

การกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินโดยใช้นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน



นายเชาว์วุฒิ สิงห์แก้ว

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

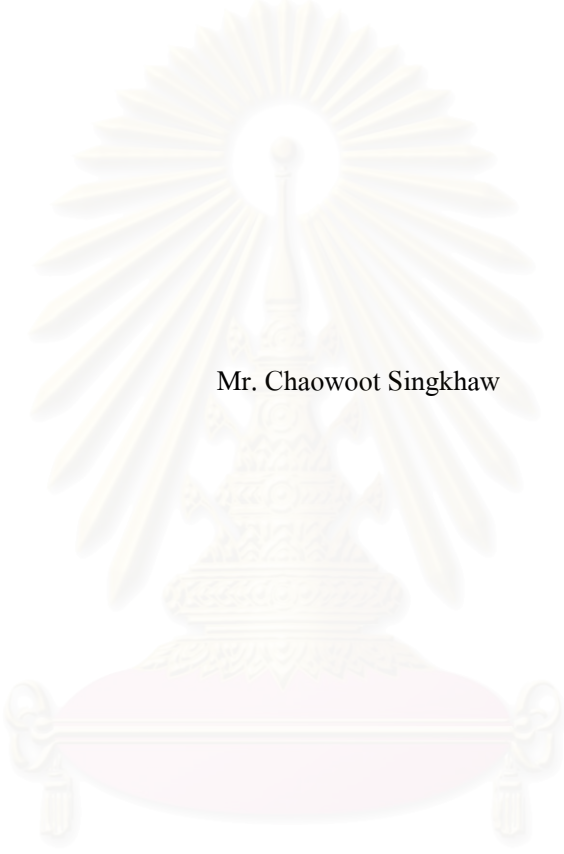
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF ENDOSULFANS IN SOIL USING AMPHIPHILIC POLYURETHANE  
NANOPOLYMER



Mr. Chaowoot Singkhaw

สถาบันวิทยบริการ

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดสารเอ็นโคซัลแฟนในดินโดยใช้นาโนโพลิเมอร์ชนิด  
แอมฟีฟิลิกโพลียูรีเทน

โดย

นายเชาว์วุฒิ สิงห์แก้ว

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา คิงส์กัณฑ์) คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อางอง ประทศสุนทรสาร) ประธานกรรมการ

.....  
(ดร. เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. โสภณ เรืองดำราญ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วณิดา จินศาสตร์)

เชาว์วุฒิ สิงห์แก้ว : การกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินโดยใช้นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน. (REMOVAL OF ENDOSULFANS IN SOIL USING AMPHIPHILIC POLYURETHANE NANOPOLYMER). อ. ที่ปรึกษา: ดร. เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์, 107 หน้า.

ในการศึกษานี้ทำการสังเคราะห์นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน เพื่อใช้กำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน (ชนิดแอลฟา เบตา และซัลเฟต) จากดิน นาโนโพลิเมอร์ที่ได้ มีสมบัติชอบน้ำที่บริเวณผิวด้านนอกและไม่ชอบน้ำที่ผิวด้านใน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 - 130 นาโนเมตร ทำให้สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ชนิดชอบไขมันได้รวมทั้งพวกเอ็นโดซัลแฟน นาโนโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และเอ็นโดซัลแฟน ที่อยู่ในระบบน้ำ - ดิน ถึงจุดสมดุลที่ 48 ชั่วโมง และเป็นระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ตลอดทั้งการศึกษานี้ ความเข้มข้นของนาโนโพลิเมอร์ที่ 10 มิลลิกรัม/ลิตร กำจัดสารได้ดี (90-94%) โดยประสิทธิภาพการกำจัดเรียงตามลำดับดังนี้ เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา > เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต > เอ็นโดซัลแฟนเบตา ตามลำดับ ดินที่สไปค์ด้วยเอ็นโดซัลแฟนที่แยกแ่ในนาโนโพลิเมอร์และในน้ำแยกอออนในคอลัมน์แก้วเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วทำการชะด้วยน้ำแยกอออน แสดงให้เห็นว่าน้ำแยกอออนชะพวกเอ็นโดซัลแฟนจากดินในปริมาณต่ำมากตรงกันข้ามกับนาโนโพลิเมอร์ เนื้อดินและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงดูดซับสารได้แรงและมีผลให้ยากต่อการกำจัดด้วยนาโนโพลิเมอร์ นั่นคือปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินต่ำชี้ให้เห็นถึงความสามารถที่เอื้อต่อการกำจัดสูง เช่นเดียวกับค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของสารระหว่างชั้นออกคานอลกับน้ำ ของสาร ( $\text{Log } K_{ow}$ ) ซึ่งให้ผลคล้าย ๆ กัน นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคดินก็มีอิทธิพลในการกำจัดสารจากดิน

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต เบญจลักษณ์ สิงห์แก้ว

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เบญจลักษณ์ สิงห์แก้ว

## 4789080720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : ENDOSULFAN IN SOIL / NANOPOLYMER / AMPHIPHILIC POLYURETHANE / REMOVAL

CHAOWOOT SINGKHAO: REMOVAL OF ENDOSULFANS IN SOIL USING AMPHIPHILIC POLYURETHANE NANOPOLYMER. THESIS ADVISOR : BENJALAK KARNCHANASEST, Ph.D., 107 pp.

In this study, amphiphilic nanoparticles were synthesized for removing endosulfans (alpha, beta and sulfate) from soil. The obtained polymers had hydrophilic on outer surface and hydrophobic interior with 50-130 nm diameters which enabled them to sorb some lipophilic organic compounds including endosulfans. The various concentrations of nanopolymer and endosulfan in soil-water system reached equilibrium at 48 h, the contact time used throughout the study. The nanopolymer of 10 mg/L found out to be best for removal (90 - 94%) and the efficiency is in the order of alpha endosulfan > endosulfan sulfate > beta endosulfan respectively. The endosulfans spiked soil in a glass column were soaked separately in 10 mg/L nanopolymer and deionized water for 48 h and later leached with deionized water showed that deionized water capable to leach endosulfans from soil at very low amount in contrary to nanopolymer. The soil texture and its high organic carbons exhibited strong affinity to the compounds and as a consequence made them difficult to be removed by the nanoparticles. That is low organic carbon content in soil indicated its capacity facilitate high removal rate as well as low log  $K_{ow}$  values of the compounds exhibited similarly. Besides, soil particle size influenced the removal of compounds from soils.

Field of study Environmental Science

Student's signature

*Chaowoot Singkhao*

Academic year 2007

Advisor's signature

*B. Well*



## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านให้ความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูง ในการให้คำปรึกษาชี้แนะข้อผิดพลาดและอบรมฝึกทักษะ เพิ่มความรู้รวมทั้งข้อคิดต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการทำงาน ด้วยดีเสมอมา กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อางอง ประทัดสุนทรสาร ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ศาสตราจารย์ ดร. โสภณ เรืองสำราญ และรองศาสตราจารย์ ดร.วนิดา จินศาสตร์ ที่เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้ตรวจสอบแก้ไขในรายละเอียดต่าง ๆ ตลอดทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี ขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนวิจัยจากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และทุนสนับสนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ ในความเอื้อเฟื้อด้านสถานที่และอุปกรณ์การศึกษารวมทั้งการอำนวยความสะดวกจากหน่วยงานต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิทยานิพนธ์สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ได้แก่ ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร รวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่เป็นนักวิชาการและนิสิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุกคนที่เกี่ยวข้อง ซึ่งไม่สามารถที่จะกล่าวนามได้ทั้งหมด ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในปัญหาที่เกิดขึ้นบ้างช่วงขณะ จนทำให้ผ่านปัญหาต่าง ๆ ไปด้วยดี

และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่น้อง ในครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และคอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจเสมอมา สิ่งใดข้าพเจ้าที่ทำได้ ล่วงเกิน คุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ ขอโปรดอโหสิกรรมที่ได้ล่วงนั้น และคุณประโยชน์อันปรากฏจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้ทั้งหมด แต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....  | ง  |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....   | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....   | ฎ  |
| สารบัญรูป.....   | ฐ  |
| คำย่อ.....   | ฑ  |
| <br>   |    |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....   | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....  | 3  |
| 1.3 สมมุติฐาน.....   | 3  |
| 1.4 ขอบเขตการศึกษา.....  | 3  |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....   | 4  |
| <br>   |    |
| บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....   | 5  |
| 2.1 สารเอ็นโดซัลแฟน.....   | 5  |
| 2.1.1 สมบัติของสาร.....  | 6  |
| 2.1.2 การแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม.....                                      | 9  |
| 2.1.3 ความเป็นพิษของสาร.....   | 12 |
| 2.2 อนุภาคนาโนโพลิเมอร์ (polymeric nanoparticles).....                     | 17 |
| 2.2.1 แหล่งที่มา.....  | 17 |
| 2.2.2 การจำแนกชนิดโพลิเมอร์ตามแหล่งกำเนิด.....                             | 17 |
| 2.2.3 นาโนเทคโนโลยี.....   | 17 |
| 2.2.4 สมบัติและโครงสร้างของนาโนโพลิเมอร์<br>ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน..... | 19 |
| 2.2.5 การใช้อนุภาคนาโนในการกำจัด<br>สารมลพิษอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม.....     | 22 |

|                            |   |    |
|----------------------------|---|----|
| 2.3                        | สมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์              | 24 |
| 2.3.1                      | เนื้อดินและโครงสร้างดิน   | 24 |
| 2.3.2                      | สมบัติทางเคมี   | 25 |
| 2.3.3                      | ปฏิกิริยาของสารในดิน  | 25 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย |   | 27 |
| 3.1                        | อุปกรณ์การวิจัยและสารเคมี   | 27 |
| 3.1.1                      | อุปกรณ์ภาคสนามสำหรับเก็บตัวอย่าง  | 27 |
| 3.1.2                      | อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ   | 27 |
| 3.1.3                      | สารเคมี   | 29 |
| 3.2                        | การสังเคราะห์สารนาโนโพลิเมอร์   | 30 |
| 3.3                        | การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน   | 35 |
| 3.3.1                      | การเก็บตัวอย่างดิน  | 35 |
| 3.3.2                      | การวิเคราะห์สมบัติของดิน  | 35 |
| 3.4                        | วิธีวิเคราะห์สารเอ็นโดซัลแฟน  | 36 |
| 3.4.1                      | การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในตัวอย่างดิน                                     | 36 |
| 3.4.2                      | การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในตัวอย่างของเหลว                                 | 37 |
| 3.4.3                      | การหาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี                               | 38 |
| 3.4.4                      | ช่วงเวลาที่ปรากฏ (retention time) ของสารเอ็นโดซัลแฟน                    | 39 |
| 3.4.5                      | กราฟมาตรฐาน (calibration curve)   | 39 |
| 3.5                        | การตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำ                                      | 41 |
| 3.5.1                      | ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดสาร (detection limit) ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี | 41 |
| 3.6                        | การกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์แก้ว                                    | 42 |
| 3.6.1                      | การชะสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน                          | 42 |
| 3.6.2                      | การชะสารนาโนโพลิเมอร์ในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน                         | 43 |
| 3.6.3                      | การกลับคืนของสารเอ็นโดซัลแฟนจากอนุภาคนาโนโพลิเมอร์                      | 44 |



|                                     |  |    |
|-------------------------------------|--|----|
| 3.6.4                               | การหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้สารนาโนโพลิเมอร์<br>เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน.....                                      | 45 |
| 3.6.5                               | การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิก<br>โพลียูริเทนกับความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน..... | 46 |
| 3.6.6                               | ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับอัตราการกำจัดสาร.....   | 47 |
| 3.6.7                               | การศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลิเมอร์ในการกำจัด<br>สารเอ็นโดซัลแฟนในดินปนเปื้อน.....                              | 48 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... |  | 49 |
| 4.1                                 | ขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์.....  | 49 |
| 4.2                                 | สมบัติของดิน.....  | 52 |
| 4.3                                 | การปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน.....   | 56 |
| 4.4                                 | การตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำ.....  | 58 |
| 4.4.1                               | ขีดจำกัดในการตรวจวัดสารของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....   | 59 |
| 4.6                                 | การชะสารนาโนโพลิเมอร์ในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอูออน.....  | 61 |
| 4.7                                 | การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนที่ปนเปื้อนในสารนาโนโพลิเมอร์.....   | 62 |
| 4.8                                 | เวลาที่เหมาะสมในการเข้สารนาโนโพลิเมอร์เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน.....   | 63 |
| 4.9                                 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารนาโนโพลิเมอร์<br>ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูริเทนกับสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน.....              | 65 |
| 4.10                                | ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับอัตราการกำจัดสาร.....  | 67 |
| 4.10.1                              | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารกับ<br>ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน.....                                  | 67 |
| 4.10.2                              | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัด<br>กับเปอร์เซ็นต์เนื้อดิน.....  | 69 |
| 4.10.3                              | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัด<br>กับค่า Log K <sub>ow</sub> ของสารเอ็นโดซัลแฟน.....                     | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.10. ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับ<br>ค่าการละลายของสารในน้ำ.....            | 73  |
| 4.11 การศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลิเมอร์ในการกำจัดสาร<br>เอ็นโดซัลเฟนจากดินปนเปื้อน..... | 75  |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....  | 78  |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....   | 78  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 79  |
| รายการอ้างอิง.....  | 80  |
| ภาคผนวก.....  | 88  |
| ภาคผนวก ก.....  | 89  |
| ภาคผนวก ข.....  | 93  |
| ภาคผนวก ค.....  | 94  |
| ภาคผนวก ง.....  | 95  |
| ภาคผนวก จ.....  | 96  |
| ภาคผนวก ฉ.....  | 97  |
| ภาคผนวก ช.....  | 98  |
| ภาคผนวก ซ.....  | 99  |
| ภาคผนวก ฌ.....  | 102 |
| ภาคผนวก ญ.....  | 105 |
| ภาคผนวก ณ.....  | 106 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 107 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1   |      |
| สูตรโครงสร้างและสมบัติบางประการของสารเอ็น โคซัลแฟนแอลฟา<br>เอ็น โคซัลแฟนเบตาและ เอ็น โคซัลแฟนซัลเฟต.....                 | 7    |
| ตารางที่ 3.1   | 30   |
| สมบัติและอัตราส่วนในการสังเคราะห์สารนาโน โพลีเมอร์.....  |      |
| ตารางที่ 3.2   | 35   |
| สมบัติคินที่วิเคราะห์.....   |      |
| ตารางที่ 4.1   | 50   |
| ขนาดของสารนาโน โพลีเมอร์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ 3 ครั้ง.....   |      |
| ตารางที่ 4.2   |      |
| ชนิดและขนาดของสารนาโน โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์เพื่อใช้ศึกษาการกำจัด<br>สารมลพิษอินทรีย์ต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม.....           | 51   |
| ตารางที่ 4.3   | 52   |
| สมบัติของคินที่ใช้ทดสอบ.....   |      |
| ตารางที่ 4.4   | 53   |
| สมบัติของคินปนเปื้อน.....  |      |
| ตารางที่ 4.5   | 56   |
| ปริมาณสารเอ็น โคซัลแฟนในปนเปื้อน.....  |      |
| ตารางที่ 4.6   | 58   |
| ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารเอ็น โคซัลแฟน ทั้ง 3 ชนิด.....   |      |
| ตารางที่ 4.7   |      |
| การกลับคีนของสารเอ็น โคซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด หลังจากใส่ลงในสาร<br>นาโน โพลีเมอร์ 0.16 กรัม/ 16 มิลลิลิตร (10 กรัม/ลิตร)..... | 62   |

สารบัญรูป

| รูปที่     |   | หน้า |
|------------|---|------|
| รูปที่ 2.1 | กระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเอ็น โคซัลแฟนเมื่อลงสู่สิ่งแวดล้อม .....  | 10   |
| รูปที่ 2.2 | หนึ่งในเด็กหลายคน ในเมืองคราลา ประเทศอินเดียคนป่วยเป็นมะเร็ง<br>เนื่องมาจากอยู่อาศัยในพื้นที่ที่มีการใช้สารเคมี เอ็น โคซัลแฟน<br>เป็นระยะเวลาที่ยาวนานติดต่อกัน .....   | 14   |
| รูปที่ 2.3 | เด็กหญิงคนนี้พิการเพราะสารเคมีเอ็น โคซัลแฟน ยามาฮอยเซอร์รี่ของชวานา<br>ที่มารดาได้รับขณะตั้งครรภ์ .....   | 15   |
| รูปที่ 2.4 | เด็กคนนี้พิการและเสียชีวิตในเวลาไม่นาน เนื่องจากพิษของสารเคมี<br>เอ็น โคซัลแฟนที่มารดาได้รับขณะตั้งครรภ์ .....  | 15   |
| รูปที่ 2.5 | ขนาดของอนุภาคนาโน โพลีเมอร์ชนิดแอนไอออนิก โพลียูรีเทน ระหว่าง PMUA<br>และ โพลียูรีเทนอะคริเลตแอนไอออนเมอร์<br>(Polyurethane acrylate anionomer; UAA) .....              | 19   |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างของ PMUA ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์และการผสม<br>แบบร่างแหหรือตาข่าย .....   | 20   |
| รูปที่ 2.7 | ขนาดของสารลดแรงตึงผิวที่เป็นไมเซลล์กับขนาดอนุภาคนาโน โพลีเมอร์ .....  | 21   |
| รูปที่ 3.1 | รีแอกเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยขวดแก้วที่มีฝาปิดมี 3 คอ<br>ที่แช่ในอ่างน้ำร้อนชนิดควบคุมอุณหภูมิ .....   | 31   |
| รูปที่ 3.2 | การกวนสารโพลีเมอร์เพื่อให้เป็นขนาดระดับอนุภาคนาโน<br>ด้วยเครื่องกวนในอัตราเร็ว 2500 – 3000 รอบ/นาที .....   | 32   |
| รูปที่ 3.3 | รีแอกเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยขวดกันกลม 3 คอ สำหรับเชื่อมต่อกับ<br>ส่วนต่างๆ และแช่ภายในอ่างชิลิโคนเจลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ในขั้นตอน<br>การสังเคราะห์ ..... | 33   |
| รูปที่ 3.4 | สารนาโนโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์เสร็จสมบูรณ์แล้ว และสามารถนำไปใช้<br>ในการศึกษาการกำจัดสารเอ็น โคซัลแฟนในดินต่อไป .....  | 34   |
| รูปที่ 4.1 | ขนาดของอนุภาคนาโน โพลีเมอร์จากการตรวจวัดด้วย<br>distribution particles size analysis .....  | 46   |
| รูปที่ 4.2 | ปริมาณสารเอ็น โคซัลแฟนแอลฟา ในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออกจาก<br>คอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกไอออน ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที .....                           | 60   |

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.3 ปริมาณสารเอ็น โคซัลเฟนเบตาในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออก<br>จากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอูออน<br>ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที่.....     | 60   |
| รูปที่ 4.4 ปริมาณสารเอ็น โคซัลเฟนซัลเฟตในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออก<br>จากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอูออน<br>ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที่.....   | 60   |
| รูปที่ 4.5 ปริมาณสารโพลีเมอร์นาโน (กรัม) ในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออก<br>จากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอูออน<br>ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที่..... | 61   |
| รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำจัดสาร เอ็น โคซัลเฟนซัลเฟตกับระยะ<br>เวลาที่แซ่สารนาโนโพลีเมอร์ในคอลัมน์ดิน.....                                   | 63   |
| รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดสารเอ็นโคซัลเฟนกับความเข้มข้น<br>ของสารนาโนโพลีเมอร์.....   | 66   |
| รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโคซัลเฟนแอลฟา<br>กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน.....   | 68   |
| รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโคซัลเฟนเบตา<br>กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน.....  | 68   |
| รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโคซัลเฟนซัลเฟต<br>กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน.....   | 68   |
| รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกำจัด<br>สารเอ็นโคซัลเฟนแอลฟา.....   | 69   |
| รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกำจัด<br>สารเอ็นโคซัลเฟน เบตา.....   | 69   |
| รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกำจัด<br>สารเอ็นโคซัลเฟน ซัลเฟต.....   | 70   |
| รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่า Log $K_{ow}$ ของ<br>สารเอ็นโคซัลเฟน โดยพิจารณากับชนิดเนื้อดินเหนียว.....                           | 72   |



| รูปที่      |  | หน้า |
|-------------|--|------|
| รูปที่ 4.15 | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่าการละลายของสารในน้ำของสารเอ็นโดซัลเฟน โดยพิจารณากับชนิดเนื้อดินเหนียว..... | 74   |
| รูปที่ 4.16 | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนแอลฟา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน.....                   | 76   |
| รูปที่ 4.17 | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนเบตา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน.....                    | 76   |
| รูปที่ 4.18 | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนซัลเฟต กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน.....                  | 77   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำย่อ

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| APU       | = | Amphiphilic Polyurethane   |
| CEC       | = | Cation Exchange Capacity   |
| DMAc      | = | N,N-Dimethylacetamide  |
| FT-IR     | = | Fourier Transform Infrared spectrometer                              |
| GC-ECD    | = | Gas Chromatography -Electron Capture Detector                        |
| HEMA      | = | 2-hydroxyethyl methacrylate  |
| HPLC – UV | = | High Performance Liquid Chromatograph (HPLC) with UV-VIS<br>Detector |
| $K_{oc}$  | = | Soil organic carbon - water partition coefficient                    |
| $K_{ow}$  | = | Octanol – water partition coefficient                                |
| KPS       | = | Potassium persulfate   |
| $LC_{50}$ | = | Lethal Concentration   |
| $LD_{50}$ | = | Lethal Dose  |
| NCO       | = | Chemical symbol for the isocyanate reactive radical/group            |
| OCs       | = | Organochlorines  |
| PAHs      | = | Polycyclic Aromatic Hydrocarbons                                     |
| PEG       | = | Poly (ethylene glycol)   |
| PHEN      | = | Phenanthrene   |
| PMUA      | = | Poly (ethylene glycol) Modified Urethane Acrylate                    |
| POLE      | = | Polyoxyethylene  |
| ppm       | = | Part Per Million   |
| PTMG      | = | Poly(tetramethylene glycol)  |
| TDI       | = | 2,4-toluene diisocyanate   |
| UAA       | = | Urethane Acrylate Anionomer,   |
| UAN       | = | Urethane Acrylate Nonionomer,  |
| ULV       | = | Ultra Low Volume   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เอ็นโดซัลแฟน (Endosulfans) เป็นสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine insecticides, OCs) มีส่วนผสมระหว่างไอโซเมอร์ 2 ชนิดหลัก คือ แอลฟา (Alpha) และเบตา (Beta) ในอัตรา 7:3 และ 1 อนุพันธ์ คือ เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต (Endosulfan sulfate) มีการใช้อย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันและกำจัดแมลงในผลผลิตทางการเกษตร เช่น ฝ้าย ชา อ้อย และผักชนิดต่าง ๆ เป็นต้น (Verma et al., 2005) สารดังกล่าวนอกจากจะมีพิษสูงต่อแมลงแล้วยังเป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือสัตว์ก่อให้เกิดการเจ็บป่วยและถึงแก่ชีวิตได้หากได้รับสารโดยตรงหรือสะสมในร่างกาย (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

ในประเทศไทยพบการตกค้างของสารพิษในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะสารฆ่าแมลงในพื้นที่ภาคเหนือ พบสารเอ็นโดซัลแฟนตกค้างมากที่สุดโดยในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02-86.45 ไมโครกรัม/ลิตร และในดินอยู่ระหว่าง 0.09-0.28 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และพบในดินบริเวณโรงงานสารกำจัดศัตรูพืช และพื้นที่นอกโรงงานในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบสารเอ็นโดซัลแฟนในดินปริมาณ 0.30-7.0 และ 0.26 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) การสะสมของสารฆ่าแมลงในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2539 พบทั้งในดินและในน้ำ เช่น ระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารเอ็นโดซัลแฟน ที่พบในน้ำและดินมีปริมาณ 1.35 ไมโครกรัม/ลิตร และ 634.90 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (Thapinta and Hudek, 2000) นอกจากนี้สารดังกล่าวยังมีความคงทนในดินอินทรีย์ (organic soil) สูงกว่าดินทั่วไป ดินอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการทำสวนผักมักมีสารฆ่าแมลงตกค้างอยู่มาก จึงพบในดินชนิดนี้ได้แทบทุกครั้งที่มีการใช้ในการเกษตร (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ซึ่งการสลายตัวของสารในดินมีระยะเวลาที่ต่างกัน เช่น เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต สลายตัวระยะ 2-3 สัปดาห์ (Kate, 2000) ดังนั้นเมื่อสารเหล่านี้ปนเปื้อนในดินหากยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงสภาพหรือสลายตัว ย่อมมีผลต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อาศัยในดิน เช่น ไส้เดือน มด ปลวก เป็นต้น เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นในลำดับห่วงโซ่อาหารต่อไป (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2543) ดังนั้นการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนจากดินจึงมีความสำคัญในการป้องกันการแพร่ของสารสู่สิ่งแวดล้อมและสู่มนุษย์ในที่สุดได้

การกำจัดดินที่ปนเปื้อนสารมลพิษอินทรีย์ มีแนวทางกำจัดหลายรูปแบบ โดยเน้นปัจจัยทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ของดินและวัสดุที่ใช้กำจัด เช่น กระบวนการดูดซับ (adsorption) ของดินหรือตัวดูดซับ, ความเป็นกรด – ด่างของดิน สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) และการชะละลาย (leaching) การสลายตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) การสลายตัวด้วยแสง (photolysis) และการสลายตัวทางชีวภาพ ได้แก่ จุลินทรีย์ต่าง ๆ (biodegradation) เป็นต้น (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) แต่วิธีการที่กล่าวมามีเงื่อนไขหรือข้อจำกัด อยู่หลายประการ อาทิ การกำจัดสารมลพิษอินทรีย์โดยวิธีทางชีววิทยา มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย หรือประสิทธิภาพจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารได้ขึ้นอยู่กับสภาพที่มีอากาศ หรือไร้อากาศเท่านั้น (Ghadiri and Rose, 2001) หรือการใช้วัสดุตามธรรมชาติ เพื่อดูดซับสารมลพิษในดิน ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างและขนาดโมเลกุล และความสามารถในการดูดซับไว้ ที่ไม่แน่นอนจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดลงได้ (กานูวัฒน์ ไกรจิตเมตต์, 2547)

การใช้อนุภาคนาโนโพลิเมอร์ (Polymeric nanoparticles) เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถกำจัดสารพิษปนเปื้อนจากดินได้ เช่น การสังเคราะห์นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน (Amphiphilic polyurethane, APU) เพื่อนำมาดูดซับสารฟิแนนทริน (Phenanthrene, PHEN) ปนเปื้อนในดิน (Tungittiplakorn et al., 2005) ซึ่งสมบัติของอนุภาคนาโนโพลิเมอร์ เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์มีอนุภาคขนาดเล็ก และไม่เปลี่ยนรูปโครงสร้าง สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์เป็นพิษต่าง ๆ ที่ไม่ละลายในน้ำและสารพิษดังกล่าวในอนุภาคนาโนสามารถกำจัดให้สะดวกยิ่งขึ้น โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพและนำอนุภาคนาโนกลับมาใช้ได้ใหม่โดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Tungittiplakorn et al., 2004) การศึกษานี้จึงทดสอบกับสารมลพิษอื่นที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารฟิแนนทริน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟนในดินกับระยะเวลาในการกำจัดสาร

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟีฟิสิกโพลียูรีเทนกับสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินกับอัตราการกำจัดสาร

## 1.3 สมมุติฐาน

นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟีฟิสิกโพลียูรีเทน สามารถดูดซับสารเอ็นโดซัลแฟนในดินได้

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

เป็นการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.4.1 ดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินที่มีค่าคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon content) ระดับต่างๆ กัน

1.4.2 สมบัติดินที่ศึกษา คือ เนื้อดิน (soil texture) พีเอช (pH) และความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC)

1.4.3 นาโนโพลิเมอร์ที่ใช้ศึกษา คือ แอมฟีฟิสิกโพลียูรีเทน

1.4.4 สารที่ศึกษาคือ สารเอ็นโดซัลแฟน ได้แก่ เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา, เอ็นโดซัลแฟนเบตา และเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต

1.4.5 การวิเคราะห์หาปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟน โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี ใช้ส่วนตรวจวัดอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Gas chromatography - electron capture detector, GC-ECD)



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถนำสารชนิดใหม่คือแอมฟีฟิลิก โพลียูริเทนมากำจัดสารมลพิษอินทรีย์ในดินได้
- 1.5.2 ได้ข้อมูลพื้นฐานเพื่อปรับหรือใช้ในการพัฒนาวิธีการกำจัดสารต่อไปได้
- 1.5.3 เป็นแนวทางลดผลกระทบที่เกิดจากการปนเปื้อนสารมลพิษอินทรีย์อื่น ๆ ในดินได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 สารเอ็นโดซัลแฟน

สารเอ็นโดซัลแฟน เป็นวัตถุมีพิษทางการเกษตร มีสมบัติในการกำจัดแมลงศัตรูพืชได้หลายชนิด นิยมใช้ในพืชไร่ พืชสวน และไม้ดอก ไม้ประดับ โดยเฉพาะ ไร้ฝ้าย แมลงพวกหนอน เพลี้ยบางชนิดเมื่อถูกพิษต้องตัวจะตายโดยทันที (contact poison) และยังสามารถซึมเข้าสู่ผิวหนังหรือเนื้อเยื่อได้ดีเป็นพิเศษ มีความเป็นพิษกับสัตว์เลือดเย็นสูงมาก เช่น ปลา และสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ โดยรวมแล้วสารเอ็นโดซัลแฟนจะส่งผลร้ายแรงต่อสัตว์ทุกชนิดทั้งนี้รวมถึงนกและสัตว์ปีกชนิดต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน (กองกัญและสัตววิทยา, 2541) ในประเทศแถบทวีปยุโรป ได้ประกาศห้ามใช้สารกลุ่มนี้มากกว่า 30 ปี เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำสาธารณะ นอกจากนี้สารดังกล่าวยังแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างกว้างขวาง โดยมีการตรวจพบในหลายแห่ง เช่น ในบรรยากาศ ดิน ดินตะกอน และแหล่งน้ำ เป็นต้น (Schulz, 2004)

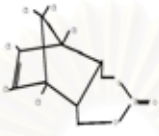
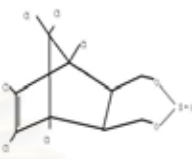

สารเอ็นโดซัลแฟน คือชื่อสามัญของสารอินทรีย์เคมีชนิดหนึ่ง เป็นสารฆ่าแมลงที่จัดอยู่ในกลุ่มสารออร์กาโนคลอรีน (organochlorine insecticides) หรือ คลอรีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) โดยมีอนุพันธ์ของคลอรีน (Cl) เป็นองค์ประกอบ (Metalf, 1974) มีจำหน่ายในรูปชนิดที่เป็นน้ำ ชนิดที่ละลายน้ำได้ เช่น ฝุ่น เม็ด เป็นต้น ชนิด ULV (Ultra Low Volume) และชนิดควัน (smoke types) นอกจากนี้ยังสามารถที่จะผสมกับสารชนิดอื่นได้หลายชนิด เช่น ไดเมทโทเอท (dimethoate) มาลาไธออน (malathion) ไทเรียโซฟอส (triazophos) ฟีนอพรอพ (fenoprop) พาราไธออน (parathion) พีโตรเลียมออยล์ (petroleum oils) และออกซินคอปเปอร์ (oxine copper) (ศักดิ์ ศรีนิเวศน์, 2547)

ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายมีส่วนผสมของไอโซเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ แอลฟา (alpha) และเบตา (beta) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่ามีความเป็นพิษต่อปลาสูงมาก การใช้จึงต้องระวังไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ จากการศึกษพบว่า เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา จะสลายตัวได้เร็วกว่า เอ็นโดซัลแฟนเบตา (Rao et. al, 1980) และเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ยังมีค่าความเป็นพิษสูงกว่า เอ็นโดซัลแฟนเบตาด้วย (Barnes and Ware, 1965 ; Devi et al, 1981 ; Barry et al, 1995) ภายหลังจากพ่นลงน้ำ จะเป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำต่าง ๆ มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์น้ำ และสภาพแวดล้อมหรือภูมิอากาศของพื้นที่ (Tayaputch et al., 1991) โดยทั่วไปความเป็นพิษของสารที่มีต่อปลา มีค่า  $LC_{50}$  ระหว่าง 1 – 10 ไมโครกรัม/ลิตร (ESCAP/EC, 1994 and IAEA – TECDOC – 695, 1991)

### 2.1.1 สมบัติของสาร

สารเอ็นโดซัลแฟน มีสูตรโครงสร้าง คือ  $C_9H_6Cl_6O_3S$  ชื่อทางเคมี คือ 1,4,5,6,7,7 - hexachloro - 8,9,10 - trinoborn - 5 - en - 2,3 ylenebisethylene sulfite หรือ 6,7,8,9,10,10 - hexachloro - 1,5,5a,6,9,9a - hexahydro - 6,9 - methano - 2,3,4 - benzo (e) dioxathiepin - 3 - oxide อยู่ในกลุ่ม sulfurous ester of chlorinated cyclic diol หรือ cyclic sulfite ester (WHO, 1986) มีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสี หรือเป็นของเหลวเข้มข้นแต่ที่มีจำหน่ายอยู่ทั่วไปจะมีสีครีมจนถึงสีน้ำตาล กลิ่นคล้ายน้ำมันสน ประกอบด้วย ไอโซเมอร์ (isomer) 2 รูปแบบ คือ แอลฟา (alpha;  $\alpha$ ) และเบตา (beta;  $\beta$ ) ผสมกันในอัตราส่วนตั้งแต่ 4 : 1 (Melnikov et al., 1995) หรือ 2 : 1 และ 7 : 3 (Herrmann, 2004) นอกจากนี้ เอ็นโดซัลแฟนยังมีอนุพันธ์ คือ เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต มีความเข้มข้นบริสุทธิ์ 94 % - 96 % มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย โดยต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สลายตัวเมื่อถูกกับน้ำ (hydrolysis) ละลายได้เร็วด้วยกรดหรือด่าง และในตัวทำละลาย (solvent) มีความคงทนต่อแสงแดด ไม่ทนความร้อน มีฤทธิ์ไม่แน่นอนในสภาพที่ผสมกับน้ำที่เป็นกรด - ด่าง มีฤทธิ์ตกค้างได้นาน ซึ่งสมบัติด้านกายภาพและทางเคมีได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างและสมบัติบางประการของสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา เอ็นโดซัลแฟนเบตา และเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต

| สมบัติ                   | เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา   | เอ็นโดซัลแฟนเบตา   | เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต  |
|--------------------------|---|--|---|
| สูตรโครงสร้าง            |  |  |  |
| สูตรโมเลกุล              | $C_9H_6Cl_6O_3S$  | $C_9H_6Cl_6O_3S$   | $C_9H_6Cl_6O_4S$  |
| น้ำหนักโมเลกุล           | 406.93  | 406.93   | 422.9   |
| สี                       | ไม่มีสี   | สีครีม   | น้ำตาล  |
| ลักษณะกายภาพ             | ผลึก  | ผลึก   | ผลึก  |
| จุดหลอมเหลว              | 108 – 110 °C  | 198 – 201 °C   | 207 – 209 °C  |
| ความหนาแน่น ที่ 20 °C    | 1.735 g/cm <sup>3</sup>   | -  | -   |
| การละลาย                 |   |  |   |
| : ในน้ำ ที่ 25 °C        | 0.53 mg/L   | 0.28 mg/L  | 0.22 mg/L   |
| : ในตัวทำละลาย ที่ 20 °C |   |  |   |
| - เฮกเซน                 | 24 g/L  | ละลายได้   | ไม่มีข้อมูล   |
| - อะซิโตน                | 200 g/L   | ละลายได้   | ไม่มีข้อมูล   |

ที่มา: (ATSDR, 2000)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) สูตรโครงสร้างและสมบัติบางประการของสารเอ็นโคซัลเฟนแอลฟา เอ็นโคซัลเฟนเบตา และเอ็นโคซัลเฟนซัลเฟต

| คุณสมบัติ                                     | เอ็นโคซัลเฟนแอลฟา                                    | เอ็นโคซัลเฟนเบตา  | เอ็นโคซัลเฟนซัลเฟต                                      |
|---|--|---|---|
| ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (partition coefficient) |  |   |   |
| Log K <sub>ow</sub>                           | 3.83   | 3.52  | 3.66  |
| Log K <sub>oc</sub>                           | 3.55   | 3.46  | -   |
| ความดันไอ ที่ 25°C                            | 1 × 10 <sup>-5</sup> mmHg                            | 1 × 10 <sup>-5</sup> mmHg                               | 1 × 10 <sup>-5</sup> mmHg                               |
| ค่ากฎของ เฮนรี่ ที่ 24°C                      | 1 × 10 <sup>-5</sup> mmHg<br>atm m <sup>3</sup> /mol | 1.91 × 10 <sup>-5</sup> mmHg<br>atm m <sup>3</sup> /mol | 2.61 × 10 <sup>-5</sup> mmHg<br>atm m <sup>3</sup> /mol |

ที่มา: ATSDR, (2000)

ค่าครึ่งชีวิต (half - life) ของสารเอ็นโคซัลเฟนแอลฟา และเอ็นโคซัลเฟนเบตา สามารถสลายตัวได้ครึ่งหนึ่งในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ใช้เวลาประมาณ 27 – 30 วัน และ 100 – 370 วัน ตามลำดับ ในดินที่มีสภาพเป็นกลาง มีความชื้นดิน 15 % ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส การสลายตัว โดยใช้เวลาประมาณ 60 – 800 วัน หรือมากกว่านั้น (Martens, 1976; Chopra and Mahfouz, 1977; Katayama and Matsumura, 1993; PANAP, 1996; Ghadiri and Rose, 2001) สารเอ็นโคซัลเฟน ทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าวสามารถคงสภาพได้นานเมื่อตกค้างหรือถูกดูดซับอยู่ในดินและดินตะกอน (Van Dyk and Van dar Linde, 1976; Rao and Murty, 1980) โดยรวมแล้วการตกค้างของสารเอ็นโคซัลเฟนในสิ่งแวดล้อม จะใช้เวลาสลายตัวที่ต่างกันตามลักษณะและสภาพของสิ่งแวดล้อมนั้น เช่น เมื่อตกค้างบนใบพืช จะใช้เวลาสลายตัวประมาณ 1.6 วัน และในดินจะสลายตัวประมาณ 7.1 วัน เป็นต้น นอกจากนี้สารดังกล่าวยังสามารถเปลี่ยนเป็นไอโซเมอร์หรือสารอนุพันธ์ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ 1-5 วัน หลังจากที่มีการใช้สาร (Kennedy et al., 2001) แต่ไม่สามารถบ่งชี้ได้ชัดว่าสารเอ็นโคซัลเฟนจะเปลี่ยนเป็นไอโซเมอร์ชนิด แอลฟา เบตา หรือซัลเฟต ได้เร็วหรือช้ากว่าเท่าใด



การสลายตัวของสารเอ็นโดซัลแฟนในดินและดินตะกอนยังมีความแตกต่างกัน โดย Martens (1977) ได้ศึกษาในตัวอย่างดินจากพื้นที่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำพบว่าสารเอ็นโดซัลแฟนมีการเปลี่ยนรูปเป็นเอ็นโดซัลแฟนไดออล (endosulfan diol) และอัตราการเปลี่ยนแปลงจะต่ำกว่าเมื่อน้ำลดจนดินแห้ง ซึ่งเอ็นโดซัลแฟนจะเปลี่ยนเป็นเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟตอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ อาจเกิดจากกระบวนการทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการเกิดแบบแอโรบิก (aerobic condition)

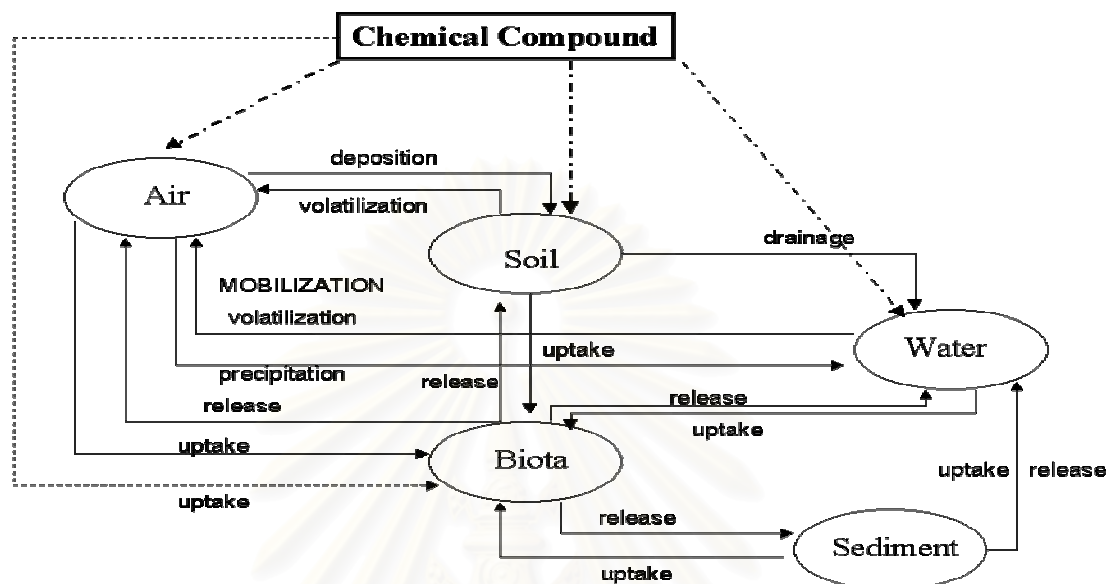
การละลายหรือสลายตัวในน้ำ หรือที่เรียกว่า กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เนื่องจากสารเอ็นโดซัลแฟน ประกอบด้วยโมเลกุลสารอินทรีย์เป็นหลัก จึงมีลักษณะของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (non-polarity) สูง จึงทำให้สารมีการละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด - ด่าง และอุณหภูมิ ของน้ำด้วย โดยสารจะสลายตัวได้รวดเร็วในสภาพที่เป็นด่าง ที่อุณหภูมิสูง (Schwarzenbach et al., 1993) สารเอ็นโดซัลแฟนเมื่อละลายในน้ำที่สภาพเป็นกรดจะใช้เวลาสลายตัวได้น้อยกว่าสภาพด่าง (Miles and Moy, 1997; Peterson and Batley, 1993)

Ballschmitter และคณะ (1967) แสดงปฏิกิริยาการสลายของสารเอ็นโดซัลแฟนที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิส กระบวนการรีดักชัน ออกซิเดชัน โดยได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาของสารเอ็นโดซัลแฟน ในหนูเมาส์ (mouse) และหนูแรท (rat) ที่ได้รับสารและวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโตกราฟี ซึ่งพบว่า สารมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาในระดับโมเลกุลไปจากเดิม โดยเกิดเป็นกลุ่มสารชนิดใหม่เพิ่ม สามารถจำแนกได้ 5 ชนิด คือ ซัลเฟต (sulfate) ไดออล (diol) อีเทอร์ (ether) ไฮดรอกซีอีเทอร์ (hydroxyether) และ แลคโตน (lactone)

### 2.1.2 การแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม

สารเอ็นโดซัลแฟน สามารถแพร่กระจายสู่แหล่งสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศ ดิน น้ำ และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ โดยปัจจัยหลักที่ทำให้สารพิษแพร่กระจายนั้น มี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยทางเคมีของสาร เช่น สภาพละลาย (solubility) ความดันไอ (vapor pressure) สภาพไร้ขั้ว (non - polarity) สภาพละลายกรด - ด่าง เป็นต้น และปัจจัยทางกายภาพ เช่น การพัดพาจากลม การไหลบ่าของน้ำหรือการละลายของหน้าดิน การถ่ายทอดสารโดยผ่านทางโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตและสัตว์ เป็นต้น

สารเอ็นโดซัลแฟนเมื่อนำไปฉีดพ่นกับพืชจะตกลงและสะสมในดิน เกิดกระบวนการต่าง ๆ ทำให้สารนั้นคงสภาพหรือสลายตัวหรือเปลี่ยนรูปไป โดยมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเอ็นโดซัลแฟนในสิ่งแวดล้อม (www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23\_rep.htm, 2006)

จากการศึกษาปฏิกิริยาของสารเอ็นโดซัลแฟน โดย Beyers และคณะ (1965) แสดงให้เห็นว่า แอลฟา ค่อยกระจายอย่างช้า ๆ ลงสู่ดินมากกว่า เบตา จากนั้นจะถูกดูดซับอยู่ในดินเป็นเวลานาน ซึ่งผลการศึกษาพบว่าแอลฟา กระจายลงสู่ดินระยะการสลาย ประมาณ 60 วัน และเบตา ประมาณ 900 วัน ซึ่งจะใช้เวลานานกว่าแอลฟา (Steward and Cairns, 1974) นอกจากนี้ยังพบว่า สารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนทางเคมีของแอลฟาและเบตา ภายในดิน เวลาการสลายตัว ถ้าหากไม่ถูกชะภายในดินจะใช้เวลานานกว่าสารทั้ง 2 ชนิด (Steward and Cairns, 1974). และสารเอ็นโดซัลแฟนเมื่อปนอยู่ในดินแล้ว การสลายตัวจะชะงักหรือสลายช้ายิ่งขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงฤดูหนาว (Niagara Chemical Division, 1966; Stewart and Cairns, 1974)

การสำรวจพื้นที่การเกษตรที่มีการพ่นสารเอ็นโดซัลแฟนในพื้นที่ทางเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกา พบสารตกค้าง ต่ำกว่าที่ยอมรับให้มีได้เล็กน้อย คือ 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ยอมรับให้ได้ที่ 4.73 – 4.79 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Frank et al., 1976; Harris et al., 1977).

ในประเทศอิตาลีจากการศึกษาพบสารตกค้าง ระหว่าง 0.23 – 3.88 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Sanna et al., 1979) และพบการตกค้างของสารเอ็นโดซัลแฟน ในตะกอนดินบริเวณคลองระบายน้ำ แม่น้ำ และทะเลสาบ ปริมาณน้อยมาก จนถึง 0.64 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้ง (Miles and Harris, 1971; Niagara Chemical Division, 1971; Canada, National Research Council, 1975 ; Miles et al., 1971 ; Miles, 1976 )

ในประเทศไทย เมื่อปี 2537-38 ได้มีการตรวจวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารพิษตกค้างที่สะสมอยู่ในพื้นที่เกษตรและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแปลงอู่ พบสารพิษกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในดิน ปริมาณ 0.038 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ศิวาภรณ์ สกุกเที่ยงตรง และคณะ, 2545)

รายงานการศึกษาการสะสมสารเคมีในดินและน้ำบริเวณพื้นที่เกษตรที่สูงในภาคเหนือ ในปี 2537-38 ชนิดและปริมาณสารพิษตกค้างทั้งในดินและน้ำระหว่างปีไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีนพบปนเปื้อนในดินและน้ำเป็นส่วนใหญ่ ในตัวอย่างดินพบสารพิษตกค้างของ ดีดีที (DDT) อนุพันธ์ไดโคโฟล (dicofol) เอ็นโดซัลแฟน อนุพันธ์เฮปตาคลอร์ (heptachlor) เฮปตาคลอร์อีพอกไซด์ (heptachlor epoxide) อัลดริน (aldrin) และ ดิลดริน (dieldrin) พบการตกค้างของสาร ประมาณ 80 % (กองแผนงานและวิชาการ, 2540)

จากการศึกษาการปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดแมลงศัตรูพืช กลุ่มออร์กาโนคลอรีนในแม่น้ำสายหลัก 8 สายคือ เจ้าพระยา ท่าจีน แม่กลอง บางปะกงและป่าสักในภาคกลาง ห้วยน้ำอูน และแม่น้ำสงครามในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และลุ่มน้ำปากพนังในภาคใต้ ระหว่างปีพ.ศ. 2536-2542 เก็บตัวอย่างน้ำ 1,033 ตัวอย่างและตะกอน 765 ตัวอย่าง ได้ผลดังนี้ ในน้ำ พบสารพิษในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนใน 40.62 % ของตัวอย่างทั้งหมด ปริมาณระหว่าง 0.01-1.12 ไมโครกรัม/ลิตร ในดินตะกอน พบสารพิษในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนใน 46.46% ของตัวอย่างทั้งหมด ปริมาณระหว่าง 0.01-7.43 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ภิญญา จุลินทร และคณะ, 2545)

การศึกษาการปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟน ซึ่งจัดในกลุ่มวัตถุมีพิษทางการเกษตรชนิดร้ายแรงมาก เกษตรกรนิยมใช้กำจัดหอยเชอรี่ในนาหวนน้ำตามในเขตภาคกลาง ในแม่น้ำสายสำคัญในเขตภาคกลาง ที่มีการปลูกข้าวแบบนาหวนน้ำตามทั้ง 3 สายได้แก่ แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำบางปะกง แม่น้ำท่าจีนเก็บ 23 จุดที่จังหวัดสุพรรณและนครปฐม แม่น้ำเจ้าพระยาเก็บ 12 จุด บริเวณ จังหวัดปทุมธานีและนนทบุรี และแม่น้ำบางปะกง เก็บ 16 จุด ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยเก็บทุก 2 เดือนรวม 5 ครั้ง เริ่มเดือนมีนาคม 2542 ถึง กุมภาพันธ์ 2543 และเก็บทุก 3 เดือน รวม 4 ครั้ง เริ่มเดือนมกราคม 2544 ถึงเดือนตุลาคม 2544 ผลการตรวจวิเคราะห์

พบว่า แม่น้ำท่าจีนมีปริมาณสารพิษตกค้างสูงกว่าแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำบางปะกง ตามลำดับ ปริมาณสารพิษตกค้างในแม่น้ำท่าจีนพบ 0.04-0.79 ไมโครกรัม/ลิตร แม่น้ำเจ้าพระยาพบในปริมาณ 0.03-0.29 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนแม่น้ำบางปะกงพบในปริมาณ 0.01-0.24 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาณสารพิษตกค้างที่พบในแม่น้ำทั้ง 3 สาย ยังไม่เกินค่าความปลอดภัยที่จะเป็นอันตรายต่อปลาและสัตว์น้ำ (ปริษา ฉัตรสันติประภา และพูลสุข หฤทัยธนาสันต์, 2545)

การปนเปื้อนของวัตถุมีพิษที่อยู่ในรายการเฝ้าระวังในแม่น้ำสายหลักในภาคกลาง โดยสุ่มตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา 17 จุด แม่น้ำท่าจีน 14 จุด และแม่น้ำแม่กลอง 10 จุด จำนวน 3 ครั้งในปี 2546 ในแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณเขตจังหวัดอยุธยา อ่างทอง สิงห์บุรีและชัยนาท พบสารตกค้าง สารเอ็นโดซัลแฟน ระหว่าง 0.01-0.08 ไมโครกรัม/ลิตร (กรมวิชาการเกษตร, 2547)จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างจำนวน 59 ตัวอย่าง ในช่วงฤดูแล้งปี 2544 พบการปนเปื้อนคิดเป็น 71.2 % ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด โดยพบสารป้องกันและกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนได้แก่ สารเอ็นโดซัลแฟนและเมตาโบไลต์ ในปริมาณ 0.01-3.3 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนในช่วงฤดูฝนปี 2544 ได้เก็บตัวอย่างจากน้ำใต้ดินจำนวน 54 ตัวอย่าง พบการปนเปื้อนคิดเป็น 13 % ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด พบสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ชนิดที่พบได้แก่ คลอเดน ดีดีทีและเมตาโบไลต์ และเอ็นโดซัลแฟนและเมตาโบไลต์ ในปริมาณ 0.01-0.1 ไมโครกรัม/ลิตร (ศิวาภรณ์ สกุลเที่ยงตรง และคณะ, 2545)

### 2.1.3 ความเป็นพิษของสาร

สารเอ็นโดซัลแฟน จัดอยู่ในประเภท ระดับพิษปานกลาง(The World Health Organization; WHO, 2002) โดยที่จะมีค่า LD<sub>50</sub> ทางผิวหนัง ทางปาก และทางการหายใจ เท่ากัน ส่วนองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม หรือ The U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA, 2002) จัดให้สารเอ็นโดซัลแฟนมีความเป็นพิษในระดับ Ib หรือเทียบได้กับประเภท ระดับพิษสูง มีผลต่ออวัยวะในร่างกาย ซึ่งสารสามารถจะซึมผ่านและสะสมในอวัยวะต่าง ๆ ได้ เช่น ในกระเพาะอาหาร ปอด และสัมผัสโดยผิวหนัง (ATSDR, 1993) กล่าวคือ สารสามารถจะซึมผ่านอวัยวะเกือบทุกส่วนได้หากได้รับหรือสัมผัสโดยทันที

### 2.1.3.1 พิษเฉียบพลัน (acute toxicity)

สารเอ็นโดซัลแฟน มีพิษสูงโดยการกินเข้าไป ค่า LD<sub>50</sub> ปริมาณ 18 – 160 มิลลิกรัม ในหนูขนาดเล็ก 7.36 มิลลิกรัม ในหนูขนาดใหญ่ และ 77 มิลลิกรัม ในสุนัขรับพิษโดยการซึมผ่านผิวหนังสูง โดยมีค่า LD<sub>50</sub> สำหรับหนูเล็ก ปริมาณ 78 – 359 มิลลิกรัม รับพิษจากการสูดหายใจเข้าไประดับต่ำ (ESCAP/EC, 1994) เมื่อสารเอ็นโดซัลแฟนเข้าสู่ร่างกาย จะออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Meister, 1994) ทำให้หายใจลำบาก สูญเสียการทรงตัว ขากรรไกรแข็ง อาเจียน ท้องร่วง กระวนกระวาย มีอาการสั่นชักกระตุก และหมดสติในที่สุด (IPCS, 1988) มีรายงานว่าในสัตว์ เช่น วัว แกะ และหมู ที่กินหญ้าที่ฉีดพ่นสารเอ็นโดซัลแฟนเข้าไปมีอาการตาบอดและกล้ามเนื้อสั่นกระตุก (U.S. Department of Health and Human Services, 1990)

### 2.1.3.2 พิษเรื้อรัง (chronic toxicity)

ในหนูทดลองที่ให้กินสารเอ็นโดซัลแฟนในอัตรา 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน ติดต่อกัน 15 วัน มีอัตราการตายสูง แต่ถ้ากินในอัตรา 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน ในระยะเวลาที่เท่าเดิมจะมีสาเหตุทำให้ตับโตผิดปกติ มีอาการเจ็บป่วย การเจริญเติบโต และการรอดชีวิตลดลง ใตทำงานผิดปกติ คุณสมบัติทางเคมีของเลือดเปลี่ยนไป (Meister, 1994)

### 2.1.3.3 พิษต่อการสืบพันธุ์และแพร่ขยายพันธุ์ (reproductive effects)

สารเอ็นโดซัลแฟนที่มีการใช้เพิ่มขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบการสืบพันธุ์ในเพศผู้ได้ (Murray et al., 2001; Sharpe, 2001) จากรายงานการศึกษาในระบบการสืบพันธุ์และการแพร่ขยายพันธุ์ โดยควบคุมชนิด อายุ ของหนู (mice) ทดลองเพศผู้ ซึ่งให้กินสารเอ็นโดซัลแฟน ในอัตรา 7.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน เป็นเวลา 13 สัปดาห์ หรือ ในอัตรา 2.5 – 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน เป็นเวลา 2 ปี (National Cancer Institute; NCI, 1978; Hack et al., 1995) ผลการศึกษาพบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นความผิดปกติในการขยายพันธุ์ใน 3 ชั่วอายุ (generation) แต่เมื่อให้กินในปริมาณ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน จะส่งผลกระทบต่ออัตราการรอดชีวิตของลูกหนูลดลง (U.S. Department of Health and Human Services, 1990; ATSDR, 1993) ในหนูเพศเมียที่กินสารเอ็นโดซัลแฟน ในปริมาณ 0.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน ติดต่อกันในระยะ 78 สัปดาห์ จะมีผลต่อต่อมและอวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการสืบพันธุ์ (reproductive organs) ส่วนในหนูเพศผู้เต็มวัย (adult rat) ที่กินสารเอ็นโดซัลแฟน ในอัตรา 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน ในระยะเวลา 5 วัน ติดต่อกัน 10 สัปดาห์ จะมีผล



ทำให้ท่อนสุจิและลูกอ๊อดมีขนาดเล็กลง (Sinha et al., 1995; Khan and Sinha, 1996) ในมนุษย์ยังไม่ทราบว่าได้รับผลเท่าใด จึงจะเกิดผลหรืออาการเช่นเดียวกับหนูทดลองและคาดหวังว่าผลที่เกิดขึ้นกับคนจะเป็นเช่นเดียวกับหนูทดลอง

#### 2.1.3.4 พิษต่อการพัฒนาการของทารกในครรภ์ (teratogenic effects)

การทดลองในหนู โดยให้สารเอ็นโดซัลแฟนในปริมาณ 2.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน ไม่มีผลต่อลูกที่เกิดขึ้นในช่วง 3 ชั่วโมง แต่ถ้ากินในปริมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน จะส่งผลให้ลูกที่เกิดมามีความผิดปกติทำให้พิการ การพัฒนาการเจริญเติบโตทางกระดูกผิดปกติ (U.S. Department of Health and Human Services, 1990) ผลที่เกิดกับมนุษย์จากการได้รับสาร จะมีลักษณะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 – รูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.2** หนึ่งในเด็กหลายคน ในเมืองคราลา ประเทศอินเดียคนป่วยเป็นมะเร็ง เนื่องจากอยู่อาศัยในพื้นที่ที่มีการใช้สารเคมี เอ็นโดซัลแฟน เป็นระยะเวลาที่ยาวนานติดต่อกัน  
ที่มา: What's your poison?. Environment Justice Foundation ([www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23\\_rep.htm](http://www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23_rep.htm), 2000)





**รูปที่ 2.3** เด็กหญิงคนนี้พิการเพราะสารเคมีเอ็นโดซัลแฟน ยามาฮอยเซอริ่งของชาวนา ที่มารดาได้รับขณะตั้งครรภ์

ที่มา: What's your poison?. Environment Justice Foundation ([www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23\\_rep.htm](http://www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23_rep.htm), 2000)



**รูปที่ 2.4** เด็กคนนี้พิการและเสียชีวิตในเวลาไม่นาน เนื่องจากพิษของสารเคมีเอ็นโดซัลแฟน ที่มารดาได้รับขณะตั้งครรภ์

ที่มา: What's your poison?. Environment Justice Foundation ([www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23\\_rep.htm](http://www.chem.unep.ch/.../ws234/ws23_rep.htm), 2000)

### 2.1.3.5 พิษที่ก่อให้เกิดการผ่าเหล่า (mutagenic effects)

สารเอ็นโดซัลแฟนก่อให้เกิดการผ่าเหล่าในเซลล์ของแบคทีเรีย และยีสต์ ในขบวนการทำปฏิกิริยาของสารเอ็นโดซัลแฟน (Yadav et al., 1982) ก่อให้เกิดความผิดปกติในผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการผ่าเหล่าของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสองชนิดที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้อาจเกิดกับมนุษย์ได้ หากได้รับสารในปริมาณที่มาก

### 2.1.3.6 พิษที่ก่อให้เกิดเซลล์มะเร็ง (carcinogenic effects)

จากการศึกษาเป็นระยะเวลาในหนูขนาดใหญ่และเล็ก เพศเมียพบว่า แม้จะให้สารเอ็นโดซัลแฟนปริมาณ 23 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน เป็นระยะเวลาถึง 78 สัปดาห์ หรือนานกว่านั้น ไม่พบว่ามีผลต่อการเกิดเนื้องอกหรือเซลล์มะเร็งแต่ประการใด แต่มีผลต่อสมบัติทางเคมีของเลือด เป็นสาเหตุของโรคมะเร็งในเม็ดเลือด (leukemia) (Innes et al., 1969)

### 2.1.3.7 พิษที่เกิดกับต่อมหรืออวัยวะต่างๆ (organ toxicity)

จากการศึกษาพบว่า สารเอ็นโดซัลแฟนมีพิษต่อต่อมหรืออวัยวะต่างๆ ของสัตว์ทดลองแน่นอน เช่น ตับ เลือด และต่อมพาราไทรอยด์ (parathyroid) (Butler, 1963 ; Kahlon et al., 1981 ; Srivastava and Misra, 1981)

สารเอ็นโดซัลแฟน มีพิษร้ายแรง ในหลายประเทศมีการเลิกใช้แล้ว เช่น เดนมาร์ก เยอรมัน เนเธอร์แลนด์ สวีเดน สิงคโปร์ และในหลายประเทศจำกัดการใช้อย่างเข้มงวด ในช่วงปี ค.ศ.1999 – 2000 ประเทศแถบแอฟริกา มีการนำเข้าและใช้มากเพื่อกำจัดหนอนสมอฝ้าย (American boll worm) ซึ่งเป็นศัตรูพืชที่สร้างความเสียหายให้แก่ฝ้ายเป็นอย่างมาก โดยใช้แทนสารกลุ่มไพรีทรอยด์ ซึ่งแต่เดิมสารกลุ่มนี้เคยใช้ดีผลดี แต่เนื่องจากแมลงศัตรูพืชได้สร้างความต้านทานต่อยาที่ใช้ จึงหันมาใช้สารเอ็นโดซัลแฟนแทนกลุ่มดังกล่าวเป็นต้นมา เมื่อปี ค.ศ. 1980 รัฐบาลบราซิล ได้รับรายงานข่าวว่าทางตอนเหนือของเมืองบอร์กอน ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกฝ้าย ประมาณ 50 % ของพื้นที่ในเมืองบราซิล มีการระบาดของศัตรูพืชมากอยู่ช่วงระหว่าง เดือนสิงหาคม – เดือนกันยายน ค.ศ. 1999 พบว่าช่วงนี้มีเกษตรกรเสียชีวิต 37 คน ป่วยหนัก 36 คน หลังจากใช้สารเอ็นโดซัลแฟน กำจัดหนอนสมอฝ้ายจากการฉีดพ่น 2 ครั้ง ในช่วงเวลา 40 วัน (จิราพร ศรีพลากิจ, 2543 อ้างอิงจาก pesticides news, 2000)

## 2.2 อนุภาคนาโนโพลิเมอร์ (polymeric nanoparticles)

### 2.2.1 แหล่งที่มา

โพลิเมอร์ คือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำ ๆ กัน มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) หน่วยที่ซ้ำ ๆ กันนี้มีชื่อว่า โมโนเมอร์ (monomer) น้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์จะมีค่าสูงมาก เช่นอาจมีค่าตั้งแต่ 1,000 ขึ้นไป จนถึง 1,000,000 เป็นต้น โมเลกุลของโพลิเมอร์อาจเรียกว่าเป็น แมกโครโมเลกุล (macromolecules) (ชลธิชา นุ่มหอม, 2538)

โพลิเมอร์มีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์มานานแล้ว อย่างน้อยที่สุดประมาณหลายพันปีก่อนพุทธศักราช โพลิเมอร์อาจพบได้ในธรรมชาติหรืออาจสังเคราะห์ขึ้นมาก็ได้ ตัวอย่างสารในธรรมชาติที่เป็นโพลิเมอร์ ได้แก่ ฝ้าย ไม้ ขนแกะ ไหม ป่าน และปอ เป็นต้น ซึ่งโพลิเมอร์เหล่านี้นำมาใช้เป็นเครื่องนุ่งห่มและอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน โพลิเมอร์ อีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวันปัจจุบัน คือ ยาง พลาสติก และเส้นใยสังเคราะห์

### 2.2.2 การจำแนกชนิดโพลิเมอร์ตามแหล่งกำเนิด

โดยโพลิเมอร์ที่มีอยู่ทั่วไปสามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้ดังนี้ โพลิเมอร์อินทรีย์จากธรรมชาติ (natural organic polymers) โพลิเมอร์อนินทรีย์ (inorganic polymers) และโพลิเมอร์อินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic organic polymer)

### 2.2.3 นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology)

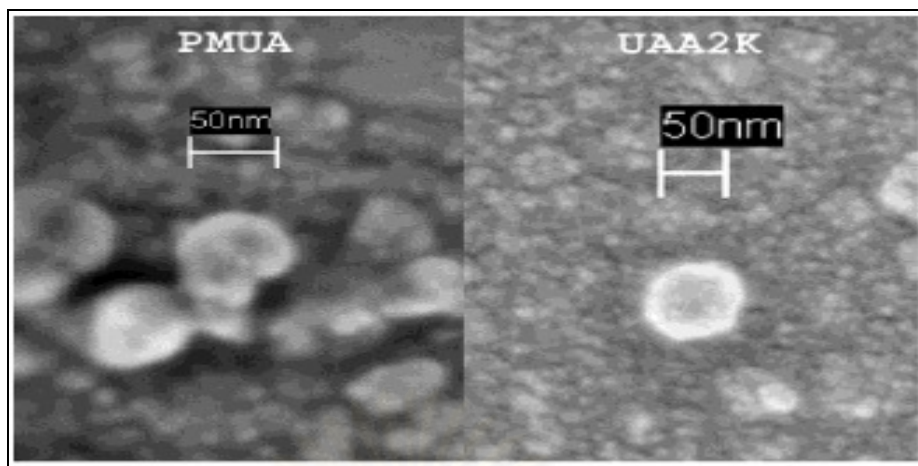
เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร(ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือในการสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ หรือเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

เป็นเทคโนโลยีแห่งอนาคตที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมระดับโลก ซึ่งคุณสมบัติของการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีระดับนาโนนั้นจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) สามารถจัดเรียงอะตอมได้ตรงตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้กำหนดสมบัติของวัตถุได้ตามที่เราต้องการ
- 2) เป็นการผลิตแบบ down-top คือผลิตจากหน่วยย่อยไปสู่หน่วยใหญ่ จากเดิมที่ผลิตแบบ top-down ซึ่งจะใช้ในการสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพื่อสร้างวัสดุที่ต้องการอีกชั้นหนึ่ง
- 3) สามารถออกแบบโครงสร้างเกือบทุกอย่างให้สอดคล้องกับกฎของฟิสิกส์ได้ถึงระดับโมเลกุล
- 4) ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าต้นทุนของวัตถุดิบและ
- 5) พลังงานที่ใช้ในการผลิตลดลง

(<http://www.nstda.or.th/html/ar-nanotech.html>, 2006)

อนุภาคนาโน ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถควบคุมให้ได้ขนาด รูปร่าง ตามที่ต้องการ มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีความจำเพาะต่อพื้นที่ผิวสูง (Biswas and Wu, 2005) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนนี้มีความน่าสนใจในสมบัติที่สามารถดูดซับสารมลพิษอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดินที่ตำแหน่งโมโนเลเยอร์ (monolayer) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำของนาโนโพลิเมอร์ ไอโซเทอมการดูดซับของอนุภาคนาโนโพลิเมอร์ คือการดูดติดที่ผิวระหว่างวัฏภาคของแข็ง (solid phase) – วัฏภาคของเหลว (liquid phase) อีกทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น โครงสร้างของโมเลกุล จำนวนโมล ของนาโนโพลิเมอร์ที่ถูกดูดซับ การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนโดยเฉพาะการสังเคราะห์นาโนโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบต่าง ๆ ผสมกัน เช่น อนุภาคนาโนชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน ซึ่งใช้สารประกอบด้วยโพลิเอทิลีนไกลคอลโพลิไธมอไดฟายด์ยูรีเทนอะคริเลตเชื่อมระหว่างโมเลกุล (Poly(ethylene glycol) modified urethane acrylate, PMUA) (Tungittiplakorn, 2004)

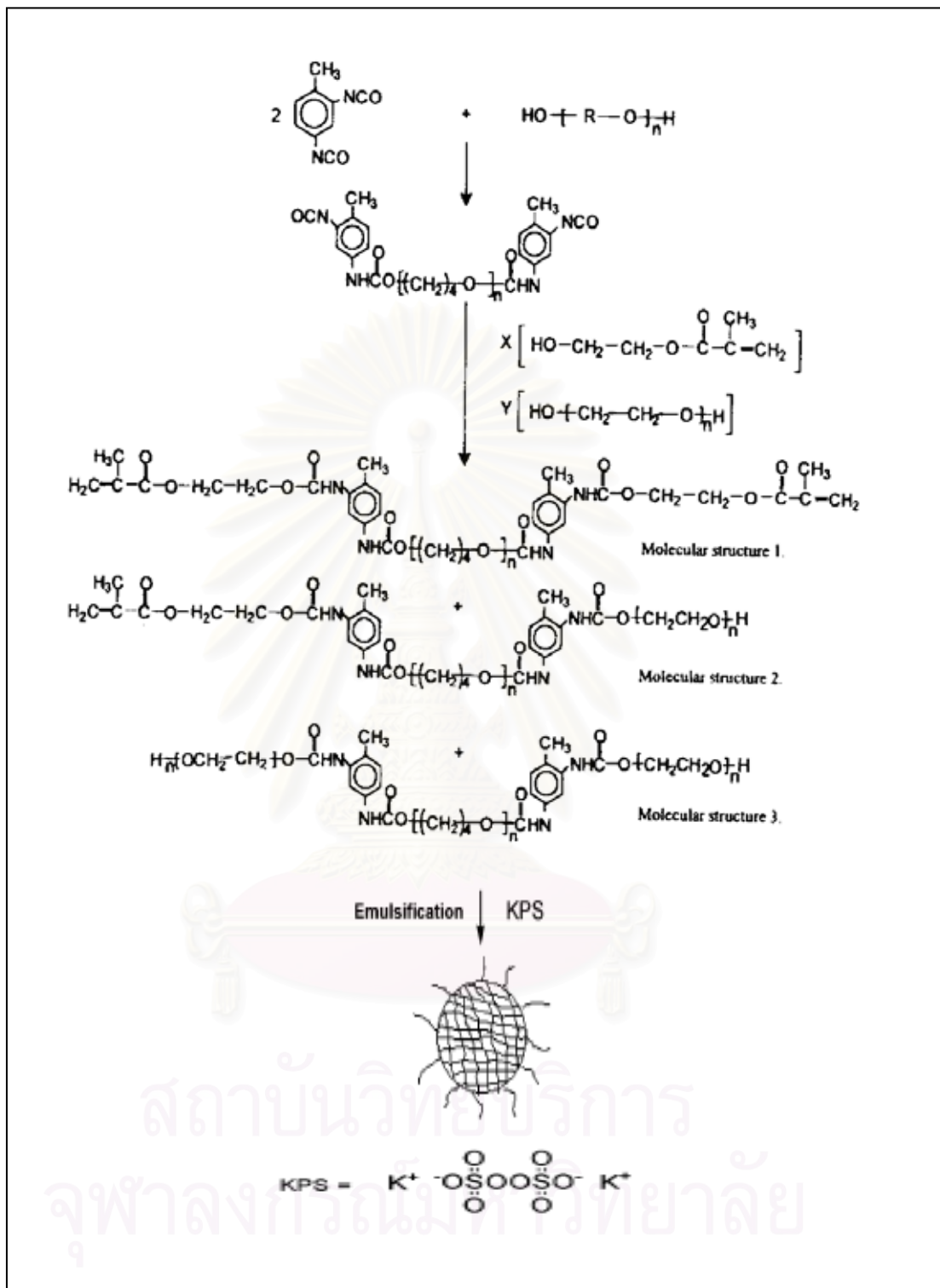


**รูปที่ 2.5** ขนาดอนุภาคนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน ระหว่าง PMUA และโพลียูรีเทนอะคริเลตแอนไอออนเมอร์ (Polyurethane acrylate anionomer, UAA) (Tungittiplakorn et al., 2004)

#### 2.2.4 สมบัติและโครงสร้างของนาโนโพลิเมอร์ ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน

สารโพลียูรีเทนมักจะเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของไดไอโซไซยานตกับไดออลเพื่อเตรียมโพลียูรีเทนแบบโซ่ตรงหรือโซ่กิ่ง ซึ่งสารไดไอโซไซยานตเป็นสารที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก (Kim and Suh, 1996) ในกระบวนการสังเคราะห์ PMUA มีขั้นตอนหลักอยู่ 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเชื่อมต่อโซ่กิ่งโดยใช้ปฏิกิริยาของไดไอโซไซยานต 2) กระบวนการสร้างเส้นใยจากโพลียูรีเทนโดยใช้ไดออลหรือโพลีออล ซึ่งสารโพลีออลที่ใช้เป็นโพลีเอทิลีนไกลคอล 3) ขั้นตอนการผสมโครงสร้างแบบตาข่าย เป็นขั้นสุดท้าย (Sperling, 2001) ซึ่งการสังเคราะห์เกิดโครงสร้างเมื่อครบขั้นตอนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สารแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนจะมีลักษณะเป็นเจลสีใส สีนํ้าตาลอ่อน ซึ่งเกิดจากโพลีเอทิลีนไกลคอล และยูรีเทนอะคริเลตหากจะนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป ต้องนำไปผ่านกระบวนการเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนอีกครั้งหนึ่ง

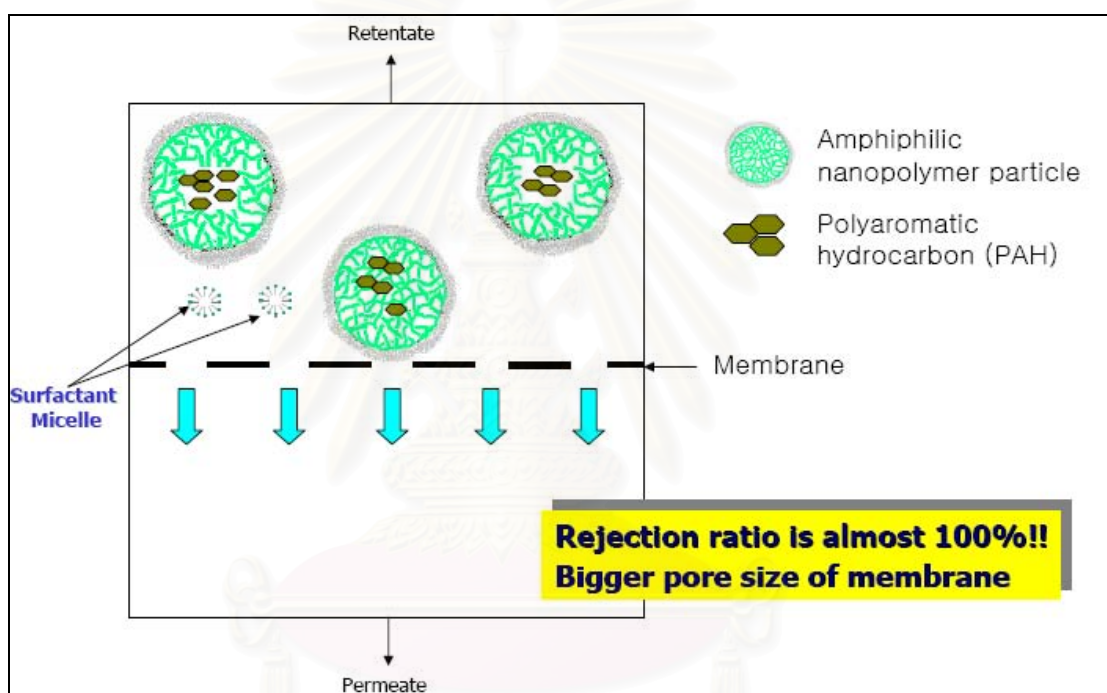
อนุภาคนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน เป็นสารที่ไม่มีขั้ว แต่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งโครงสร้างทั้ง 2 ส่วนจะรวมอยู่ด้วยกัน เรียกว่า สภาพแอมฟิพาติก (amphipatic) โดยเมื่อสารโพลิเมอร์นาโนชนิดนี้อยู่ในน้ำ จะเกิดในลักษณะแยกส่วนโดยส่วนที่ชอบน้ำจะยื่นออกมาสัมผัสกับน้ำ ในส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะอยู่ด้านในของโมเลกุล (Park et al, 1997 and Tungittiplakorn et al., 2004) ซึ่งส่วนนี้มีความสามารถในการดึงดูดกับสารประกอบอินทรีย์ชนิด ต่าง ๆ ได้ดี



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ PMUA ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์และการผสมแบบร่างแหหรือตาข่าย (ประยุกต์จาก Park et al, 1997 and Tungittiplakorn et al., 2004)



ลักษณะของอนุภาคนาโน โพลีเมอร์ เมื่อทำการผสมสาร โครงร่างแบบตาข่ายแล้วจะมีสถานะเสถียรไม่เปลี่ยนรูป เมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวทั่วไปที่อาจจะมีสมบัติคล้ายกันในส่วนที่เป็นสภาพการไม่มีขี้ หรือ สภาพแอมฟิพาติก แต่มีความต่างกันคืออนุภาคนาโนจะไม่เกิดเป็นไมเซลล์ (micell) ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวต้องอาศัยปริมาณ โมเลกุลสารมากพอสมควรเพื่อที่จะเกิดไมเซลล์ จึงจะสามารถเกิดสภาพแอมฟิพาติกได้ อีกทั้งสารลดแรงตึงผิวมีขนาดของอนุภาคที่เล็กมาก คือ ประมาณ 1-5 นาโนเมตร จึงถูกดูดซับหรือตกค้างในน้ำหรือดินมากกว่านาโนโพลีเมอร์เมื่อนำมาใช้ ซึ่งตรงกันข้ามกับอนุภาคนาโนจะไม่ถูกดูดซับและตกค้างน้อยมาก (Kim et al., 2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขนาดของสารลดแรงตึงผิวที่เป็นไมเซลล์กับขนาดอนุภาคนาโนโพลีเมอร์ (Kim et al., 2003)

## 2.2.5 การใช้อุณหภูมิในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

Karnchanasest และ Santisukkasaem (2007) ศึกษาการกำจัดสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) จากดินปนเปื้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง โพลีเมอร์ ซึ่งใช้อุณหภูมิชนิดแอมฟิฟิลิก โพลียูรีเทน ที่มีโพลีเอทิลีนไกลคอลมอร์ดิฟายด์ยูรีเทนอะคริเลต เป็นพรีเคอร์เซอร์ เช่น มากำจัดสารพีแนนทรินและเบนโซ (เอ) ไพรีน ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีการปนเปื้อนในดิน โดยประสิทธิภาพของอุณหภูมิสูงเพื่อกำจัดสารทั้ง 2 ชนิด จากดินที่ปนเปื้อนพบว่า การไหลของอุณหภูมิสูงให้หยุดชะงัก 24 ชั่วโมง ไว้ในคอลัมน์สามารถกำจัดสารออกได้ดีกว่า การไหลผ่านแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้สามารถกำจัดสารพีแนนทรินได้ 90 % และสารเบนโซ (เอ) ไพรีน 50 % ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ อัตราการไหลของอุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของทั้งสารนาโนโพลีเมอร์และสารพิษที่ศึกษา

Daura และคณะ (2005) ใช้สารลดแรงตึงผิว ชนิด Polyoxyethylene เพื่อกำจัดสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน จากดินในพื้นที่เกษตรกรรม โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวผสมแบบไม่มีประจุ 2 ชนิด คือ 1) POLE และ Polyoxyethylene 10 Cetyl ether 2) POLE และ Polyoxyethylene 10 Stearyl ether ทำการสกัดสารออร์กาโนคลอรีน 6 ชนิด ด้วย Microwave-assisted extraction และวิเคราะห์ด้วย HPLC-UV ศึกษาโดยดูผลของค่าคืนกลับของสาร (recovery) ในแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นและปริมาณของสารลดแรงตึงผิวกับสารออร์กาโนคลอรีน การทดลองใช้ตัวอย่างจากดินที่กำหนดความเข้มข้นสารออร์กาโนคลอรีน และตัวอย่างดินที่มีการปนเปื้อนในพื้นที่จริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสามารถในการกลับคืนมาของสารออร์กาโนคลอรีน หลังผ่านการกำจัดแล้วได้ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ต่ำกว่า 10% และความเข้มข้นต่ำสุดที่พบได้อยู่ที่ระหว่าง 80-800 นาโนกรัม/กรัม ดังนั้น วิธีการนี้จึงสามารถใช้ได้กับดินที่ปนเปื้อนและดินที่ตกค้างสารพิษเป็นเวลานานได้

Kim และคณะ (2003) สังเคราะห์ขนาดอนุภาคนาโนชนิดแอมฟิฟิลิก โพลียูรีเทน (APU) เพื่อศึกษาการดูดซับและการคายสารพีแนนทรินในวัสดุที่ปนเปื้อน (aquifer material) โดยสังเคราะห์จากการผสมนาโนโพลีเมอร์จากโพลียูรีเทนอะคริเลตนอนไอโอโนเมอร์ (Urethane acrylate nonionomer, UAN) และทดสอบความสามารถในการกำจัดสารพีแนนทริน ออกจากวัสดุที่ปนเปื้อน เมื่อนำสาร APU มาทดสอบปฏิกิริยาต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิว ชนิด Triton X-100 ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำ APU สามารถลดการดูดซับสารพีแนนทริน จากวัสดุดูดซับและสกัดสารออกจากวัสดุที่ปนเปื้อนได้มากกว่า ในขณะที่ Triton X-100 ต้องใช้

ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเพื่อจะสกัดสารออกจากวัสดุปนเปื้อน ดังที่กล่าวมาจะเห็นว่าทั้งการใช้อนุภาคนาโนแบบ APU และ Triton X-100 เป็นสารที่สามารถใช้ล้างดินที่ปนเปื้อนสารพิษได้ แต่ในการศึกษานี้การใช้อนุภาคนาโนแบบ APU มีประสิทธิภาพดูดซับและกำจัดสารพิษได้มากกว่าการใช้ Triton X-100

Kim และ Shim (2004) ประเมินศักยภาพของอนุภาคนาโนชนิด APU ที่สามารถสกัดสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่ปนเปื้อน จากการประเมินได้อัตราการกลับคืนของสารพีแนนทริน อยู่ที่ระดับ 95 % ภายหลังจากการสกัดโดยที่อนุภาคนาโนที่ประกอบด้วยโซ่ของโพลียูรีเทนอะคริเลตแอนไอออนเมอร์ (Polyurethane acrylate anionomer, UAA) เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด

Tungittiaplakorn และคณะ (2004) ประเมินค่าการสลายตัวของสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดิน โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ UAA และ PMUA ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า PMUA ซึ่งเป็นโพลิเมอร์แบบไม่มีประจุสามารถทำให้การสลายตัวของ PAHs ชนิด พีแนนทริน สลายตัวได้ดีกว่า UAA ซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดสภาวะประจุมากกว่า นอกจากนี้ PMUA ยังสามารถใช้สลายสารประกอบอินทรีย์เป็นพิษชนิดอื่นได้

Paknikar และคณะ (2005) หาปริมาณการสลายตัวของ ลินเดน (Lindane) ที่ละลายในของเหลวโดยใช้อนุภาคนาโนไอร่อนซัลไฟด์ (Iron sulfide nanoparticles) ทำให้คงสภาพโดยใช้ไบโอโพลิเมอร์ (Biopolymers) ซึ่งลินเดน จัดอยู่ในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำโดยเฉพาะน้ำดื่ม การใช้อนุภาคไอร่อนซัลไฟด์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารลินเดนที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มและน้ำอัดลมได้ โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโนไอร่อน ด้วยวิธี wet chemical และทำให้คงสภาพโดยใช้โพลิเมอร์จาก Basidiomycetous fungus, *Itajahia* sp. การคงสภาพของอนุภาคนาโนสามารถที่จะลดปริมาณ ลินเดน (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ในน้ำได้ 94 % ในเวลา 8 ชั่วโมง

## 2.3 สมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์

ดิน เกิดขึ้นจากการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่กับอินทรีย์วัตถุที่ผสมคลุกเคล้ากัน เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มผิวโลก สมบัติของดินในด้านทางกายภาพหรือฟิสิกส์นั้น ได้แก่ เนื้อดิน (soil texture) โครงสร้างของดิน (soil structure) และความหนาแน่นของดิน (soil density) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อกระบวนการต่าง ๆ ของดิน นอกจากสมบัติดังกล่าวนี้ยังมี ขนาด (size) และความจุอนุภาค (particle) ที่เกี่ยวข้องด้วยเช่นกัน เมื่ออนุภาคจับกันหรือรวมกันเป็นหน่วยขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดกระบวนการเฉพาะของสมบัติดิน (Miller and Gardiner, 2001)

### 2.3.1 เนื้อดินและโครงสร้างดิน

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา (2545) ได้อธิบายการจำแนกขนาดของดิน เพื่อความเข้าใจลักษณะของเนื้อดินเบื้องต้นนี้ ขนาดของดิน (soil separate) คือ กลุ่มขนาดของอนุภาคอินทรีย์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลย์ (effective diameter) ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร โดยแต่ละกลุ่มขนาดอยู่ในพิสัยที่กำหนด ให้ชื่อกลุ่มขนาดและขนาดของเกณฑ์สากล (international scale) มีดังนี้ ทรายหยาบ (coarse sand) ขนาด 0.20 – 2.00 มิลลิเมตร, ทรายละเอียด (fine sand) ขนาด 0.02 – 2.00 มิลลิเมตร, ทรายแป้ง (silt) ขนาด 0.002 – 0.02 มิลลิเมตร และดินเหนียว (clay) ขนาดเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตรลงไป ซึ่งในความหมายของคำว่า เนื้อดิน คือ สัดส่วนสัมผัสของอนุภาคในกลุ่มขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเนื้อดินจะเป็นประเภทใดขึ้นอยู่กับสมบัติเด่นของกลุ่มขนาดหลักในดินชนิดนั้น

### 2.3.2 สมบัติทางเคมี

ความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของดิน ซึ่งดินเป็นสิ่งที่มีความประจุทั้งบวกและลบแต่จะมีค่าประจุบวกมากกว่า การมีประจุสามารถที่จะละลายแร่ธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญ รวมทั้งสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะถูกความมีประจุของดินดูดซับไว้ และโดยทั่วไปสารอินทรีย์จะถูกดูดซับไว้ในดินที่เป็นกรดมากกว่าดินที่เป็นด่าง (Kamble, 1996)

ความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวก (cation exchange capacity, CEC) การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลมาจากอนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก และโดยส่วนใหญ่อนุภาคดินเหนียวมีลักษณะแบนบางทำให้โอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่รอบนอกจะหลุดออกไปได้มาก จึงทำให้อะตอมของธาตุอื่นหลุดเข้าไปแทนที่ทำ

ให้อนุภาคดินเกิดประจุได้ การแตกตัวของกลุ่มอนุมูลบางตัวจากสารประกอบอินทรีย์ก็ทำให้เกิดประจุได้เช่นกัน ซึ่งประจุที่เกิดส่วนใหญ่เป็นประจุลบดินจึงมีความสามารถในการดึงดูดแคตไอออนได้ ( ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

### 2.3.3 ปฏิกริยาของสารในดิน

สมบัติที่เกี่ยวข้องกับลักษณะนิสัย (fate) ของสารจำกัดแมลงในดิน คือ สภาพละลายได้ (solubility) ความดันไอ (vapor pressure) สภาพมีขั้ว (polarity) ประจุ (charge) และสภาพกรด - ด่าง ในสารละลาย โดยความดันไอ จะบ่งบอกถึงศักยภาพในการระเหยของสารไปจากดินและน้ำ ส่วนสภาพการไหลแสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารในดินและน้ำ

กระบวนการดูดซับ (adsorption) สารกำจัดแมลง เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างผิวหน้าของคอลลอยด์ดิน กับสารในสภาพไอหรือสารละลาย การดูดซับทำให้ความเข้มข้นของสารที่ผิวหน้าคอลลอยด์มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของสารในสารละลายที่ระยะห่างออกไปจากผิวหน้าคอลลอยด์ การดูดซับนี้เป็นผลจากปฏิกริยา (interaction) ของแรงที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) คือคอลลอยด์ดินที่กระทำต่อโมเลกุลหรือไอออนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) คือสารกำจัดแมลง กลไกการดูดซับนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่างเช่น การแลกเปลี่ยนแคตไอออนหรือแอนไอออน การเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างสารไร้ขั้ว (non - polar van der waals force) และ โคออร์ดิเนชันเชิงซ้อน (coordination complex)

กระบวนการดูดซับและการคาย (desorption) เป็นกลไกที่สำคัญในการควบคุมปริมาณสารละลายในดิน เช่น ควบคุมอัตราการสลายตัวของสารกำจัดแมลงชีวภาพ, สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ซึ่งจะไปกับน้ำในดิน การเคลื่อนย้ายไปกับน้ำที่ไหลบ่า และสภาพการระเหย (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

ภานุวัฒน์ ไกรจิตต์เมตต์ (2547) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารเอ็นโดซัลแฟนของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อช่วยลดการตกค้างของสารเอ็นโดซัลแฟนในดินด้วยปริมาณอินทรีย์วัตถุใช้ดินจากสวนส้ม อำเภอแม่เมาะ จังหวัดเชียงใหม่ และกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย 3 แหล่ง จากการทดลองพบว่าองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดินและในกากตะกอนระบบบำบัดที่มีอินทรีย์วัตถุมีปริมาณ 1.85 % และ 42-53.33 % โดยค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับดิน 47.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีค่า 466.9, 707.7 และ 1,755.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม



ในการทดลองคอสม์นั้ดินโดยใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยง  
สุกรเป็นวัสดุคลุมผิวดินและทำการฉีดพ่นสารเอ็นโดซัลแฟนในปริมาณที่กำหนดพบว่าการตกค้าง  
ของสารเอ็นโดซัลแฟนอยู่ในชั้นของกากตะกอนมากกว่าชั้นดินที่ไม่มีกากตะกอนคลุมผิวดินทำให้  
สามารถสรุปได้ว่าการตกค้างของสารเอ็นโดซัลแฟนสามารถลดลงโดยใช้กากตะกอนจากระบบ  
บำบัดน้ำเสียที่คลุมผิวดินได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การวิจัยและสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์ภาคสนามสำหรับเก็บตัวอย่าง

- 3.1.1.1 พลับและเสียม
- 3.1.1.2 ถังพลาสติก
- 3.1.1.3 ตะแกรงร่อน ขนาด 2 มิลลิเมตร
- 3.1.1.4 ถังพลาสติก

##### 3.1.2 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

- 3.1.2.1 เครื่องมือ
  - 1) เครื่องกวน (mechanical stirrer)
  - 2) อ่างน้ำร้อนชนิดควบคุมอุณหภูมิ
  - 3) เครื่องให้ความร้อน ที่สามารถปรับระดับการหมุนได้ (heating mantle)
  - 4) เทอร์มอมิเตอร์ (thermometer)
  - 5) แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
  - 6) เครื่องซอกซ์เลท (soxhlet apparatus)
  - 7) เครื่องระเหย (rotary vacuum evaporator)
  - 8) เครื่องปั้มน้ำ (pump)
  - 9) ตู้อบ (oven)
  - 10) เครื่องเขย่า

11) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) รุ่น HP 6890 (Agilent technologies ) ของบริษัท Hewlett Packard

### 3.1.2.2 เครื่องแก้ว

- 1) ขวดแก้วก้นกลมเก็บสาร ขนาด 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 2) กรวยแยกพร้อมก๊อกชนิดเทฟลอน (separating funnel) ขนาด 250 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3) ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1, 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 4) ขวดเออร์เลนเมเยอร์ (erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 500 มิลลิลิตร
- 5) ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100 และ 500 มิลลิลิตร
- 6) คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร พร้อมก๊อกชนิดเทฟลอน
- 7) ชุดคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร
- 8) ขวดแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่มีฝาปิด 3 คอ
- 9) ขวดแก้วก้นกลมมี 3 คอ เชื่อมต่อกับขวด ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 10) เข็มฉีดยา (syringe) ขนาด 10, 250 และ 500 ไมโครลิตร
- 11) ออร์โตปิเปต (auto pipette) ขนาด 100, 1000 และ 5000 ไมโครลิตร
- 12) ถ้วยชอบ (crucible)
- 13) หลอดสำหรับสกัดทำด้วยกระดาษกรอง (extraction thimble)
- 14) แท่งแก้ว (glass rod)
- 15) ลูกแก้ว (glass bead)

### 3.1.3 สารเคมี

3.1.3.1 99.5 % เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา, 99.5 % เอ็นโดซัลแฟนเบตา ชนิด analytical grade และ 98.8 % เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ชนิด analytical grade จากบริษัท Dr. Ehrenstorfer GmbH

3.1.3.2 สาร Internal standard 98.5 % 2, 4, 5, 6 - เตตระคลอโร- เอ็ม - ไซลีน จากบริษัท Dr. Ehrenstorfer GmbH

3.1.3.3 95 % นอร์มัลเฮกเซน (normal-hexane) ชนิด pesticide grade จากบริษัท Lab scan

3.1.3.4 ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) ชนิด pesticide grade จากบริษัท Lab scan

3.1.3.5 อะซีโตนไนไตร์ (acetonitrile) ชนิด pesticide grade จากบริษัท Lab scan

3.1.3.6 ฟลอริซิล (florisil) Pr 60/100 จากบริษัท Trademark of florida

3.1.3.7 โซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate anhydrous) ชนิด granular จากบริษัท Fisher scientific

3.1.3.8 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid)

3.1.3.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide)

3.1.3.10 ขี้แก้ว (glass wool)

3.1.3.11 Poly(tetramethylene glycol) MW = 1000 (PTMG) จากบริษัท Aldrich chemical

Aldrich chemical

3.1.3.12 2,4-toluene diisocyanate (TDI) จากบริษัท Aldrich chemical

3.1.3.13 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) จากบริษัท Fluka chemical

3.1.3.14 Poly(ethylene glycol) MW = 2000 (PEG) จากบริษัท Fluka chemical

3.1.3.15 N,N-Dimethylacetamide (DMAc) จากบริษัท Across organics

3.1.3.16 Potassium persulfate (KPS) จากบริษัท Across organics

3.1.3.17 แก๊สไนโตรเจน (nitrogen gas 99.99%)

### 3.2 การสังเคราะห์สารนาโนโพลิเมอร์

สังเคราะห์ APU โดยการผสมสารตั้งต้นสาร TDI : PTMG : HEMA : PEG ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 : 1 (Tungittiplakorn et.al., 2005) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

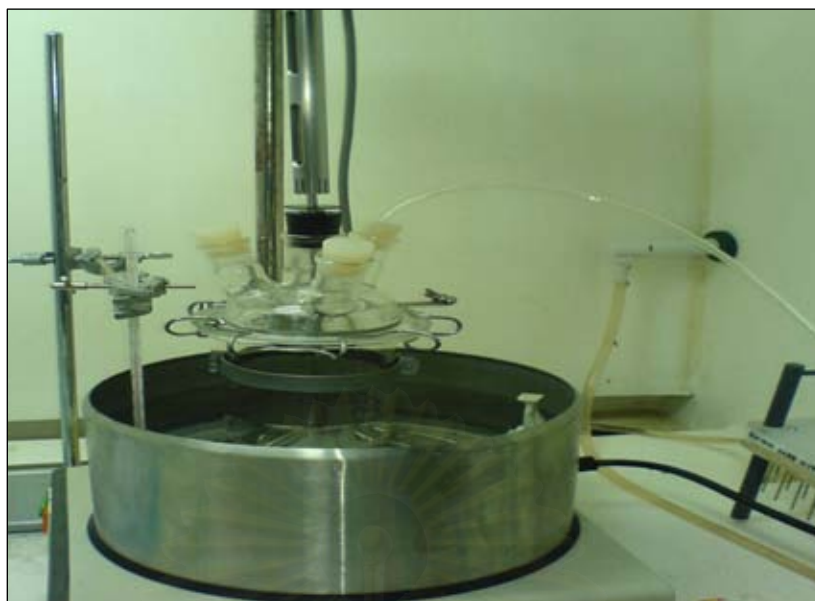
3.2.1 ชั่งสาร TDI PEG PTMG และ HEMA ปริมาณ 6.96, 40.00, 20.00 และ 2.60 กรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การคำนวณน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารนาโนโพลิเมอร์

| สาร  | น้ำหนักโมเลกุล | โมล  | น้ำหนัก<br>(กรัม) | อัตราส่วน |
|------|----------------|------|-------------------|-----------|
| TDI  | 174.16         | 0.04 | 6.96              | 2         |
| PEG  | 2000           | 0.02 | 40.00             | 1         |
| PTMG | 1000           | 0.02 | 20.00             | 1         |
| HEMA | 14             | 0.02 | 2.60              | 1         |

3.2.2 นำสาร PEG 40.00 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสาร DMAc 0.25 % ของสาร PEG คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว ให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนสารละลาย

3.2.3 เริ่มต้นการโดยนำสาร TDI ตามอัตราส่วนที่กำหนด คือ 6.96 กรัม ใส่ลงในรีแอกเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยขวดแก้วที่มีฝาปิด 3 คอ แขนในอ่างน้ำร้อนชนิดควบคุมอุณหภูมิ และส่วนของคอที่ 1 ปิดด้วยจุกชนิดซิลิโคนสำหรับเพื่อที่จะเติมสาร TDI และสารอื่น ๆ ส่วนคอที่ 2 เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกวน และส่วนคอที่ 3 เชื่อมต่อกับสายส่งแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงรูปที่ 3.1



**รูปที่ 3.1** รีแอกเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยขวดแก้วที่มีฝาปิดมี 3 คอ ที่แช่ในอ่างน้ำร้อน ชนิดควบคุมอุณหภูมิ

จากนั้นปรับระดับความร้อนของอ่างน้ำร้อน ให้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศในระบบ เทสาร PTMG 20.00 กรัม ลงในคอที่ 1 ของขวดแก้ว เมื่อเทสารลงหมดจึงปิดแก๊สและปากขวดให้สนิท แล้วกวนด้วยเครื่องกวน 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิต่อไปที่ 45 องศาเซลเซียส แล้วกวนผสมต่อไป 5 ชั่วโมง

3.2.4 ลดอุณหภูมิลงที่ 20 องศาเซลเซียส เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศในระบบอีกครั้ง เติมสาร HEMA 2.60 กรัม แล้วปิดแก๊สและปากขวดให้สนิทอีกครั้ง แล้วกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิต่อไปที่ 45 องศาเซลเซียส ทำการกวนต่ออีก 8 ชั่วโมง

3.2.5 ลดอุณหภูมิลงที่ 20 องศาเซลเซียส เปิดแก๊สไนโตรเจนอีกครั้งเพื่อไล่อากาศ แล้วเติมสารละลาย PEG ที่เตรียมจากข้อ 3.2.2 ใส่ในขวดแก้ว จากนั้นปิดแก๊สไนโตรเจน แล้วกวนต่อ 30 นาที เพิ่มอุณหภูมิอีกที่ 65 องศาเซลเซียส ทำการกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.2.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนด จากข้อ 3.2.5 จะได้สารโพลีเมอร์ ที่มีโซ่ยาวเรียงต่อกัน เรียกว่า PMUA ซึ่งมีลักษณะเนื้อสารคล้ายเจลสีขาว และเพื่อความเชื่อมั่นในวิธีการสังเคราะห์ ทำการตรวจสอบหาปริมาณสาร NCO ซึ่งการสังเคราะห์เพื่อให้ได้สาร PMUA จะต้องไม่มีกลุ่มสาร NCO เหลืออยู่ (Tungittiplakorn et.al., 2005) โดยนำไปตรวจกับ เครื่อง FT-IR spectrometer ที่ความยาวคลื่นแสง 2270 / เซนติเมตร

การละลายสารโพลีเมอร์ด้วยน้ำแยกไอออน (deionization water) โดยอัตราส่วนของสารโพลีเมอร์ 5 กรัม ต่อน้ำแยกไอออน 100 มิลลิลิตร การละลายต้องกวนหรือตีให้เนื้อสารแตก โดยใช้เครื่องกวนความเร็ว 2500 - 3000 รอบ/นาที ทั้งนี้เพื่อให้สารเนื้อที่มีขนาดเล็กที่สุดในระดับอนุภาคนาโน (Tungittiplakorn et.al., 2005) ซึ่งของเหลวที่ละลายแล้วจะมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (emulsion) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกวนสารโพลีเมอร์เพื่อให้ได้ขนาดระดับอนุภาคนาโนด้วยเครื่องกวนความเร็ว 2500 – 3000 รอบ/นาที



3.2.7 ผสานโพลีเมอร์ (cross-link) โดยใช้ชุดรีแอกเตอร์ 2 ที่ประกอบด้วย ขวดแก้วก้นกลมมี 3 คอ โดยในส่วนของคอที่ 1 ให้ปิดด้วยจุกชนิดซิลิโคนสำหรับที่จะเติมสาร ส่วนคอที่ 2 ให้เชื่อมต่อกับชุดคอนเดนเซอร์เพื่อใช้สำหรับควบแน่น และส่วนคอที่ 3 เชื่อมต่อกับสายแก๊สไนโตรเจน และขวดก้นกลมจะต้องแช่ในอ่างซิลิโคนเจล เพื่อให้ความร้อนจากซิลิโคนเจลแพร่กระจายรอบก้นขวดได้เสมอกัน อีกทั้งไม่เกิดการสัมผัสผิวตัวนำความร้อนจากเครื่องให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งจะทำให้สารสัมผัสความร้อนอยู่จุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รีแอกเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยขวดก้นกลม 3 คอ สำหรับเชื่อมต่อกับส่วนต่าง ๆ และแช่ภายในอ่างซิลิโคนเจลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ในขณะที่สังเคราะห์

จากนั้นนำสารละลายโพลีเมอร์จาก ข้อ 3.2.6 เทลงในขวดชุดรีแอกเตอร์ 2 ปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศในระบบ และระบบคอนเดนเซอร์ ไล่แห้งกวนแม่เหล็ก เมื่อเทสารลงแล้ว ปิดด้วยจุกเฉพาะในส่วนของคอที่ 1 ที่ใช้สำหรับเติมสารเท่านั้น ส่วนคอที่ 3 ที่เชื่อมต่อกับสายส่งแก๊ส ให้เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศในระบบตลอดเวลา จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องให้ความร้อนพร้อมทั้งปรับระดับการหมุน 100 รอบ/นาที ให้แห้งกวนแม่เหล็กหมุนในระบบตลอดเวลา

3.2.8 เมื่ออุณหภูมิถึง 65 องศาเซลเซียส เติมน้ำ KPS 0.5 กรัม แล้วกวนต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.2.9 เมื่อครบเวลาที่กำหนดวางไว้ให้สารนาโนโพลิเมอร์เย็นตัวซักพัก แล้วจึงปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ ไฮโดรคลอริก (Tungittiplakorn et.al., 2005) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สารนาโนโพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทั้งหมดแล้วนำไปวัดด้วย distribution particles size analysis เพื่อตรวจวัดขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 3.4 สารนาโนโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์เสร็จสมบูรณ์แล้ว และสามารถนำไปใช้ในการศึกษากำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

#### 3.3.1 การเก็บตัวอย่างดิน

กำหนดพื้นที่และเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม โดยเก็บทั้งหมด 1 จุด ต่อพื้นที่ 1 ไร่ ทำการเก็บที่ความลึกจากระดับผิวดิน 10 – 15 เซนติเมตร จุดตัวอย่างละ 1 กิโลกรัม นำตัวอย่างแต่ละจุดมารวมกันในถังพลาสติก คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วจึงแบ่งเอาดินออกมา 1 กิโลกรัม เพื่อใช้เป็นตัวแทนดินตัวอย่างศึกษาจากพื้นที่ทั้งหมด (วิศิษฐ์ โชลิตกุล และคณะ, 2536) นำดินมาผึ่งให้แห้งในห้องที่สะอาด จากนั้นร่อนดินตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้ใส่ในถุงพลาสติกที่สะอาด เพื่อใช้ในลำดับต่อไป

#### 3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของดิน

สมบัติ ทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ทำกรวิเคราะห์ ได้แก่ เนื้อดิน (soil texture), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon content), ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity) (Black et al., 1969 and Tan, 1996) ด้วยวิธีดังตารางที่ 3.2 ซึ่งการวิเคราะห์สมบัติแต่ละพารามิเตอร์แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.2 สมบัติดินที่วิเคราะห์

| พารามิเตอร์                      | วิธีการ                         |
|----------------------------------|---------------------------------|
| เนื้อดิน                         | hydrometer                      |
| ความเป็น กรด-ด่าง                | pH meter (1 : 1 ; soil : water) |
| คาร์บอนอินทรีย์                  | wet oxidation                   |
| ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก | ammonium saturation             |

### 3.4 วิธีวิเคราะห์สารเอ็นโดซัลแฟน

#### 3.4.1 การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในตัวอย่างดิน

ประยุกต์ตาม U.S. EPA 8081B standard method และการสกัดตัวอย่างโดยใช้ soxhlet extraction method จาก U.S. EPA Method 3540C (Online, 2000)

3.4.1.1 ชั่งตัวอย่างดิน 30 กรัม บรรจุลงในหลอดสำหรับสกัดทำด้วยกระดาษกรอง ปิเปตต์สาร internal standard ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร นำไปใส่ในชุดชอกซ์เลต

3.4.1.2 ตวงสารทำละลาย นอร์มัลเฮกเซนปริมาณ 150 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ลูกแก้ว (glass beads) 2 – 3 เม็ด แล้วต่อเข้ากับชุดชอกซ์เลต

3.4.1.3 ทำการกลั่นตัวทำละลาย อัตราการกลั่น 1 รอบ/ 4 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ ที่อุณหภูมิ 65 - 80 องศาเซลเซียส

3.4.1.4 เก็บหลอดสำหรับสกัดออกจากชุดชอกซ์เลต แล้วเทสารสกัดลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างที่สกัดมาลดปริมาตรจนเหลือ 10 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องระเหย โดยใช้สภาวะเครื่องดังนี้

อุณหภูมิของอ่างน้ำ : 35 องศาเซลเซียส  
ความเร็วที่ระดับ : 5 รอบ/นาที

3.4.1.5 การทำความสะอาดตัวอย่าง (clean up)

การทำความสะอาดตัวอย่างประยุกต์ใช้ตามวิธี EPA Method 3620C Florisil Cleanup (Online, 2000) โดยมีวิธีดังนี้

1) ใส่ใยแก้ว (glass wool) ที่ล้างด้วยนอร์มัลเฮกเซนแล้ว ลงไปที่ก้นของคอลัมน์แก้ว ขนาดความยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อป้องกันสารฟลอริซิล ตกกลงสู่ข้างล่าง

2) ตวงฟลอริซิล 10 กรัม ที่ผ่านการเผา ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ลงไปในคอลัมน์

- 3) ตวงโซเดียมซัลเฟต 5 กรัม ลงในคอลัมน์ บนชั้นของฟลอริซิล
- 4) ปลอ่ยสารนอร์มัลเฮกเซนให้ไหลผ่านคอลัมน์เพื่อทำความสะอาดฟลอริซิล หลังจากนั้นแช่ฟลอริซิลให้ท่วมด้วยตัวทำละลายนอร์มัลเฮกเซน ไม่ควรปลอ่ยคอลัมน์ให้แห้ง
- 5) นำสารตัวอย่างที่ผ่านการสกัดและลดปริมาตรแล้วจากข้อ 3.4.1.4 ใส่งในคอลัมน์ทีละน้อย จากนั้นค่อย ๆ ไขก๊อกให้สารผ่านคอลัมน์ลงมาอย่างช้า ๆ
- 6) ใช้ตัวทำละลายผสม ไดเอทิลอีเทอร์ 15 % ในนอร์มัลเฮกเซน ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ชะผ่านคอลัมน์ โดยไม่ปลอ่ยให้คอลัมน์แห้ง ลงสู่ขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 7) ชะด้วยสารทำละลายนอร์มัลเฮกเซน ให้รอบปากและคอของคอลัมน์อีกครั้ง ประมาณ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวละลาย ไปลดปริมาตรอีกครั้งด้วยเครื่องระเหย ให้เหลือปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนปริมาตรเหลือ 1 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารที่ได้ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

### 3.4.2 การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในตัวอย่างของเหลว

วิธีสกัดสารในตัวอย่างของเหลวด้วยวิธี liquid – liquid extraction ได้ประยุกต์มาจาก Kamchanasest และ jailak (2004) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.4.2.1 ใช้กรวยแยก ขนาด 1000 มิลลิลิตร เพื่อสกัดสารออกจากของเหลว โดยใส่งสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว 300 มิลลิลิตรจากขวดเก็บตัวอย่าง ลงไปในกรวยแยกสาร ชะขวดเก็บตัวอย่างให้ท่วมด้วยตัวทำละลาย นอร์มัลเฮกเซน 1 – 2 มิลลิลิตร แล้วเทรวมลงไปในกรวยแยกสาร จากนั้นเติม นอร์มัลเฮกเซน 20 มิลลิลิตร ลงในกรวยแยก

3.4.2.2 เขย่ากรวยแรง ๆ 2-3 นาที แล้วเขย่าต่อไปอีก 5 นาที เพื่อให้สารที่อยู่ในกรวยแยกรวมตัวกัน ตั้งทิ้งไว้ จนกว่าสารจะแยกออกเป็นสองชั้นระหว่างของเหลวที่เป็นน้ำกับนอร์มัลเฮกเซน ไขก๊อกเอาของเหลวที่อยู่ชั้นล่างลงสู่ขวดเก็บตัวอย่างเดิม แล้วปิดก๊อก จากนั้นเปิดก๊อกอีกครั้งปลอ่ยของเหลวทำละลายอย่างที่อยู่ชั้นบนลงสู่ขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 125 มิลลิลิตร

3.4.2.3 นำสารตัวอย่างที่ผ่านการสกัดรอบแรกที่ใส่งไว้ในขวดเก็บ ลงในกรวยแยกอีกครั้ง เติมตัวทำละลาย นอร์มัลเฮกเซนใหม่ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าและเก็บลงในขวดเก็บดังข้อ 3.4.2.2 และรอบรับนอร์มัลเฮกเซนที่อยู่ชั้นบนใส่งรวมกับนอร์มัลเฮกเซนในเออร์เลนเมเยอร์ขวดเดิม

3.4.2.4 นำไปเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (preconcentration) โดยใช้เครื่องระเหย ให้เหลือปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารที่ได้ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

### 3.4.3 การหาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

#### 3.4.3.1 สภาวะหรือเงื่อนไขของเครื่อง (Operational conditions)

คอลัมน์(column) : คอลัมน์ของบริษัท J & W Scientific ประเภท HP-5 (5% Phenyl methyl siloxane) เส้นผ่านศูนย์กลาง (I.D.) 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร ฟิล์ม (film) 0.25 ไมโครเมตร

ส่วนของการฉีด (Injector): แบบอัตโนมัติ (Auto split) ของบริษัท Hewlett Packard ตั้งค่าปริมาณการฉีดที่ 1 ไมโครลิตร / 1 ตัวอย่าง

ส่วนตรวจวัด (Detector) : ใช้อิเล็กทรอนิกส์แคปเจอร์ดีเทคเตอร์ (electron capture detector; ECD)

อุณหภูมิ : ตั้งอุณหภูมิของ injector ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของ Detector ที่ 250 องศาเซลเซียส

#### 3.4.3.2 ตั้งค่าอุณหภูมิให้แก่คอลัมน์ โดยตั้งค่า

- oven ramp เริ่มต้นถึง ค่า oven ramp 1 จากอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที คงที่อุณหภูมิเป็นเวลา 3 นาที

- oven ramp 1 ถึง oven ramp 2 เพิ่มจากค่าอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ให้ถึง 300 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 50 องศาเซลเซียส/นาที คงที่อุณหภูมิ เป็นเวลา 4 นาที จากเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งที่ 325 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมิ เวลา 3 นาที



แก๊สพาที่ใช้ (carrier gas) : ใช้แก๊สฮีเลียม (He) ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที และสำหรับ makeup gas ใช้แก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตร/นาที ในอัตราส่วน แก๊สที่ใช้ 5 : 1

ปริมาณที่ฉีด (injector volume) : 1 ไมโครลิตร

### 3.4.4 ช่วงเวลาที่ปรากฏ (retention time) ของสารเอ็นโดซัลแฟน

ใช้สารเอ็นโดซัลแฟน ชนิดแอลฟา เบตา และซัลเฟต ที่มีความเข้มข้นชนิดละ 2 มิลลิกรัม/ลิตร ฉีดเข้าเครื่อง GC-ECD ที่เงื่อนไขเดียวกับข้อ 3.4.3 โดยฉีดจำนวน 3 ครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาที่ปรากฏ ของสารแต่ละชนิด ซึ่งช่วงเวลาที่ปรากฏของสาร คือ แอลฟา  $10.524 \pm 0.003$  เบตา  $11.672 \pm 0.001$  และซัลเฟต  $12.495 \pm 0.004$  ดังแสดงในภาคผนวก ข

### 3.4.5 กราฟมาตรฐาน (calibration curve)

โดยการฉีดสารเอ็นโดซัลแฟนที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่กำหนดเข้าไปในเครื่อง GC – ECD เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นที่ยอด (peak area) ของสารเอ็นโดซัลแฟนกับระดับความเข้มข้นของสารที่ฉีดเข้าไป

#### 3.4.5.1 เตรียมสารละลายมาตรฐาน (stock solution standard) เข้มข้นตั้งต้น

ชั่งสารเอ็นโดซัลแฟน แอลฟา,เอ็นโดซัลแฟน เบตา และเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ชนิดละ 50 มิลลิกรัม ใส่รวมกันในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำทำละลายนอร์มัลเฮกเซน แล้วเขย่าเพื่อให้สารละลายแล้วปรับปริมาตรด้วยนอร์มัลเฮกเซนให้ได้ 500 มิลลิลิตร

#### 3.4.5.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานเข้มข้น

ปรับความเข้มข้นของสารให้ได้ 10 มิลลิกรัม/ลิตร จากสารละลายตั้งต้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อเก็บไว้ใช้งาน โดยใช้ออร์โตปิเปต ดูดสารละลายตั้งต้นมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำทำละลาย นอร์มัลเฮกเซน จนถึงขีดวัดปริมาตรของขวด เขย่าให้เข้ากัน

#### 3.4.5.3 เตรียมสารละลาย internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร

โดยชั่งสาร 2, 4, 5, 6- เตตระคลอโร - เอ็ม - ไซลีน 1.5 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ละลายด้วยนอร์มัลเฮกเซน แล้วปรับปริมาตรด้วยนอร์มัลเฮกเซนให้ได้ 500 มิลลิลิตร

#### 3.4.5.4 เตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อใช้เปรียบเทียบ (calibration standard)

ใช้สารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นสาร ได้แก่ 0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 4 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยใช้เข็มฉีดยาคูดสารละลายเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด จากความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ในปริมาณ 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 และ 400 ไมโครลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 มิลลิลิตร เติมสาร internal standard ที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ในปริมาณ 10 ไมโครลิตร ลงในทุกความเข้มข้นสาร จากนั้นเติมสารทำละลายนอร์มัลเฮกเซน จนถึงขีดวัดปริมาตร

#### 3.4.5.5 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (standard curve)

ฉีดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 9 ระดับ และสาร internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงไปในแต่ละระดับ เข้าเครื่อง GC – ECD นำอัตราส่วนพื้นที่ที่ได้พิกที่ปรากฏ ระหว่างสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 9 ระดับ มาเทียบกับพื้นที่ที่ได้พิก internal standard นำค่าอัตราส่วนที่ได้มาสร้างเป็นกราฟโดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่พิกเทียบกับสารมาตรฐาน กับความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์แบบสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ดังสมการที่ 3.1

$$(สมการที่ 3.1) \quad y = (M)x + (r^2)$$

โดยค่า M = ค่าความชัน (slope)

x, y = จุดตัด (เริ่มที่ 0) (intercept)

(r<sup>2</sup>) = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

กราฟมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณและแสดงสมการได้แสดงไว้รูปที่ 1 2 และ 3 ในภาคผนวก ง

#### 3.4.5.6 ปริมาณสารอ่านจากกราฟมาตรฐาน

ใช้การเปรียบเทียบอัตราส่วนพื้นที่ที่ได้พิกของสารเอ็นโดซัลแฟนกับสารมาตรฐาน โดยที่ลำดับช่วงเวลาปรากฏออกมาของสารและสาร internal standard ตรงกับสารละลายมาตรฐานแต่ละชนิด จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการแบบถดถอยเชิงเส้น ดังสมการที่ 3.1 ในข้อ 3.4.5.5 จะได้ค่าความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟนที่ตรวจพบ

### 3.5 การตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำ

#### 3.5.1 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดสาร (detection limit) ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องที่สามารถตรวจวัดสารได้ในปริมาณน้อยที่สุดเท่าใด โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานเอ็นโดซัลแฟนที่ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัม/ลิตร แล้วนำมาฉีดเข้าเครื่อง GC-ECD หลังจากนั้นนำไปคำนวณเพื่อหาค่า limit of detection (LOD) โดยความเข้มข้นของสารที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งให้สัญญาณ (signal) เป็น 3 เท่า ของพื้นหลัง (background) หรือสัญญาณรบกวน (noise) หรือของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) โดยคำนวณจากสมการที่ 3.2

$$\text{(สมการที่ 3.2) ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด} = \frac{3 \times (\text{ความเข้มข้นที่ใช้}) \times (\sigma)}{\text{(ค่าเฉลี่ยสัญญาณที่อ่านได้)}}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.6 การกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์แก้ว

#### 3.6.1 การชะสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินโดยใช้น้ำแยกอออน

เพื่อทดสอบว่าสมบัติของสารเอ็นโดซัลแฟนซึ่งละลายน้ำต่ำ จะสามารถถูกชะด้วยน้ำได้มากน้อยอย่างไร โดยมีขั้นตอน ดังนี้

3.6.1.1 ชั่งตัวอย่างดิน 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร ใส่สารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ลงตัวอย่างดิน เพื่อให้ความเข้มข้นของสาร 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (เนื้อสาร 0.0600 มิลลิกรัม/ ดิน 30 กรัม) โดยคูดสารเอ็นโดซัลแฟนด้วยออร์โตปิเปตต์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 6 มิลลิลิตร และสาร internal standard ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างดิน แล้วคนด้วยแท่งแก้ว

3.6.1.2 บรรจุตัวอย่างดินที่เตรียมในข้อ 1) ลงในคอลัมน์แก้ว ขนาดความยาว 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 ในภาคผนวก ง

3.6.1.3 ต่อกอลัมน์แก้วเข้ากับเครื่องปั้มน้ำ แล้วปล่อยน้ำแยกอออนผ่านเครื่องปั้มน้ำที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที ดังรูปที่ 2 ในภาคผนวก ง

3.6.1.4 รองรับน้ำชะผ่านคอลัมน์ และเก็บทุก 1 pore volume (1 pore volume = 16 มิลลิลิตร) เก็บทั้งหมดจำนวน 15 pore volume

3.6.1.5 ทำการสกัดสารแต่ละ pore volume ด้วยวิธี liquid – liquid extraction โดยใช้กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเทตัวอย่างลงในกรวยแยก ใช้นอร์มัลเฮกเซน 20 มิลลิลิตร เป็นสารสกัด เขย่ากรวยแยก เป็นเวลา 2 – 3 นาที ตั้งไว้ให้ของเหลวตัวอย่างกับนอร์มัลเฮกเซนแยกชั้นกันชัดเจน จากนั้นรองรับนอร์มัลเฮกเซนที่สกัดและแยกชั้นอยู่ใส่ขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 125 มิลลิลิตร นำตัวอย่างเดิมกลับมาสกัดอีกครั้ง ด้วยนอร์มัลเฮกเซน 10 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งไว้ให้ของเหลวแยกชั้น รองรับสารนอร์มัลเฮกเซนที่สกัดแล้วเก็บใส่ขวดเออร์เลนเมเยอร์ เดียวกัน

3.6.1.6 นำสารที่ได้จากข้อ 3.6.1.5 ไประเหยให้เหลือปริมาตร 10 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องระเหย แล้วทำความสะอาดตัวอย่าง ตามวิธี EPA 3620 florasil cleanup (Online, 2000)

3.6.1.7 วิเคราะห์สารเอ็นโดซัลแฟนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.6.1.8 นำผลการวิเคราะห์มาหาเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของสาร (% recovery)

เปอร์เซ็นต์การกลับคืนของสารเอ็นโดซัลแฟน คือสัดส่วนของค่าความเข้มข้นสุดท้ายของสารดังกล่าวที่ผสมลงในตัวอย่างโดยคำนวณจากสมการที่ 3.3

(สมการที่ 3.2)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกลับคืนของสาร} = \frac{\text{ความเข้มข้นสารเอ็นโดซัลแฟนหลังวิเคราะห์} \times 100}{\text{ความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟนก่อนวิเคราะห์}}$$

### 3.6.2 การชะสารนาโนโพลิเมอร์ในคอลัมน์ดินโดยใช้น้ำแยกอออน

เพื่อตรวจสอบความสามารถของน้ำแยกอออนในการชะสารนาโนโพลิเมอร์ออกจากคอลัมน์ดินได้ทั้งหมด โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.6.2.1 ชั่งตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ 30 กรัม แล้วบรรจุลงในคอลัมน์แก้ว

3.6.2.2 บีบอัดสารนาโนโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร ให้ปริมาตร 1 pore volume เท่ากับ 16 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ดิน

3.6.2.3 ต่อคอลัมน์แก้วเข้ากับเครื่องปั้มน้ำจากนั้นทำการชะสารนาโนโพลิเมอร์ โดยใช้น้ำแยกอออนผ่านคอลัมน์ อัตราการไหลของน้ำ 20 มิลลิลิตร/ นาที

3.6.2.4 รองรับน้ำชะที่ผ่านคอลัมน์ดิน ทุก 1 pore volume ด้วยถ้วยอบ ขนาด 25 มิลลิลิตร เป็นจำนวน 20 pore volume นำไปอบให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำถ้วยที่ผ่านการอบแล้ว มาชั่งเพื่อหาน้ำหนักของสารนาโนโพลิเมอร์ที่มีอยู่ในถ้วย โดยคำนวณน้ำหนักสารจากสมการที่ 3.4

(สมการที่ 3.4)

$$\text{น้ำหนักสารโพลิเมอร์นาโน} = \text{น้ำหนักถ้วย (ก่อนอบ)} - \text{น้ำหนักถ้วย (หลังอบ)}$$

3.6.2.5 คำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนสารของสารนาโนโพลิเมอร์

### 3.6.3 การกลับคืนของสารเอ็นโดซัลแฟนจากอนุภาคนาโนโพลีเมอร์

เพื่อทดสอบว่าสารเอ็นโดซัลแฟนที่ถูกดูดซับด้วยสารนาโนโพลีเมอร์แล้วเมื่อนำมาสกัดแยกด้วยตัวทำละลายนอร์มัลเฮกเซน สารเอ็นโดซัลแฟนจะถูกแยกออกสารนาโนโพลีเมอร์เท่าใด โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.6.3.1 ปิเปตต์สารนาโนโพลีเมอร์ ปริมาตร 16 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตต์สารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ลงในสารนาโนโพลีเมอร์ ให้ได้ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร และปิเปตต์สาร internal standard ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร เขย่าบีกเกอร์ด้วยเครื่องเขย่า 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.6.3.2 เทสารทั้งหมดลงในเออร์เลนเมเยอร์ที่มีขีดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำแยกอออนและปรับปริมาตร ให้ได้ 300 มิลลิลิตร เขย่าเล็กน้อย

3.6.3.3 นำตัวอย่างจากข้อ 3.6.3.2 มาสกัดด้วยวิธี liquid – liquid extraction โดยใช้กรวยแยก ขนาด 1000 มิลลิลิตร และใช้ นอร์มัลเฮกเซน เป็นตัวสกัด โดยรอบแรกใช้ นอร์มัลเฮกเซน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่ากรวย 2 – 3 ที่ แล้วตั้งกรวยไว้ให้ของเหลวแยกชั้นกัน ซึ่ง นอร์มัลเฮกเซน จะอยู่ชั้นบน แล้วรองรับของเหลวที่อยู่ชั้นล่างมาสกัดอีกรอบ โดยรอบที่ 2 ใช้ นอร์มัลเฮกเซน ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และรองรับนอร์มัลเฮกด้วยเออร์เลนเมเยอร์ขนาดเดิม

3.6.3.4 นำสารสกัดจากข้อ 3) มาลดปริมาตรด้วยเครื่องระเหย และปรับปริมาตรสารให้ได้ 1 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปวิเคราะห์สารเอ็นโดซัลแฟนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.6.3.5 คำนวณเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของสารที่ได้หลังจากการวิเคราะห์



### 3.6.4 การหาเวลาที่เหมาะสมในการแช่สารนาโนโพลิเมอร์เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน

3.6.4.1 ใช้สารละลายนาโนโพลิเมอร์ให้ได้ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร

3.6.4.2 ชั่งตัวอย่างดินทดสอบ 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ ออร์โตปิเปตต์ดูดสารละลายสารเอ็นโดซัลแฟน ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 6 มิลลิลิตร และสาร internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงลงในดิน แล้วคน ด้วยแท่งแก้ว

3.6.4.3 บรรจุดินตัวอย่างที่ปนสารเอ็นโดซัลแฟนแล้วลงคอลัมน์แก้วที่ขนาด ความยาว 10 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร แล้วเชื่อมต่อสายปั๊มเข้ากับเครื่องปั๊ม

3.6.4.4 ปีเปตต์สารนาโนโพลิเมอร์ เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ลงในตัวอย่างดินใน คอลัมน์ จำนวน 9 ชุด ชุดละ 3 ชั่วโมง ในปริมาณ 1 pore volume ของดิน (1 pore volume = 16 มิลลิลิตร) ซึ่งแต่ละชุดแช่ไว้ ตามเวลา 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.6.4.5 เมื่อครบเวลาในการแช่สารโพลิเมอร์นาโนแต่ละช่วง ใช้น้ำแยกอีออน ชะผ่านคอลัมน์ดินโดยใช้เครื่องปั๊มน้ำ ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที รองรับน้ำชะที่ผ่าน คอลัมน์ดินทั้งหมด 300 มิลลิลิตร ด้วยขวดเออร์เลนเมเยอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.6.4.6 สกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในน้ำชะ แล้วหาปริมาณด้วยเครื่องแก๊ส โครมาโตกราฟี

### 3.6.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนกับ ความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน

3.6.5.1 เตรียมสารละลายนาโนโพลิเมอร์ให้ได้ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร ตามลำดับ

3.6.5.2 ชั่งตัวอย่างดินทดสอบ 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ออร์โตปิเปตต์ดูดสารละลายเอ็นโดซัลแฟนแต่ละชนิด เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ในปริมาตร 6 มิลลิลิตร และ สาร internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงดิน ตัวอย่าง แล้วคนด้วยแท่งแก้ว

3.6.5.3 บรรจุดินตัวอย่างที่พ่นสารเอ็นโดซัลแฟนแล้วลงคอลัมน์แก้วที่ขนาด ความยาว 10 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร แล้วเชื่อมต่อสายปั๊มเข้ากับเครื่องปั๊ม

3.6.5.4 ปิเปตต์สารโพลิเมอร์นาโน จากความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม ลงตัวอย่างดินในคอลัมน์แต่ละชุด ในปริมาณ 1 pore volume ของดิน (1 pore volume = 16 มิลลิลิตร) แล้วแช่ไว้ โดยใช้เวลาที่ได้ศึกษาในข้อ 3.6.4

3.6.5.5 ใช้น้ำแยกอออนชะผ่านคอลัมน์ดินโดยใช้เครื่องปั๊มน้ำ ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที รองรับน้ำชะที่ผ่านคอลัมน์ดินทั้งหมด 300 มิลลิลิตร ด้วยขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.6.5.6 สกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในน้ำชะ และนำไปหาปริมาณสารด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโตกราฟี

### 3.6.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับอัตราการกำจัดสาร

ใช้ดินทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ต่าง ๆ

3.6.6.1 เตรียมสารนาโนโพลิเมอร์จากความเข้มข้น ที่ได้ทำการศึกษาแล้วใน  
ข้อ 3.6.5

3.6.6.2 ชั่งตัวอย่างดิน 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นใช้อร์โต  
ปิเปตต์ดูดสารละลายเอ็นโดซัลแฟน เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 6 มิลลิลิตร และ  
สาร internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงดิน แล้วคนด้วย  
แท่งแก้ว

3.6.6.3 บรรจุดินตัวอย่างที่พ่นสารเอ็นโดซัลแฟนแล้วลงคอลัมน์แก้วขนาดความ  
ยาว 10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร แล้วเชื่อมต่อสายปั๊มเข้ากับเครื่องปั๊ม

3.6.6.4 ปิเปตต์สารนาโนโพลิเมอร์ที่เตรียมในข้อ 3.6.6.1 ลงตัวอย่างดิน  
ในคอลัมน์แต่ละชุด ในปริมาณ 1 pore volume แล้วแช่ไว้ โดยใช้เวลาที่ได้ศึกษาในข้อ 3.6.4

3.6.6.5 ใช้น้ำแยกอออนชะผ่านคอลัมน์ดิน โดยใช้เครื่องปั๊มน้ำ ที่อัตราการไหล  
20 มิลลิลิตร/นาที เก็บตัวอย่างของเหลวที่ผ่านคอลัมน์ดินทั้งหมด 300 มิลลิลิตร ด้วยขวดเออร์เลน  
เมเยอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.6.6.6 สกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในน้ำชะ และหาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊ส  
โครมาโตกราฟี

3.6.6.7 นำปริมาณสารที่วิเคราะห์ได้มาหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ระหว่างคุณสมบัติ  
ของสารและสมบัติของดินตัวอย่าง

### 3.6.7 การศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลิเมอร์ในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนจากดินปนเปื้อน

3.6.7.1 ชั่งดินปนเปื้อน จำนวน 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 30 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 30 มิลลิลิตร ปิดฝาดังสาร internal standard เข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร คนด้วยแท่งแก้ว แล้วบรรจุดินปนเปื้อนลงในคอลัมน์แก้วความยาว 10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร

3.6.7.3 ต่อกอลัมน์แก้วเข้ากับเครื่องปั๊ม ปิดฝาดังสารนาโนโพลิเมอร์ ที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.6.5 ลงตัวอย่างดินปนเปื้อนในคอลัมน์แต่ละชุด ในปริมาตร 1 pore volume แล้วแช่ไว้ตามเวลาที่ได้ศึกษาในข้อ 3.6.4

3.6.7.4 ใช้น้ำแยกอออนชะผ่านคอลัมน์ดินตัวอย่างโดยใช้เครื่องปั๊มน้ำ ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที รองรับน้ำชะที่ผ่านคอลัมน์ดิน ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ด้วยขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.6.7.5 สกัดสารเอ็นโดซัลแฟนในน้ำชะ และหาปริมาณสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

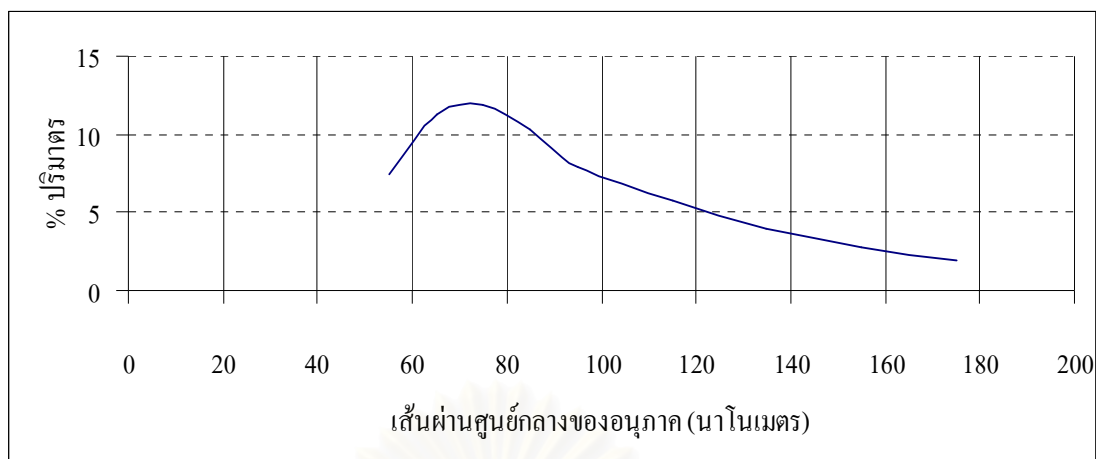
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์

การเติมสาร PEG ในขั้นตอนการสังเคราะห์ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์ ซึ่งไปแทนที่กลุ่มสาร NCO ที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล เมื่อนำไปตรวจหาปริมาณสาร NCO ภายหลังจากเติมสาร PEG โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง FT – IR spectrometer ที่ความยาวคลื่นแสง 2270/เซนติเมตร ไม่ปรากฏกลุ่มสาร NCO ดังแสดงในรูปภาคผนวก จ การไม่ปรากฏกลุ่มสาร NCO แสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์เกิดคู่พันธะต่อกัน โดยสมบูรณ์แล้ว และหลังจากสังเคราะห์ในกระบวนการสุดท้ายสารนาโนโพลีเมอร์จะมีค่าเป็นกรดแก่ (ค่าพีเอช เท่ากับ 2) ทั้งนี้เนื่องจากสารที่นำมาสังเคราะห์ส่วนมากเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งไฮโดรเจนประจุบวกจะแตกตัวได้มากเมื่อถูกกับน้ำแยกออกในขณะที่ละลายและกวนสารโพลีเมอร์ จึงทำให้สารละลายมีความเป็นประจุบวกสูง และอยู่ในรูปอิมัลชันที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้เป็นกลางคือ เท่ากับ 7 ซึ่งหากไม่ปรับจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการศึกษาทดลองต่อไปได้ (Tungittiplakorn et al., 2004) กล่าวคือมีผลต่อสมบัติของสารเอ็นโดซัลแฟน ซึ่งเป็นสารมลพิษอินทรีย์ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นหรือในน้ำที่เป็นกรด – ด่าง สารจะสลายได้เร็วกว่าสภาพที่เป็นกลาง (Schwarzenbach et al., 1993) ทำให้การทดลองที่มีการกำหนดความเข้มข้นสารที่แน่นอนและผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

หลังจากสังเคราะห์และผสมสารโครงสร้างของโพลีเมอร์นาโนแล้ว เมื่อนำมาวัดขนาดของอนุภาคด้วย distribution particles size ผลการตรวจวัด พบว่าขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 50 – 130 นาโนเมตร คิดเป็น 58.57 % ของปริมาณสารละลายนาโนโพลีเมอร์ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อนำมาสร้างเป็นแผนภูมิภาพจะมีลักษณะคล้ายรูปประฆังคว่ำ โดยพบขนาดอนุภาค 50 – 90 นาโนเมตร มากที่สุด คือ 48.84 % ของปริมาณสารละลายนาโนโพลีเมอร์ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อนุภาคที่มีขนาดต่างกันทั้งนี้เพราะความเร็วในขั้นตอนการกวนของเครื่องกวนเพื่อให้สารโพลีเมอร์แตกกระจายอนุภาคระดับนาโนเมตร สารโพลีเมอร์ที่กวนแล้วเมื่อได้อนุภาคนาโนเมตรแล้ว จากการสังเกตด้วยสายตา มีลักษณะเป็นอิมัลชัน สีน้ำตาลใส (Tungittiplakorn et al., 2004; Karnchanasest and Santisukkasaem, 2007)



รูปที่ 4.1 ขนาดของอนุภาคโพลีเมอร์นาโนจากการตรวจวัดด้วย distribution particles size analysis

ตารางที่ 4.1 ขนาดของสารนาโนโพลีเมอร์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ 3 ครั้ง

| ขนาดอนุภาค<br>(นาโนเมตร) | สารโพลีเมอร์     |                             |                  |                             |                  |                             |                  |                             |
|--------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
|                          | ครั้งที่ 1       |                             | ครั้งที่ 2       |                             | ครั้งที่ 3       |                             | เฉลี่ย           |                             |
|                          | ปริมาณ<br>(กรัม) | %<br>(ก./ซม. <sup>3</sup> ) | ปริมาณ<br>(กรัม) | %<br>(ก./ซม. <sup>3</sup> ) | ปริมาณ<br>(กรัม) | %<br>(ก./ซม. <sup>3</sup> ) | ปริมาณ<br>(กรัม) | %<br>(ก./ซม. <sup>3</sup> ) |
| 50                       | 0.07             | 7.33                        | 0.08             | 7.64                        | 0.07             | 7.36                        | 0.07             | 7.44                        |
| 60                       | 0.11             | 11.17                       | 0.12             | 11.54                       | 0.11             | 11.23                       | 0.11             | 11.31                       |
| 70                       | 0.12             | 11.74                       | 0.12             | 12.03                       | 0.12             | 11.83                       | 0.12             | 11.87                       |
| 80                       | 0.10             | 10.21                       | 0.10             | 10.36                       | 0.10             | 10.31                       | 0.10             | 10.29                       |
| 90                       | 0.08             | 7.89                        | 0.08             | 7.93                        | 0.08             | 7.98                        | 0.08             | 7.93                        |
| 110                      | 0.06             | 5.70                        | 0.06             | 5.68                        | 0.06             | 5.78                        | 0.06             | 5.72                        |
| 130                      | 0.04             | 3.99                        | 0.04             | 3.95                        | 0.04             | 4.06                        | 0.04             | 4.00                        |
| มากกว่า 130              | -                | 41.97                       | -                | 40.87                       | -                | 41.45                       | -                | 41.43                       |

ตารางที่ 4.1 เมื่อแยกขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค จากการสังเคราะห์เพื่อใช้ศึกษาครั้งนี้ พบว่าสารโพลีเมอร์ ขนาด 70 นาโนเมตร มีปริมาณมากที่สุด คือ 11.87 % รองลงมาคือ ขนาด 60 และ 80 นาโนเมตร โดยมีปริมาณ 11.31% และ 10.29 % ตามลำดับ เมื่อแยกเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีช่วงขนาดระหว่าง 50 – 90 นาโนเมตร มีปริมาณ 48.84 % กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 110 – 130 นาโนเมตร มีปริมาณ 9.72 % และยังมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 130 นาโนเมตร ที่ไม่ได้แสดงให้เห็นอยู่อีกประมาณ 41 %



ตารางที่ 4.2 ชนิดและขนาดของสารนาโนโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์เพื่อใช้ศึกษาการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม

| อนุภาคโพลิเมอร์<br>ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทน | ขนาดอนุภาค<br>(นาโนเมตร) | การศึกษาของแหล่งต่าง ๆ                     |
|--|--------------------------|--|
| APU โชนโมเลกุลชนิด UAN                       | น้อยกว่า 32.10           | Kim et al. (2003)<br>Kim et al. (2004)     |
| APU โชนโมเลกุลชนิด UAN                       | 23.40                    | Kim et al. (2003)                          |
| APU โชนโมเลกุลชนิด UAA                       | 15 - 60                  | Tungittiplakorn et al. (2004)              |
| APU โชนโมเลกุลชนิด PMUA                      | 60-80                    | Tungittiplakorn et al. (2004)              |
| APU โชนโมเลกุลชนิด PMUA                      | 80 - 110                 | Karnchanasest and santisukkasaem<br>(2007) |
| APU โชนโมเลกุลชนิด PMUA                      | 50 – 130                 | ผลการศึกษารั้งนี้                          |

APU, amphiphilic polyurethane; UAN, urethane acrylate nonionomer; UAA, urethane acrylate anionomer; PMUA , poly (ethylene glycol) modified urethane acrylate

ตารางที่ 4.2 การสังเคราะห์สารนาโนโพลิเมอร์ ในครั้งนี้เมื่อเทียบกับผลการศึกษาค้นพบว่าอนุภาคสารนาโนโพลิเมอร์ มีค่าใกล้เคียงหรือต่างกันเล็กน้อย โดยจากการสังเคราะห์ของ Tungittiplakorn และคณะ (2004) กับ Karnchanasest และ Santisukkasaem (2007) สามารถสังเคราะห์ได้ในอนุภาคขนาด ที่อยู่ระหว่าง 60 – 80 นาโนเมตร และ 80 – 110 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้อนุภาคมีขนาดไม่เท่ากัน เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ อาทิ เครื่องมือที่ใช้กวนซึ่งมีลักษณะไม่เหมือนกัน เช่น ขนาดของใบพัดที่ใช้สำหรับกวน เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 สมบัติของดิน

### 4.2.1 ดินที่ใช้ทดสอบและดินปนเปื้อน

ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบและดินที่ปนเปื้อนเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติของดินบางประการปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 สมบัติของดินที่ใช้ทดสอบ

| สมบัติของดิน                                       | ตัวอย่างดิน |                   |               |               |                   |
|--|-------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|
|  | 1           | 2                 | 3             | 4             | 5                 |
| 1.เนื้อดิน   | ดินร่วน     | ดินร่วน<br>เหนียว | ดิน<br>เหนียว | ดิน<br>เหนียว | ดินร่วน<br>เหนียว |
| 2. % อนุภาคดิน                                     |             |                   |               |               |                   |
| ทราย   | 40.20       | 41.80             | 21.80         | 13.80         | 43.80             |
| ทรายแป้ง   | 35.60       | 26.00             | 25.80         | 21.80         | 27.80             |
| ดินเหนียว  | 24.20       | 32.20             | 52.40         | 64.4          | 28.40             |
| 3. ความเป็นกรด - ด่าง                              | 4.87        | 4.84              | 5.20          | 5.42          | 6.71              |
| 4. % คาร์บอนอินทรีย์                               | 0.92        | 1.35              | 1.66          | 1.83          | 2.51              |
| 5. ความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวก<br>(เมก./100 กรัม) | 4.80        | 7.10              | 14.60         | 11.30         | 18.90             |

|          |   |                             |
|----------|---|-----------------------------|
| หมายเหตุ | 1 | = ดินปลูกมันสำปะหลัง        |
|          | 2 | = ดินปลูกยางพารา            |
|          | 3 | = ดินนา                     |
|          | 4 | = ดินปลูกข้าวโพด            |
|          | 5 | = ดินพื้นที่อาศัยของชุมชน 1 |

ตารางที่ 4.4 สมบัติของดินปนเปื้อน

| สมบัติของดิน                                       | ตัวอย่างดิน |                   |         |                   |
|--|-------------|-------------------|---------|-------------------|
|  | 6           | 7                 | 8       | 9                 |
| 1. เนื้อดิน  | ดินทราย     | ดินร่วน<br>ปนทราย | ดินทราย | ดินเหนียว<br>ร่วน |
| 2. % อนุภาคดิน                                     |             |                   |         |                   |
| ทราย   | 55.00       | 52.63             | 71.43   | 43.80             |
| ทรายแป้ง   | 46.00       | 36.84             | 23.81   | 27.80             |
| ดินเหนียว  | 5.00        | 10.53             | 4.76    | 28.40             |
| 3. ความเป็นกรด - ด่าง                              | 5.20        | 5.92              | 5.12    | 6.71              |
| 4. % คาร์บอนอินทรีย์                               | 0.21        | 0.44              | 0.72    | 2.51              |
| 5. ความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวก<br>(เมก./100 กรัม) | 6.78        | 12.52             | 4.50    | 18.90             |

|          |   |                          |
|----------|---|--------------------------|
| หมายเหตุ | 6 | = ดินปลูกข้าวคุณประชิด   |
|          | 7 | = ดินปลูกข้าวพ่อเลา 1    |
|          | 8 | = ดินปลูกข้าวพ่อเลา 2    |
|          | 9 | = ดินพื้นที่อาศัยชุมชน 2 |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**เนื้อดิน และอนุภาคของดิน** จากตัวอย่างดินทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อจำแนกเนื้อดินพบดินเหนียวและดินร่วนเหนียวเป็นส่วนใหญ่ รองลงมาเป็น ดินร่วน ส่วนตัวอย่างดินปนเปื้อน จำนวน 4 ตัวอย่าง พบเนื้อดินเป็นดินทรายเป็นส่วนใหญ่ รองลงมา เป็นดินร่วนปนทราย และดินเหนียว ตามลำดับ โดยจำแนกสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคดิน เป็น 3 กลุ่มคือ อนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เรียกชนิดดินแต่ละประเภทตามสัดส่วนที่มากที่สุดเป็นหลัก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545) ดินจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำและถ่ายเทอากาศไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอนุภาคดิน เพราะอนุภาคทำให้เกิดช่องว่าง (pore) ระหว่างอนุภาคของดิน ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับและการคายน้ำและอินทรีย์วัตถุในดิน ดินเหนียวมีอนุภาคขนาดเล็ก คือ ต่ำกว่า 0.02 มิลลิเมตร ทำให้มีช่องว่างภายในดินน้อยน้ำสามารถผ่านได้น้อยแต่ดูดซับอินทรีย์วัตถุได้ดีเช่นกัน ในขณะที่ดินร่วนและดินทราย มีอนุภาคดินที่ใหญ่กว่าทำให้เกิดช่องขนาดใหญ่ น้ำสามารถไหลผ่านได้ดีกว่า ทำให้น้ำพาอินทรีย์วัตถุเข้าสู่เนื้อดินได้เร็วกว่า แต่การดูดซับสารอินทรีย์ได้น้อยกว่าดินเหนียวเพราะสามารถถูกชะพาโดยน้ำที่อยู่ในช่องดินออกมาได้ง่ายกว่า (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545)

**ความเป็นกรด – ด่าง ของดิน** จากตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าเป็นกรด – ด่าง อยู่ช่วง 4.84 – 6.71 ซึ่งสภาพดินมีระดับความเป็นกรดจัดถึงระดับกลาง และจากตัวอย่างดินปนเปื้อนจำนวน 4 ตัวอย่าง มีค่าความเป็นกรด – ด่าง อยู่ช่วง 5.12 – 6.71 สภาพดินมีระดับความเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับกลาง โดยการจำแนกระดับกรดและด่างได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของดิน สภาพของดินที่เป็นกรดหรือด่างสาเหตุหลักเกิดจากวัตถุดิบกำเนิดของดินและการเปลี่ยนไอออนในดินกับน้ำ ทั้งนี้จึงมีการตรวจวัดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์เพื่อหาการแตกตัวของไอออนในดิน ดินที่มีการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนบวก ( $H^+$ ) มากจะมีความเป็นกรดมากตรงกันข้ามไฮโดรเจนไอออนบวกน้อยจะมีสภาพเป็นกลางถึงสภาพด่างได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545) แม้ในดินจะทำปฏิกิริยาในทางตรงกับสารอินทรีย์หรือสารมลพิษอินทรีย์ที่อยู่ในดินได้น้อยก็ตามเนื่องจากสภาพที่ไม่มีขั้วของสาร เมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์ที่มีขั้วและทำปฏิกิริยากับดินได้โดยตรง แต่ถ้าดินมีน้ำเข้ามาเป็นส่วนประกอบหรือเกี่ยวข้องกับ จะทำให้สารอินทรีย์เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารเอ็น โคซัลเฟนเมื่ออยู่ในดินที่มีความชื้นสูงหากดินมีสภาพเป็นกรดหรือด่าง จะทำให้เกิดการสลายตัวได้รวดเร็วกว่าสภาพดินที่เป็นกลางและความชื้นต่ำ (Schwarzenbach et al., 1993) เพราะน้ำมีส่วนที่ทำให้ไอออนในดินรวมถึงแร่ธาตุเกิดการแตกตัวได้ง่าย โดยไอออนบวกจากน้ำไอออนบวกจากน้ำจะไล่ไอออนบวกที่อยู่ในดินให้เป็นอิสระถ้าหากถูกน้ำชะพาไอออนบวกเหล่านี้ไปรวมกันดินบริเวณต่าง ๆ ก็จะเกิดสภาพที่เป็นกรดได้สูง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545)

**ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์** จากตัวอย่างดินทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่าง มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.92 %– 2.51 % และตัวอย่างดินปนเปื้อนจำนวน 4 ตัวอย่าง พบปริมาณอินทรีย์คาร์บอน อยู่ระหว่าง 0.27 % - 2.51 % โดยอินทรีย์คาร์บอนเป็นค่าบ่งชี้ถึงความอุดมสมบูรณ์ของดินซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์และทับถมเป็นเวลานาน คาร์บอนอินทรีย์ มีบทบาทสำคัญในการช่วยดูดซับแร่ธาตุต่าง ๆ รวมถึงสารอินทรีย์และมลพิษอินทรีย์ เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคดินและมีความสามารถในการดูดซับอออนบวกและอออนลบได้ดี จึงเป็นตัวสำคัญต่อความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545)

**ความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวก** ตัวอย่างดินทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่างและดินปนเปื้อนจำนวน 4 ตัวอย่าง เมื่อทำการวิเคราะห์หาความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวก พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 4.80 – 18.90 และ 4.50 – 18.90 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวกของดินบ่งบอกถึงความสามารถของคอลอยด์ที่ดูดซับปริมาณอออนบวกไว้ได้ดี ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงจะมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวกสูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวต่ำ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545) จากตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 4 ของดินทดสอบ มีความสัมพันธ์กันคือเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงทำให้พบค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวกสูง และตัวอย่างที่ 1 ของดินที่ใช้ทดสอบ กับตัวอย่างที่ 6, 7 และ 8 ของดินปนเปื้อน มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวต่ำ ทำให้มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนต่ำเช่นกัน แต่ในตัวอย่างที่ 5 ของดินทดสอบและตัวอย่างที่ 9 ของดินปนเปื้อน ความสัมพันธ์ไม่สอดคล้องกับที่กล่าวมา ทั้งนี้เพราะเกิดจากคาร์บอนอินทรีย์ในดินที่ประกอบด้วยฮิวมัสปริมาณมาก ซึ่งฮิวมัสนี้จะค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนบวกอยู่สูงเช่นกัน ในดินที่มีค่าคาร์บอนอินทรีย์สูงจึงทำให้ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอออนสูงตามไปด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2545)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3 การปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน

#### 4.3.1 ดินที่ใช้ทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ดิน จำนวน 5 ตัวอย่าง ไม่พบ การปนเปื้อนของสารเอ็นโดซัลแฟน ทั้ง 3 ชนิด

#### 4.3.2 ดินปนเปื้อน

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนจากดินที่เก็บพื้นที่ปนเปื้อน จำนวน 4 ตัวอย่าง พบว่ามีการปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนในดินปนเปื้อน

| ตัวอย่าง | ปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟน (ไมโครกรัม/กิโลกรัม) |        |        |
|----------|--|--------|--------|
|          | แอลฟา                                      | เบตา   | ซัลเฟต |
| 6        | 0.0712                                     | 0.0426 | 0.0207 |
| 7        | 0.0729                                     | 0.0707 | 0.0140 |
| 8        | 0.0294                                     | nd     | 0.1507 |
| 9        | nd   | 0.7777 | 0.1418 |

หมายเหตุ nd (not detected) = วิเคราะห์ไม่พบ

6 = ดินปลูกข้าวคุณประชิด

7 = ดินปลูกข้าวพ่อเตา 1

8 = ดินปลูกข้าวพ่อเตา 2

9 = ดินพื้นที่อาศัยชุมชน 2

ตารางที่ 4.5 พบสารเอ็นโดซัลแฟนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างดินเกือบทุกตัวอย่าง ในช่วง 0.01 – 0.77 ไมโครกรัม/กิโลกรัม เมื่อพิจารณาตัวอย่างดินที่ 9 หรือ ดินพื้นที่อาศัยชุมชน 2 พบสารเอ็นโดซัลแฟน เบตา มากกว่าทุกตัวอย่าง โดยมีปริมาณ 0.7777 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ทั้งนี้ เนื่องจากสภาพพื้นที่ตัวอย่างอยู่ในเขตชุมชน และจากการสังเกตของผู้ศึกษาพบว่าในบริเวณพื้นที่ เคยมีการกักเก็บสารฆ่าแมลงหลายชนิดเพื่อใช้ในการเกษตรอยู่จำนวนมากมาก่อน รวมถึงสาร



เอ็นโดซัลแฟน ทำให้เกิดการปนเปื้อนในดินบริเวณนั้น และทำให้ค่าสูงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟน ที่ปนเปื้อนในดินโดยทั่วไปในประเทศไทย เช่นพื้นที่ภาคเหนือ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.09-0.28 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ซึ่งนับว่ามีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างที่ตรวจวัดในครั้งนี้ แม้มาตรฐานปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนที่ยอมให้มีการปนเปื้อนในดิน ยังไม่มีการกำหนดจากหน่วยงานใดในประเทศไทย แต่กรมอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา (New York State Department of Environmental Conservation, 2006) ได้กำหนดค่าความสะอาดในดินที่ให้มีสารเอ็นโดซัลแฟน ปนเปื้อนได้น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.9 – 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เมื่อเทียบกับผลการศึกษานี้ พบว่าค่าไม่เกินมาตรฐาน อย่างไรก็ตามถึงจะพบในปริมาณน้อยแต่สามารถแพร่กระจายไปยังแหล่งสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตที่จะได้รับ ทางห่วงโซ่อาหาร และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำ

##### 4.4.1 ขีดจำกัดในการตรวจวัดสารของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ความเข้มข้นต่ำสุดของสารเอ็นโดซัลแฟนที่สามารถตรวจวัดได้ (LOD ; limit of detection) ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้สารละลายมาตรฐานเอ็นโดซัลแฟน ทั้ง 3 ชนิด ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัม/ลิตร

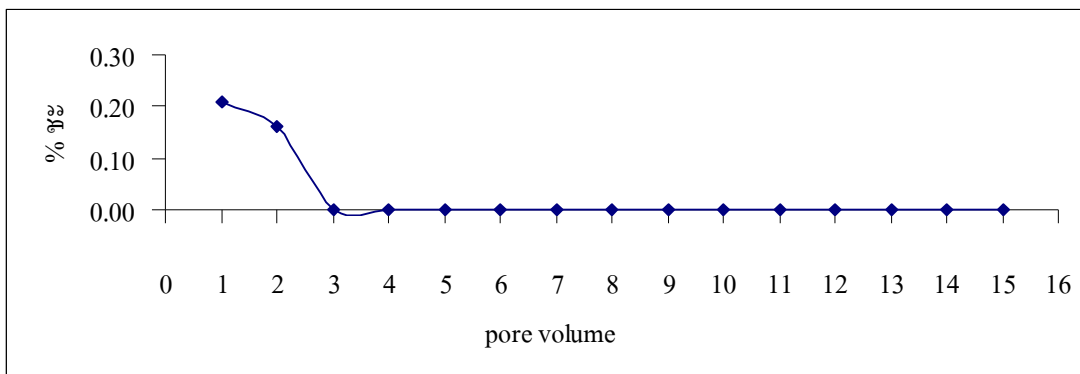
##### ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารเอ็นโดซัลแฟน ทั้ง 3 ชนิด

| สาร                | ความเข้มข้นต่ำสุด (LOD) (ไมโครกรัม/ลิตร) |
|--------------------|--|
| เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา  | 0.0027                                   |
| เอ็นโดซัลแฟนเบตา   | 0.0021                                   |
| เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต | 0.0025                                   |

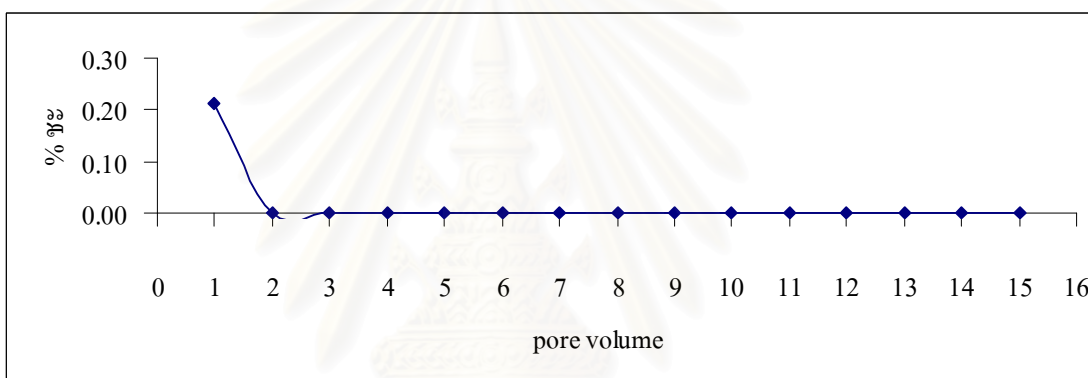
LOD เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือ ว่ามีขีดความสามารถในการตรวจวัดสารได้เพียงใด ซึ่งจากตารางที่ 4.6 พบว่า LOD มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0021 – 0.0027 ไมโครกรัม/ลิตร แสดงให้เห็นว่าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความสามารถในการตรวจวัดสารได้ในระดับที่ต่ำกว่า 1 ไมโครกรัม/ลิตร

#### 4.5 การชะสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน

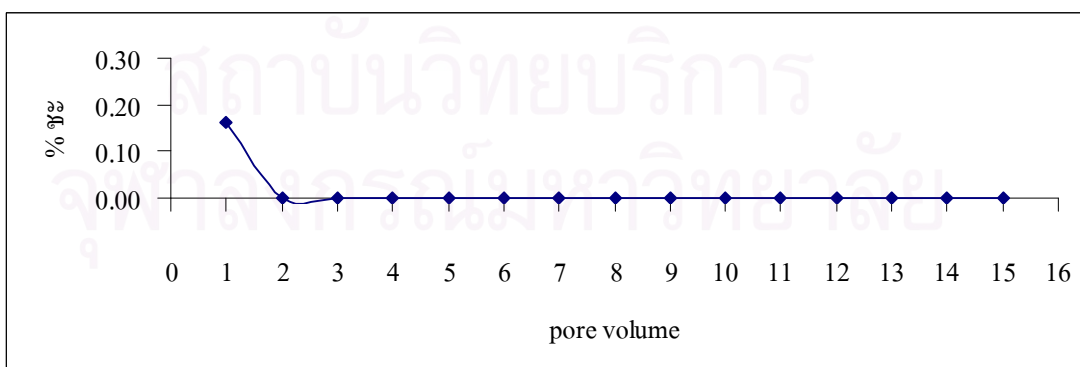
ใช้น้ำแยกอออนเป็นตัวชะ ผ่านคอลัมน์ดินที่ผสมสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ลงในดิน 30 กรัม ซึ่งกำหนดให้สารอยู่ในดินที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ใช้อัตราการไหลชะคงที่ คือ 20 มิลลิลิตร/นาที่ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างของเหลวหลังจากที่ถูกน้ำแยกอออนชะผ่าน แต่ละ pore volume ไปสกัดเพื่อหาปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนทั้งหมดที่ชะออกมากับน้ำ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 – รูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าสารเอ็นโดซัลแฟนถูกชะด้วยน้ำแยกอออนในปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ ค่าการละลายในน้ำ (solubility) โดยทั่วไปของสารเอ็นโดซัลแฟน คือ ตั้งแต่ 0.22 – 0.53 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อคำนวณปริมาณสารที่ถูกชะออกมาในค่าเปอร์เซ็นต์ พบว่าสารเอ็นโดซัลแฟน แอลฟา เอ็นโดซัลแฟน เบตา และเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ถูกชะได้ 0.37 %, 0.21 % และ 0.16 % ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะสารเอ็นโดซัลแฟนเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์โมเลกุลไม่มีขั้ว (Pignatello and Xing, 1996) ละลายกับน้ำได้น้อย และเมื่อสารสะสมในสิ่งแวดล้อมที่ลักษณะแตกต่าง เช่น ชั้นดิน หรือดินตะกอน ทำให้สารเกิดการเคลื่อนได้มากน้อยตามสภาพโครงสร้างของดิน อีกทั้งอาศัยปัจจัย การดูดซับสารจากคาร์บอนอินทรีย์ที่อยู่ในดินด้วย ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสารเอ็นโดซัลแฟนถูกชะออกจากดินได้น้อยโดยการไหลพาของน้ำ เพราะถูกยึดไว้ด้วยดินเป็นส่วนมาก ซึ่งปริมาณสารที่ถูกชะในแต่ละ pore volume ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ



**รูปที่ 4.2** ปริมาณสารเอ็นโดซัลเฟนแอลฟา ในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอออน ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที



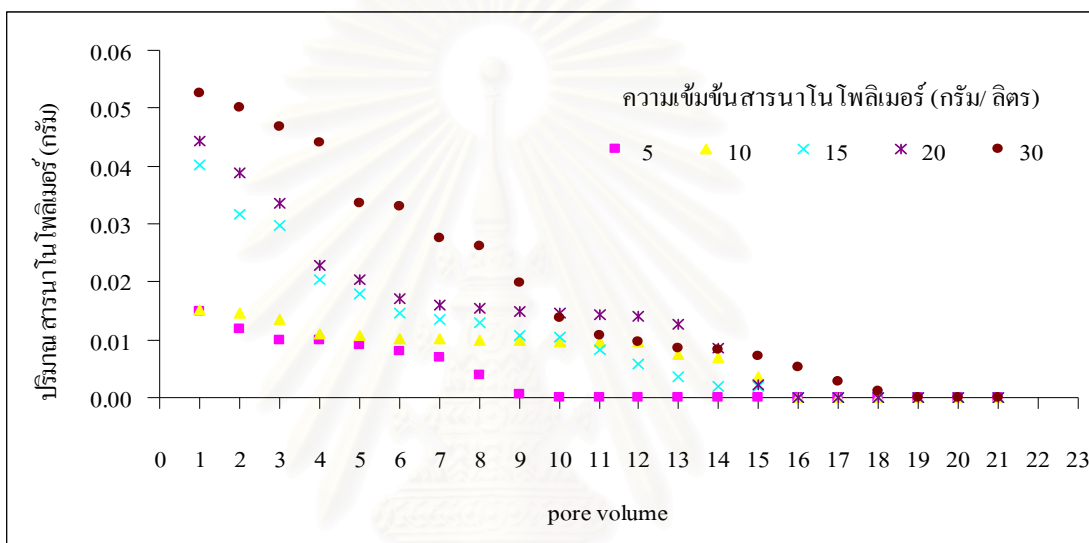
**รูปที่ 4.3** ปริมาณสารเอ็นโดซัลเฟนเบตาในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอออน ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที



**รูปที่ 4.4** ปริมาณสารเอ็นโดซัลเฟนซัลเฟตในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอออน ที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที

#### 4.6 การชะสารถานาโนโพลีเมอร์ในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน

เมื่อใส่สารถานาโนโพลีเมอร์จากปริมาณเริ่มต้น คือ 0.0800, 0.1600, 0.2475, 0.3100 และ 0.4800 กรัม หรืออัตราส่วนของปริมาตร 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร ลงคอลัมน์ดินเมื่อทำการชะด้วยน้ำแยกอออน พบว่ามีปริมาณสารสูงใน pore volume แรก ๆ และลดลงไปเรื่อย ๆ จนตรวจไม่พบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยสารถานาโนโพลีเมอร์ถูกชะออกมาได้มากในช่วง pore volume ที่ 1 – 9 จากนั้นจะค่อยลดลงจนตรวจไม่พบตั้งแต่ pore volume ที่ 10 เป็นต้นไป



รูปที่ 4.5 ปริมาณสารโพลีเมอร์นาโน (กรัม) ในแต่ละ pore volume ที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ดิน (30 กรัม) ด้วยน้ำแยกอออนที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร / นาที

จากปริมาณสารโพลีเมอร์นาโนเริ่มต้น ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถถูกชะออกมาได้ปริมาณ 0.0749, 0.1518, 0.2242, 0.2896 และ 0.4005 กรัม ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกลับคืนอยู่ระหว่าง 90 % - 94 % ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข ทั้งนี้เมื่อนุภาคนาโนโพลีเมอร์จะไม่จับตัวกับอนุภาคดิน (Kim et al., 2004) แต่ก็ไม่สามารถถูกชะออกมาได้หมดนั้น ซึ่งน่าจะมาจากอนุภาคนาโนโพลีเมอร์บางส่วนถูกกักไว้ในช่องขนาดเล็ก (micropore) ของดิน และในขั้นตอนการหาปริมาณนาโนโพลีเมอร์โดยการชั่งน้ำหนักที่อาจคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากการชั่งน้ำหนักที่มีปริมาณสารน้อยมาก จึงเป็นสาเหตุให้สูญเสียปริมาณนาโนโพลีเมอร์ ประมาณ 5 % – 10 %

#### 4.7 การสกัดสารเอ็นโดซัลแฟนที่ปนเปื้อนในสารนาโนโพลิเมอร์

สารเอ็นโดซัลแฟน เข้มข้นสาร 0.5 , 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร (0.0080, 0.0160 และ 0.0320 มิลลิกรัม/ 16 มิลลิลิตร) เมื่อพ่นลงในสารนาโนโพลิเมอร์ เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร หลังจากเขย่าเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำมาสกัดหาปริมาณเอ็นโดซัลแฟน พบว่า สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา เอ็นโดซัลแฟนเบตา และเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ทั้ง 3 ชนิด ถูกสกัดออกมาได้ 91% - 94 %, 92% - 98 % และ 96 % - 99 % ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การกลับคืนของสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด หลังจากใส่ลงในสารนาโนโพลิเมอร์ 0.16 กรัม/ 16 มิลลิลิตร (10 กรัม/ลิตร)

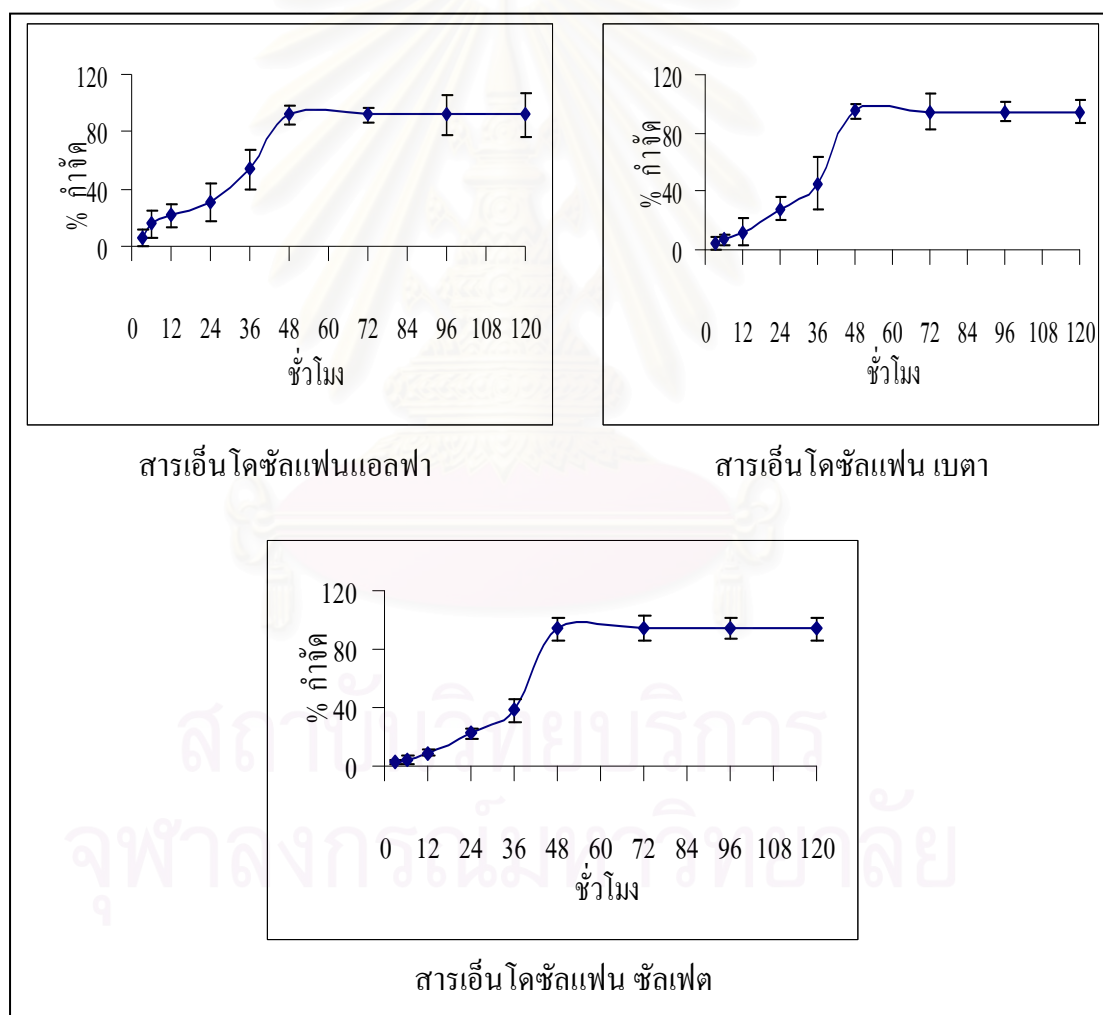
| ความเข้มข้นของสาร<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | การกลับคืนของสาร       |    |                        |    |                        |    |
|---------------------------------------|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|
|                                       | แอลฟา                  |    | เบตา                   |    | ซัลเฟต                 |    |
|                                       | น้ำหนัก<br>(มิลลิกรัม) | %  | น้ำหนัก<br>(มิลลิกรัม) | %  | น้ำหนัก<br>(มิลลิกรัม) | %  |
| 0.5                                   | 0.4500<br>± 0.0022     | 91 | 0.4562<br>± 0.0007     | 92 | 0.4750<br>± 0.0006     | 96 |
| 1                                     | 0.9750<br>± 0.0015     | 92 | 0.9625<br>± 0.0003     | 97 | 0.9812<br>± 0.0002     | 99 |
| 2                                     | 1.8875<br>± 0.0057     | 94 | 1.9500<br>± 0.0022     | 98 | 1.9875<br>± 0.0008     | 99 |

ตารางที่ 4.7 อธิบายได้ว่าสารนาโนโพลิเมอร์สามารถจับกับโมเลกุลของสารเอ็นโดซัลแฟนได้ และเมื่อทำการสกัดโดยใช้อร์มัลเฮกเซนเพื่อแยกสารเอ็นโดซัลแฟนหลุดออกจากสารนาโนโพลิเมอร์ พบว่าการกลับคืนของสารเอ็นโดซัลแฟน อยู่ที่ระหว่าง 91 % - 99 % ทั้งนี้เกิดจากสมบัติของนาโนโพลิเมอร์ เป็นแอมฟิฟิลิก คือดูดซับได้ทั้งน้ำและสารอินทรีย์ โดยอาศัยแรงยึดระหว่างโมเลกุล จึงทำให้สามารถดูดจับสารเอ็นโดซัลแฟนได้ แต่การใช้แรงดูดยึดระหว่างโมเลกุลสารต่ำ จึงทำให้สารเอ็นโดซัลแฟนหลุดออกได้ง่าย เมื่อถูกตัวทำละลายนอร์มัลเฮกเซนเข้ามายึดระหว่างโมเลกุลสารแทน อีกทั้งสมบัติของนอร์มัลเฮกเซนละลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าขณะที่สารนาโนโพลิเมอร์มีน้ำเป็นส่วนประกอบจึงดูดยึดสารเอ็นโดซัลแฟนได้น้อยกว่า การทดสอบนี้บ่งชี้ว่าการทดลองว่าสามารถสกัดด้วยนอร์มัลเฮกเซนออกมาจากนาโนโพลิเมอร์ได้และสามารถยอมรับได้เมื่อนำไปใช้ในการชั้นตอนศึกษาต่อไป



#### 4.8 เวลาที่เหมาะสมในการแช่สารนาโนโพลิเมอร์เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน

สารเอ็นโดซัลแฟน 2 มิลลิกรัม/ลิตร ในคอลัมน์ดิน เมื่อใส่สารนาโนโพลิเมอร์ เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร แล้วแช่ไว้ในคอลัมน์ตามเวลาที่ศึกษา แล้วทำการชะด้วยน้ำแยกอออน เมื่อนำมาหาปริมาณสารตามเวลาที่แช่ ปรากฏว่าสารเอ็นโดซัลแฟนมีปริมาณน้อยและเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงระดับช่วงเวลาที่ 48 ชั่วโมง จึงคงที่ กล่าวคือลักษณะการถูกชะของสารเอ็นโดซัลแฟนจะถูกชะออกมาได้ปริมาณน้อยในช่วงระยะเวลาแรก ๆ จากนั้นปริมาณจะเพิ่มขึ้นจนถึงเวลาที่ 48 ชั่วโมง และจะเริ่มคงที่ตลอดจนถึงเวลาที่ 120 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมดุระหว่างสารเอ็นโดซัลแฟนและสารนาโนโพลิเมอร์ในตัวกลางของน้ำแยกอออนเกิดขึ้นที่ 48 ชั่วโมง ในการแช่สารนาโนโพลิเมอร์ในคอลัมน์ดินที่ปนสารเอ็นโดซัลแฟนแล้วตลอดการศึกษานี้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำจัดสาร เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟตกับระยะเวลาที่แช่สารนาโนโพลิเมอร์ในคอลัมน์ดิน

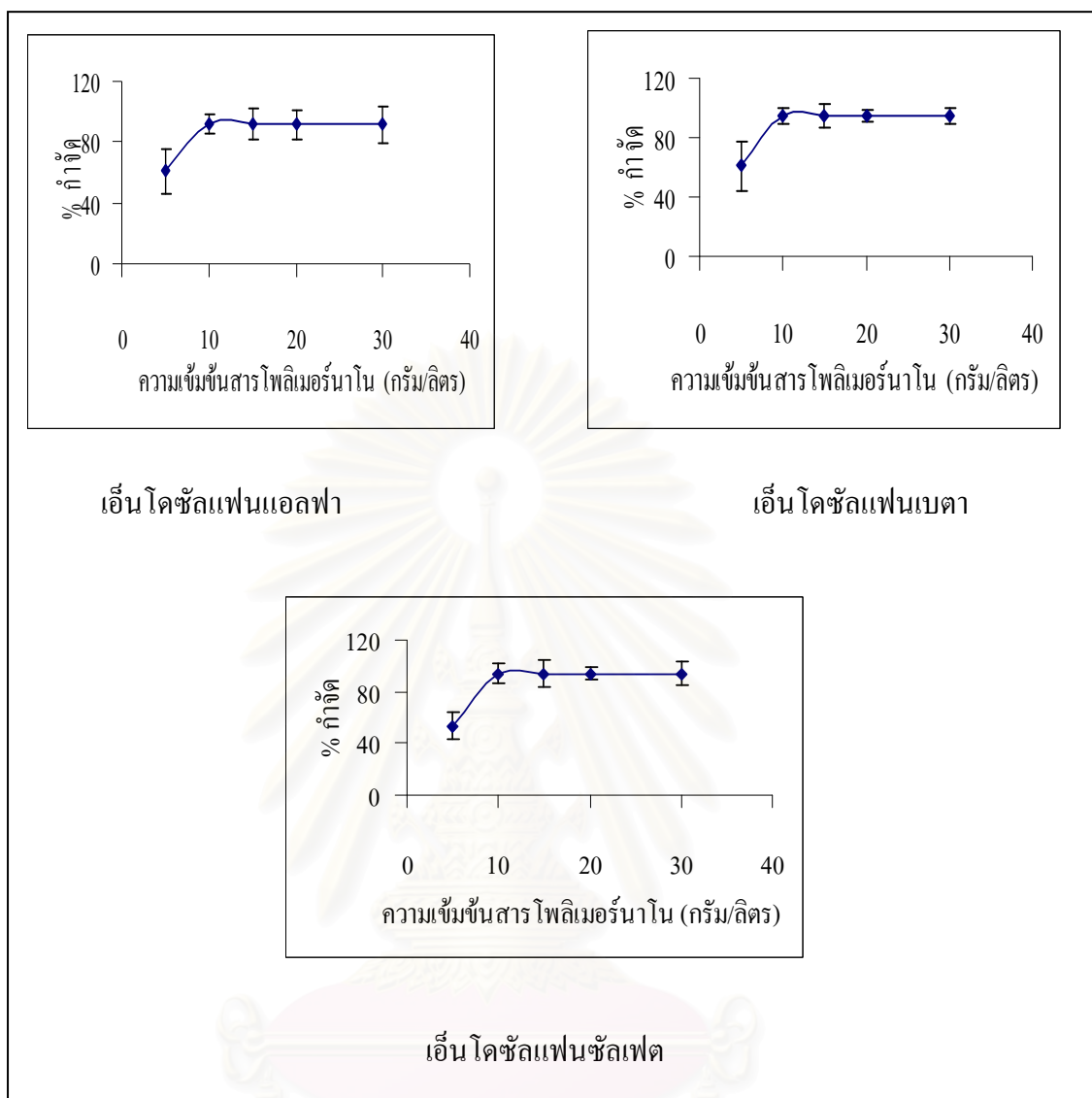
ปริมาณสารเอ็นโคซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การถูกกำจัด พบว่าสารที่ถูกกำจัดออกมาได้ดีที่สุดคือ เอ็นโคซัลแฟนเบตา สามารถกำจัดได้ในช่วง 80% - 84% สารเอ็นโคซัลแฟนซัลเฟตสามารถกำจัดได้ 78% - 89% ส่วนสารเอ็นโคซัลแฟนแอลฟา ถูกกำจัดได้น้อยกว่าสารชนิดอื่น คือ 54% - 61 % ซึ่งน้ำหนักของสารเอ็นโคซัลแฟนหลังจากกำจัดได้แสดงในตารางที่ 1 – ตารางที่ 3 ของภาคผนวก ช

สารเอ็นโคซัลแฟนที่ถูกชะออกมามีปริมาณไม่เท่ากัน เนื่องจากสมบัติของสารเอ็นโคซัลแฟนแอลฟา เบตา และซัลเฟต โดย  $\text{Log } K_{ow}$  มีค่า 3.83 , 3.52 และ 3.66 (ATSDR, 2000) ตามลำดับ จะเห็นว่าสารเอ็นโคซัลแฟนแอลฟา มีค่ามากที่สุด ค่า  $\text{Log } K_{ow}$  บ่งชี้ถึงความสามารถในการถูกดูดซับไว้ในสารอินทรีย์และน้ำ ค่าที่สูงแสดงการถูกดูดซับไว้ในสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ในกรณีของสารเอ็นโคซัลแฟนแอลฟา ซึ่งจะถูกลดซับจากคาร์บอนอินทรีย์ในดินมากกว่า ในสารนาโนโพลิเมอร์ซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ จึงทำให้ถูกกำจัดออกมาได้ปริมาณน้อยกว่าสารเอ็นโคซัลแฟนเบตา และเอ็นโคซัลแฟนซัลเฟต ประกอบกับสารเอ็นโคซัลแฟนสลายตัวได้เร็วกว่าสารทั้ง 2 ชนิด เมื่ออยู่ในสภาวะที่ชื้นหรือถูกกับน้ำ (Rao et al, 1980) รวมถึงอนุภาคสารโพลิเมอร์ซึ่งยังมีบางส่วนเกาะอยู่ในช่องว่างระหว่างดินทำให้สารถูกดูดซับออกมาไม่เท่ากัน

#### 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนกับสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน

เมื่อนำสารนาโนโพลิเมอร์ ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร ใส่น้ำลงในดินที่พ่นสารเอ็นโดซัลแฟนทิ้งแล้ว แช่ไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วชะด้วยน้ำแยกก้อน และนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟน ผลจากการศึกษาพบว่าสารเอ็นโดซัลแฟนแต่ละชนิด ถูกสกัดออกจากสารนาโนโพลิเมอร์ อยู่ที่ระหว่าง 50 % - 94 % ดังรูปที่ 4.7 โดยปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนแต่ละชนิด ที่ถูกสกัดออกจากสารนาโนโพลิเมอร์มีลักษณะแปรผันตามในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 กรัม/ลิตร และเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 10 กรัม/ลิตร ในช่วงนี้ลักษณะของกราฟจึงเริ่มเป็นเส้นตรงหรือคงที่ตลอดจนถึงความเข้มข้นของนาโนโพลิเมอร์ ที่ 30 กรัม/ลิตร ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของนาโนโพลิเมอร์ ที่ 5 กรัม/ลิตร ยังไม่สมดุลกับการดูดซับสารเอ็นโดซัลแฟน จึงทำให้ปริมาณสารที่กำจัดได้ออกมาน้อย คือ ประมาณ 90 % และจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารนาโนโพลิเมอร์ เป็น 10 กรัม/ลิตร พบว่าสารที่ถูกกำจัดออกมาปริมาณมากกว่า ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารนาโนโพลิเมอร์อีกไปจนถึง 30 กรัม/ลิตร ปรากฏว่าสารเอ็นโดซัลแฟนถูกชะออกมาได้ในปริมาณใกล้เคียงกับความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ประมาณ 91 % - 94 % ซึ่งน้ำหนักของสารเอ็นโดซัลแฟนที่กำจัดได้จากสารนาโนโพลิเมอร์เข้มข้นต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ ดังนั้นจะเห็นว่า สารเอ็นโดซัลแฟนถูกดูดซับด้วยสารนาโนโพลิเมอร์ได้มากที่สุดคือ ที่ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร เป็นต้นไป ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นที่ความสมดุลกับการเอ็นโดซัลแฟนมากที่สุดใช้ในการศึกษา

สารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ที่ถูกกำจัดมากที่สุด ประมาณ 90 % - 94 % เมื่อแยกออกเป็นสารแต่ละชนิดที่ถูกกำจัดออกมาได้ จากความเข้มข้นนาโนโพลิเมอร์ 10 กรัม/ลิตร เป็นต้นไป สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ถูกกำจัดออกมาได้ 91 % เอ็นโดซัลแฟนเบตา 94% และ เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต 94 % ตามลำดับ จากปริมาณสารที่ถูกกำจัดได้จะเห็นว่า สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ถูกกำจัดได้น้อยที่สุด จากปัจจัยการสลายตัวได้เร็วกว่า เบตา และ ซัลเฟตในดินและมีความชื้น (Rao et. al, 1980) จึงทำให้สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ถูกกำจัดได้ปริมาณน้อยกว่า สารเอ็นโดซัลแฟน 2 ชนิด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดสารเอ็นโคซัลแฟนกับความเข้มข้นของสารนาโนโพลีเมอร์

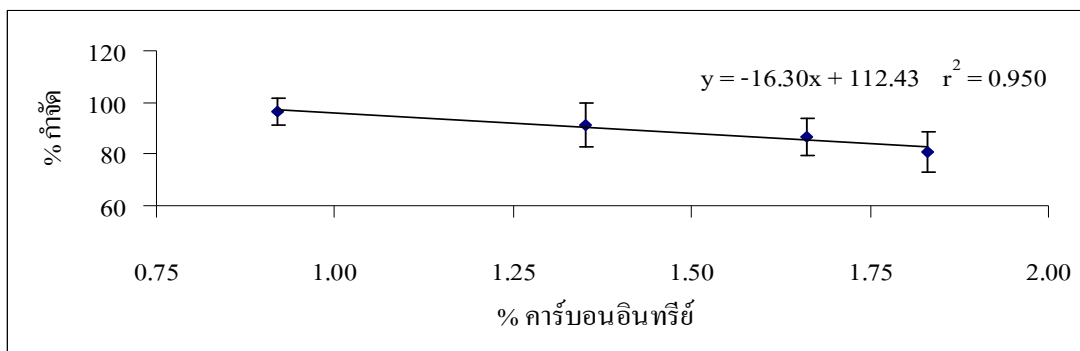
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับอัตราการกำจัดสาร

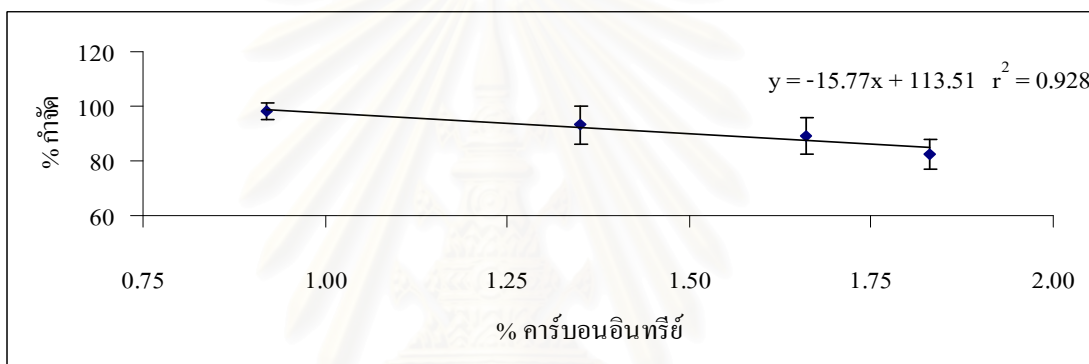
##### 4.10.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ในดิน

เมื่อนำตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบที่มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ต่าง ๆ จำนวน 4 แห่ง มาศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด โดยใช้นาโนโพลิเมอร์เป็นตัวกำจัด เมื่อทำการชะคอลลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออนแล้ว พบว่าสารเอ็นโดซัลแฟน ถูกกำจัดออกมาได้หรือประสิทธิภาพในการกำจัดสูงในดินที่มีค่าคาร์บอนอินทรีย์ต่ำ และประสิทธิภาพจะลดลงในดินที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งค่าที่ถูกกำจัดได้ คือ สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ได้สูงสุดอยู่ที่ 96 % และต่ำสุดอยู่ที่ 80 % , สารเอ็นโดซัลแฟนเบตาสูงสุดอยู่ที่ 98% และต่ำสุดอยู่ที่ 82% และสารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต สูงสุดอยู่ที่ 97 % และต่ำสุดอยู่ที่ 81 % ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าต่ำสุดที่สามารถกำจัดได้พบ ว่าสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา อยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 2 ชนิด ซึ่งได้อภิปรายผลแล้วในการศึกษาปริมาณของสารนาโนโพลิเมอร์ที่เหมาะสมกับการกำจัดสารที่ผ่านมา โดยเกิดจากปัจจัยทางเคมีตัวสารที่มีการสลายตัวได้เร็วกว่า

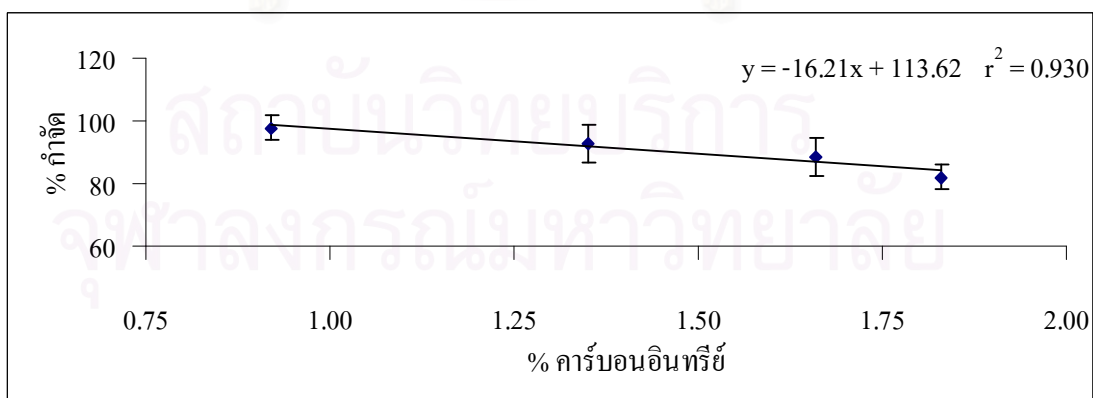
ในรูปที่ 4.8 - รูปที่ 4.10 เป็นความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำจัดของสารเอ็นโดซัลแฟนกับ เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์ของดิน โดยลักษณะของกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงเชิงผกผัน กล่าวคือเปอร์เซ็นต์กำจัด ค่าลดลงเมื่อ เปอร์เซ็นต์หรือปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) ระหว่าง 0.92 - 0.95 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงและเมื่อพิจารณาจากสมการที่แสดง คือ  $y = (M)x + C$  โดย M คือค่าความชัน เมื่อแทนที่สมการต่าง ๆ พบว่า ค่าความชันใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ดังนั้นสารทั้ง 3 ชนิด จึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงขึ้น



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนแอลฟา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน



**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนเบตา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน

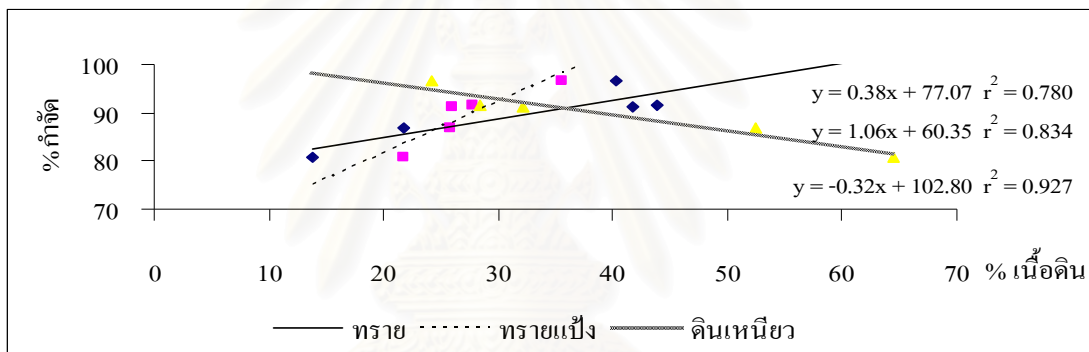


**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนซัลเฟต กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน

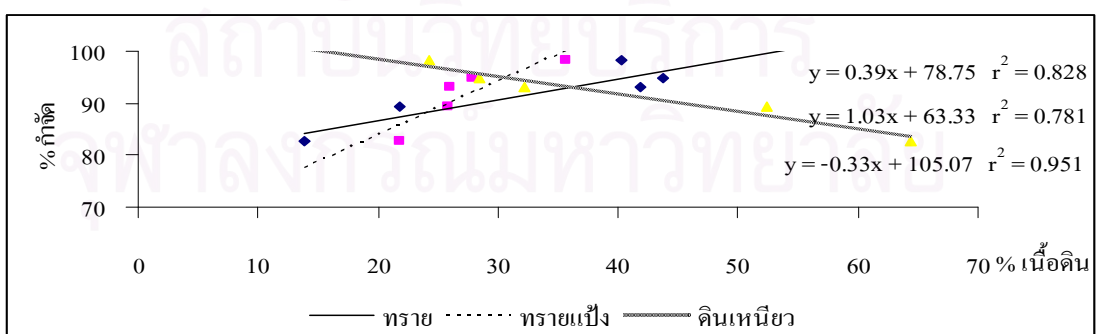


#### 4.10.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารกับเปอร์เซ็นต์เนื้อดิน

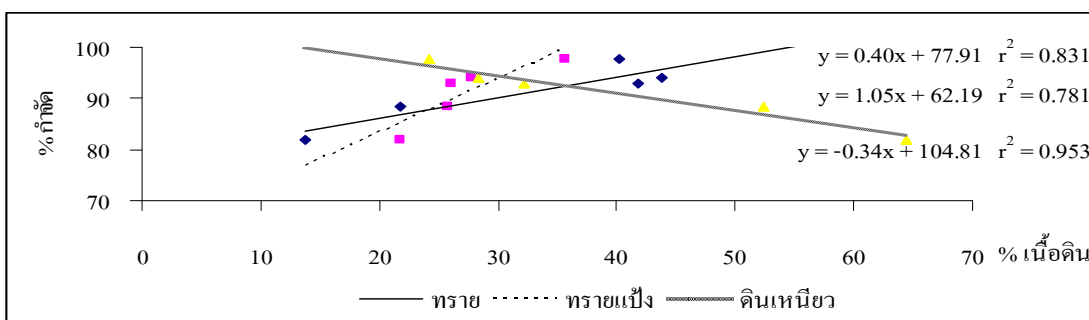
เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิดโดยพิจารณาจากลักษณะของเนื้อดินที่นำมาทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดเนื้อดิน คือ ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – รูปที่ 4.13 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำจัดสารกับชนิดเนื้อดิน มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ทราย และทรายแป้ง จะแปรผันตาม เปอร์เซ็นต์กำจัดสารทั้ง 3 ชนิด และเป็นไปในทิศทางเดียวกันเสมอ แต่ขณะเดียวกัน ดินเหนียว จะแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์กำจัดสาร ที่เป็นไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับดิน 2 ชนิดดังกล่าว ซึ่งแสดงว่าทราย และทรายแป้ง ไม่ได้ช่วยดูดซับสาร ยังมีชนิดเนื้อดินเหล่านี้สูงยังสามารถกำจัดสารได้โดยง่าย ในขณะที่ดินเหนียวซึ่งยังมีชนิดเนื้อดินมากย่อมดูดซับสารได้ดีกว่าจึงยากที่จะกำจัดได้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนเบตา



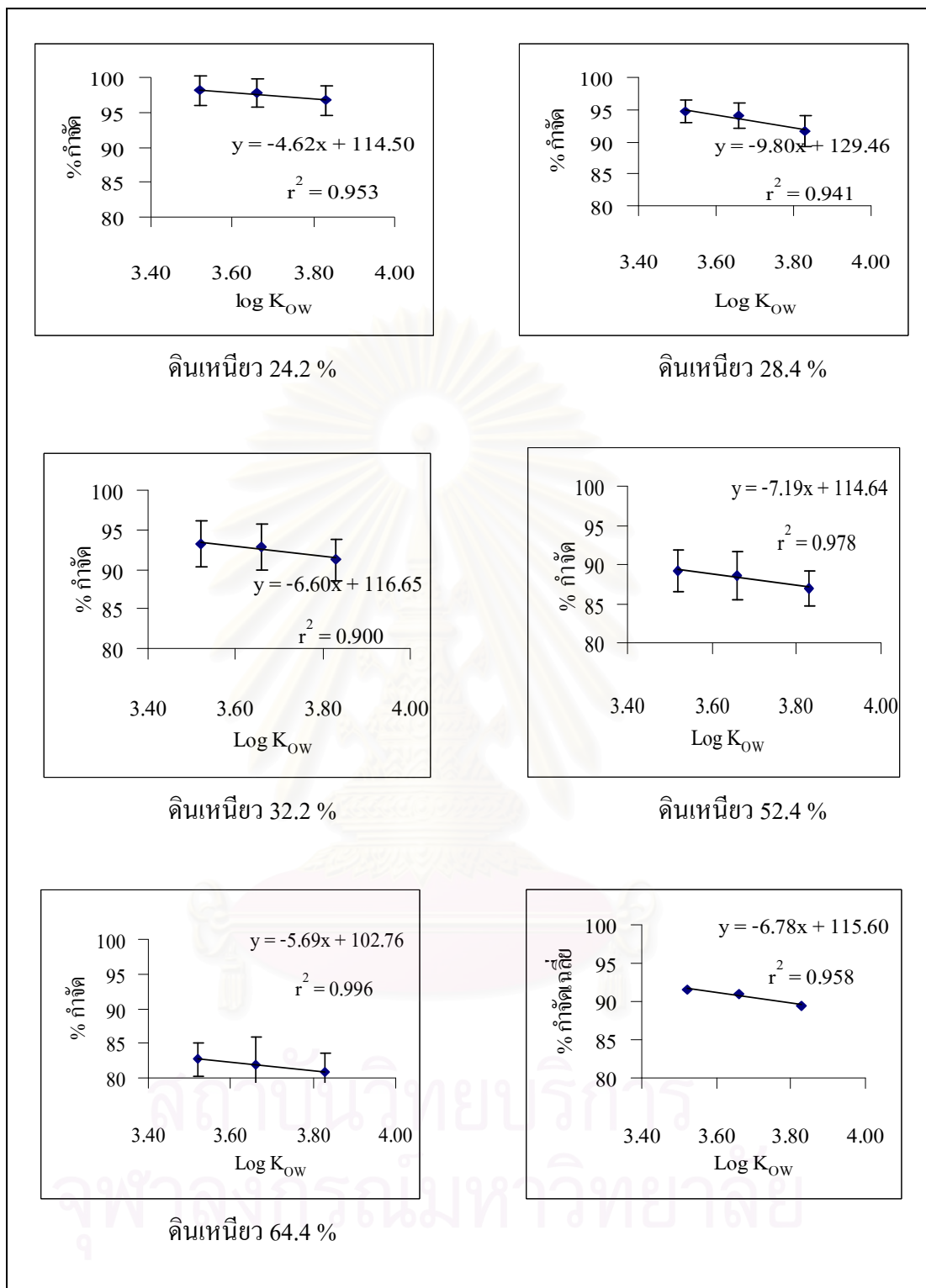
**รูปที่ 4.13** ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เนื้อดินกับประสิทธิภาพการกักตุนน้ำในดินโคลน ทราย และ ทรายแป้ง

โครงสร้างของดินที่มีขนาดหรืออนุภาคของดินต่างกัน เนื้อดินเหนียวมีอนุภาคที่ละเอียด และมีความพรุนสูง แต่มีช่องว่างขนาดเล็ก จึงเกิดพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้มีแรงดึงดูดอินทรีย์วัตถุ ได้สูงด้วย จึงส่งผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ในดินโคลน ทราย และ ทรายแป้งนี้ด้วยเช่นกัน

### 4.10.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่า $\text{Log } K_{ow}$ ของสารเอ็นโดซัลเฟน

เมื่อแยกเฉพาะเปอร์เซ็นต์เนื้อดินเหนียว จากตัวอย่างดิน 5 ตัวอย่าง แล้วแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟนทั้ง 3 ชนิด กับสมบัติของตัวสารเองคือสัมประสิทธิ์การแยกของสารระหว่างชั้นออกตานอลกับน้ำ หรือ  $K_{ow}$  จากชนิดเนื้อดินเหนียวพบว่าปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ กำจัดสารลดลงและค่า  $\text{Log } K_{ow}$  ที่เพิ่มขึ้นตามระดับความไม่ชอบน้ำ หรือชอบไขมัน เปอร์เซ็นต์กำจัดสารก็ลดลงเช่นเดียว ซึ่งจากลักษณะเส้นกราฟในรูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์กำจัดสารจะแปรผกผันกับเนื้อดินเหนียวในทิศทางเดียวกัน และเมื่อเฉลี่ยค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดสารในดินเหนียวทั้ง 5 ชนิด มาสร้างความสัมพันธ์ พบว่าเปอร์เซ็นต์กำจัดสารลดลงในขณะที่ค่า  $\text{Log } K_{ow}$  เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับรูปอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมา

สารที่ค่า  $K_{ow}$  สูงจะถูกดูดซับได้ดีทั้งในดินและสารอินทรีย์ประเภทไขมัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับเนื้อดินเหนียวซึ่งมีอนุภาคเล็ก และพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้เกิดแรงยึดโมเลกุลสารได้ดีกว่า เนื้อดินชนิดหยาบ เช่น ทราย และทรายแป้ง จึงทำให้ดินเหนียวดูดซับได้ดีกว่าเมื่อมีปริมาณมากขึ้น

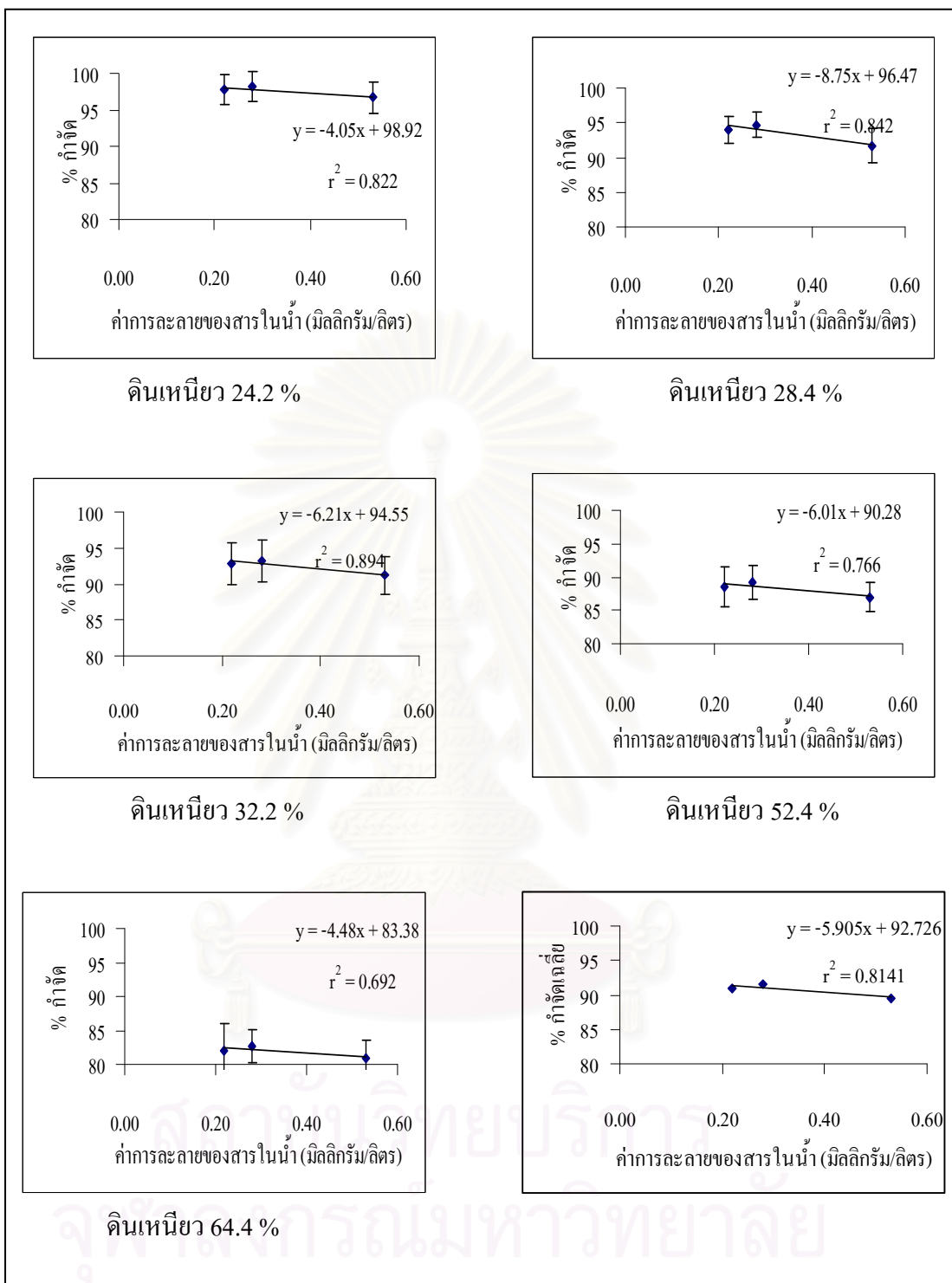


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่า Log K<sub>OW</sub> ของสารเอ็นโดซัลเฟน โดยพิจารณากับชนิดเนื้อดินเหนียว

#### 4.10.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่าการละลายของสารในน้ำ

ตัวอย่างดินเหนียวจำนวน 5 ตัวอย่าง ในรูปที่ 4.15 เมื่อนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด กับสมบัติของตัวสารเอง คือค่าการละลายของสารในน้ำ โดยพิจารณาจากชนิดเนื้อดินเหนียว ซึ่งพบว่าปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น เพอร์เซ็นต์กำจัดสารลดลงและเมื่อดูค่าการละลายของสารที่เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์กำจัดสารก็ลดลงเช่นเดียว ซึ่งจากลักษณะเส้นกราฟในรูปที่แสดง การกำจัดสารจะแปรผกผันตามค่าการละลายในน้ำของสาร เมื่อเฉลี่ยค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดสารในดินเหนียวทั้ง 5 ชนิด มาสร้างความสัมพันธ์กับค่าการละลายสารในน้ำอีกครั้ง พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเช่นเดียวกัน

สารที่มีค่าการละลายน้ำสูงจะมีการเคลื่อนที่สูง โดยการพาหรือชะของน้ำ เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีกว่า เมื่อสารอยู่ในดินจึงมักถูกชะได้มากกว่าสารที่มีค่าการละลายน้ำต่ำ ซึ่งมักจะถูกดูดซับไว้ในดินหรือคาร์บอนอินทรีย์ในดินมากกว่า ดังนั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินในการศึกษานี้ลดลงเมื่อเทียบกับค่าการละลายในน้ำของสารที่กับปริมาณเนื้อดินเหนียวที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดกับค่าการละลายของสารในน้ำของสารเอ็นโดซัลแฟนโดยพิจารณากับชนิดเนื้อดินเหนียว



#### 4.11 การศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลิเมอร์ในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนจากดินปนเปื้อน

จากตัวอย่างดินที่นำมาศึกษาเป็นดินที่มีการปนเปื้อนจากพื้นที่ต่าง ๆ จำนวน 4 แห่งโดยส่วนมากเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่อยู่อาศัย เมื่อนำมาวิเคราะห์หาสารเอ็นโดซัลแฟนที่ปนเปื้อน พบสารเอ็นโดซัลแฟนเกือบทุกตัว ในปริมาณ 0.01 – 0.77 ไมโครกรัม/กิโลกรัม จึงได้นำมาศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลิเมอร์ในการกำจัดสารในดินเช่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างดินทดสอบที่มีการพ่นสารเอ็นโดซัลแฟนลงดินโดยตรงและทราบปริมาณสารที่แน่นอน

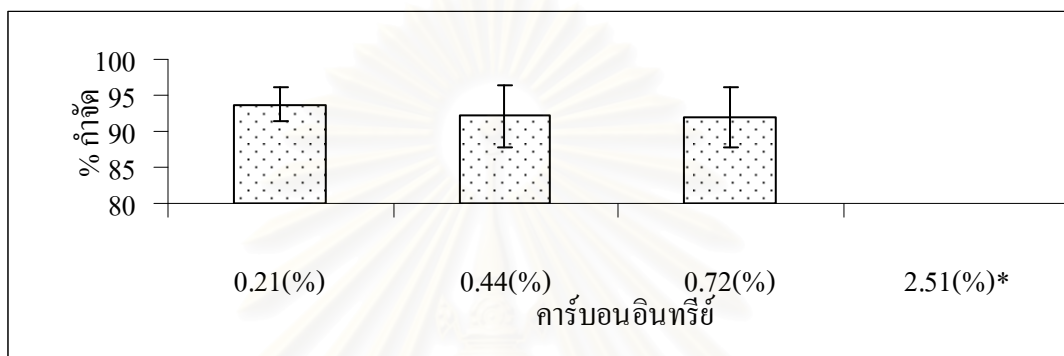
จากการศึกษาโดยการใช้สารนาโนโพลิเมอร์และวิธีการกำจัดซึ่งใช้เงื่อนไขเดียวกันกับดินทดสอบ หลังจากวิเคราะห์สารที่ได้หลังจากสกัดแล้ว พบว่าสามารถกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนได้ในระดับ 91.3 % - 95.31 % ซึ่งปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนที่กำจัดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฎ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดิน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – รูปที่ 4.18 ซึ่งการศึกษากำจัดสารจากตัวอย่างดินปนเปื้อนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างดินทดสอบ

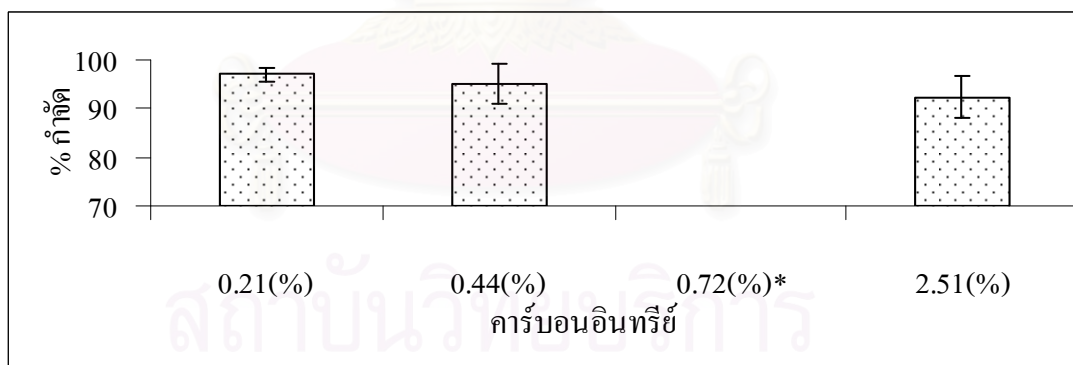
ประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนของดินทดสอบกับดินปนเปื้อน คือดินทดสอบสามารถกำจัดได้ สูงสุด 97 % ส่วนดินปนเปื้อนสามารถกำจัดได้ สูงสุด 95 % เมื่อเปรียบเทียบจะเห็นว่าดินทดสอบสามารถกำจัดสารได้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะเกิดจากสารเอ็นโดซัลแฟนในดินทดสอบที่พ่นยังไม่ถูกดูดซับไว้ในดินและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินได้ทั้งหมด จึงมีโอกาสดังกล่าวจะถูกดึงโดยสารนาโนโพลิเมอร์ได้มากกว่า ส่วนดินปนเปื้อนสารอาจถูกดูดซับไว้ในดินเป็นเวลานานกว่าทำให้โมเลกุลของสารเอ็นโดซัลแฟนถูกยึดไว้ในคาร์บอนอินทรีย์หรือพื้นที่ผิวของอนุภาคดินมากกว่า จึงทำให้การกำจัดสารในดินปนเปื้อนมีปริมาณน้อยกว่า

อีกทั้งในการวิเคราะห์ปริมาณสารเอ็นโดซัลแฟนก่อนนำมากำจัด พบปริมาณการปนเปื้อนในดินน้อยมาก ซึ่งพบในระดับหน่วยไมโครกรัม/กิโลกรัม จึงทำให้เกิดผลการคลาดเคลื่อนได้ในช่วงการศึกษา หรืออาจถูกจับอยู่ในอนุภาคนาโนโพลีเมอร์ที่ยังค้างและถูกชะออกจากคอลัมน์ดินไม่หมด

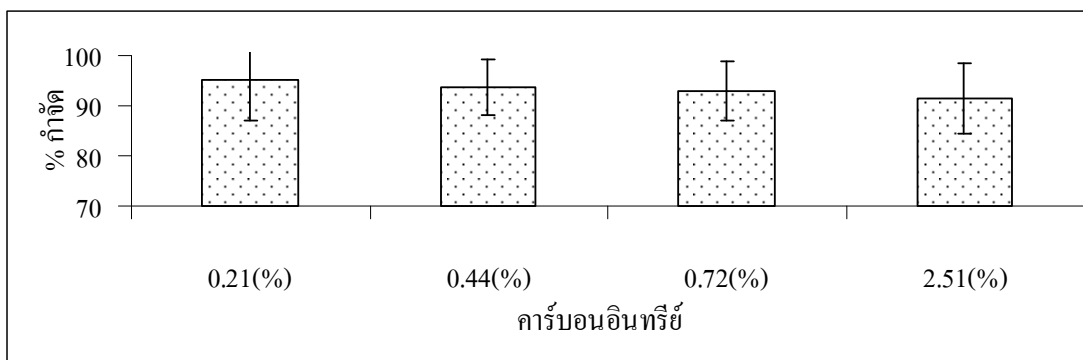
อย่างไรก็ตามถึงแม้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนของดินปนเปื้อนจะต่ำกว่าดินทดสอบ แต่ผลการกำจัดสารถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจได้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนเบตา กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน



**รูปที่ 4.18** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟตกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินปนเปื้อน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินโดยใช้นาโนพอลิเมอร์ชนิดแอมฟีฟิลิกโพลียูรีเทน โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการมีผลสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การสังเคราะห์นาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟีฟิลิกโพลียูรีเทน ที่ประยุกต์ด้วยโซ่โพลีเอทิลีนไกลคอลมอดิฟายด์ยูรีเทนอะครีเลต เมื่อนำไปตรวจหากลุ่ม NCO ที่หลงเหลืออาจอยู่ในโมเลกุลด้วยเครื่อง FT – IR spectrometer ไม่พบสารกลุ่มนี้ปนอยู่ในโมเลกุล และเมื่อทำการผสมสารโครงสร้างของโพลิเมอร์พร้อมทั้งการทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโน อนุภาคที่ได้จากขั้นตอนสังเคราะห์ได้ขนาดอนุภาค 50 – 130 นาโนเมตร

5.1.2 สมบัติดินที่นำมาศึกษา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุดทดลอง คือ ชุดดินทดสอบ และชุดดินปนเปื้อน ชุดดินทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่าง ส่วนมากเป็นดินที่จากพื้นที่เกษตรกรรม มีค่าความเป็นกรด – ด่าง อยู่ระหว่าง 4.87 – 6.81 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ อยู่ระหว่าง 0.92 – 2.51 ความจุในการเปลี่ยนประจุออน อยู่ระหว่าง 4.80 – 18.90 ดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวและดินร่วนเหนียวชุดดินปนเปื้อน จำนวน 4 ตัวอย่าง ส่วนมากเป็นดินจากพื้นที่เกษตรกรรม และจากพื้นที่อาศัย มีค่าความเป็นกรด – ด่าง อยู่ระหว่าง 5.12 – 6.71 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ อยู่ที่ 0.21 – 2.51 ความจุในการเปลี่ยนประจุออนบวก อยู่ที่ 4.50 – 18.90 ลักษณะดินเป็นดินทรายและดินร่วนปนทรายเป็นส่วนใหญ่

5.1.3 การปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน จากการวิเคราะห์ไม่พบการปนเปื้อนสารเอ็นโดซัลแฟนทั้ง 3 ชนิด ในชุดดินทดสอบ แต่พบการปนเปื้อนในชุดดินปนเปื้อนจากสภาพพื้นที่จริง จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยพบสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.0294 – 0.0729 ไมโครกรัม/กิโลกรัม พบสารเอ็นโดซัลแฟนเบตา จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.0426 – 0.7777 ไมโครกรัม/กิโลกรัม และพบสารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต ทั้ง 4 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.0140 – 0.1507 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ทั้งนี้ทุกตัวอย่างดินที่พบสารเอ็นโดซัลแฟนยังมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (ยอมรับให้ได้ที่ 4.73 – 4.79 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Frank et al., 1976; Harris et al., 1977).

5.1.4 การกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินโดยศึกษาเวลาที่สมดุลที่สุดที่สามารถกำจัดสารได้มาก ซึ่งพบว่าเมื่อแ่สารนาโนโพลิเมอร์ไว้ในคอลัมน์ 48 ชั่วโมง จะเกิดประสิทธิภาพในการกำจัดสารสูงสุด ซึ่งสารที่ถูกกำจัดออกมาได้มากที่สุดคือ เอ็นโดซัลแฟนเบตา สามารถกำจัดได้ในช่วง 80% - 84% สารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟตสามารถกำจัดได้ 78% - 89% ส่วนสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา ถูกกำจัดได้น้อยกว่าสารชนิดอื่น คือ 54% - 61 %

5.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารนาโนโพลิเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนกับสารเอ็นโดซัลแฟนในดิน ผลจากการศึกษาพบว่าสารเอ็นโดซัลแฟนแต่ละชนิด ที่ถูกสกัดออกมาจากสารนาโนโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร อยู่ระหว่าง 50 % - 94 % โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 กรัม/ลิตร เป็นต้นไป สารเอ็นโดซัลแฟนแต่ละชนิดถูกสกัดออกจากรานาโนโพลิเมอร์มีลักษณะแปรผันตามความเข้มข้นของสารนาโนโพลิเมอร์คือเปอร์เซ็นต์กำจัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารนาโนโพลิเมอร์ จนถึงความเข้มข้นที่ 10 กรัม/ลิตร จึงเริ่มคงที่ในขณะที่ความเข้มข้นของสารนาโนโพลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเห็นว่าความเข้มข้นที่สมดุลของนาโนโพลิเมอร์อยู่ที่ 10 กรัม/ลิตร

5.1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดินกับอัตราการกำจัดสาร พบว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินที่สูงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารลดลง รวมถึงสภาพโครงสร้างดิน และชนิดเนื้อดิน ซึ่งดินเนื้อละเอียดจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเกิดแรงยึดสูง สามารถดูดซับสารอินทรีย์ไว้ได้ดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารของนาโนโพลิเมอร์ได้ นอกจากนี้รวมถึงสมบัติของสารเอ็นโดซัลแฟน โดยพิจารณาจากค่า  $\text{Log } K_{ow}$  กับอัตราการละลายของสารในน้ำ ซึ่งสมบัติดังกล่าวของสารเอ็นโดซัลแฟนมีต่อการกำจัดสารเช่นกัน โดย ค่า  $\text{Log } K_{ow}$  กับอัตราการละลายของสารในน้ำยิ่งมากขึ้น ยิ่งทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษานี้ใช้สารโพลีเมอร์เพียงชนิดเดียว คือ PMUA เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินจึงควรมีการศึกษาสารโพลีเมอร์ชนิดอื่นเพิ่มที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น UAN, UAA

5.2.2 การสังเคราะห์สารนาโนโพลีเมอร์ควรคำนึงถึงอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำสูงเนื่องจากขั้นตอนในการสังเคราะห์ค่อนข้างมีความละเอียดและซับซ้อนและต้องมีความระมัดระวังในการสังเคราะห์เป็นพิเศษเพราะอาจเกิดความผิดพลาดในระบบและทำให้เสียเวลาได้ เนื่องจากการสังเคราะห์ในแต่ละครั้งซึ่งต้องใช้เวลาานพอสมควร

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมในสมบัติของนาโนโพลีเมอร์ เช่น ระยะเวลาในการจัดเก็บสารเพื่อมิให้เสื่อมสภาพ รวมถึงการคำนวณความคุ้มค่ากับต้นทุนในสังเคราะห์เพื่อการจัดสารแต่ละครั้ง ทั้งนี้เพื่อจะได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการกำจัดโดยวิธีอื่นได้

5.2.4 การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการหากเป็นไปได้ควรประยุกต์นอกภาคสนามหรือออกแบบการทดลองในตัวอย่างดินที่ปริมาณมากกว่านี้



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมวิชาการเกษตร. 2547. ศึกษาการปนเปื้อนของวัตถุมีพิษที่อยู่ในรายการเฝ้าระวังในแม่น้ำสายหลักในภาคกลาง. ในผลการดำเนินงานประจำปี 2546 วิจัยและพัฒนาวิชาการเฉพาะด้าน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กองกัญและสัตววิทยา. 2541. คำแนะนำการป้องกันกำจัดแมลงและสัตว์ศัตรูพืช. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กองแผนงานและวิชาการ. 2540. เทคโนโลยีก้าวหน้าของโครงการลดการใช้สารเคมีทางการเกษตรและโครงการเปลี่ยนกระโดดสีน้ำตาล. ในรายงานการประชุมวิชาการ กรมวิชาการเกษตร ประจำปี 2540. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2543. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ควบคุมมลพิษ. กรม. 2542. การตกค้างของสารอันตรายในสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- จิราพร ศรีพลากิจ. 2543. การตายด้วยพิษจาก endosulfan ที่ Benin. ข่าวสารวัตถุมีพิษ. ปีที่ 27. ชลธิชา นุ่มหอม. 2538. โพลีเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นรินาม. 2006. นาโนเทคโนโลยี: เทคโนโลยีซูเปอร์จิว[Online]. แหล่งที่มา: <http://www.nstda.or.th/html/ar-nanotech.html>. [2549 พฤศจิกายน 5].
- นรินาม. 2006. สารพิษเอ็นโดซัลแฟน[Online]. แหล่งที่มา: [http://www.asoke.info/04Agriculture/OFNT /Appendix/Toxic/main\\_2c\\_toxin.html](http://www.asoke.info/04Agriculture/OFNT /Appendix/Toxic/main_2c_toxin.html). [2549 พฤศจิกายน 10].
- ปรีชา ภัทรสันติประภา และ พูลสุข หฤทัยธนาสันต์. 2545. การแพร่กระจายของสารเอ็นโดซัลแฟนสู่แม่น้ำสายสำคัญในเขตภาคกลาง. ในการประชุมวิชาการกองวัตถุมีพิษการเกษตร ครั้งที่ 4 การวิเคราะห์ วิจัย และควบคุมวัตถุอันตรายเป็นหัวใจของเกษตรดีที่เหมาะสม. กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ภาณุวัฒน์ ไกรจิตเมตต์. 2547. การดูดซับสารเอ็นโดซัลแฟนในดินจากสวนส้มโดยใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ภิญญา จุลินทร วิชา ตั่งนิพนธ์ และศิวาภรณ์ สกุลเที่ยงตรง. 2545. ผลกระทบของวัดถุณีพิชัยต่อสิ่งแวดล้อม. ในการประชุมวิชาการกองวัดถุณีพิชัยการเกษตรครั้งที่ 4 การวิเคราะห์วิจัยและควบคุมวัตถุอันตรายเป็นหัวใจของเกษตรดีที่เหมาะสม. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เล่มที่ 2. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- วิศิษฐ์ โชติตกุล ประไพ ชัยโรจน์ และจักรพงษ์ เจริญศิริ. 2536. การเก็บตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ทางเคมี. วิธีวิเคราะห์ดิน. กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ.
- ศักดิ์ดา ศรีนิเวศน์. 2547. คนพันธุ์ใหม่. วารสารส่งเสริมการเกษตร. ปีที่ 36 เล่มที่ 195. กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ศิวาภรณ์ สกุลเที่ยงตรง มลิสาว เวชยานนท์ พงศ์ศรี ไบอดุลย์ และพูลสุข หฤทัยธนาสันดี. 2545. การปนเปื้อนวัตถุพิษในน้ำใต้ดิน. ในการประชุมวิชาการกองวัดถุณีพิชัยการเกษตรครั้งที่ 4 การวิเคราะห์ วิจัย และควบคุมวัตถุอันตรายเป็นหัวใจของเกษตรดีที่เหมาะสม. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สุภาณี พิมพ์สมาน. 2540. สารฆ่าแมลง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์คลังนานาวิทยา. ขอนแก่น.

## ภาษาอังกฤษ

- ASTDR. 1993. Toxicological Profile for Endosulfan. United States Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: GA.
- ASTDR. 2000. Physical and Chemical Information[Online]. Available from: <http://www.astdr.cdc.gov/toxprofiles/tp41-c3.pdf>[2007, December 15].
- Ballschmitter, K., Schophan, I. and Tölg, G. 1967. The metabolization of endosulfan in insects and mammals. Proceeding of the VI International Plant Protection Congress. Vienna.
- Barnes and Ware. 1965. The sorption and metabolism of C-14-labeled endosulfan in the house fly. Econ. Entomol. 58: 286-291.
- Barry. 1995. Effect of algal food concentration on toxicity of two agricultural pesticides to *Daphnia carinata*. Ecotoxicol. Environ. Saf. 32: 273-279.
- Beyers, R. A., Woodham, D. W., and Bowman, M. C. G. 1965. Residues on coastal Bermuda grass, trash and soil treated with endosulfan. J. econ. Entomol. 58: 160-161.
- Biswas, P. and Wu, C. Y. 2005. Nanoparticles and the environment. Proceedings of 35<sup>th</sup> annual critical review presentation 2005. AWMA Annual Meeting. Washington University in St. Louis: University of Florida.
- Black, S. O., Evan, D. D., and White, J. L. 1969. Estimating  $K_{OC}$  for persistent organic pollutants: limitations of correlation with  $K_{OW}$ . Chemosphere. 41: 813 – 817.
- Butler, P. A. 1963. A review of fish and wildlife service investigations during 1961-1962. In J. L., George (ed), Commercial Fisheries Investigations, pp. 11-25. Florida: Gulf Breeze.
- CANADA, National Research Council. 1975. Endosulfan: its Effects on Environmental Quality. (NRC Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality, Report No. 11, Subcommittee of Pesticides on Related Compounds, Subcommittee Report No. 3, Publication No. NRCC 14098 of the Environmental Secretariat).
- Chopra, N. M., and Mahfou, A. M. 1977. Metabolism of endosulfan 1, endosulfan 2 and endosulfan sulfate in tobacco leaf. Agri. Food Chem. 25: 32-39.
- Daura, V. M., Zoraida, S. F. and Jose, J. S. R. 2005. Use of polyoxyethylene surfactants for the extraction of organochlorine pesticides from agricultural soils. Chromatography A. 1104: 11-17.

- Devi, A. P., Rato, D. M. R., Tilak, K.S., and Murty, A. S. 1981. Relative toxicity of the technical grade material, isomers and formulation of endosulfan to the fish *Channa punctata*. Environ. Contam. Toxicol. 27: 239-243.
- ESCAP/EC. 1994. Database on pesticide and the environment. Asean: Version.
- Frank, R., Braun, H. E., Ishida, K., and Suda, P. 1976. Persistent organic and inorganic pesticide residues in orchard soils and vineyards of southern Ontario. J. Soil Sci. 56: 463-484.
- Ghadiri, H., and Rose, C. R. 2001. Degradation of endosulfan in a clay soil from cotton farms of western Queensland. Environ. Manage. 62: 155-169.
- Hack, R., Ebert E., and Leist K. H. 1995. Chronic toxicity and carcinogenicity studies with the insecticide endosulfan in rats and mice. Food Chem Toxicol. 33: 941-950.
- Hapeman, C. J., and Pierpoint, A. C. 1997. Alba Torrents Ozone treatment of soil contaminated with aniline and trifluralin. Chemosphere 50 (8): 1025-1034.
- Harris, C. R., Chapman, R. A., and Miles, J. R. W. 1977. Insecticide residues in soils on fifteen farms in southwestern Ontario, 1964-1974. J. environ. Sci. Health, B12(3): 163-177.
- Herrmann, M. 2004. Endosulfan. Draft Dossier prepared in support of a proposal of endosulfan to be considered as a candidate for inclusion in the UN-ECE LRTAP protocol on persistent organic pollutants, pp. 64. Berlin: German Federal Environmental Agency.
- IAEA-TECDOC-695. 1991. Use of isotopes in studies of pesticides in rice-fish ecosystem. Report of a final research co - ordination meeting. Thailand: Bangkok.
- Innes, J. R. M., Ulland, B. M., Valerio, M. G., Petrucelli, L., Fishbein, L., Hart, E. R., Pallotta, A. J., Bates, R. R., Falk, H. L., Gart, J. J., Klein, M., Mitchell, I. and Peters, J. 1969. Bioassay of pesticides and industrial chemicals for tumorigenicity in mice: a preliminary note. J. Natl Cancer Inst. 42: 1101-1114.
- IPCS. 1988. Endosulfan. Health and safety guide. Geneva: WHO.
- Kahlon, R. S., Sidhu, R. S. and Kalra, M. S. 1981. Compatibility of *Bacillus thuringiensis* with chemical insecticides. Indian J. Ecol. 8: 306-307.
- Kamble, S. T. 1996. Fat of insecticide used for termite control in soil. Institute of Agriculture and Natural Resources. University of Nebraska.
- Karnchanasest, B., and jailak R. 2004. Developing simple QSAR models to predict soil sorption of PAHs. Environmental Research 26(1): 37-55.

- Karnchnasest, B., and Santisukkasaem, O. 2007. A preliminary study for removing Phenanthrene and Benzo (a) Pyrene from soil by nanoparticles. J. of Appli. Sci. 7(21): 3317-3321.
- Katamaya, A., and Matsumura, F. 1993. Degradation of organochlorine pesticides particularly endosulfan, by *Trichoderma harzianum*. Environ. Toxicol. Chem. 12: 1059-1065.
- Kate, A. 2000. The effect of soil type and structure on organochlorine animal uptake. Farmnote 35. Agriculture Western Australia.
- Kennedy, I. R., Sanchez-Bayo, F., Kimber, S. W., Hugo, L. and Ahmad, N. 2001. Off-side movement of endosulfan from irrigated cotton in New South Wales. Environ. Qual. 30: 683-696.
- Khan, P. K., Sinha, S. P. 1996. Ameliorating effect of vitamin C on murine sperm toxicity induced by three pesticides (endosulfan, phosphamidon and mancozeb). Mutagenesis. 11: 33-36.
- Kim, J. Y., Shim, S. B., and Shim J. K. 2004. Comparison of amphiphilic polyurethane nanoparticles to nonionic surfactants for flushing phenanthrene from soil. Hazardous Materials. B116: 205-212.
- Kim, J. Y., Shim, S. B., and Shim J. K. 2003. Effect of amphiphilic polyurethane nanoparticles on sorption – desorption of phenanthrene in aquifer material. Hazardous Materials. B98: 145 – 160.
- Martens, R. 1976. Degradation of (8, 9C) endosulfan by soil microorganisms. Appl. Environ. Microbiol. 31: 853-858.
- Martens, R. 1977. Degradation of endosulfan-8, 9-Carbon-14 in soil under different conditions. Environ. Contam. Toxicol. 17: 438-446.
- Meister, R. T. 1994. Farm Chemicals Handbook. Meister Publishing Company. Ohio: Willoughby.
- Melnikov, N. N., Novozhilov, K. V., and Belan S. R. 1995. Pesticides and Plant Growth Regulators. Reference Book, pp. 474-475.
- Metcalfe, R. L. and McKelvey, J. 1974. The Future for insecticides: and prospects. New York: Wiley.
- Mile, J. R. W., and Moy, P. 1979. Degradation of endosulfan and its metabolites by a mixed culture of soil microorganisms. Environ. Contam. Toxicol. 23: 13-19.



- Miles, J. R. W. 1976. Insecticide residues on stream sediments in Ontario, Canada. Pestic. Monit. J. 10: 87-91.
- Miles, J. R. W., and Harris, C. R. 1971. Insecticide residues in a controlled drainage system in agricultural areas of south-western Ontario, 1970. Pestic. Monit. J. 5: 289-294.
- Miller, R. W., and Gardiner, D. T. 2001. Soil in our environment 9<sup>th</sup>. New Tersey: Prentice-Hall.
- Murray P. K., Lea R. G., Abramovich, D. R., Haites N. E., and Fowler, P. A. 2001. Endocrin disrupting chemical: effects on human male reproductive health. Early Pregnancy. 5: 80-112.
- NCI. 1978. Week Dietary Study in Osborne-Mendel Rats and B6C3F1 Mice. NCI-CG-TR62, Technical report series No. 62. Bethesda: National Cancer Institute.
- New York state department of environmental conservation. 2006. Strategy for Prioritizing Vapor Intrusion Evaluations at Remedial. Program Policy DER.
- Niagara Chemical Division FMC Corp. 1966. Determination of thiodan I, II, and sulfate residues in soil. NewYork: Middleport.
- Niagara Chemical Division FMC Corp. 1971. Thiodan residues in soil and irrigation run off water. California: Richmond.
- Paknikar, K. M., Nagpal, V., Pethkar, A. V., and Rajwade, J. M. 2005. Degradation of lindane from aqueous solutions using iron sulfide nanoparticles stabilized by biopolymers. Science and Technology of Advanced Materials. 6: 370 – 374.
- Park, S.Y., and Shimizu, H. 1997. Crystal structure of nitric oxide reductase from denitrifying fungus *Fusarium oxysporum*. Nat Struct Biol 4(10): 827-832.
- Peterson, S. M., and Batley, G. E. 1993. The fate of endosulfan in aquatic systems. Environ. Pollut. 82: 143-152.
- Pignatello, J. J., and Xing, B. 1996. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. Environ. Sci. and Tech. 30: 1-11.
- Rao, D. M. R., Devi, A. P., and Murty, A. S. 1980. Relative toxicity of endosulfan, its isomer and formulated products to the freshwater fish *Labeo rohita*. J. Toxicol. Environ. Healthy. 6: 323-329.
- Sanna, M., Pelosi, N., Carocci, C., and De Vincenzi, S. 1979. Soil pollution: situation of some agricultural and seaboard urban zone in the province of Rome. Lab. Prov. 5: 260-270.



- Schulz, R. 2004. Field studies on exposure, effects, and risk mitigation of aquatic nonpoint-source insecticide pollution: a review. Environ. Qual. 33: 419 – 448.
- Schwarzenbach R. P., Gschwend P. M., and Imoden, D. M. 1993. Environmental organicchemistry. New York: Wiley and Sons.
- Sharpe, R. M. 2001. Homones and testis development and the possible adverse effect of environmental chemicals. Toxicol lett. 120: 221-232.
- Sinha, N., Narayan, R., Shanker, R., and Saxena, D. K. 1995. Endosulfan-induced biochemical changes in the testis of rats. Vet Hum Toxicol. 37: 547-549.
- Sperling. 2001. Empirical data exist to support both views.
- Srivastava, V., and Misra, P. C. 1981. Effect of endosulfan on plasma membrane function of the yeast *Rhodotorula gracilis*. Toxicol. Lett. 7: 475-480.
- Steward, D. K. R., and Cairns, K. G. 1974. Endosulfan persistence in soil and uptake by potato tubers. J. agric. food Chem. 22(6): 984-986.
- Suh, D. Y., and Kim, Y. C. 1996. Unusual enamide cleavage of franguloline under mild acidic condition. Heterocycles. 43: 2347-2351.
- Tan, K. H. 1996. Soil sampling preparation and analysis. USA: Marcel Dekker.
- Tayaputch, N., Kamnerdman, A., and Chawengsri, V. 1991. Distribution and effect of C-endosulfan in a rice-fish microecosystem. Report of a final research co-ordination meeting 11-15 November 1991, pp. 33-45. Thailand: Bangkok.
- Thapinta, A., and Hudek, P. F. 2000. Pesticide use and residual occurence in Thailand. Environmental Monitoring and Assessment. 60: 103-114.
- Tungittiplakron, W., Cohen, C., and Lion, L. W. 2005. Engineered polymeric nanoparticles for bioremediation of hydrophobic contaminants. Environ. Sci. and Tech. 39: 1354 – 1358.
- Tungittiplakron, W., Cohen, C., Lion, L. W., Cohen, C., and Kim, J. Y. 2004. Engineered polymeric nanoparticles for soil remediation. Environ. Sci. and Tech. 38: 1605-1610.
- U.S. Department of Health and Human Services. 1990. Toxicological profile for endosulfan. Agency for Toxic Substances and disease registry: Public health services.
- U.S. EPA. 1998. EPA Method 8081B Organochlorine Pesticides by Gas Chromatography: U.S. Environment Protection Agency[Online]. Available from: <http://www.epa.gov/epaower/hazwaste/test/pdfs8081b.pdf>. [2006, May 13].

- U.S. EPA. 2000. EPA Method 3540C Soxhlet Extraction: U.S. Environment Protection Agency[Online]. Available from:  
<http://www.epa.gov/epaower/hazwaste/test/pdfs3540c.pdf>. [2006, June 11].
- U.S. EPA. 2000. EPA Method 3620C Florisil Cleanup: U.S. Environment Protection Agency[Online]. Available from:  
<http://www.epa.gov/epaower/hazwaste/test/pdfs3620c.pdf>. [2006, May 22].
- U.S. EPA. 2002. Re-registration eligibility decision for endosulfan Case No. 0014. Washington, DC: U.S. Environment Protection Agency.
- Van Dyk, L. P., and Linde, V. D. 1976. Persistence of endosulfan in soil of the loskop Dam irrigation area. Agrochemmophysica. 8: 31-34.
- Verma, K., Agrawal N., Farooq M., Misra R. B., and Hans, R. K. 2005. Endosulfan degradation by a Rhodococcus strain isolated from earthworm gut. Ecotoxicol. Environ. Saf. 8: 31-34.
- WHO. 1986. Interim Specification for Endosulfan Technical and Emulsifiable Concentrate. World Health Organization.
- WHO. 2002. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2000-2002. Geneva: World Health Organization, International programme on chemical safety/inter-organization programme for sound management of chemicals.
- Yadav, A. S., Vashishat, R. K., and Kakar, S. N. 1982. Testing of endosulfan and fenitrothion for genotoxicity in *Saccharomyces cerevisiae*. Mutat. Res. 105: 403-407.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์สมบัติของดิน

#### 1. เนื้อดิน (soil texture)

วิเคราะห์ดินโดยวิธี hydrometer โดยนำตัวอย่างดินมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาใส่ desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น

ชั่งตัวอย่างดิน 50 กรัม (ถ้าเป็นดินทราย ใช้ 100 กรัม) ใส่ลงใน dispersion cup เติม calgon 5 % ลงไป 15 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น ลงไป 1/2 ถ้วย ปั่นดินเป็นเวลา 5 นาที (สำหรับดินทราย) หรือ 10 นาที สำหรับดินเนื้อละเอียด

เทตัวอย่างดินลงใน cylinder เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดที่กำหนด (ดิน 50 กรัม ทำให้เป็น 1130 มิลลิลิตร ดิน 100 กรัม ทำให้เป็น 1205 มิลลิลิตร) ปิดฝาเขย่ากลับไปมาจนกระทั่งเม็ดดินอยู่ในสภาพสารแขวนลอย วาง cylinder ลงแล้วเริ่มจับเวลาทันที

เมื่อครบเวลา 40 นาที หย่อน hydrometer ลงในสารละลายดิน บันทึกค่าที่อ่านได้จาก hydrometer และอุณหภูมิของสารละลาย จากนั้นบันทึกค่าอีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ ของอนุภาคดินและจำแนกเนื้อดินจากไดอะแกรม

การคำนวณ

$$\% \text{ ทรายแป้ง (silt) + ดินเหนียว (clay)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้ ณ เวลา 40 นาที} \times 100}{\text{น้ำหนักของดิน}}$$

$$\% \text{ ดินเหนียว} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้ ณ เวลา 2 ชั่วโมง} \times 100}{\text{น้ำหนักของดิน}}$$

$$\% \text{ ทราย} = 100 - \% (\text{ทรายแป้ง} + \text{ดินเหนียว})$$

$$\% \text{ ทรายแป้ง} = \% (\text{ทรายแป้ง} + \text{ดินเหนียว}) - \% \text{ ดินเหนียว}$$

## 2. ค่าความเป็นกรด – ด่าง (soil - pH)

วิเคราะห์ดินโดยใช้วิธี อิเล็กโตรเมตริก (electrometric method) ในอัตราส่วน ดิน 1 กรัม : น้ำ 1 มิลลิลิตร ซึ่งดินตัวอย่าง 10 กรัม ผสมกับน้ำ 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้ดินและน้ำเข้ากัน ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำไปวัดด้วย พีเอชมิเตอร์ (pH – meter) ระดับชั้นของสภาพกรด หรือสภาพด่าง ซึ่งแสดงด้วยค่าของพีเอช ดังนี้

| พีเอช        | สภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน           |
|--------------|-------------------------------------|
| น้อยกว่า 3.5 | กรดรุนแรงมากที่สุด (ultra acid)     |
| 3.4 – 4.5    | กรดรุนแรงมาก (Extremely acid)       |
| 4.6 – 5.0    | กรดจัดมาก (very strongly acid)      |
| 5.1 – 5.5    | กรดจัด (strongly acid)              |
| 5.6 – 6.0    | กรดปานกลาง (moderately acid)        |
| 6.1 – 6.5    | กรดเล็กน้อย (slightly acid)         |
| 6.6 – 7.3    | กลาง (neutral)                      |
| 7.4 – 7.8    | ด่างเล็กน้อย (slightly alkaline)    |
| 7.9 – 8.4    | ด่างปานกลาง (moderately alkaline)   |
| 8.5 – 9.0    | ด่างจัด (strongly alkaline)         |
| มากกว่า 9.0  | ด่างจัดมาก (very strongly alkaline) |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3. ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon content)

วิเคราะห์ดินโดยใช้วิธี wet oxidation โดยชั่งดินตัวอย่างซึ่งได้บดไว้แล้ว (ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.5 มิลลิเมตร) ปริมาณ 2 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 1 นอร์มัล โพแตสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution ;  $K_2Cr_2O_7$ ) ลงไป 10 มิลลิลิตร โดยเร็วแกว่งขวดชมพู่ไปรอบ ๆ เบบ ๆ เพื่อให้น้ำยากับดินเข้ากันประมาณ 1 – 2 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที

เติมน้ำกลั่นลงไป 15 มิลลิลิตร และหยด อินดิเคเตอร์ (indicator) ลงไป 3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วย น้ำยาเฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulfate ;  $FeSO_4$ ) จนกระทั่ง สีของสารในขวดชมพู่เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลปนแดง ถ้าไทเทรตด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต มากเกินไปให้เติม โพแตสเซียมไดโครเมต ลงไป 1 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต อีกครั้งหนึ่ง จุดยุติ (end point) คือจุดที่อินดิเคเตอร์ เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นสีน้ำตาลปนแดง จดปริมาตรของน้ำยา โพแตสเซียมไดโครเมต และเฟอร์รัสซัลเฟต ที่ใช้

วิธีนี้จำเป็นต้องทำ แบลงค์ (blank) และจดปริมาตรโพแตสเซียมไดโครเมต และเฟอร์รัสซัลเฟต ไว้คำนวณ ค่านอร์มัลลิตี (normality) ที่แท้จริง ของ เฟอร์รัสซัลเฟต แล้วจึงคำนวณหาปริมาณของ โพแตสเซียมไดโครเมต ที่ถูกรีดิวซ์ ในกรณีที่พบว่าน้ำยา โพแตสเซียมไดโครเมต ที่ถูกรีดิวซ์ โดยใช้ดินตัวอย่างเป็นปริมาณมากกว่า 4 มิลลิลิตรขึ้นไป ควรทำการวิเคราะห์ใหม่โดยลดปริมาณดินตัวอย่างให้น้อยลง

การคำนวณ

$$\% \text{ คาร์บอนอินทรีย์} = \frac{(me \text{ } K_2Cr_2O_7 - me \text{ } FeSO_4) 0.003 \times 100 \times 1.33}{\text{น้ำหนักของดินตัวอย่าง (กรัม)}}$$

น้ำหนักของดินตัวอย่าง (กรัม)

สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4. ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity ; CEC)

วิเคราะห์ดินโดยใช้ วิธี แอมโมเนียม อะซิเตท (Ammonium acetate ;  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) ซึ่งตัวอย่างดิน ที่ผ่านตะแกรง ขนาด 2 มิลลิเมตร ปริมาณ 2 กรัม (ถ้าเป็นดินทราย ใช้ 4 กรัม) ใส่ใน leaching tube ซึ่งรองด้วยสำลีและ asbestos ชะด้วยน้ำยาแอมโมเนียมอะซิเตท ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยค่อย ๆ ปล่อยให้หยดทีละน้อย

ล้างดินใน leaching tube ด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อไล่แอมโมเนียมอะซิเตทที่อยู่ตาม pore space ของดินออกให้หมด จากนั้นชะดินด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) 10 % ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อไล่ แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดิน การชะดินต้องทำอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ชะแล้วมาปรับปริมาตรให้เป็น 200 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

นำตัวอย่างที่ได้ไปกลั่นหาปริมาณแอมโมเนียม โดยใช้ สารละลายกรดบอริกอินดิเคเตอร์ 2 % ปริมาณ 5 มิลลิลิตร รองรับสิ่งที่กลั่นได้ จากนั้นนำมาไทเทรตด้วย สารละลายมาตรฐานซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 0.02 นอร์มัล จนถึงจุดยุติ โดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง บันทึกปริมาณสารละลายมาตรฐานซัลฟิวริกที่ไทเทรตเพื่อนำไปคำนวณ ทำแบลงค์โดยไม่ใช้ดินควบอยู่ไปกับการวิเคราะห์ตัวอย่างดินด้วย

การคำนวณ

$$\text{CEC (meq / 100 กรัม)} = \frac{N \times (T - B) \times \text{ปริมาณทั้งหมด} \times 100}{\text{ปริมาณที่ถูกใช้ น้ำหนักของตัวอย่าง}}$$

เมื่อ

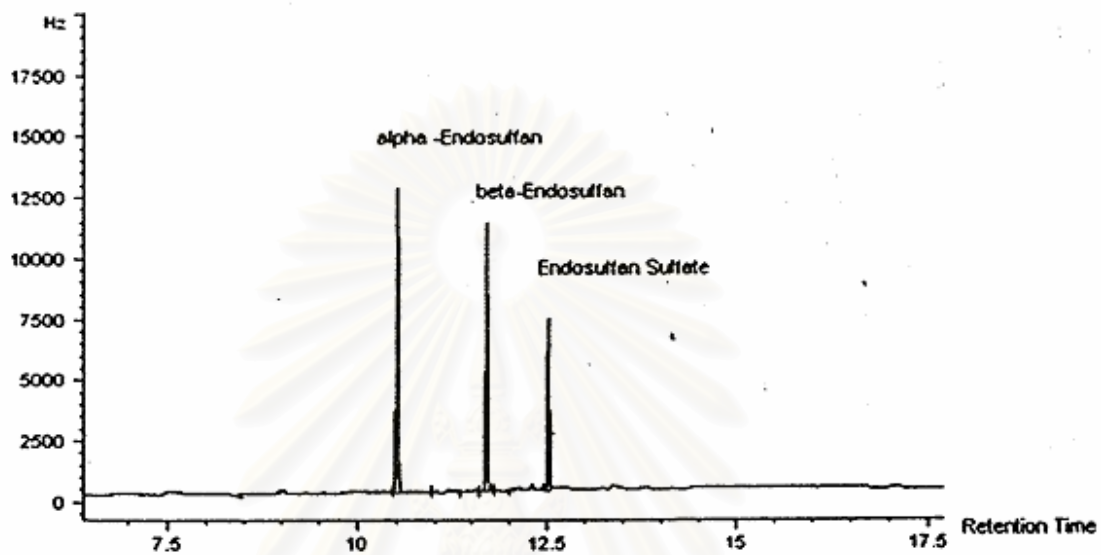
N = นอร์มัลลิตี ของสารละลายมาตรฐานซัลฟิวริก

T = ปริมาณของสารละลายมาตรฐานซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

B = ปริมาณของสารละลายมาตรฐานซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตแบลงค์

## ภาคผนวก ข

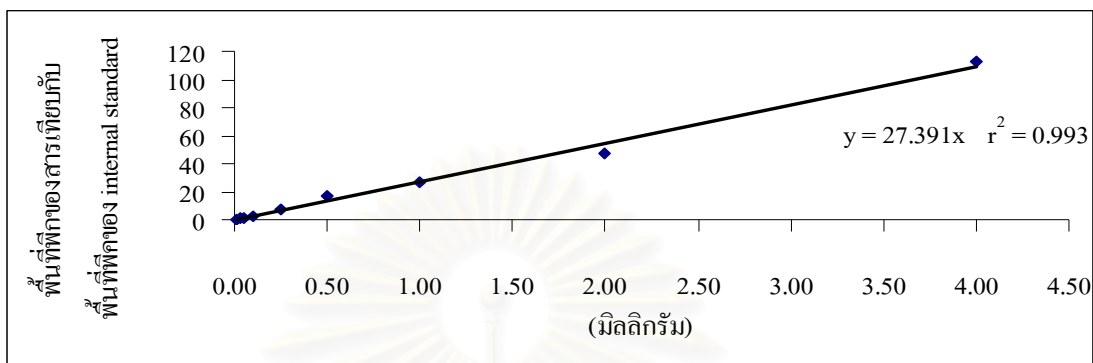
## ช่วงเวลาที่ปรากฏของสารเอ็นโดซัลแฟน



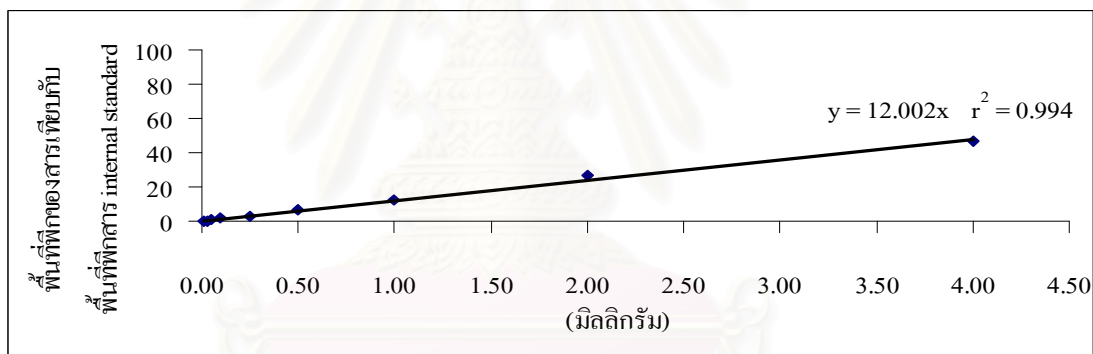
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

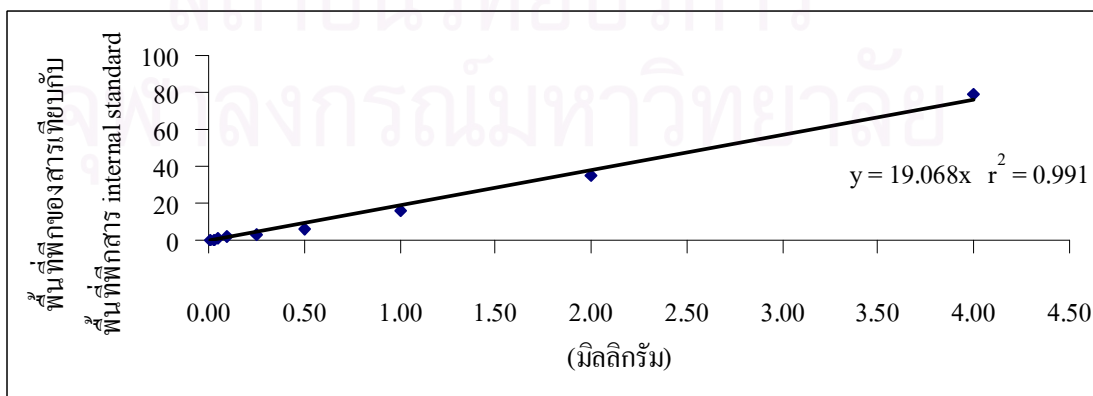
## กราฟมาตรฐานของสารเอ็นโดซัลแฟน



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานของสารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา



รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานของสารเอ็นโดซัลแฟนเบตา



รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานของสารเอ็นโดซัลแฟน ซัลเฟต

## ภาคผนวก ง



1

2

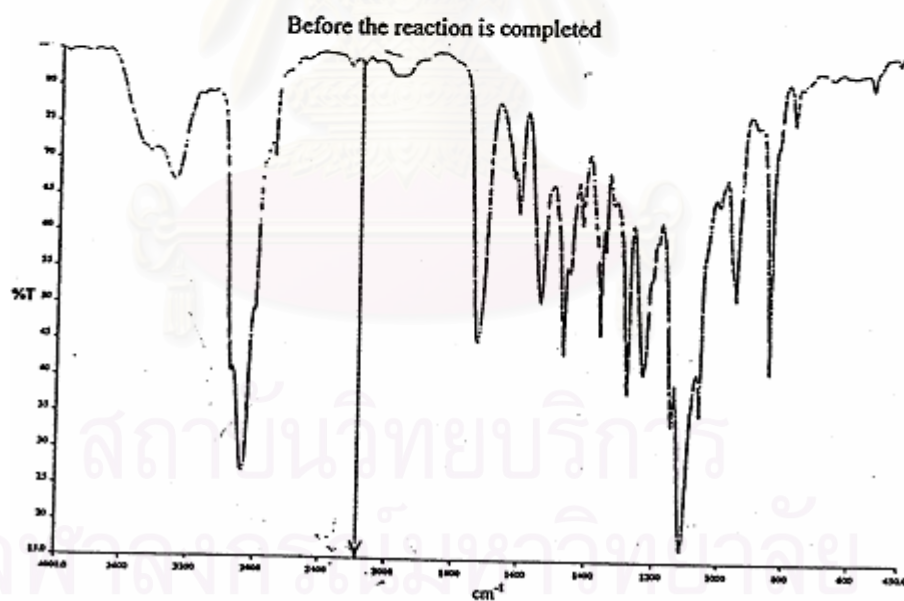
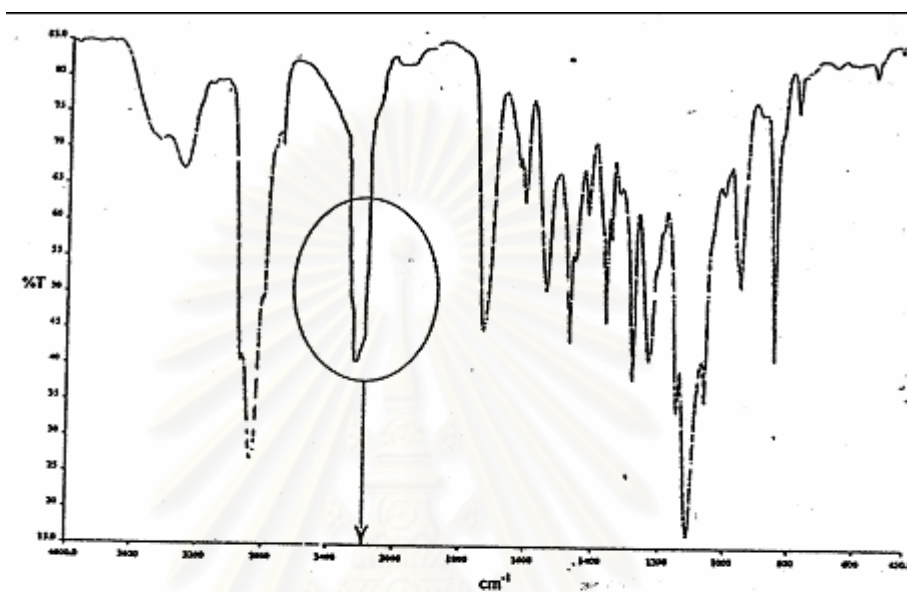
1. คอลลิมน์แก้วที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ใช้สำหรับบรรจุดิน เพื่อที่ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารโดยใช้สารนาโนโพลิเมอร์
2. การต่อคอลลิมน์แก้วเข้ากับเครื่องปั๊มที่สามารถปรับอัตราการไหลชะของน้ำแยกได้ออนได้

รูปที่ 1 อุปกรณ์ในการกำจัดสารเอ็นโดซัลเฟน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

ผลการตรวจวัด หากลุ่มสาร NCO ด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer  
ที่ความยาวคลื่น 2270 / เซนติเมตร



After the reaction is completed

## ภาคผนวก จ

## การชะสารเอ็นโดซัลแฟนในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน

| pore<br>volume | การกลับคืนของสารในคอลัมน์ดิน             |         |   |         |   |         |
|----------------|--|---------|---|---------|---|---------|
|                | สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) |         | สารเอ็นโดซัลแฟนเบตา<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) |         | สารเอ็นโดซัลแฟน<br>ซัลเฟต<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) |         |
|                | ปริมาณ                                   | % การชะ | ปริมาณ                                  | % การชะ | ปริมาณ  | % การชะ |
| 1              | 0.0001                                   | 0.21    | 0.0001                                  | 0.21    | 0.0001  | 0.16    |
| 2              | 0.0001                                   | 0.16    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 3              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 4              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 5              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 6              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 7              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 8              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 9              | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 10             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 11             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 12             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 13             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 14             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| 15             | 0.0000                                   | 0.00    | 0.0000                                  | 0.00    | 0.0000  | 0.00    |
| รวม            | 0.0002                                   | 0.37    | 0.0001                                  | 0.21    | 0.0001  | 0.16    |



## ภาคผนวก ข

## การชะสารถานาโนโพลีเมอร์ในคอลัมน์ดินด้วยน้ำแยกอออน

| pore volume             | ความเข้มข้นของสารถานาโนโพลีเมอร์ (กรัม/ลิตร)<br>ในคอลัมน์ดิน 30 กรัม |        |        |        |        |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|--------|
|                         | 5  | 10     | 15     | 20     | 30     |
| 1                       | 0.0150   | 0.0152 | 0.0402 | 0.0444 | 0.0525 |
| 2                       | 0.0118   | 0.0147 | 0.0317 | 0.0388 | 0.0501 |
| 3                       | 0.0099   | 0.0135 | 0.0298 | 0.0337 | 0.0469 |
| 4                       | 0.0099   | 0.0110 | 0.0205 | 0.0229 | 0.0440 |
| 5                       | 0.0090   | 0.0106 | 0.0180 | 0.0205 | 0.0335 |
| 6                       | 0.0080   | 0.0102 | 0.0145 | 0.0171 | 0.0330 |
| 7                       | 0.0069   | 0.0102 | 0.0136 | 0.0159 | 0.0276 |
| 8                       | 0.0038   | 0.0100 | 0.0130 | 0.0153 | 0.0261 |
| 9                       | 0.0006   | 0.0098 | 0.0108 | 0.0148 | 0.0199 |
| 10                      | 0.0000   | 0.0096 | 0.0105 | 0.0145 | 0.0138 |
| 11                      | 0.0000   | 0.0095 | 0.0082 | 0.0143 | 0.0107 |
| 12                      | 0.0000   | 0.0095 | 0.0059 | 0.0140 | 0.0097 |
| 13                      | 0.0000   | 0.0075 | 0.0036 | 0.0127 | 0.0084 |
| 14                      | 0.0000   | 0.0070 | 0.0020 | 0.0086 | 0.0082 |
| 15                      | 0.0000   | 0.0035 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0072 |
| 16                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0052 |
| 17                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0027 |
| 18                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0010 |
| 19                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 20                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 21                      | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| ปริมาณสารรวม (กรัม)     | 0.0749   | 0.1518 | 0.2242 | 0.2896 | 0.4005 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 0.0800   | 0.1600 | 0.2475 | 0.3100 | 0.4800 |
| การกลับคืนของสาร        | 91.00%   | 94.87% | 90.58% | 90.70% | 92.74% |

ภาคผนวก ข

การหาเวลาที่เหมาะสมในการแช่สารนาโนโพลิเมอร์เพื่อกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟน

ตารางที่ 1 สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา

| ชั่วโมง | น้ำหนักสารที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักสารที่ถูกกำจัดเมื่อลบจากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น 0.0000 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|---------|-----------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|--|---------------|
|         | จำนวนครั้ง                        |        |        |                     |                   |  |               |
|         | 1                                 | 2      | 3      |                     |                   |  |               |
| 3       | 0.0010                            | 0.0074 | 0.0029 | 0.0037              | ±0.0033           | 0.0037   | 6.24          |
| 6       | 0.0046                            | 0.0157 | 0.0080 | 0.0094              | ±0.0057           | 0.0094   | 15.69         |
| 12      | 0.0076                            | 0.0172 | 0.0138 | 0.0128              | ±0.0049           | 0.0128   | 21.41         |
| 24      | 0.0097                            | 0.0247 | 0.0213 | 0.0186              | ±0.0079           | 0.0186   | 30.97         |
| 36      | 0.0224                            | 0.0373 | 0.0370 | 0.0322              | ±0.0085           | 0.0322   | 53.67         |
| 48      | 0.0506                            | 0.0574 | 0.0571 | 0.0550              | ±0.0039           | 0.0550   | 91.70         |
| 72      | 0.0527                            | 0.0585 | 0.0538 | 0.0550              | ±0.0031           | 0.0550   | 91.64         |
| 96      | 0.0451                            | 0.0600 | 0.0595 | 0.0549              | ±0.0085           | 0.0549   | 91.49         |
| 120     | 0.0444                            | 0.0612 | 0.0596 | 0.0551              | ±0.0093           | 0.0551   | 91.82         |

ตารางที่ 2 สารเอ็นโดซัลเฟนเบตา

| ชั่วโมง | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        |                     | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัดเมื่อลบ<br>จากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น<br>0.0009 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|---------|-------------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|---|---------------|
|         | จำนวนครั้ง                          |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) |                   |   |               |
|         | 1                                   | 2      | 3      |                     |                   |   |               |
| 3       | 0.0021                              | 0.0061 | 0.0020 | 0.0034              | ± 0.0025          | 0.0023  | 4.10          |
| 6       | 0.0038                              | 0.0073 | 0.0034 | 0.0049              | ± 0.0040          | 0.0021  | 6.62          |
| 12      | 0.0059                              | 0.0148 | 0.0038 | 0.0082              | ± 0.0073          | 0.0058  | 12.10         |
| 24      | 0.0127                              | 0.0193 | 0.0214 | 0.0178              | ± 0.0169          | 0.0046  | 28.12         |
| 36      | 0.0302                              | 0.0162 | 0.0383 | 0.0282              | ± 0.0273          | 0.0111  | 45.52         |
| 48      | 0.0539                              | 0.0606 | 0.0586 | 0.0577              | ± 0.0568          | 0.0035  | 94.70         |
| 72      | 0.0495                              | 0.0637 | 0.0599 | 0.0577              | ± 0.0568          | 0.0073  | 94.69         |
| 96      | 0.0528                              | 0.0607 | 0.0596 | 0.0577              | ± 0.0568          | 0.0043  | 94.67         |
| 120     | 0.0527                              | 0.0606 | 0.0599 | 0.0577              | ± 0.0568          | 0.0044  | 94.68         |

ตารางที่ 3 สารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต

| ชั่วโมง | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        |                     | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัดเมื่อลบ<br>จากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น<br>0.0000 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|---------|-------------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|---|---------------|
|         | จำนวนครั้ง                          |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) |                   |   |               |
|         | 1                                   | 2      | 3      |                     |                   |   |               |
| 3       | 0.0020                              | 0.0036 | 0.0036 | 0.0031              | ± 0.0019          | 0.0009  | 3.09          |
| 6       | 0.0042                              | 0.0053 | 0.0017 | 0.0037              | ± 0.0025          | 0.0018  | 4.16          |
| 12      | 0.0063                              | 0.0082 | 0.0057 | 0.0067              | ± 0.0055          | 0.0014  | 9.20          |
| 24      | 0.0124                              | 0.0169 | 0.0145 | 0.0146              | ± 0.0134          | 0.0023  | 22.34         |
| 36      | 0.0293                              | 0.0232 | 0.0201 | 0.0242              | ± 0.0230          | 0.0047  | 38.31         |
| 48      | 0.0521                              | 0.0606 | 0.0602 | 0.0576              | ± 0.0564          | 0.0048  | 94.00         |
| 72      | 0.0519                              | 0.0607 | 0.0604 | 0.0576              | ± 0.0564          | 0.0050  | 94.07         |
| 96      | 0.0529                              | 0.0606 | 0.0594 | 0.0576              | ± 0.0564          | 0.0041  | 94.00         |
| 120     | 0.0522                              | 0.0606 | 0.0601 | 0.0576              | ± 0.0564          | 0.0047  | 94.05         |

ภาคผนวก ฅ

ความสัมพันธ์ระหว่างสารนาโนโพลีเมอร์ชนิดแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนกับความเข้มข้นของสารเอ็นโดซัลเฟนในดิน

ตารางที่ 1 สารเอ็นโดซัลเฟนแอลฟา

| สาร APU<br>( กรัม/ลิตร) | น้ำหนักรสารที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักรสารที่ถูกกำจัดเมื่อลบ<br>จากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น<br>0.0000 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|-------------------------|------------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|--|---------------|
|                         | จำนวนครั้ง                         |        |        |                     |                   |  |               |
|                         | 1                                  | 2      | 3      |                     |                   |  |               |
| 5                       | 0.0453                             | 0.0365 | 0.0277 | 0.0365              | 0.0088            | 0.0365   | 60.85         |
| 10                      | 0.0506                             | 0.0574 | 0.0571 | 0.0550              | 0.0039            | 0.0550   | 91.70         |
| 15                      | 0.0545                             | 0.0612 | 0.0497 | 0.0551              | 0.0058            | 0.0551   | 91.91         |
| 20                      | 0.0495                             | 0.0609 | 0.0546 | 0.0550              | 0.0057            | 0.0550   | 91.64         |
| 30                      | 0.0468                             | 0.0599 | 0.0583 | 0.0550              | 0.0071            | 0.0550   | 91.64         |

ตารางที่ 2 สารเอ็น โดซัลเฟนเบตา

| สาร APU<br>( กรัม/ลิตร) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        |                     | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัดเมื่อลบ<br>จากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น<br>0.0009 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|-------------------------|-------------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|---|---------------|
|                         | จำนวนครั้ง                          |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) |                   |   |               |
|                         | 1                                   | 2      | 3      |                     |                   |   |               |
| 5                       | 0.0283                              | 0.0479 | 0.0358 | 0.0373              | 0.0099            | 0.0364  | 60.74         |
| 10                      | 0.0539                              | 0.0606 | 0.0586 | 0.0577              | 0.0035            | 0.0568  | 94.70         |
| 15                      | 0.0523                              | 0.0603 | 0.0606 | 0.0577              | 0.0047            | 0.0568  | 94.72         |
| 20                      | 0.0601                              | 0.0554 | 0.0575 | 0.0577              | 0.0023            | 0.0568  | 94.61         |
| 30                      | 0.0609                              | 0.0573 | 0.0549 | 0.0577              | 0.0030            | 0.0568  | 94.70         |



ตารางที่ 3 สารเอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต

| สาร APU<br>(กรัม/ลิตร) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) |        |        |                     | ค่าเบี่ยงเบน (SD) | น้ำหนักรังสีที่ถูกกำจัดเมื่อลบ<br>จากปริมาณที่พบในดินเริ่มต้น<br>0.0009 (มิลลิกรัม) | % การกำจัดสาร |
|------------------------|-------------------------------------|--------|--------|---------------------|-------------------|---|---------------|
|                        | จำนวนครั้ง                          |        |        | ค่าเฉลี่ย (Average) |                   |   |               |
|                        | 1                                   | 2      | 3      |                     |                   |   |               |
| 5                      | 0.0390                              | 0.0353 | 0.0260 | 0.0334              | 0.0067            | 0.0322  | 53.71         |
| 10                     | 0.0521                              | 0.0606 | 0.0602 | 0.0576              | 0.0048            | 0.0564  | 94.00         |
| 15                     | 0.0507                              | 0.0611 | 0.0611 | 0.0576              | 0.0060            | 0.0564  | 94.03         |
| 20                     | 0.0543                              | 0.0583 | 0.0603 | 0.0576              | 0.0031            | 0.0564  | 94.03         |
| 30                     | 0.0512                              | 0.0611 | 0.0605 | 0.0576              | 0.0055            | 0.0564  | 94.03         |

ภาคผนวก ๑

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับอัตราการกำจัดสาร

| ชนิดดิน | น้ำหนักสาร (มิลลิกรัม/ดิน 30 กรัม) จากสารเริ่มต้น 0.0600 มิลลิกรัม |         |                  |         |                    |         |
|---------|--|---------|------------------|---------|--------------------|---------|
|         | เอ็นโดซัลแฟนแอลฟา  |         | เอ็นโดซัลแฟนเบตา |         | เอ็นโดซัลแฟนซัลเฟต |         |
|         | หลังกำจัด  | % กำจัด | หลังกำจัด        | % กำจัด | หลังกำจัด          | % กำจัด |
| 1       | 0.0580 ± 0.0031  | 96.72   | 0.0588 ± 0.0019  | 98.13   | 0.0586 ± 0.0025    | 97.77   |
| 2       | 0.0547 ± 0.0051  | 91.19   | 0.0559 ± 0.0041  | 93.20   | 0.0557 ± 0.0036    | 92.88   |
| 3       | 0.0521 ± 0.0043  | 86.98   | 0.0535 ± 0.0088  | 89.20   | 0.0530 ± 0.0024    | 88.48   |
| 4       | 0.0485 ± 0.0046  | 80.90   | 0.0495 ± 0.0033  | 82.66   | 0.0491 ± 0.0024    | 81.97   |
| 5       | 0.0550 ± 0.0039  | 91.70   | 0.0568 ± 0.0035  | 94.70   | 0.0564 ± 0.0048    | 94.00   |

หมายเหตุ : 1 = ดินปลูกมันสำปะหลัง 2 = ดินปลูกยางพารา 3 = ดินนา 4 = ดินปลูกข้าวโพด 5 = ดินพื้นที่อาศัยของชุมชน 1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การศึกษาประสิทธิภาพของสารนาโนโพลีเมอร์ในการกำจัดสารเอ็นโดซัลแฟนในดินปนเปื้อน

| ชนิดดิน | น้ำหนักรีดสาร (ไมโครกรัม/ดิน 30 กรัม) |                    |        |                     |                    |        |                          |                    |        |
|---------|---------------------------------------|--------------------|--------|---------------------|--------------------|--------|--------------------------|--------------------|--------|
|         | สารเอ็นโดซัลแฟนแอลฟา                  |                    |        | สารเอ็นโดซัลแฟนเบตา |                    |        | สารเอ็นโดซัลแฟนซัลซัลเฟต |                    |        |
|         | ก่อนกำจัด                             | หลังกำจัด          | %กำจัด | ก่อนกำจัด           | หลังกำจัด          | %กำจัด | ก่อนกำจัด                | หลังกำจัด          | %กำจัด |
| 6       | 0.0728<br>± 0.0023                    | 0.0682<br>± 0.0066 | 93.67  | 0.0707<br>± 0.0061  | 0.0686<br>± 0.0010 | 96.97  | 0.0140<br>± 0.0685       | 0.0133<br>± 0.0016 | 95.13  |
| 7       | 0.0712<br>± 0.0011                    | 0.0656<br>± 0.0012 | 92.14  | 0.0426<br>± 0.0032  | 0.0405<br>± 0.0021 | 95.07  | 0.0206<br>± 0.0051       | 0.0193<br>± 0.0016 | 93.74  |
| 8       | 0.0294<br>± 0.0023                    | 0.0270<br>± 0.0017 | 92.01  | -                   | -                  |        | 0.1506<br>± 0.0832       | 0.1399<br>± 0.0088 | 92.87  |
| 9       | -                                     | -                  | -      | 0.7778<br>± 0.0054  | 0.7179<br>± 0.0329 | 92.31  | 0.1418<br>± 0.0009       | 0.1296<br>± 0.0099 | 91.38  |

หมายเหตุ : 6 = ดินปลูกข้าวคุณประชิด 7 = ดินปลูกข้าวพ่อเลา 1 8= ดินปลูกข้าวพ่อเลา 2 9 = ดินพื้นที่อาศัยชุมชน 2

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชาว์วุฒิ สิงห์แก้ว เกิดเมื่อวันอังคารที่ 21 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2524 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่ โรงเรียนหนองบัวพิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู เมื่อ พ.ศ. 2543 จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี และสำเร็จการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2547 ต่อมาศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจบการในปีการศึกษา พ.ศ. 2550



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย