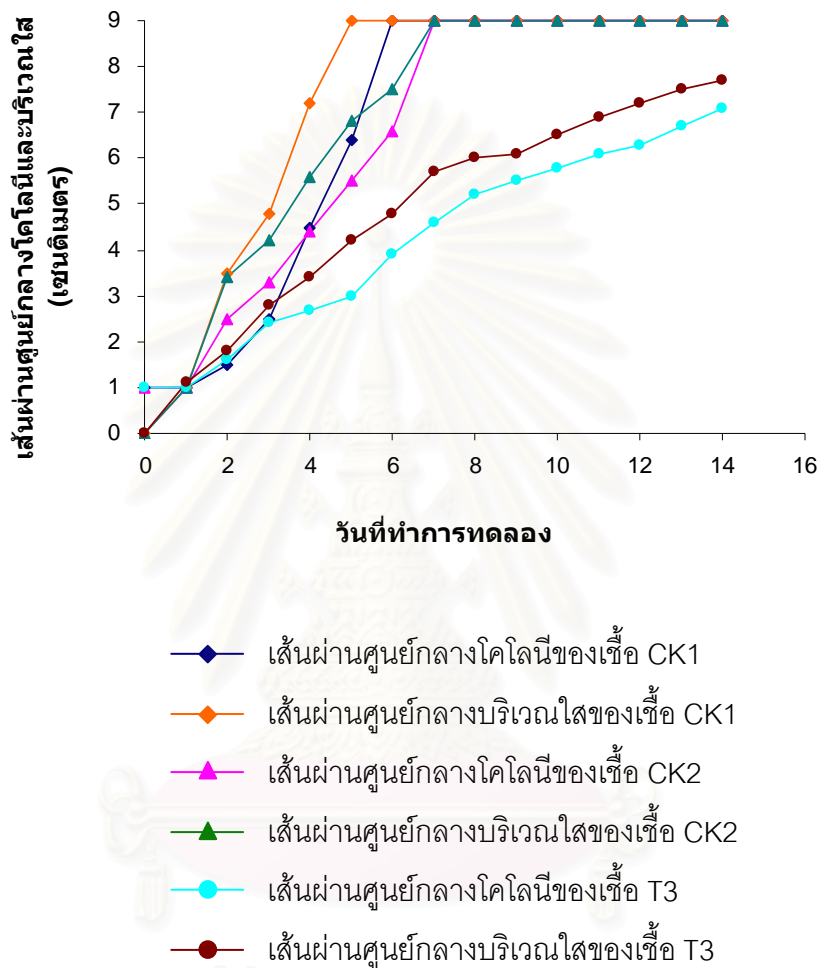
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 พบว่าราทั้ง 8 สายพันธุ์มีความสามารถในการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดนี้ แต่มีอัตราการเจริญเติบโตแตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งราได้เป็น 4 กลุ่มตามความสามารถในการเจริญคือ กลุ่มแรกเป็นราที่มีอัตราการเจริญเร็วที่สุด ประกอบด้วยรา 2 สายพันธุ์ ได้แก่ รารหัส CK1 และ CK2 ซึ่งมีความสามารถในการเจริญได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงวันที่ 2 ของการทดลองและเจริญจนเต็มจานเพาะเชื้อในวันที่ 7 ของการทดลอง คิดเป็นอัตราการเจริญเฉลี่ย 1.3 เซนติเมตรต่อวัน จึงเป็นไปได้ว่ารา 2 สายพันธุ์นี้สามารถสร้างเอนไซม์เพื่อย่อยสลาย RBBR ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียวได้ดีที่สุด กลุ่มที่สองเป็นราที่มีอัตราการเจริญได้เร็ว ซึ่งมีราเพียงสายพันธุ์เดียวคือรารหัส T3 ราสายพันธุ์นี้มีอัตราการเจริญเฉลี่ย 0.6 เซนติเมตรต่อวันซึ่งช้ากว่ากลุ่มแรกไม่มากนัก รากลุ่มถัดมาเป็นราที่มีอัตราการเจริญช้า ประกอบด้วยรา 3 สายพันธุ์คือ C9, N2 และ N3 ที่มีอัตราการเจริญเฉลี่ย 0.36 เซนติเมตรต่อวัน กลุ่มสุดท้ายเป็นราที่มีอัตราการเจริญช้าที่สุด หรืออาจไม่สามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดนี้ได้ ประกอบด้วยรา 2 สายพันธุ์คือรารหัส N7 และ X1 ซึ่งสามารถเจริญได้น้อยมากใน 14 วันที่ทำการทดลอง

ผลการทดลองการย่อยสลาย RBBR ของราทั้ง 8 สายพันธุ์ดังรูปที่ 4.6 พบว่ามีราเพียง 3 สายพันธุ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลาย RBBR ได้อย่างชัดเจนภายใน 14 วันที่ทำการทดลอง คือรารหัส CK1, CK2 และ T3 ส่วนราอีก 5 สายพันธุ์คือ C9, N2, N3, N7 และ X1 ไม่พบการย่อยสลาย RBBR ภายใน 14 วันที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเจริญกับความสามารถในการย่อยสลาย RBBR แล้ว พบว่ารารหัส C9, N2 และ N3 มีความสามารถในการเจริญได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดนี้ อาจเป็นไปได้ว่าราทั้ง 3 สายพันธุ์นี้สามารถย่อยสลาย RBBR ได้แต่ช้า จึงส่งผลให้มีอัตราการเจริญช้าดังเห็นได้จากรูปที่ 4.5 และทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นบริเวณใสที่เกิดจากการย่อยสลายได้อย่างชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเจริญกับความสามารถในการย่อยสลาย RBBR ของรา 3 สายพันธุ์ที่พบการย่อยสลาย RBBR เกิดขึ้นอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.8 พบว่ามีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือราที่มีการเจริญอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 2 ของการทดลองซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการย่อยสลาย RBBR ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงวันที่ 2 ของการทดลองเช่นกัน จึงน่าจะเป็นไปได้ว่าราเหล่านี้สามารถสร้างเอนไซม์เพื่อย่อยสลาย RBBR เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อใช้ในการเจริญได้

จากผลการทดลองในข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าในจำนวนราทั้ง 8 สายพันธุ์ที่ทำการทดลอง มีราเพียง 3 สายพันธุ์คือ CK1, CK2 และ T3 เท่านั้นที่มีความสามารถในการเจริญสอดคล้องกับความสามารถในการย่อยสลาย RBBR อย่างชัดเจนบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งที่มีการเติมสีย RBBR ทั้ง 2 ชนิด นั่นหมายความว่าราทั้ง 3 สายพันธุ์นี้สามารถเจริญได้ทั้งในภาวะที่มีน้ำตาลและสีย RBBR เป็นแหล่งคาร์บอน และในภาวะที่ไม่มีสีย RBBR เป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียว

เนื่องจาก RBBR มีโครงสร้างคล้ายสารไดเบนโซฟูแรนราเหล่านี้ก็น่าจะย่อยสลายไดเบนโซฟูแรนได้ จึงจะทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสารไดเบนโซฟูแรนต่อไป



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการย่อยสลาย RBBR ของรา CK1, CK2 และ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral Medium ที่เติมสีย RBBR

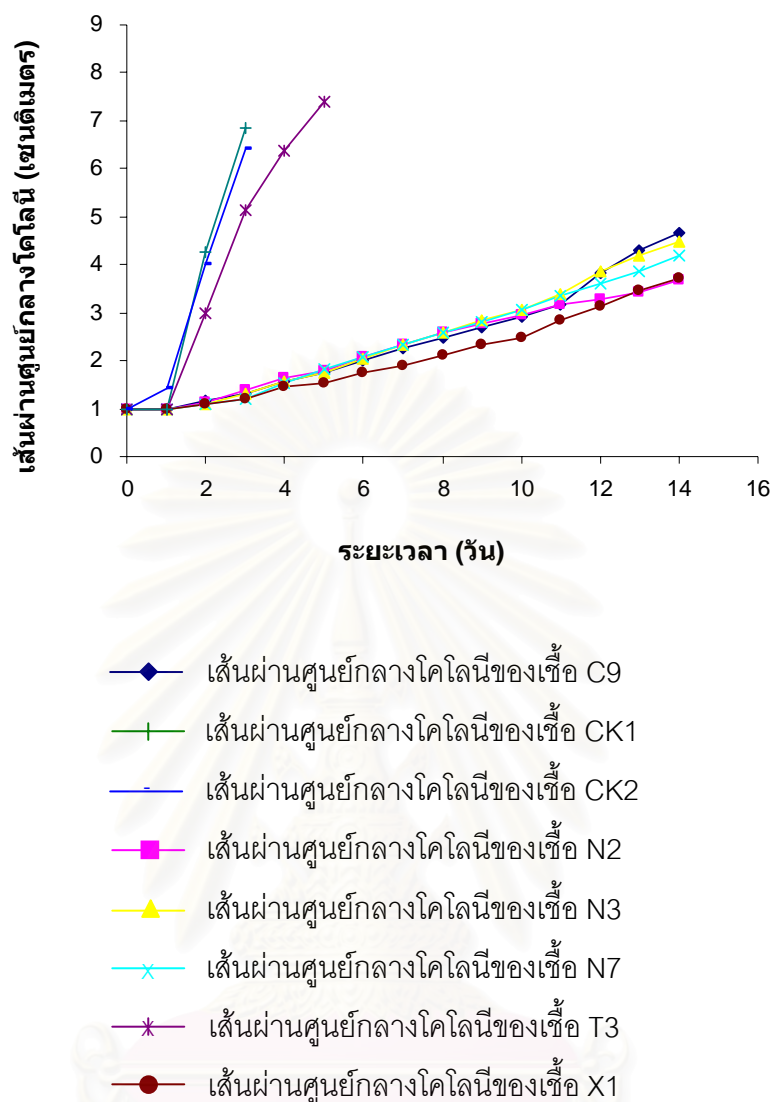
4.3 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญบนขุยมะพร้าว

เนื่องจากงานวิจัยนี้จะนำราไปประยุกต์ใช้กับตัวกรองอากาศชีวภาพ ซึ่งนอกจากราแล้วยังต้องมีตัวกลางชีวภาพเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงทดสอบว่าราจะสามารถเจริญบนตัวกลางชีวภาพได้หรือไม่ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขุยมะพร้าว เพราะเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาได้ง่ายและมีมากในประเทศ มีความเป็นรุกรุ่นค่อนข้างสูง ทำให้อากาศไหลผ่านได้ดี

4.3.1 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox

การที่ราจะเจริญบนขุยมะพร้าวนั้น อาจต้องมีอาหารที่ช่วยให้ราเจริญได้ในระยะแรก การทดลองนี้จะเติมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.2 แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ การทดลองนี้จะยังคงใช้ราสายพันธุ์ C9, N2, N3, N7 และ X1 แม้จะพบว่าไม่สามารถย่อยสลาย RBBR ได้ก็ตาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการเจริญของรากบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox

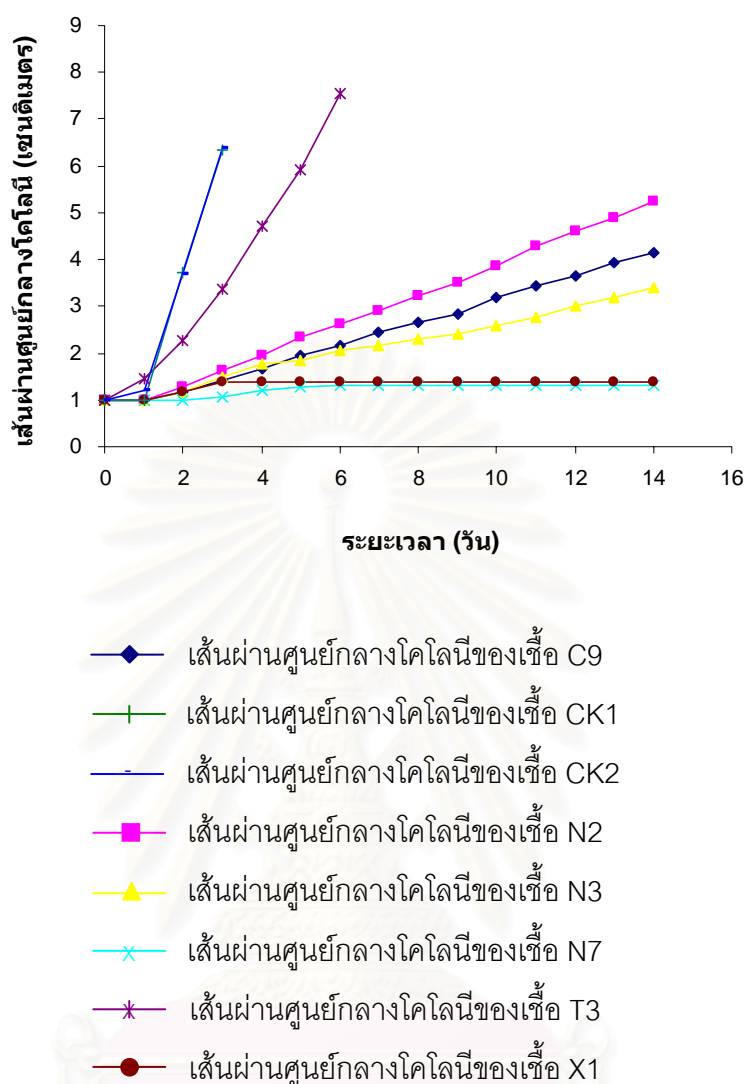
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่าราทั้ง 8 สายพันธุ์มีความสามารถในการเจริญบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ได้แตกต่างกัน โดยสามารถแยกออกเป็น 2 กลุ่มคล้ายกับการทดลองที่ 4.2.1 คือ กลุ่มราที่เจริญได้เร็ว ประกอบด้วยรา 3 สายพันธุ์คือ รารหัส CK1, CK2 และ T3 ราทั้ง 3 สายพันธุ์นี้มีการเจริญอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 และใช้เวลาเจริญจนเต็มขวดทดลองในเวลาไม่เกิน 7 วันของการทดลอง คิดเป็นอัตราการเจริญเฉลี่ย 1.3-2.0 เซนติเมตรต่อวัน ส่วนอีกกลุ่มเป็นราที่เจริญได้ช้ากว่าคือ รารหัส C9, N2, N3, N7 และ X1 โดยมีการเจริญอย่างช้า ๆ ตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองจนถึงวันที่ 14 ของการทดลอง ซึ่งมีอัตราการเจริญเฉลี่ย 0.26-0.33 เซนติเมตรต่อวัน

4.3.2 การทดสอบความสามารถของราในการเจริญบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium

ตัวกรองอากาศชีวภาพส่วนใหญ่มักมีการใช้งานที่นานพอสมควร สารอาหารในตัวกลางจึงจำเป็นต้องเพียงพอสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ จากการทดลองที่ 4.3.1 พบว่าราเจริญได้ดี จึงทดสอบความสามารถในการเจริญของรบบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral medium ซึ่งมีอาหารสมบูรณ์น้อยกว่า แต่มีราคาถูก

จากการทดสอบความสามารถในการเจริญบนขุยมะพร้าวซึ่งใช้เป็นตัวกลางสำหรับตัวกรองอากาศชีวภาพของราทั้ง 8 สายพันธุ์คือ C9, CK1, CK2, N2, N3, N7, T3, และ X1 บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium ตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.2 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่าราทั้ง 8 สายพันธุ์มีความสามารถในการเจริญบนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium แตกต่างกัน โดยสามารถแยกออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ กลุ่มแรกเป็นราที่เจริญได้เร็ว โดยมีการเจริญอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองจนแผ่เต็มขวดทดลองภายใน 7 วันที่ทำการทดลอง ได้แก่ราหีส CK1, CK2 และ T3 ที่มีอัตราการเจริญเฉลี่ย 1.1-2.0 เซนติเมตรต่อวัน ซึ่งให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับผลการทดลองที่ 4.2.2 ถัดมาเป็นกลุ่มราที่เจริญได้ช้า โดยมีการเจริญอย่างช้า ๆ และค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองจนถึงวันที่ 14 ของการทดลอง ได้แก่ราหีส C9, N2 และ N3 กลุ่มสุดท้ายเป็นราที่เจริญได้ช้ามาก หรือไม่สามารเจริญได้ภายใน 14 วันที่ทำการทดลอง ได้แก่ราหีส N7 และ X1



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการเจริญของราบนขุมมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว

Mineral Medium

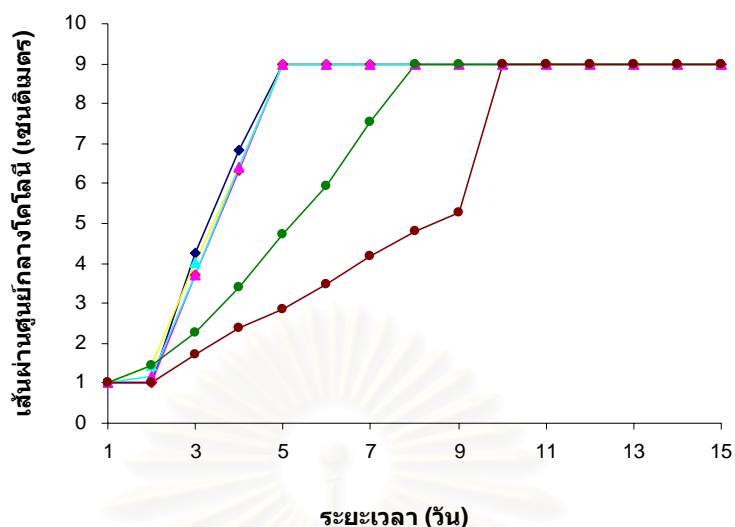
จากการทดลองข้างต้นเห็นได้ว่าการทดลองที่ 4.3.1 มีการให้แหล่งคาร์บอนแก่รา 2 ชนิดด้วยกัน ชนิดแรกเป็นแหล่งคาร์บอนที่อยู่ในรูปใช้งานได้ง่าย คือน้ำตาลจากอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ซึ่งเราสามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ทันที ขณะที่แหล่งคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งคือขุมมะพร้าวซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีองค์ประกอบซับซ้อนทำให้อำนาจนำไปใช้ในการเจริญค่อนข้างยาก แต่หากเรามีการสร้างเอนไซม์บางชนิดออกมาเพื่อย่อยโครงสร้างเหล่านี้ได้ ก็สามารถนำไปใช้ในการเจริญได้เช่นกัน ในการทดลองที่ 4.3.1 นี้รา CK1, CK2 และ T3 มีความสามารถในการเจริญสูงที่สุด ส่วนในการทดลองที่ 4.3.2 นั้นมีการให้แหล่งคาร์บอนแก่ราเพียงแหล่งเดียวคือขุมมะพร้าวซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน ดังนั้นราจึงนำไปใช้งานได้ยากกว่า ส่งผลให้มีการเจริญที่ช้าลง ดัง

เห็นได้จากรูปที่ 4.10 ว่าความสามารถในการเจริญของราเกือบทุกสายพันธุ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 4.3.1 และในการทดลองนี้ รา CK1, CK2 และ T3 ยังคงมีความสามารถในการเจริญสูงสุด

เมื่อนำข้อมูลการเจริญของรา 3 สายพันธุ์คือ CK1, CK2 และ T3 จากการทดลองที่ 4.3.1 และ 4.3.2 มาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.11 พบว่ารา CK1 และ CK2 มีอัตราการเจริญที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่น้ำตาลจากอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ดูจะมีผลต่อการเจริญของรา T3 มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วยังสามารถสรุปได้ว่ารา CK1, CK2 และ T3 มีความสามารถในการเจริญบนขุยมะพร้าวได้ดีทั้ง 2 ภาวะ ดังนั้นหากจะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการกรองชีวภาพแล้ว ราทั้ง 3 สายพันธุ์นี้น่าจะให้ผลการเจริญและยึดเกาะกับขุยมะพร้าวซึ่งเป็นตัวกลางได้ดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- ◆ เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ CK1 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Czapek Dox
- ◆ เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ CK1 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral medium
- ▲ เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ CK2 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Czapek Dox
- ▲ เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ CK2 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral medium
- เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Czapek Dox
- เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อ T3 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral medium

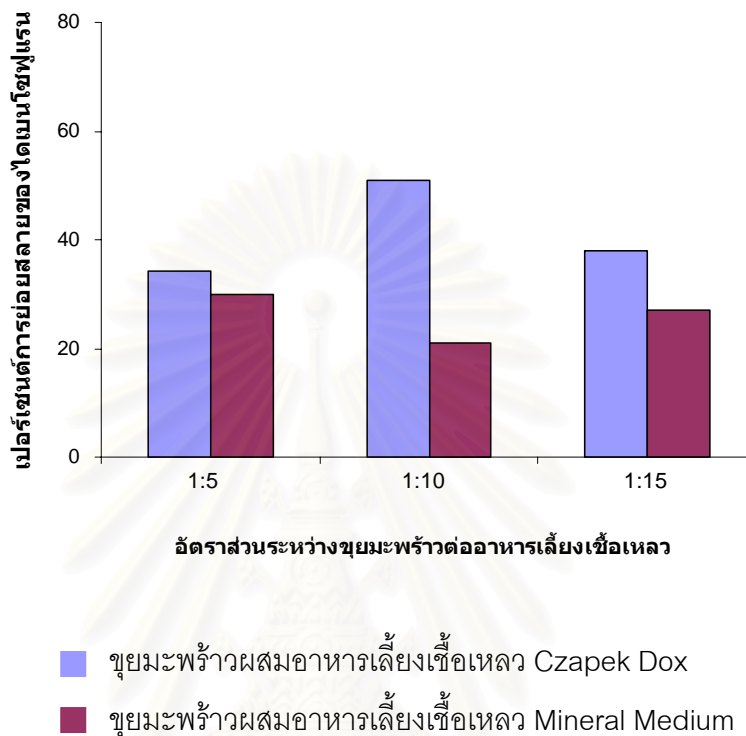
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการเจริญของรา CK1, CK2 และ T3 บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium

4.4 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายไคเบนโซฟูแรนในระดับขวดทดลอง

หลังจากทดสอบความสามารถในการเจริญของราบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวแล้ว นำเชื้อที่ขึ้นได้ดีมาทดสอบความสามารถในการย่อยสลายไคอะเซทของไคเบนโซฟูแรนในระดับขวดทดลอง เพื่อคัดเลือกราที่สามารถย่อยสลายไคอะเซทของไคเบนโซฟูแรนได้ดีที่สุดไปใช้ในตัวกรองอากาศชีวภาพในขั้นถัดไป

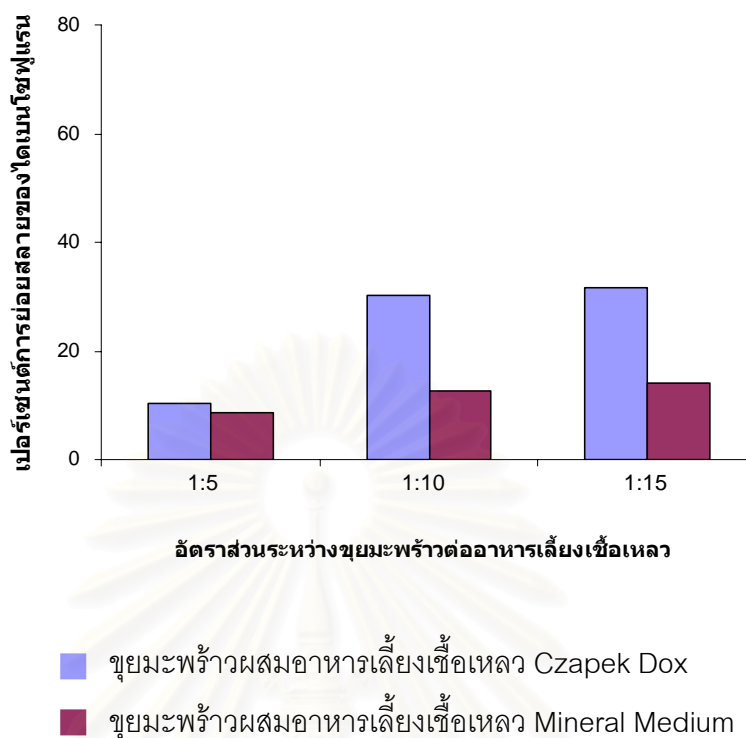
การทดลองนี้ศึกษาความสามารถของราในการย่อยไคอะเซทของไคเบนโซฟูแรนในระดับขวดทดลองโดยใช้ราที่คัดเลือกไว้จากการทดลองก่อนหน้านี้จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ CK1, CK2 และ T3 ตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.3 โดยมีการแปรผันอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว 2 ชนิดคือ อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium และอัตราส่วนระหว่างขุยมะพร้าว

มะพร้าวกับปริมาณของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว โดยใช้ขุยมะพร้าวที่อบแห้งปริมาณ 2 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อปริมาณ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 – 4.12 ตามลำดับ



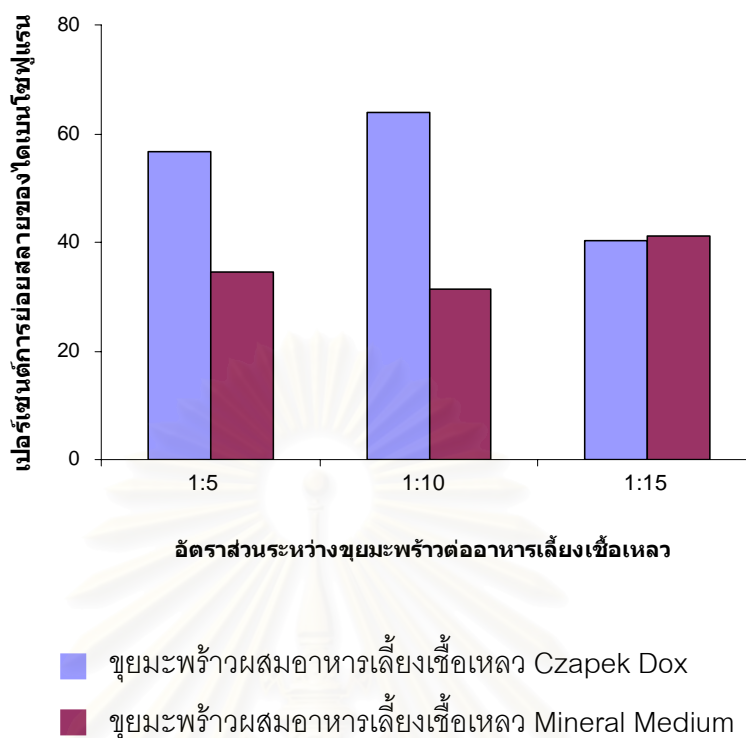
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไโคระเหยของโคแบคทีเรียโดยรา CK1 เมื่อเลี้ยงบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ

จากผลการทดลองเลี้ยงรา CK1 บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และ Mineral Medium ในอัตราส่วนขุยมะพร้าวอบแห้ง 2 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อปริมาณ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ซึ่งเท่ากับ 1:5, 1:10 และ 1:15 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 พบว่ารา CK1 สามารถย่อยสลายไโคระเหยของโคแบคทีเรียได้ในขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวทั้ง 2 ชนิด ประสิทธิภาพในการย่อยสลายไโคระเหยของโคแบคทีเรียสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้ขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1:10 ซึ่งมีค่า 51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:15 มีประสิทธิภาพ 35 และ 38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไคอะเซของไคเบนโซฟูแรนโดยรา CK2 เมื่อเลี้ยงบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ

จากผลการทดลองเลี้ยงรา CK2 บนขุยมะพร้าวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และ Mineral Medium ในอัตราส่วนขุยมะพร้าวอบแห้ง 2 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเหลวปริมาตร 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4.13 พบว่ารา CK2 สามารถย่อยสลายไคอะเซของไคเบนโซฟูแรนได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวทั้ง 2 ชนิด ประสิทธิภาพในการย่อยสลายไคอะเซของไคเบนโซฟูแรนเมื่อใช้ขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1:10 และ 1:15 มีค่า 31 และ 32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก และประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่อัตราส่วน 1:5 มีค่า 11 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การลดลงของไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนโดยรา T3 เมื่อเลี้ยงบนชุกยะพรวัวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวอัตราส่วนต่าง ๆ

จากผลการทดลองเลี้ยงรา T3 บนชุกยะพรวัวที่ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และ Mineral Medium ในอัตราส่วนชุกยะพรวัวอบแห้ง 2 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเหลวปริมาตร 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4.14 พบว่ารา T3 สามารถย่อยสลายไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวทั้ง 2 ชนิด ประสิทธิภาพในการย่อยสลายไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนสูงสุดเมื่อใช้ชุกยะพรวัวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1:10 มีค่า 64 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่อัตราส่วน 1:5 มีค่าประมาณ 57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกัน และที่อัตราส่วน 1:15 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองศึกษาความสามารถในการย่อยสลายไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนในภาวะดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการย่อยสลายไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อมีการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox ผสมกับชุกยะพรวัว โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนชุกยะพรวัวอบแห้งต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเหลวเป็น 1:10 และราที่มีความสามารถในการย่อยสลายไอรยะเหยของไคเบนโซฟูแรนได้สูงที่สุดคือรา T3 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุด 63.9 เปอร์เซ็นต์ในระหว่างการทดลอง ดังนั้นรา T3

จากการทดลองนี้จึงมีความเหมาะสมสูงที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนโดยใช้ระบบกรองชีวภาพในขั้นตอนต่อไป

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ราที่มีความสามารถย่อยสลาย RBBR ได้ดี และเจริญได้เร็วซึ่งได้แก่ CK1 และ CK2 แต่ทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการย่อยสลายไดเบนไซฟูแรนน้อยกว่า T3 ที่มีการเจริญช้ากว่า

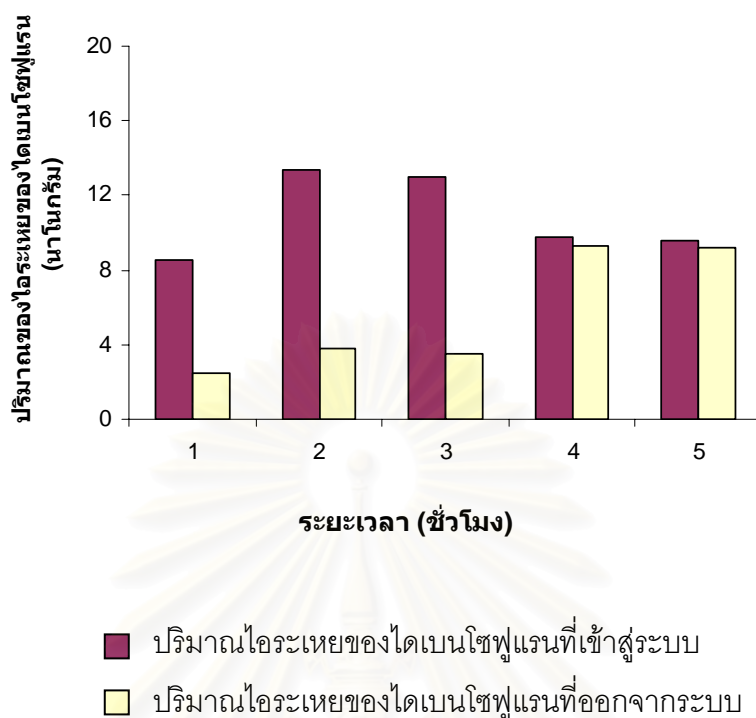
นอกจากนี้ผลการทดลองนี้ยังสามารถใช้สนับสนุนการทดลองของ Lan และคณะ ในปี 2006 ได้อีกด้วย กล่าวคือในภาวะที่มีน้ำตาลในอาหารเลี้ยงเชื้อ ราจะมีการสร้างเอนไซม์ Glucose oxidase ออกมาเพื่อใช้น้ำตาลในการเจริญ เป็นผลให้เกิดไฮโดรเจนเพอรอกไซด์ (Hydrogen peroxide) ขึ้น ซึ่งจะไปมีผลให้เอนไซม์ตระกูล peroxidase ที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างการทดลองมีความสามารถในการย่อยสลายไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Medium ที่ไม่มีน้ำตาลในการทดลองข้างต้น

4.5 การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนในตัวกรองอากาศแบบ Bench Scale Biofilter

4.5.1 ความสามารถในการดูดซับไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนของตัวกลางใน Bench Scale Biofilter ชุดควบคุม

เมื่อไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนเข้าสู่ตัวกรองอากาศชีวภาพ ไอรอะเหยดังกล่าวจะถูกดูดซับด้วยขุยมะพร้าว จึงศึกษาว่าขุยมะพร้าวที่ใช้เป็นตัวกลางในงานวิจัยนี้ดูดซับไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนหรือไม่เพียงใด และหากเกิดการดูดซับจะใช้เวลาเท่าใดในการอิ่มตัวในตัวกลาง เพื่อให้เห็นผลที่เกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยราอย่างชัดเจน

จากการทดลองสร้างตัวกรองอากาศชีวภาพตามวิธีทดลองในข้อ 3.3.4 และ 3.3.5 โดยใช้ชุดควบคุมของการทดลอง เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับความสามารถในการดูดซับไอรอะเหยของไดเบนไซฟูแรนของตัวกลางในชุดกรองชีวภาพ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับไอระเหยของไดเบนไซฟลูออเรนของตัวกลางในชุดกรองชีวภาพชุดควบคุม

จากผลการทดลองหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.15 พบว่าขุยมะพร้าวที่ใช้เป็นตัวกลางในตัวกรองอากาศชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับไอระเหยของไดเบนไซฟลูออเรนที่เข้าสู่ระบบจนอิ่มตัวภายในเวลา 4 ชั่วโมงที่ทำการทดลอง ดังนั้นหากนำไปใช้อ้างอิงสำหรับการดำเนินระบบของตัวกลางชีวภาพที่มีการใส่ราเข้าไปด้วย แล้วพบว่าการลดลงของไดเบนไซฟลูออเรนเกิดขึ้น จึงน่าจะเกิดจากความสามารถในการย่อยสลายไอระเหยของไดเบนไซฟลูออเรนของราที่อยู่ในระบบดังกล่าว และอาจสรุปได้ว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การลดลงของไอระเหยของไดเบนไซฟลูออเรนคือ ช่วงเวลาหลังจาก 4 ชั่วโมงแรกของการดำเนินระบบ

4.5.2 การทำงานของตัวกรองอากาศชีวภาพและปัจจัยที่ตรวจวัด

เนื่องจากตัวกรองชีวภาพต้องมีราเจริญอยู่บนตัวกลางเพื่อทำหน้าที่ในการย่อยสลายไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนในอากาศที่ไหลผ่านเข้าระบบ มีปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเจริญและความสามารถในการย่อยสลายไดเบนไซฟูแรนของรา ดังนั้นจึงทำการตรวจวัดปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อรา

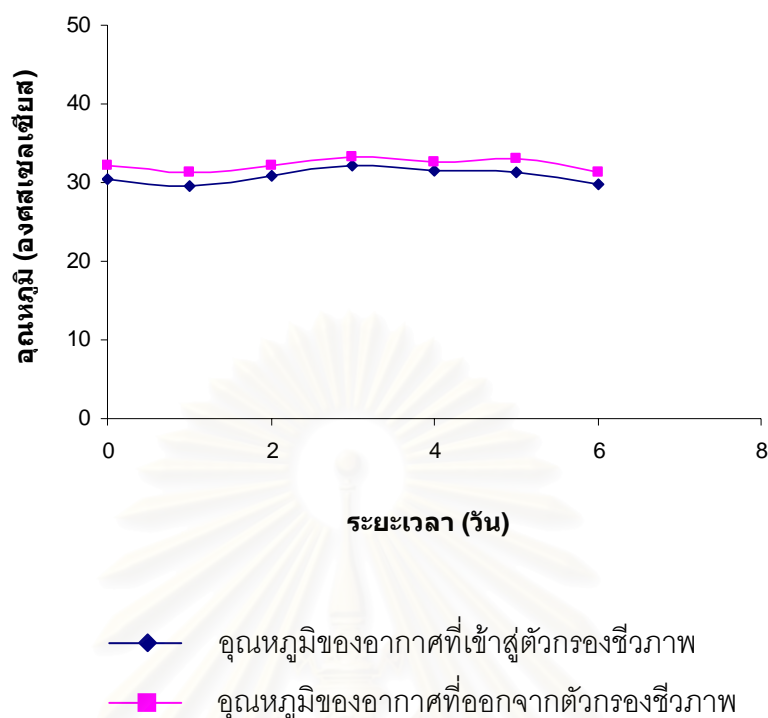
4.5.2.1 ปัจจัยที่ตรวจวัด

1. อุณหภูมิที่เข้าและออกจากระบบ

จากการทดลองในตัวกรองชีวภาพที่สร้างขึ้นและป้อนอากาศที่อิมตัวด้วยไดเบนไซฟูแรนเข้าไป ทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่เข้าระบบด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล พบว่าอุณหภูมิที่เข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 30.9 ± 0.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากระบบมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยคือมีค่าเฉลี่ย 32.3 ± 0.7 องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

จากผลการวัดอุณหภูมิที่เข้าและออกจากระบบไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เครื่องกรองชีวภาพในการทดลองนี้มีขนาดเล็ก อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบสูงและปริมาตรตัวกลางไม่มากพอที่จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เข้าระบบในช่วง 29-33 องศาเซลเซียสเป็นช่วงอุณหภูมิที่รา T3 ที่ใช้ในตัวกรองอากาศชีวภาพสามารถเจริญและย่อยสลายไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนได้

ในเครื่องกรองชีวภาพโดยทั่วไปอุณหภูมิของไอของสารที่ออกจากระบบมักมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของไอของสารที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกรองชีวภาพนั้นเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบที่มีการย่อยสลายทางชีววิทยาซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และการเสียดทานของอากาศกับตัวกลาง ความดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการอัดอากาศผ่านตัวกลางก็ทำให้เกิดความร้อนได้ จึงมีผลทำให้ไอของสารที่ออกจากระบบมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากรายงานการศึกษาการบำบัดไอระเหยของไซลีน พบว่าอุณหภูมิของระบบมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการย่อยสลายทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของระบบที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์จะทำให้ความสามารถในการบำบัดไอระเหยของไซลีนเพิ่มขึ้น (Jorio และคณะ, 2000)



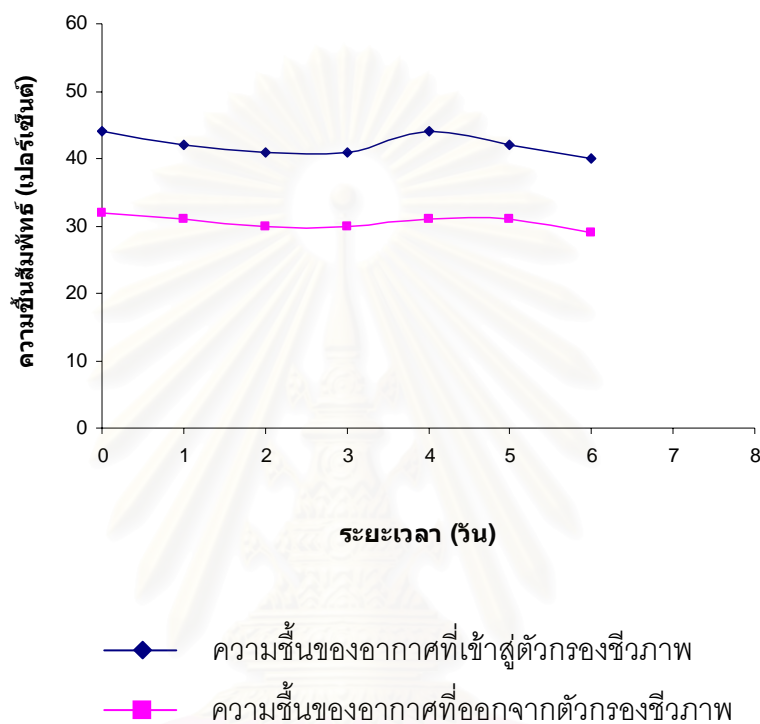
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศที่เข้าและออกจากตัวกรองอากาศชีวภาพ

2. ความชื้นของอากาศที่เข้าและออกจากระบบ

ความชื้นของตัวกลางเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของเครื่องกรองชีวภาพ ถ้าความชื้นของตัวกลางมีค่าต่ำเกินไปจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษของตัวกลางลดลง แต่ถ้าความชื้นของตัวกลางมีค่าสูงเกินไปอาจทำให้มีน้ำขังอยู่ในตัวกลาง ซึ่งจะเป็นการขัดขวางการไหลของอากาศในตัวกลาง ทำให้จุลินทรีย์เจริญได้ช้าหรือตายได้ มีผลให้ไม่สามารถบำบัดสารมลพิษได้ (สุโรชา พูลสวัสดิ์, 2546)

ในเครื่องกรองอากาศชีวภาพโดยทั่วไปนิยมให้มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าระบบเป็น 95-100 เปอร์เซ็นต์ ในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเติมน้ำให้ตัวกลางเพิ่มเติมด้วยเพื่อป้องกันตัวกลางแห้ง ในการทดลองนี้มีการใช้ความชื้น 75 องศาเซลเซียส ในการทำให้ผลึกไดเบนไซฟูแรนระเหิดก่อนเข้าสู่ระบบ ดังนั้นความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่ระบบจึงมีค่าน้อย จึงเพิ่มความชื้นของอากาศโดยการให้อากาศที่จะเข้าสู่ระบบผ่านภาชนะบรรจุน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ แต่อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าสู่ระบบยังคงมีค่าอยู่ในช่วง 40-44 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองในตัวกรองชีวภาพ ทำการตรวจวัดความชื้นของอากาศที่เข้าและออกจากระบบ

ด้วยเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิตอล พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าระบบมีค่าตั้งแต่ 40-44 เปอร์เซ็นต์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากระบบมีลดลงมาอยู่ในช่วงตั้งแต่ 29-32 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่าขาเข้า สาเหตุอาจเกิดจากการดูดซับไว้กับตัวกลาง และถูกนำไปใช้บางส่วน



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าและออกจากตัวกรองอากาศชีวภาพ

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบ

จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเจริญและย่อยสลายสารมลพิษได้ดีในช่วง pH ที่แตกต่างกัน เครื่องกรองชีวภาพจึงมีช่วง pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสารมลพิษแตกต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ การเปลี่ยนแปลงค่า pH ภายในเครื่องกรองชีวภาพจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารมลพิษของระบบเช่นกัน จากการตรวจวัดค่า pH ของตัวกลาง โดยเก็บน้ำทิ้งที่ค้างอยู่บริเวณทางอากาศเข้าแล้ววัดด้วยกระดาษวัด pH เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าไบโแบนโซฟูแรนที่เข้าสู่ระบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของตัวกลางและมีผลต่อการบำบัดของระบบหรือไม่ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีค่า

pH เท่ากับ 7 ตลอดการทดลอง สอดคล้องกับการทดลองบำบัดไอระเหยของไซลีนโดย สุโรชา พูลสวัสดิ์ (2546) ที่พบว่าค่า pH เท่ากับ 7 ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง และระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 90-98 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าจุลินทรีย์ที่บำบัดไอระเหยของไซลีนสามารถดำรงชีพและย่อยสลายสารมลพิษได้ที่ pH เท่ากับ 7

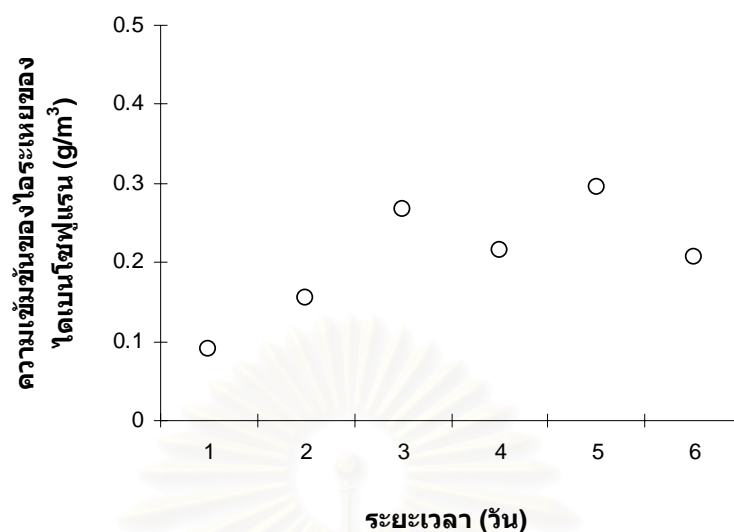
4. การยุบตัวของตัวกลาง

ในตัวกรองชีวภาพทั่ว ๆ ไปมักมีการยุบตัวของตัวกลางเกิดขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีการย่อยสลายตัวกลาง ทำให้ความแข็งแรงของตัวกลางลดลง หรือขณะบรรจุตัวกลางมีโพรงอากาศแทรกอยู่มากจนเกิดการยุบตัวในภายหลัง ปัญหาที่ตามมาหลังจากเกิดการยุบตัวของตัวกลางคือ อากาศไหลผ่านได้ยากขึ้นเป็นเหตุให้ความดันอากาศบริเวณทางออกลดลงมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรอากาศที่ไหลผ่านระบบมีค่าน้อยกว่าที่คาดไว้ (Devinnny และคณะ, 1999) แต่ในการทดลองนี้มีการเขย่าตัวกลางในขณะที่ทำการบรรจุในตัวกรองชีวภาพ จึงทำให้ไม่มีการยุบตัวของตัวกลางเกิดขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งคือช่วงเวลาในการดำเนินการทดลองมีระยะสั้น จึงอาจสรุปได้ว่าภายในระยะเวลาที่ทำการทดลองนี้การไหลของอากาศผ่านตัวกรองอากาศชีวภาพเป็นไปอย่างสม่ำเสมอที่สุด

5. ความเข้มข้นของไอของไดเบนไซฟูแรนที่เข้าสู่ระบบ

วัดค่าความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนที่เข้าสู่ระบบตลอดการทดลอง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนเข้าระบบ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 แม้ว่าการทดลองนี้จะมีการควบคุมอัตราไหลของอากาศให้มีค่าคงที่ แต่ความเข้มข้นของไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนเข้าระบบมีค่าไม่คงที่ในแต่ละวัน โดยพบว่าในช่วง 3 วันแรกของการดำเนินระบบ ความเข้มข้นของไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนมีค่าอยู่ในช่วง 0.09-0.26 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 3-6 สาเหตุที่ความเข้มข้นของไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนไม่คงที่ใน 3 วันแรกของการทดลองนั้นอาจเนื่องมาจากผลึกโดเบนโซฟูแรนที่นำมาใช้ไม่ได้อบแห้งมาก่อน เมื่อน้ำระเหยพร้อมกับถูกชะไปกับอากาศเข้าระบบความเข้มข้นจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ ความชื้นของอากาศภายนอกก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความเข้มข้นของไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนไม่คงที่ จึงเป็นที่สังเกตว่าการบำบัดของระบบขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบด้วย นั่นคือหากความเข้มข้นของสารมลพิษเข้าสู่ระบบมีค่าสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากความเข้มข้นของสารมลพิษเข้าสู่ระบบมีค่าต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบมีค่าสูง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารมลพิษที่เหมาะสมกับแต่ละระบบจะมีค่าแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบด้วย ในงานวิจัยนี้เราอาจจะมีชีวิตรอดได้เมื่อสัมผัสกับไอรระเหยของโดเบนโซฟูแรนได้ในระดับไม่เกิน 0.16 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อความเข้มข้นของโดเบนโซฟูแรนสูงขึ้นมาอยู่ในระดับ 0.2-0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาจมีความเป็นพิษต่อร่างกายส่งผลให้บางส่วนตาย ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

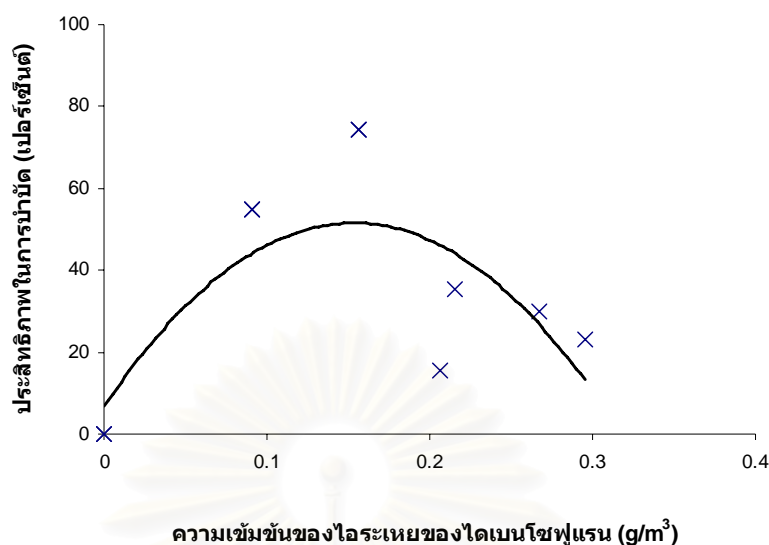
จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดไอระเหยของอะซิโตนโดยการกรองทางชีวภาพพบว่าเมื่อทำการทดลองโดยมีการควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บกักคงที่ และมีการเพิ่มความเข้มข้นของไอระเหยของอะซิโตนเข้าสู่ระบบ ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบจะมีค่าลดลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ (จิรวัดณ์ กัณพยนต์, 2548)

6. ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง (Empty Bed Residence Time, EBRT)

อัตราการไหลของสารมลพิษเข้าสู่ระบบมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ไอของสารมลพิษสัมผัสกับอนุภาคของตัวกลาง ในเครื่องกรองชีวภาพที่มีปริมาตรคงที่นั้น เมื่ออัตราการไหลของสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบมีค่าสูง ระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางมีค่าน้อย พบว่าที่ความเข้มข้นของสารมลพิษเข้าสู่ระบบคงที่ อัตราไหลของสารมลพิษเข้าสู่ระบบต่ำจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าอัตราไหลของสารมลพิษเข้าสู่ระบบสูง เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบถูกควบคุมด้วย Mass Transfer Rate ของสารมลพิษสู่ไบโอฟิล์ม ซึ่งขึ้นกับระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางโดยตรง (Devanny และคณะ, 1999; สุโรชา พูลสวัสดิ์, 2546; จิรวัดณ์ กัณพยนต์, 2548) ในการทดลองนี้มีปริมาตรและอัตราไหลของอากาศคงที่ ทำให้มีระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลางคงที่ที่ 595 วินาที

4.5.2.2. ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency) และความสามารถในการบำบัดของระบบ (Elimination Capacity)

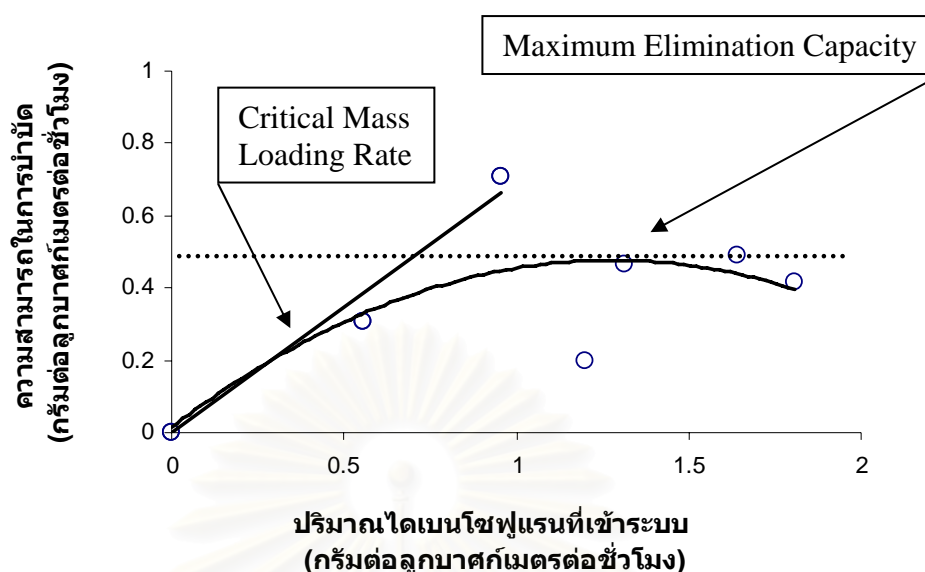
ในการทดลองนี้มีการควบคุมอัตราไหลของอากาศเข้าสู่ระบบเพียงอัตราเดียวคือ 0.2 ลิตรต่อนาที ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นอัตราไหลของอากาศเข้าสู่ระบบที่แท้จริงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีค่าเป็น 0.337 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนโซฟลูแรนและประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟลูแรน

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนโซฟลูแรนเข้าสู่ระบบไม่เกิน 0.16 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูงสุด 75 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนโซฟลูแรนเข้าสู่ระบบมีค่าในช่วง 0.2-0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลงมาอยู่ในช่วง 15-36 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ (Removal Efficiency) เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าและออกจากระบบที่ลดลงในขณะใดขณะหนึ่งโดยเบื้องต้น หากต้องการจะอธิบายถึงการบำบัดของระบบแล้ว จะต้องพิจารณาถึงค่าความสามารถในการบำบัดของระบบ (Elimination Capacity) รวมด้วย ความสามารถในการบำบัดของระบบจะกล่าวถึงมวลของสารมลพิษที่ถูกกำจัดออกไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา อีกทั้งค่าความสามารถในการบำบัดของระบบนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีขนาดต่างกัน และอัตราไหลของอากาศต่างกันได้ด้วย (Devinny และคณะ, 1999; Jorio และคณะ, 2000; สุโรชา พูลสวัสดิ์, 2546; จิรวัดณ์ กัณพยันต์, 2548) ความสามารถในการบำบัดของการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟลูออเรนของระบบ

จากรูปที่ 4.20 เมื่ออัตราไหลของอากาศเข้าระบบมีค่าคงที่ 0.337 ลิตรต่อนาที พบว่าในช่วงแรกปริมาณไอระเหยของไดเบนโซฟลูออเรนที่เข้าสู่ระบบมีค่าในช่วง 0.5-1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความสามารถในการบำบัดกับปริมาณไดเบนโซฟลูออเรนที่เข้าระบบมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 55-75 หรือมีความสามารถในการบำบัดคิดเป็น 0.3-0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่เมื่อปริมาณไอระเหยของไดเบนโซฟลูออเรนที่เข้าระบบมีค่ามากขึ้นเป็น 1.3-1.6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความสามารถในการบำบัดของระบบลดลงเหลือประมาณ 0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเมื่อปริมาณไอระเหยของไดเบนโซฟลูออเรนเพิ่มขึ้นเป็น 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าความสามารถในการบำบัดก็ยังมีค่าในช่วง 0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเช่นเดิม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากความเป็นพิษของไดเบนโซฟลูออเรน และการขาดอาหารทำให้ร่าตาย จึงสรุปได้ว่าระบบมีขีดจำกัดในการบำบัดนั่นเอง

ตามปกติในการบำบัดสารมลพิษด้วยตัวกรองชีวภาพ เมื่อปริมาณสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบมีค่ามากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้ว ระบบจะมีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษสูงสุดได้ (Maximum Elimination Capacity) (Deviny และคณะ, 1999; สุโรชา พูลสวัสดิ์, 2546; จิรวัดน์ กัณพยนต์, 2548)

จากรูปที่ 4.20 เมื่อปริมาณไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนยังมีค่าน้อยคืออยู่ในช่วง 0.5-1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะมีความสัมพันธ์กันกับความสามารถในการบำบัดเป็นเส้นตรง แต่เมื่อความเข้มข้นในระบบมีค่าสูงขึ้น ทำให้ปริมาณไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนมีค่าสูงขึ้นจนเห็นการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการบำบัด โดยความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง ค่า Removal Efficiency ลดต่ำลงมาก แต่ความสามารถในการบำบัดของระบบยังมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าตัวกรองอากาศชีวภาพในการทดลองนี้มีค่า Maximum Elimination Capacity ในช่วง 0.4-0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และปริมาณสารเข้าระบบวิกฤติ (Critical Mass Loading Rate) ของระบบนี้มีค่าประมาณ 0.35 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ส่วนในวันสุดท้ายของการทดลองถึงแม้ว่าจะมีปริมาณไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนที่เข้าสู่ระบบลดต่ำลงเหลือ 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แต่ความสามารถในการบำบัดของระบบลดต่ำลงที่สุดคือเหลือเพียง 0.19-0.2 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เท่านั้น สาเหตุน่าจะเกิดจากราที่อยู่ในระบบบางส่วนมีการตายเนื่องจากสัมผัสกับไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนที่มีปริมาณมากเป็นเวลานาน หรืออาจเกิดจากการที่สารอาหารในตัวกลางหมดทำให้ราไม่สามารถสร้างเอนไซม์ออกมาเพื่อย่อยสลายไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนได้ อย่างไรก็ตามปัญหาการตายของราจากการสัมผัสกับไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนเป็นเวลานานอาจแก้ไขได้โดยการกำหนดให้มีการสัมผัสกับไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนสลับกับอากาศที่ไม่มีไอระเหยของไดเบนไซฟูแรน ส่วนกรณีที่ขาดสารอาหารนั้นอาจแก้ไขโดยการเติมอาหารกับราเป็นระยะ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดในระดับขวดทดลองกับตัวกรองอากาศชีวภาพ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนในขวดทดลองมีค่า 5×10^6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 64 เปอร์เซ็นต์ และการทดลองระดับตัวกรองอากาศชีวภาพ ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์เมื่อความเข้มข้นของไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนมีค่าประมาณ 0.2 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นในขวดทดลองถึง 40,000 เท่า แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดยังมีค่าสูงอยู่ แสดงว่าตัวกรองอากาศชีวภาพที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนได้ดีมาก ในการทดลองนี้มีการให้ไอระเหยของไดเบนไซฟูแรนที่มีความเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีค่าน้อยกว่านี้มาก จึงถือได้ว่าตัวกรองอากาศชีวภาพนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งแวดล้อมจริงได้ในอนาคต

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองอากาศชีวภาพที่มีราทำหน้าที่เป็นจุลินทรีย์ย่อยสลายไอระเหยของไดเบนไซฟูแรน โดยใช้ขุยมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และมีลิกนินเป็นองค์ประกอบ เป็นตัวกลางชีวภาพ ราที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกคัดแยกโดย ปัทมาพร ประชุมรัตน์ (2546) ซึ่งนำมาศึกษาจำนวน 8 สายพันธุ์ คือ C9, CK1, CK2, N3, N7, T3, และ X1 รายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ในขั้นต้นได้ศึกษาความสามารถของราในการเจริญและแอกติวิตีในการย่อยสี Remazol Brilliant Blue R (RBBR) บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชนิดคือ อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น Czapek Dox-malt extract agar และอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral medium ที่เติมสี RBBR จากการทดลองพบว่ารา 3 สายพันธุ์คือ CK1, CK2 และ T3 มีความสามารถในการเจริญได้ดีที่สุดบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งทั้ง 2 ชนิด ในขณะเดียวกันราทั้ง 3 สายพันธุ์นี้ยังมีแอกติวิตีในการย่อยสี RBBR ได้สูงที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 ชนิดอีกด้วย แสดงว่ารา CK1, CK2 และ T3 สามารถผลิตเอนไซม์บางชนิดเพื่อย่อยสี RBBR ได้ดีที่สุดในภาวะที่มีและไม่มีน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน

ต่อมาเป็นการศึกษาความสามารถของราในการเจริญบนขุยมะพร้าวซึ่งใช้เป็นตัวกลางชีวภาพ โดยการเลี้ยงราบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox และ Mineral medium จากการศึกษพบว่ารา CK1, CK2 และ T3 มีความสามารถในการเจริญได้ดีที่สุดบนขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวทั้ง 2 ชนิด

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่า เมื่อมีการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Czapek Dox (ภาวะที่มีน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน) รา CK1, CK2 และ T3 มีความสามารถในการเจริญและมีแอกติวิตีในการย่อยสี RBBR ได้ดีกว่าเมื่อใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral medium (ภาวะที่ไม่มีน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน) จึงตั้งสมมติฐานว่าในภาวะที่มีน้ำตาลน่าจะมีสารบางชนิดซึ่งช่วยให้ราเจริญและมีแอกติวิตีในการย่อยสีสูงกว่าภาวะที่ไม่มีน้ำตาล ซึ่งจากการศึกษาของ Lan และคณะ (2006) พบว่าเมื่อมีการทำงานของเอนไซม์ Glucose oxidase จะทำให้เอนไซม์ Lignin peroxidase ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงสามารถนำมาอธิบายผลการทดลองนี้ได้ว่า ในภาวะที่มีน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน ราจะมีการผลิตเอนไซม์ Glucose oxidase ออกมาเพื่อใช้น้ำตาล และการทำงานของเอนไซม์ Glucose oxidase นี้ทำให้เกิดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เอนไซม์ Lignin

peroxidase ทำงานได้ดีขึ้น ราในภาวะที่มีน้ำตาลจึงมีความสามารถในการเจริญและมีแอกติวิตีในการย่อยสลาย RBBR ได้ดีกว่าในภาวะที่ไม่มีน้ำตาลนั่นเอง

ผลการทดลองข้างต้นทั้งหมดนี้สรุปได้ว่ารา CK1, CK2 และ T3 มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาความสามารถในการย่อยไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรนในขั้นถัดไป

จากนั้นศึกษาความสามารถในการย่อยสลายไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรนของราทั้ง 3 สายพันธุ์ในระดับขวดทดลอง โดยเปรียบเทียบการลดลงของไคเบนโซฟูแรนทั้งในภาวะที่มีและไม่มีน้ำตาล และมีการแปรผันความชื้นที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายไฮอะเซของ ไคเบนโซฟูแรนด้วย จากการทดลองพบว่าในภาวะที่มีน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน ราทั้ง 3 สายพันธุ์สามารถทำให้ไคเบนโซฟูแรนลดลงได้มากกว่าภาวะที่ไม่มีน้ำตาล และความชื้นที่ทำให้ไคเบนโซฟูแรนลดลงได้มากที่สุดคือ อัตราส่วนขุยมะพร้าวต่ออาหารเลี้ยงเชื้อเหลวเป็น 1 ต่อ 10 และรา T3 มีความสามารถในการย่อยสลายไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรนมากที่สุดคือ 63.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือรา CK1 และ CK2 ที่ย่อยสลายไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรนได้ 50.9 และ 30.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นรา T3 จึงถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองอากาศชีวภาพในขั้นถัดไป

ในการศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองอากาศชีวภาพที่ใช้รา T3 เป็นจุลินทรีย์ในการบำบัดไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรน โดยใช้ขุยมะพร้าวเป็นตัวกลางชีวภาพ สรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองบำบัดไฮอะเซของไคเบนโซฟูแรนด้วยตัวกรองอากาศชีวภาพ

ปัจจัยที่ตรวจวัด	ค่าที่ได้
การยุบตัวของตัวกลาง	ไม่พบการยุบตัว
ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)	สูงสุด 75
เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบมีค่าไม่เกิน 0.16 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร	15-36
เมื่อความเข้มข้นเข้าระบบมีค่ามากกว่า 0.2 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร	
ระยะเวลาที่ไฮอะเซของสารสัมผัสกับตัวกลาง (วินาที)	595
ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ	7 ตลอดการทดลอง
อัตราไหลของอากาศที่แท้จริง (ลิตรต่อนาที)	0.337
ความสามารถสูงสุดในการบำบัดไคเบนโซฟูแรน (กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	0.4-0.5

จากผลการทดลองพบว่าตัวกรองอากาศชีวภาพสามารถบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนได้จริง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดในการทดลองมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ให้ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนสูงกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ในสิ่งแวดล้อมจริงมาก ดังนั้นหากนำระบบนี้ไปบำบัดในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนจะมีค่าน้อยกว่าภาวะที่ให้ในการทดลองมาก และจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน่าจะดีกว่านี้ อีกสาเหตุหนึ่งคือในการทดลองไม่มีการเติมน้ำและอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อไม่ให้ความชื้นมีค่ามากเกินไป เนื่องจากต้องการศึกษาความสามารถในการบำบัดไอระเหยของไดเบนโซฟูแรนของเราโดยตรง และป้องกันไม่ให้เกิดภาวะไร้อากาศเกิดขึ้นด้วย อีกทั้งการทดลองต้องการศึกษาระยะเวลาที่ตัวกรองใช้งานได้สูงสุดโดยไม่มีการเติมอาหารเพิ่มในแต่ละวัน

จะเห็นได้ว่าตัวกรองอากาศชีวภาพจะสามารถทำงานได้ดีเพียงใดนั้น ปัจจัยทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานได้ทั้งสิ้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของจุลินทรีย์สำหรับการบำบัดสารมลพิษ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ และในการดำเนินระบบจริงตัวกรองอากาศชีวภาพควรต้องได้รับการดูแลอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงที่สุด

5.2 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความดันลดซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพ
2. ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือและช่วงเวลาในการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีเครื่องวิเคราะห์ภายในประเทศ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นได้ตามต้องการ
3. ควรมีการแปรผันภาวะต่าง ๆ ให้แตกต่างกันออกไป เช่น ความชื้นของตัวกลาง อัตราการไหลของอากาศ ความสูงและปริมาตรของตัวกลาง เป็นต้น
4. ควรมีการศึกษาในตัวกลางอื่นที่มีลักษณะที่เหมาะสม รวมถึงอาจมีการใช้ตัวกลางผสมซึ่งจำเป็นต้องมีการแปรผันอัตราส่วนของตัวกลาง
5. หากเป็นไปได้ควรศึกษาความสามารถในการย่อยสลายสารในกลุ่มไดออกซิน โดยอาจทำการทดลองกับสารไดออกซินที่มีความเป็นพิษต่ำ ๆ หรือมีจำนวนอะตอมคลอรีนในโครงสร้างน้อยกว่าก่อน เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ที่จะนำไปทดสอบกับการย่อยสาร 2,3,7,8-TCDD ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฤษณา ชัชพงศ์. 2542. ความเป็นพิษของไดออกซินและ PCBs. ข่าวสารวัดภูมิพิษ 26(2):76-78.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2542. ไดออกซิน. ฝ่ายศูนย์ข้อมูลสารอันตรายและอนุสัญญา กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. กรุงเทพฯ: ศรีเมืองการพิมพ์.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2544. โครงการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและควบคุมมลพิษในอากาศ (ระบบกำจัดกลิ่นแบบชีวภาพ) รายงานหลัก. (ม.ป.ท.)
- จารุวรรณ วิริยะหิรัญไพบูลย์. 2542. ไดออกซิน. พิษวิทยาสาร 9(3): 9-12.
- จิรวัดณ์ กันพยนต์. 2548. การบำบัดไออะซีไตนโดยการกรองทางชีวภาพ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 19, 3 : 65-77.
- ปัทมาพร ประชุมรัตน์. 2546. การคัดกรองรายย่อยไดเบนโซพีวเรนจากดินเพื่อศักยภาพในการย่อยสลายไดออกซิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2544. การจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม:โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิทยา สังข์ทอง. 2545. ไดออกซินและฟูแรน. แล็บทูเดย์. (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2545) : 41-47.
- สรารุช หาญทงศ์. 2543. ประสิทธิภาพการบำบัดไอของเบนซีนและโทลูอีนด้วยเครื่องกรองอากาศชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สิริกุล วัฒนานนท์กิจ. 2546. การทดสอบคัดตราเพื่อใช้ในการย่อยสลายไดเบนโซฟูแรน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุโรชา พูลสวัสดิ์. 2546. การกำจัดไอของไซลีนโดยใช้เครื่องกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J.C., and Fanlo, J.L. 2001. Biofiltration of a mixture of volatile organics emissions. J. Air & Waste Manage. Assoc. 51:1662-1670.
- Arulneyam, D., and Swaminathan, T. 2000. Biodegradation of ethanol vapor in a biofilter. J. Environ. Sci. 16(1):30-3.
- Becher, D., Specht, M., Hammer, E., Francke, W., and Schauer, F. 2000. Cometabolic degradation of dibenzofuran by biphenyl-cultivated *Ralstonia* sp. Strain SBUG 290. Appl. Environ. Microbiol. 66(10): 4528-4531.
- Bumpus, J.A., Tein, M., Wright, D., and Aust, S.D. 1985. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus. Science. 228:1434-1436.
- Cerniglia, C.E., Gibson, D.T., and Van Baalen, C. 1979. Algal oxidation of aromatic hydrocarbons: Formation of 1-naphthol from naphthalene by *Agmenellum quadruplicatum* strain PR-6. Biochem. Biophys. Res. Com. 88:50-58.
- Chapman, E. S. 1974. Effect of temperature on growth rate of seven thermophilic fungi. Mycologia 66: 542-546.
- Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M. 1991b. Removal of dimethyl disulfide by the peat seeded with night soil sludge. J. Ferment. Bioeng. 71(4):289-291.
- Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M. 1992. Degradation of hydrogen sulfide by *Xanthomonas* sp. DY44 isolated from peat. Appl. Environ. Microbiol. 58(4):1183-1189.
- Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M. 1991a. Degradation characteristics of hydrogen sulfide, methanethiol, dimethyl sulfide and dimethyl disulfide by *Thiobacillus thioparus* DW44 isolated from peat biofilter. J. Ferment. Bioeng. 71(6):384-389.
- Dehghanzaden, R., Torkian, A., Bina, B., Poormoghaddas, H., and Kalantary, A. 2005. Biodegradation of styrene laden waste gas stream using compost-based biofilter. Chemosphere. 60(3):434-439.
- Deviny, J.S., Deshusses, M.A., and Webster, T.S. 1999. Biofiltration for air pollution control. Boca Raton. CRC Press.
- Dhamwichukorn, S., Kleinheinz, G.T., Bagley, S.T. 2001. Thermophilic biofiltration of methanol and α -pinene. J. Indust. Microbiol. Biotechnol. 26(3):127-133.

- Dorado, A.D., Baquerizo, G., Maestre, J.P., Gamisans, X., Gabriel, D., and Lafuente, J. 2007. Modeling of a bacterial and fungal biofilter applied to toluene abatement: Kinetic parameters estimation and model validation. J. Chem. Eng. Article in press.
- Engesser, K.H., Strubel, V., Christoglou, K., Fischer, P., and Rast, H.G. 1989. Dioxygenolytic cleavage of aryl ether bonds: 1,10-dihydro-1,10-dihydroxy fluorene-9-one, a novel arene dihydrodiol as evidence for angular dioxygenation of dibenzofuran. FEMS Microbiol. Lett. 65:205-210.
- Engesser, K.H., Fietz, W., Fischer, P., Schulte, P., and Knackmuss, H.J. 1990. Dioxygenolytic cleavage of aryl ether bonds: 1,2-dihydroxy-1,2-dihydroxy-4-carboxybenzophenone as evidence for initial 1,2-dioxygenation in 3-and 4-carboxy biphenyl ether degradation. FEMS Microbiol. Lett. 69: 317-322.
- Foght, J.M., and Westlake, D.W.S. 1988. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and aromatic heterocycles by a *Pseudomonas* species. Can. J. Microbiol. 34: 1135-1141.
- Fortnagel, P., Harms, H., Wittich, R.M., Francke, W., Krohn, S., and Meyer, H. 1989. Cleavage of dibenzofuran and dibenzodioxin ring systems by a *Pseudomonas bacterium*. Naturwissenschaften. 76: 222-3.
- Fortnagel, P., Harms, H., Wittich R.M., Krohn, S., Meyer H. Sinnwell, V., Willks, H., and Francke, W. 1990. Metabolism of dibenzofuran by *Pseudomonas* sp. Strain HH69 and the mixed culture HH27. Appl. Environ. Microbiol. 56:1148-1156.
- Guengerich, F.P. 1995. Human cytochrome P450 enzymes. In: P.R. Ortiz de Montellano, Editor, Plenum Press, New York. pp. 473–535.
- Guengerich, F.P. 1997. Role of cytochrome P450 enzymes in drug-drug interactions. Advances in Pharmacology 43 1, pp. 7–35.
- Habe, H., Ide, K., Yotsumoto, M., Tsuji, H., Yoshida, T., Nojiri, H., and Omori, T. 2002. Degradation characteristics of a dibenzofuran-degrader *Terrabacter* sp. strain DBF63 toward chlorinated dioxins in soil. Chemosphere. 48:201-207.
- Hammel, K.E., Kalyanaraman, B., and Kirk, T.K. 1986. Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons and dibenzo-p-dioxins by *Phanerochaete chrysosporium* ligninase. J. Biol. Chem. 261: 16948-16952.

- Hammel, E., and Schauer, F. 1997. Fungal hydroxylation of dibenzofuran. Mycol. Res. 101: 433-436.
- Hammer, E., Krowas, D., Schäfer, A., Specht, M., Francke, W., and Schauer, F. 1998. Isolation and characterization of a dibenzofuran-degrading yeast: Identification of oxidation and ring cleavage products. Appl. Environ. Microbiol. 64(6): 2215-2219.
- Harms, H., Wittich, R.M., V., S., Meyer, H.P.F. and W., F. 1990. Transformation of dbenzo-p-dioxins by *Pseudomonas* sp. strain HH69. Appl. Environ. Microbiol., 56: 1157-1159.
- Hofmann, K.H., Polnisch, E., Kreisel, H., Mach, H., and Schubert, M. 1992. Degradation of dibenzofuran and dibenzodioxins by fungi. Proceedings of the 12th International Symposium on Chlorinated Dioxins and Related Compounds, p. 93-96. Finland.
- Hong, H.B., Yoon, S.C., Sung, D.C., and Park, Y.H. 1999. Degradation of dibenzofuran by *Pseudomonas putida* PH-01. Wat. Res. 34(8):2404-2407.
- Iida, T., Mukouzaka, Y., Nakamura, K., Yamaguchi, I., and Kudo, T. 2002. Isolation and characterization of dibenzofuran-degrading actinomycetes: Analysis of multiple extradiol dioxygenase genes in dibenzofuran-degrading *Rhodococcus* species. Biosci. Biotechnol. Biochem. 66(7): 1462-1472.
- Ishiguro, T. 2000. Biodegradation of dibenzofuran and dioxins by *Pseudomonas aeruginosa* and *Xanthomonas maltophilia*. Environ. Technol. 21:1309-1316.
- Jeong, E., Hirai, M., and Shoda, M. 2008. Removal of o-xylene using biofilter inoculated with *Rhodococcus* sp. BTO62. J. Hazard. Mater. 152:140-147.
- Jorio, H., Bibeau, L., Viel, G., and Heitz, M. 2000. Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance. Chem. Eng. 76:209-221.
- Kearny, P.C., Woolson, E.A., Ellington, C.P.Jr. 1972. Persistence and metabolism of chlorodioxins in soils. Environ. Sci. Technol. 6:1017-1019.
- Kim, B.J., Severin, B.F., and Neilson, L.M. 1999. Biofiltration of solvent vapors from Munitions Manufacturing Operations [online]. Available from:http://www.cecer.army.techreports/Kim_mops/Kim_Mops.uli.post.pdf. (2005, July 7)

- Kim, D., and Sorial, G.A. 2007. Role of biological activity and biomass distribution in air biofilter performance. Chemosphere. 66(9):1758-1764.
- Klecka, G.M., and Gibson, D.T. 1979. Metabolism of dibenzo (1,4) dioxin. J. Biochem. 180(3):639-645.
- Kondo, R., Harazono, K., and Sakai, K. 1994. Bleaching of hardwood kraft pulp with manganese peroxidase secrete from *Phanerochaete sordida* YK-624. Appl. Environ. Microbiol. 60:4359-4363.
- Kaufman, D.D., and Blake, J. 1973. Microbial degradation of several acetamide, acylanilide, carbamate, toluidine and urea pesticides. Soil. Biol. Biochem. 5: 297-308.
- Lan, J., Huang, X., Hu, M., Li, Y., Qu, Y., Gao, P. 2006. High efficient degradation of dyes with lignin peroxidase coupled with glucose oxidase. J. Biotechnol. 123(4):483-90.
- Lang, M.E., and Jager, R.A. 1992. Odor Control for Municipal. Biocycle. 33(8):76-85.
- Leson, G., and Winer, A.M. 1991. Biofiltration : An innovative air pollution control technology for VOC emissions. J. Air & Waste Manage. Assoc. 41: 1045-1054.
- Liu, T., Quan, X., Zhao, Y., Chen, S., and Zhao, H. 2005. Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-bed biofilter. J. Biochem. Eng. 23(1):85-95.
- Lu, C., Chu, W., and Lin, M.R. 2000. Removal of BTEX vapor from waste gases by a trickle bed biofilter. J. Air & Waste Manage. Assoc. 50:411-417.
- Moe, W.M., and Qi, B. 2004. Performance of a fungal biofilter treating gas-phase solvent mixtures during intermittent loading. Wat. Res. 38(9):2259-2268.
- Monna, L., Omori, T. and Kodama, T. 1993. Microbial degradation of dibenzofuran, fluorene, and dibenzo-p-dioxin by *Staphylococcus auriculans* DBF63. Appl. Environ. Microbiol., 59: 285-289.
- Moore, E.R.B., Wittich, R.M., Fortnagel, P., and Timmis, K.N. 1993. 16S ribosomal RNA gene sequence characterization and phylogenetic analysis of a dibenzo-p-dioxin-degrading isolate within the new genus *Sphingomonas*. Lett. Appl. Microbiol. 17: 115-118.

- Mori, T., and Kondo, R. 2002. Degradation of 2,7-dichlorodibenzo-p-dioxin by wood-rotting fungi, screened by dioxin degrading ability. FEMS Microbiol. Lett. 213:127-131.
- Nobuta, K. and Yoshikuni, U. 2001. Metabolism of dibenzo-p-dioxin and chlorinated dibenzo-p-dioxin by a gram-positive bacterium *Rhodococcus opacus* SAO101. J. Biosci. Bioeng. 92:138-143.
- Pandey, R.A., Padoley, K.V., Mukherji, S.S., Mudliar, S.N., Vaidya, A.N., Rajvaidya, A.S., and Subbarao, T.V. 2007. Biotreatment of waste gas containing pyridine in a biofilter. Biores. Technol. 98:2258-2267.
- Pfeifer, F., Schacht, S., Klein, J., and Truper, H.G. 1989. Degradation of diphenyl ether by *Pseudomonas cepacia*. Arch. Microbiol. 152:515-519.
- Pfeifer, F., Truper, H.G., Klein, J. and Schacht, S. 1993. Degradation of diphenylether by *Pseudomonas cepacia* Et4: enzymatic release of phenol from 2,3-dihydroxydiphenylether. Arch. Microbiol. 159: 323-329.
- Philippi, M., Schmid, J., Wipf, H.-K., and Hutter, R. 1982. A microbial metabolite of TCDD. Experientia. 38: 659-661.
- Pointing, S.B. 2001. Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. Appl. Microbiol. Biotechnol. 57:20-33.
- Quensen III, J. F., and Matsumura, F. 1983. Oxidative degradation of 2,3,7,8-tetrachloro dibenzo-p-dioxin by microorganisms. Environ. Toxicol. Chem. 2: 261–268
- Quinlan, C., Strevett, K., Ketcham, M., and Grego, L. 1999. VOC Elimination in a compost biofilter using previously acclimated bacterial inoculum. J. Air & Waste Manage. Assoc. 49:544-553.
- Sariaslani, F.S. 1991. Microbial cytochromes P-450 and xenobiotic metabolism. Adv. Appl. Microbiol. 36: 133-178.
- Sato, A., Watanabe, T., Watanabe, Y., Harozono, K., and Fukatsu, T. 2002. Screening for basidiomycetous fungi capable of degrading 2,7-dichlorodibenzo-p-dioxin. FEMS Microbiol. Lett. 213:213-217.

- Satoshi, T., Nakamura, M., Masueda, T., Kondo, R., and Sakai, K. 1996. Degradation of polychlorinated dibenzofurans by white rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624. Appl. Environ. Microbiol. 62:4323-4328.
- Singh, R.S., Agnihotri, S.S., and Upadhyay, S.N. 2006. Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media. Biores. Technol. 97(18):2296-2301.
- Schmid, A., Rothe, B., Altenbuchner, J., Ludwig, W. and Engesser, K.H. 1997. Characterization of three distinct extradiol dioxygenases involved in mineralization of dibenzofuran by *Terrabacter* sp. strain DPO360. J Bacteriol, 179, 53-62.
- Schmidt, S., Wittich, R.M., Erdmann, D., Wilkes, H., Francke, W., and Fortnagel, P. 1992a. Biodegradation of diphenyl ether and its monohalogenated derivatives by *Sphingomonas* sp. strain SS3. Appl. Environ. Microbiol. 58: 2744-2750.
- Schmidt, S., Wittich, R.M., Fortnagel, P., Erdmann, D., and Francke, W. 1992b. Metabolism of 3-methyldiphenyl ether by *Sphingomonas* sp. SS31. FEMS Microbiol. Lett. 96: 253-258.
- Shin, K.S., Oh, I.K., and Kim, C.J. 1997. Production and purification of Remazol Brilliant Blue R decolorizing peroxidase from the culture filtrate of *Pleurotus ostreatus*. Appl. Environ. Microbiol. 63(5): 1744-1748.
- Strubel, V., Rast, H.G., Fietz, W., Knackmuss, H.J., and Engesser, K.H. 1989. Enrichment of dibenzofuran utilizing bacteria with high co-metabolic potential towards dibenzodioxin and other anellated aromatics. FEMS Microbiol. Lett. 58:233-238.
- Strubel, V., Engesser, K.H., Fischer, P., and Knackmuss, H.J. 1991. 3-(2-Hydroxyphenyl) catechol as substrate for proximal meta ring cleavage in dibenzofuran degradation by *Brevibacterium* sp. strain DPO 1361. J. Bacteriol. 173: 1932-1937.
- Takada, S., Nakamura, M., Matsueda, T., Kondo, R., and Sakai, K. 1996. Degradation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans by the white rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624. Appl. Environ. Microbiol. 62(12): 4323-4328.

- Takase, I., Omori, T., and Minoda, Y. 1986. Microbiol degradation products from biphenyl-related compounds. Agric. Biol. Chem. 50:681-686.
- Topp, E., and Akhtar, H. 1990. Mineralization of 3-phenoxybenzoate by a two-membered bacterial co-culture. Can. J. Microbiol. 36: 495-499.
- Topp, E., and Akhtar, H. 1991. Identification and characterization of a *Pseudomonas* strain capable of mineralizing phenoxybenzoates. Appl. Environ. Microbiol. 57:1294-1300.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1994. Estimating exposure to dioxin-like compounds Volume II: properties, sources, occurrence and background exposures. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. EPA/600/6-88/005Cb.
- Valli, K., Wariishi, H., and Gold, M.H. 1992. Degradation of 2,7-dichlorodibenzo-p-dioxin by the lignin degrading basidiomycete *Phanerochaete cryosporium*. J. Bacteriol. 174:2131-2137.
- Vyas, B.R.M., and Molitoris, H.P. 1995. Involvement of an extracellular H₂O₂-dependent ligninolytic activity of white rot fungus *Pleurotus ostreatus* in the decolorization of Remazol Brilliant Blue R. Appl. Environ. Microbiol. 61(11): 3919-3927.
- World Health Organization. 1989. Polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans. Geneva: World Health Organization.
- Wilkes, H., Francke, W., Wittich, R.M., Harms, H., Schmidt, S., and Fortnagel. P. 1992. Mechanistic investigations on microbial degradation of diaryl ethers—analysis of isotope-labeled reaction products. Naturwissenschaften 79:269–271.
- Wilkes, H., Wittich, R.M., Timmis, K.N., Fornagel, P. and Francke, W. 1996. Degradation of chlorinated dibenzofurans and dibenzo-p-dioxin by *Sphingomonas* sp. strain RW1. Appl. Environ. Microbiol. 62:367-371.
- William, G.W., Susan, M.B., Dale, A.P., and Davis, J.L. 1991. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. Appl. J. Bacteriol. 173:697-703.
- Williams, T.O., and Miller, F.C. 1992. Biofilters and facility operations:Part II. Biocycle. 33(11):75-79.

- Wittich, R.M., Wikes, H., Sinnwell, V., Francke, W., and Fortnagel, P. 1992. Metabolism of dibenzo-p-dioxin by *Sphingomonas* sp. strain RW1. Appl. Environ. Microbiol. 58:1005-1010.
- Wittich, R. 1998. Biodegradation of Dioxins and dibenzofurans (Rolf-Michael Wittich), Springer-Verlag and R.G. Landes Company, Heidelberg Berlin New York.
- Yoon I.K., and Park, C.H. 2002. Effects of gas flow rate, inlet concentration and temperature on biofiltration of volatile organic compounds in a peat-packed biofilter. J. Biosci. Bioeng. 93(2):165-9.
- Zhang, L., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. Removal characteristics of dimethyl sulfide, methanethiol and hydrogen sulfide by *Hyphomicrobium* sp. I55 isolated from peat biofilter. J. Ferment. Bioeng. 72(5):392-396.
- Zhang, L., Hirai, M., and Shoda, M. 1992. Removal characteristics of dimethyl sulfide by a mixture of *Hyphomicrobium* sp. I55 and *Pseudomonas acidovorans* DMR-11. J. Ferment. Bioeng. 74(3):174-177.
- Zhang, L., Kuniyoshi, I., Hirai, M., and Shoda, M. 1991. Oxidation of dimethyl sulfide by *Pseudomonas acidovorans* DMR-11 isolated from peat biofilter. Biotechnol. Lett. 13(3):223-228.
- Zhu, L., Abumaizar, R.J., and Kocher, W.M. 1998. Biofiltration of benzene contaminated air streams using compost-activated carbon filter media. Environ. Progress. 17(3):168-172.
- Zilli, M., Converti, A., Lodi, A., Borghi, M.D., and Ferraiolo, G. 1993. Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*. Biotechnol. Bioeng. 41:693-699.
- Zilli, M., Borghi, M.D., and Converti, A. 2000. Toluene vapour removal in a laboratory scale biofilter. Appl. Microbiol. Biotechnol. 54:248-254.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อาหารเลี้ยงเชื้อ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 2 ชั้น

ประกอบด้วยอาหาร Czapek Dox agar และ malt extract agar โดยใช้สี Remazol Brilliant Blue R (RBBR) (Sato และคณะ, 2002) เตรียมโดยเทอาหารชั้นล่างคืออาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Czapek Dox agar ลงในจานเลี้ยงเชื้อ ที่ไว้จนอาหารแข็ง แล้วเททับหน้าด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง malt extract agar ที่เติมสี RBBR โดยอาหารทั้ง 2 ชั้นมีส่วนประกอบดังนี้

1.1 อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Czapek Dox agar

ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	1	กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.5	กรัม
โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl)	0.5	กรัม
โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)	2	กรัม
เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.01	กรัม
ซูโครส	10	กรัม
วุ้นผง	20	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.5 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

1.2 อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง malt extract agar

ผงมอลต์สกัด (malt extract)	1	กรัม
วุ้นผง	1	กรัม
น้ำกลั่น	100	มิลลิลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.5 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที เติมสีย้อม Remazol Brilliant Blue R (RBBR) ลงไป 0.2 กรัม/ลิตร

2. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Potato Dextrose Agar (PDA)

มันฝรั่งปอกและหั่น	200	กรัม
เดกซ์โตรส	20	กรัม
วุ้นผง	20	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5.6 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral Salt Medium (MM) (Kaufman and Blake, 1973)

ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	0.8	กรัม
โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	0.2	กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.2	กรัม
แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$)	0.1	กรัม
แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$)	5	กรัม
แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)	1	มิลลิกรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.5 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

4. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mineral Salt Medium (MM) (Kaufman and Blake, 1973)

ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	0.8	กรัม
โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	0.2	กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.2	กรัม
แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$)	0.1	กรัม
แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$)	5	กรัม
แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)	1	มิลลิกรัม
วุ้นผง	20	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.5 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

5. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox Medium

ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	1	กรัม
แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.5	กรัม
โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl)	0.5	กรัม
โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)	2	กรัม
เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.01	กรัม
ซูโครส	10	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4.5 แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

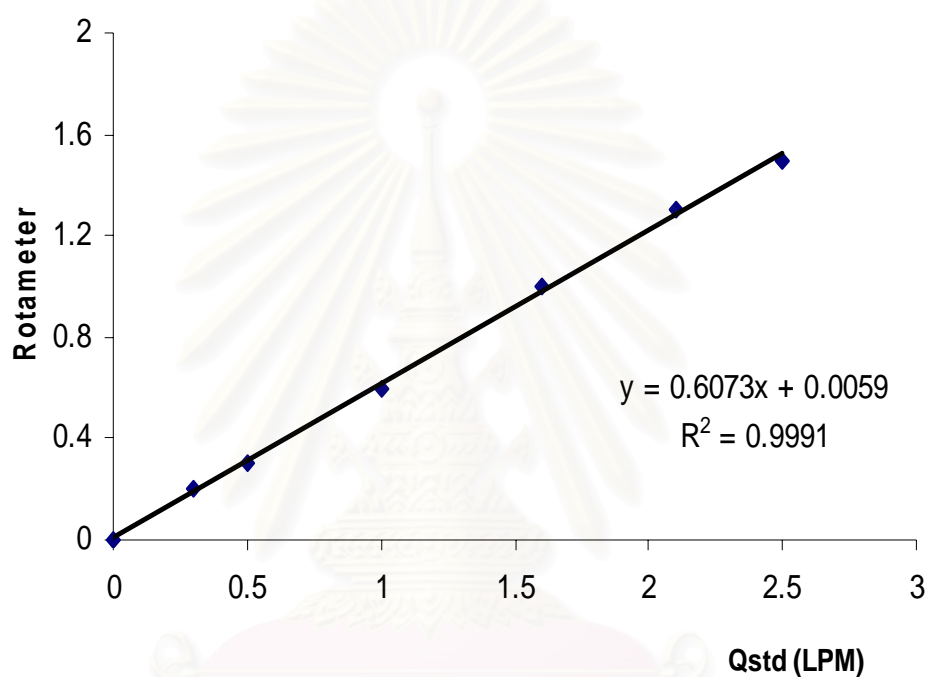
6. สารละลายไดเบนโซฟูแรนในไดเมทิลซัลฟอกไซด์

ชั่งไดเบนโซฟูแรน 100 ไมโครกรัม ละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องปั่นผสมไดเบนโซฟูแรนละลายหมด ทำให้ปลอดเชื้อโดยการกรองด้วยชุดกรองสำเร็จรูปชนิด PTFE ที่มีขนาดรูกว้าง 0.20 ไมโครเมตร เก็บรักษาในขวดสีชาหรือห่อให้มิดชิด เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐาน

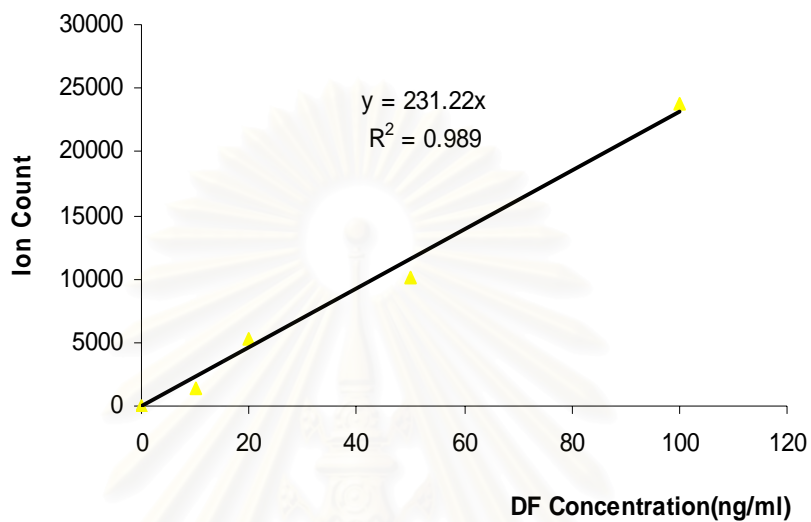
1. กราฟแสดงประสิทธิภาพของ Rotameter ที่ใช้ในการทดลอง



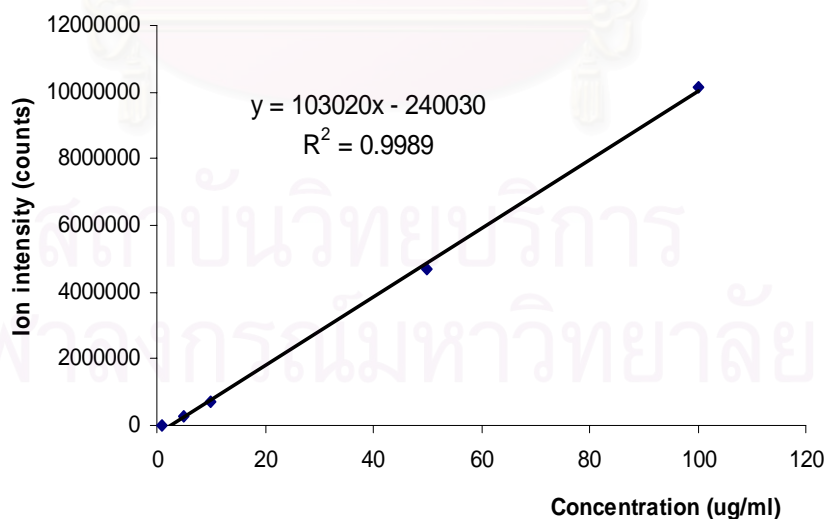
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไดเบนไซฟูแรน

2.1 กราฟมาตรฐานไดเบนไซฟูแรนความเข้มข้น 0-100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร



2.2 กราฟมาตรฐานไดเบนไซฟูแรนความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร



ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. การคำนวณอัตราการไหลที่แท้จริง

จากรูปที่ 1 ในภาคผนวก ข เป็นภาวะการทำงานของ Rotameter ที่อุณหภูมิ 25°C และความดันบรรยากาศ แกน y เป็นค่าที่อ่านได้จาก Rotameter และแกน x เป็นการแสดงอัตราการไหลของอากาศที่แท้จริงที่ 25°C

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

ที่อุณหภูมิ 30°C , Rotameter = 0.2 l/min

$$Q_{25^{\circ}\text{C}} = 0.2(298/303)$$

$$Q_{25^{\circ}\text{C}} = 0.196 \text{ l/min}$$

แทนค่า $Q_{25^{\circ}\text{C}} = 0.196$ เป็นค่า y ในสมการ $y = 0.6073x + 0.0059$

จะได้ค่า x ซึ่งเป็นค่า Q_{std} ที่ 25°C $x = 0.332 \text{ l/min}$

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

$$\text{จะได้ค่า} \quad 0.332 = Q_a [298/303]$$

$$Q_a = 0.337 \text{ l/min}$$

ดังนั้นที่อุณหภูมิ 30°C และตั้งค่า Rotameter เป็น 0.2 l/min จะได้อัตราการไหลที่แท้จริงที่อุณหภูมิ 30°C เท่ากับ 0.337 l/min

$$\text{แปลงหน่วยจาก l/min เป็น m}^3/\text{hr} \quad 0.337 = 0.337 \times 10^{-3} \times 60 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$= 2.02 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}$$

2. การคำนวณความเข้มข้นของไดเบนไซฟลูแอรในสถานะก๊าซ

ในการทดลองนี้การชั่งมวลของไดเบนไซฟลูแอรที่หายไปที่อุณหภูมิ 30° C จากการดำเนินระบบเป็นเวลา 420 นาที ที่อัตราไหลของ Rotameter เท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที มีค่า 0.0379 กรัม

2.1 การคำนวณเป็นหน่วย ppmv

ปริมาตรของไดเบนไซฟลูแอรในสถานะก๊าซ

$$\begin{aligned}
 &= [\text{กรัมของไดเบนไซฟลูแอร}] \times [1/\text{มวลโมเลกุลของไดเบนไซฟลูแอร}] \times 22.4 \times [\text{อุณหภูมิทดลอง}/273] \\
 &= [0.0379 \text{ g}] \times [1/168 \text{ g/mol}] \times [22.4 \text{ dm}^3/\text{mol}] \times [303 \text{ K}/273 \text{ K}] \\
 &= 0.0056 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

หาปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านระบบทั้งหมดใน 420 นาที และอัตราการไหลของอากาศที่แท้จริงเป็น 0.0337 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30° C

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นอากาศไหลผ่านระบบด้วยปริมาตรทั้งหมด} &= 0.337 \times 420 \\
 &= 141.54 \text{ L (dm}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของไดเบนไซฟลูแอรมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 &= (\text{ปริมาตรไดเบนไซฟลูแอรในสถานะก๊าซ/ปริมาตรอากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านระบบ}) \times 10^6 \text{ ppmv} \\
 &= (0.0056/141.54) \times 10^6 \text{ ppmv} \\
 &= 39.56 \text{ ppmv}
 \end{aligned}$$

2.2 การคำนวณเป็นหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการ	PV	=	nRT
	ppmv/1000	=	[g/m ³] x [0.0821] x [temp./MW]
	39.56/1000	=	[g/m ³] x [0.0821] x [303/168]
	[g/m ³]	=	0.267

แสดงว่าไดเบนไซฟลูแอร 0.0379 กรัม ที่อุณหภูมิ 30° C เมื่อเดินระบบที่อัตราการไหลจริงเท่ากับ 0.337 l/min จะให้ความเข้มข้นของไอของไดเบนไซฟลูแอรเท่ากับ 39.56 ppmv หรือ 0.267 g/m³

3. การคำนวณหาระยะเวลาที่ไอของสารสัมผัสกับตัวกลาง

$$EBRT = V_f / Q$$

เมื่อ $V_f =$ ปริมาตรของชั้นตัวกลาง (m^3)
 $Q =$ อัตราการไหลของอากาศ ($m^3/หน่วยเวลา$)

$$\begin{aligned} EBRT &= V_f / Q \\ &= \{22/7 \times [0.025]^2 \times 1.7\} / 0.337 \times 1000 \\ &= 9.91 \text{ min} \\ EBRT &= 594.6 \text{ sec} \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัด (Removal Efficiency)

$$\text{Removal Efficiency} = [(C_{gi} - C_{go}) / C_{gi}] \times 100$$

เมื่อ $C_{gi} =$ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ [g/m^3]
 $C_{go} =$ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ [g/m^3]

5. การคำนวณหาความสามารถในการบำบัดมลพิษ (Elimination Capacity)

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

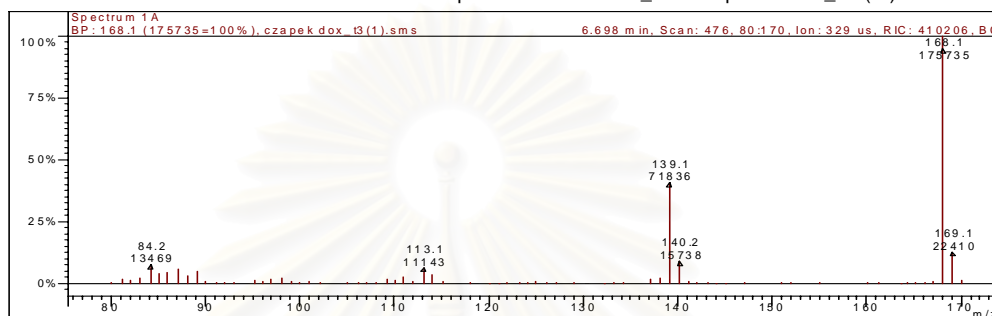
เมื่อ $V_f =$ ปริมาตรของชั้นตัวกลาง (m^3)
 $Q =$ อัตราการไหลของอากาศ ($m^3/หน่วยเวลา$)
 $C_{gi} =$ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าระบบ [g/m^3]
 $C_{go} =$ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ออกจากระบบ [g/m^3]

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ด้วย GC-MS

1. การวิเคราะห์ระดับขวดทดลอง

Scan 476 from ...ent\bottle no.2\czapek dox' bottle_2\czapek dox_t3(1).sms



Spectrum from ... no.2\czapek dox' bottle_2\czapek dox_t3(1).sms
Scan No: 476, Time: 6.698 minutes
No averaging. Background corrected.
Comment: 6.698 min. Scan: 476 80:170 Ion: 329 us RIC: 473487
Pair Count: 69 MW: 0 Formula: None
CAS No: None Acquired Range: 79.5 - 170.5 m/z

MDT: Centroid, Time: 0.00 - 10.00
Seg 1, FIL/MUL DELAY, Time: 0.00 - 5.00, Filament Off
Chan 1, 40-650 m/z
Seg 2, Dibenzofuran, Time: 5.00-10.00, EI-Auto-Full
Chan 1, 80-170 m/z
Product Mass Range: 79.5 - 170.5 m/z

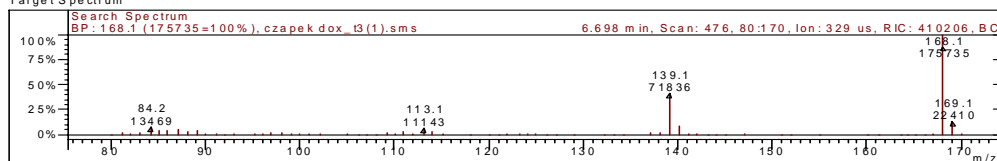
Ion	Int	Norm	Ion	Int	Norm	Ion	Int	Norm
80.0	102	1	106.2	287	2	137.2	2693	15
81.2	2889	16	107.0	279	2	138.2	3428	19
82.1	2260	13	108.0	230	1	139.1	71836	408
83.0	3682	21	109.2	2678	15	140.2	15738	89
84.2	13469	77	110.1	1824	10	141.1	1374	8
85.1	6990	40	111.0	4413	25	142.0	493	3
86.0	7620	43	112.0	1159	7	143.2	93	1
87.1	10080	57	113.1	11143	63	144.0	8	0
88.1	5138	29	114.0	5771	33	145.1	70	0
89.1	8243	47	115.1	920	5	147.1	507	3
90.0	1051	6	118.1	226	1	151.0	389	2
91.1	765	4	120.1	20	0	152.0	191	1
92.1	293	2	121.0	55	0	155.1	189	1
93.1	421	2	122.0	419	2	160.1	132	1
95.2	2161	12	123.2	828	5	161.2	243	1
96.1	1265	7	124.1	412	2	163.7	50	0
97.0	3105	18	125.0	953	5	164.3	173	1
98.1	3894	22	126.1	226	1	165.1	385	2
99.1	1451	8	127.1	176	1	166.1	300	2
100.0	651	4	129.1	246	1	167.0	1670	9
101.0	1103	6	132.2	28	0	168.1	175735	999
102.2	457	3	133.2	374	2	169.1	22410	127
105.1	399	2	134.2	172	1	170.0	1771	10

รูปที่ ง-1 Mass Spectrum ของไดเบนโซฟูแรนจากผลการทดลองที่ 4.4 เมื่อเลี้ยงรา T3 ในขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1 ต่อ 10

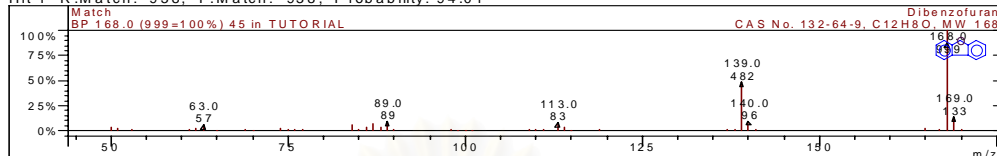
มะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Czapek Dox อัตราส่วน 1 ต่อ 10

Best 3 Hits of Search NIST Libraries for Spectrum

Target Spectrum



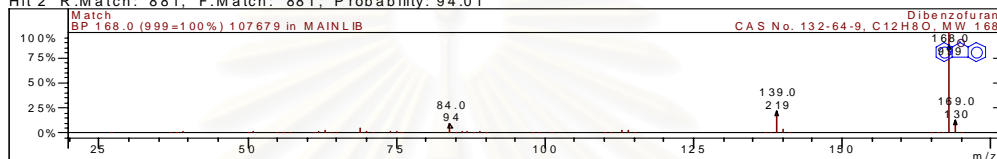
Hit 1 R.Match: 938, F.Match: 938, Probability: 94.01



Spectrum 45 from TUTORIAL Library

Name: Dibenzofuran
Pair Count: 41 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 132-64-9 Acquired Range: 50.0 - 170.0 m/z

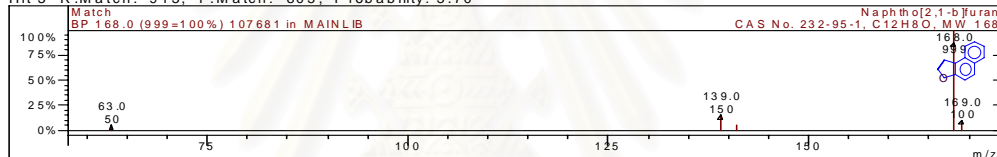
Hit 2 R.Match: 881, F.Match: 881, Probability: 94.01



Spectrum 107679 from MAINLIB Library

Name: Dibenzofuran
Pair Count: 46 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 132-64-9 Acquired Range: 27.0 - 170.0 m/z

Hit 3 R.Match: 913, F.Match: 805, Probability: 3.70



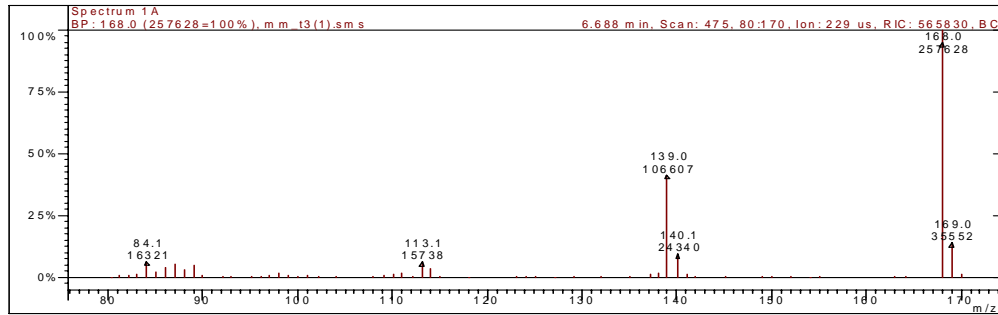
Spectrum 107681 from MAINLIB Library

Name: Naphtho[2,1-b]furan
Pair Count: 5 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 232-95-1 Acquired Range: 63.0 - 169.0 m/z

รูปที่ ง-2 เปรียบเทียบ Mass Spectrum ในรูปที่ ง-1 กับฐานข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scan 475 from ...eriment\bottle no.2\mineral medium' bottle_2\mm_t3(1).sm.s



Spectrum from ...ttle no.2\mineral medium' bottle_2\mm_t3(1).sm.s
Scan No: 475, Time: 6.688 minutes
No averaging. Background corrected.
Comment: 6.688 min. Scan: 475 80:170 Ion: 229 us RIC: 635568
Pair Count: 55 MW: 0 Formula: None
CAS No: None Acquired Range: 79.5 - 170.5 m/z

MDT: Centroid, Time: 0.00 - 10.00
Seg 1, FIL/MUL DELAY , Time: 0.00- 5.00, Filament Off
Chan 1, 40-650 m/z
Seg 2, Dibenzofuran , Time: 5.00-10.00, EI-Auto-Full
Chan 1, 80-170 m/z
Product Mass Range: 79.5 - 170.5 m/z

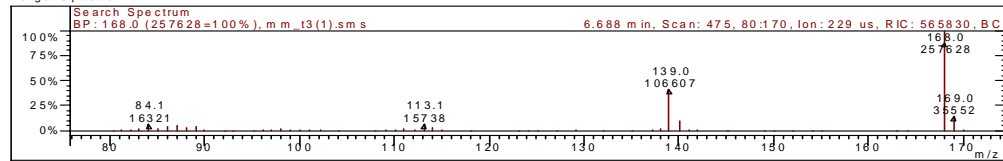
Ion	Int	Norm	Ion	Int	Norm	Ion	Int	Norm
80.3	68	0	101.0	1790	7	135.0	314	1
81.2	1696	7	102.2	877	3	137.2	3319	13
82.1	1662	6	104.0	120	0	138.1	4370	17
83.0	3464	13	108.0	198	1	139.0	106607	413
84.1	16321	63	109.1	2378	9	140.1	24340	94
85.0	5368	21	110.1	2805	11	141.1	2488	10
86.0	9755	38	111.0	4637	18	142.0	636	2
87.0	13527	52	112.2	950	4	145.2	128	0
88.1	8004	31	113.1	15738	61	149.0	271	1
89.1	11883	46	114.0	8382	33	150.0	332	1
90.0	1444	6	115.0	1023	4	152.0	263	1
92.1	564	2	118.1	78	0	154.0	30	0
93.0	129	1	123.1	505	2	155.0	174	1
95.2	497	2	124.1	516	2	163.0	120	0
96.1	1003	4	125.1	266	1	164.1	140	1
97.0	2063	8	127.1	78	0	168.0	257628	999
98.0	4100	16	129.1	869	3	169.0	35552	138
99.0	2005	8	132.0	206	1	170.0	2983	12
100.0	1166	5						

รูปที่ ง-3 Mass Spectrum ของไดเบนโซฟิวแรนจากผลการทดลองที่ 4.4 เมื่อเลี้ยงรา T3 ในขุยมะพร้าวผสมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Mineral medium อัตราส่วน 1ต่อ 10

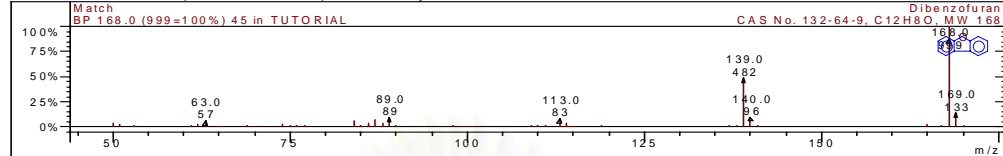
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Best 3 Hits of Search NIST Libraries for Spectrum

Target Spectrum



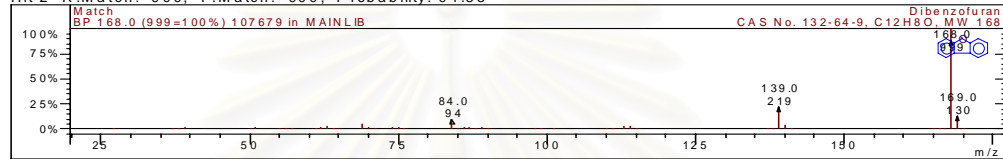
Hit 1 R.Match: 956, F.Match: 956, Probability: 94.33



Spectrum 45 from TUTORIAL Library

Name: Dibenzofuran
Pair Count: 41 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 132-64-9 Acquired Range: 50.0 - 170.0 m/z

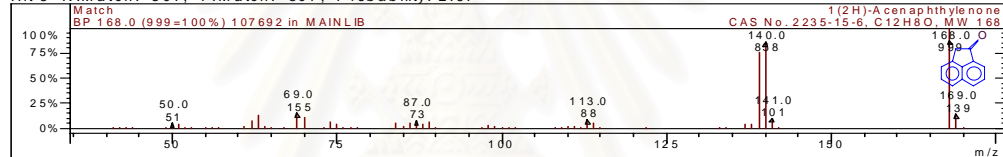
Hit 2 R.Match: 900, F.Match: 900, Probability: 94.33



Spectrum 107679 from MAINLIB Library

Name: Dibenzofuran
Pair Count: 46 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 132-64-9 Acquired Range: 27.0 - 170.0 m/z

Hit 3 R.Match: 807, F.Match: 807, Probability: 2.67



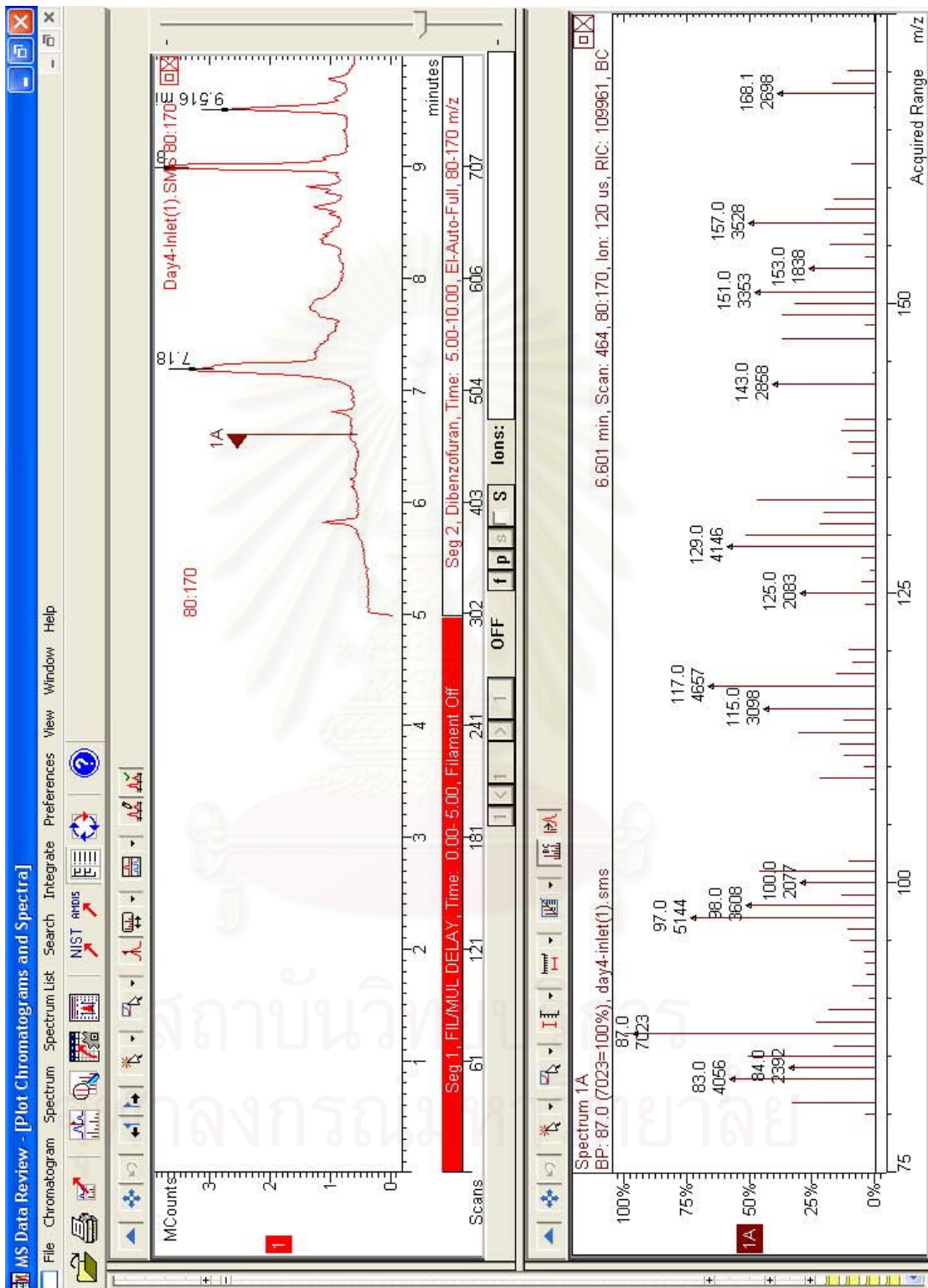
Spectrum 107692 from MAINLIB Library

Name: 1(2H)-Acenaphthylenone
Pair Count: 59 MW: 168 Formula: C₁₂H₈O
CAS No: 2235-15-6 Acquired Range: 41.0 - 170.0 m/z

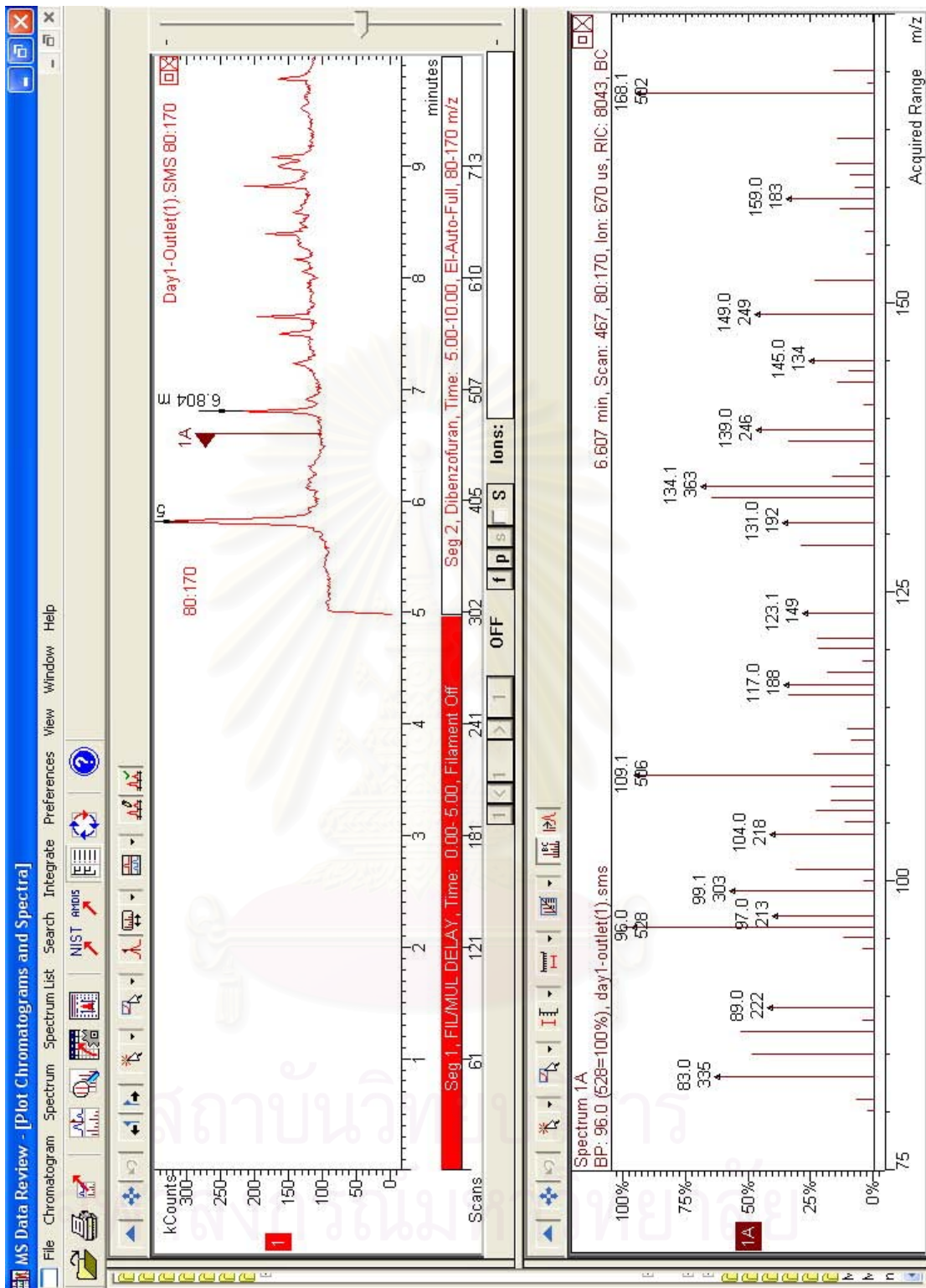
รูปที่ ง-4 เปรียบเทียบ Mass Spectrum ในรูปที่ ง-3 กับฐานข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การวิเคราะห์ระดับ Bench-Scale Biofilter



รูปที่ ง-5 Chromatogram และ Mass Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนที่จุดเข้าระบบด้วย GC-MS



รูปที่ ง-6 Chromatogram และ Mass Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไดเบนโซฟูแรนที่จุดออกระบบด้วย GC-MS

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพฑูรย์ ทวีรุจิโรจน์ เกิดเมื่อวันที่พฤษภาคมที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2546 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขา จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่บ้านเลขที่ 40/513 ถนนพระราม 2 ซอย 34 หมู่บ้านอมรชัย 2 แขวงบางมด เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร 10150

เกียรติประวัติ

- ได้รับการคัดเลือกให้เป็น นิสิตดีเด่น ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2549 เมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2550

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้เข้าร่วมเสนอและได้รับรางวัลการเสนอผลงานทางวิชาการ แบบโปสเตอร์ดีเด่นในการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 15 ประจำปี 2550 “The 15th Academic Conference, the Annual 2007” ระหว่างวันที่ 15-16 มีนาคม 2550 ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในหัวข้อเรื่อง “DEVELOPMENT OF BIOFILTER FOR DEGRADATION OF DIBENZOFURAN VAPOR.” ร่วมกับผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย