

การเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก

นางศิริพรรณ วัฒนะรัตน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

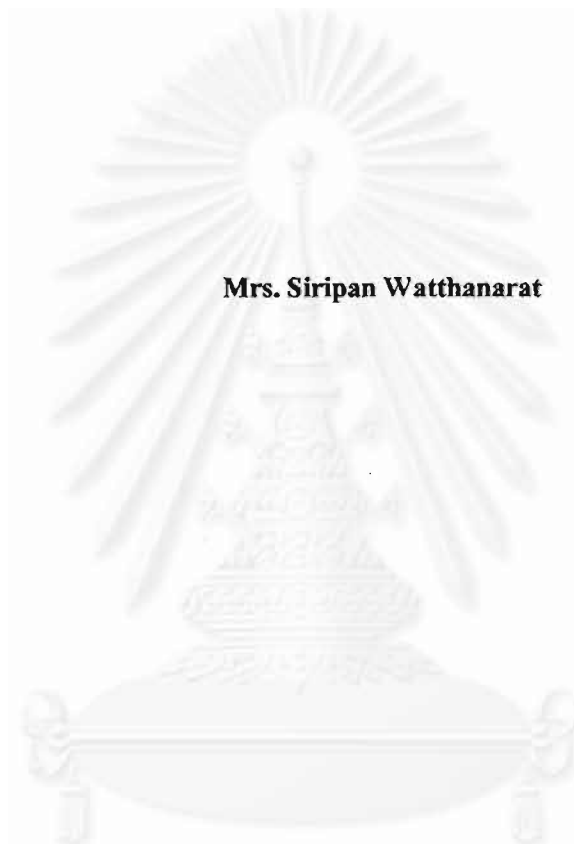
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-505-1

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ENHANCED DEGRADATION OF ORGANOCHLORINE PESTICIDES BY  
ZERO-VALENT IRON**



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

**Inter-Department of Environmental Science**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

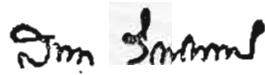
**Academic Year 1999**

**ISBN 974-334-505-1**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก  
โดย นางศิริพรรณ วัฒนะรัตน์  
สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม

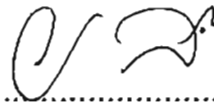
---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต



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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



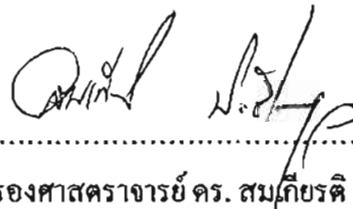
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบุลย์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)



..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรจิตวิกุล)

ศิริพรรณ วัฒนารัตน์ : การเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก (ENHANCED DEGRADATION OF ORGANOCHLORINE PESTICIDES BY ZERO-VALENT IRON) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อมร เพชรสม ; 73หน้า. ISBN 974-334-505-1

ในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก ทำการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีสารฆ่าแมลง 5 ตัว ได้แก่ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 117.6272, 95.6558, 83.4276, 106.3309 และ 132.9863 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารกลุ่มนี้ ในการศึกษาเริ่มจากการหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงศึกษาหาที่เอชที่เหมาะสม เมื่อได้ทั้งสองสภาวะนี้แล้วจึงทำการศึกษาหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ จากการศึกษาที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณผงเหล็ก (0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม ค่อน้ำเสีย 10 มิลลิิตรที่พีเอช 6.20 อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 3 วัน) ระดับพีเอช ( 4, 7 และ 8) และ อุณหภูมิ (อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียส) โดยการศึกษาผลของอุณหภูมิศึกษาในระยะเวลาทดลอง 1-7 วัน พบว่า ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม ทำให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลง 5 ตัวนี้อยู่ในช่วง 23.96-95.85 % และที่ระดับพีเอช 4 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารกลุ่มนี้สูงมากกว่า 95 %

เมื่อได้สภาวะทั้งสองนี้แล้วจึงทำการศึกษาโดยให้ผงเหล็กทำปฏิกิริยากับสารในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและที่ 40 องศาเซลเซียส และช่วงเวลาดัง ๆ กัน พบว่า ที่อุณหภูมิห้องการสลายตัวของเฮปตาคลอร์และ p,p'-DDT จะน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ส่วนการสลายตัวของแกมมาบีเอชซี อัลดริน และ o,p'-DDT ไม่พบว่าแตกต่างกันทั้งสองอุณหภูมินี้ ส่วนระยะเวลาในการทดลองที่ดีที่สุดคือ 7 วัน ซึ่งทำให้ตรวจไม่พบสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม .....ลายมือชื่อนิติศ.....ศิริพรรณ วัฒนารัตน์  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อมร เพชรสม  
ปีการศึกษา 2542 .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##3972770023 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : ZERO-VALENT IRON / PESTICIDES / REMOVAL

SIRIPAN WATTHANARAT : ENHANCED DEGRADATION OF ORGANOCHLORINE  
PESTICIDES BY ZERO-VALENT IRON. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. AMORN  
PETSOM, Ph.D. 73 pp. ISBN 974-334-505-1

The degradation of organochlorine pesticides by zero-valent iron was studied by the suitable conditions in wastewater with the five types of pesticides, namely ; gamma BHC, heptachlor, aldrin, o,p'-DDT and p,p'-DDT. The first step was studied by the suitable powdered zero-valent iron, followed by the range of pH values study. The detention time of wastewater and temperature were studied at the last step. The study of the various conditions comprised the level of powdered zero-valent iron (0.50, 1.00 and 2.00 g), range of pH (4, 7 and 8), at room temperature and 40 ° c and treated timing (1-7 days). The result showed that the lowest iron level at 0.50 g was successful for degrading of the mentioned organochlorine groups with 23.96-95.85% efficiency. At pH value of 4, the efficiency of degradation of this mentioned organochlorine groups was higher than 95 % .

For the last step, the rate of dechlorination of heptachlor and p,p'-DDT at room temperature were lower than 40 ° c. The dechlorination rate of gamma BHC, aldrin and o,p'-DDT were not different in both temperature. The mentioned pesticides were not found at days 7 of treatment.

ภาควิชา สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศิริพรรณ อัจฉริยะรัตน์  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*A. P.*  
ปีการศึกษา 2542.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมาก และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนาผลไพบุลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรศิริกุล ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพานิช ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยส่วนหนึ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของบริษัท ไอคิวเอ-นอร์เวส แล็บส์ จำกัด ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ ๆ ทุกคน ตลอดจนเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ชาวสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา รวมทั้งความรู้สึที่ดีต่อกันด้วยความเข้าใจและกำลังใจจากสามีและบุตร จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะทางเคมีของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน.....	4
2.2 อันตรายจากการใช้สารฆ่าแมลง.....	7
2.2.1 อันตรายจากพิษเฉียบพลันของสารฆ่าแมลง.....	7
2.2.2 สารฆ่าแมลงตกค้างและอันตรายจากสารตกค้าง.....	11
2.2.3 สารฆ่าแมลงตกค้างในอาหารและผลิตภัณฑ์การเกษตร.....	20
2.2.4 ปัญหาต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์.....	25
2.3 กระบวนการบำบัดของเสียที่ปนเปื้อนสารฆ่าแมลง.....	27
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของผงเหล็ก.....	31
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 รูปแบบและขั้นตอนการศึกษา.....	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2.1 เครื่องแก้ว.....	39
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	สารเคมีและวิธีการเตรียม	39
3.3.1	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	39
3.3.2	สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล	40
3.3.3	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มัล	40
3.3.4	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟ (GC-ECD)	40
3.3.5	ผงเหล็ก	43
3.4	วิธีการทดลอง	44
3.4.1	การศึกษาหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลง กลุ่มออร์กาโนคลอรีน	44
3.4.2	การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	44
3.4.3	การศึกษาหาอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสีย สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโน คลอรีน โดยวิธีการรีดชันด้วยผงเหล็ก	44
3.5	การวิเคราะห์ผลการวิจัย	45
4.	ผลการวิจัยและวิจารณ์	46
4.1	การหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสม	46
4.2	การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	50
4.3	การหาอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม	53
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
5.1	สรุปผลการวิจัย	59
5.2	ข้อเสนอแนะ	60
	รายการอ้างอิง	61
	ภาคผนวก	64
	ภาคผนวก ก โครมาโตกราฟของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกสโครมาโตกราฟ	65
	ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	69
	ประวัติผู้เขียน	73



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน.....	7
ตารางที่ 2.2	ความคงทนของสารฆ่าแมลงบางชนิดในดิน ระยะเวลา (ปี) ที่ใช้ในการ สลายตัว50%(ค่าครึ่งชีวิต)และการสลายตัว95 %.....	14
ตารางที่ 2.3	ความคงทนของสารฆ่าแมลงบางชนิดในน้ำธรรมชาติ.....	15
ตารางที่ 2.4	ความแตกต่างของอัตราความเข้มข้นของ DDT ในสิ่งแวดล้อมทางบกและ สิ่งแวดล้อมทางน้ำ.....	17
ตารางที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาของเปลือกไข่ <i>Anas platyrhynchos</i> กับปริมาณสารออร์กาโนคลอรีน.....	20
ตารางที่ 2.6	ตัวอย่างค่าปริมาณสูงสุดของสารมีพิษตกค้างในอาหาร (MRL) ที่กำหนดขึ้น โดย Codex Committee on Pesticide Residues.....	23
ตารางที่ 2.7	ปริมาณ (พีพีเอ็ม) ของสารออร์กาโนคลอรีนที่พบตกค้างในตัวอย่างเมล็ดงา จากภาคต่าง ๆ.....	24
ตารางที่ 2.8	ฤทธิ์ก่อมะเร็งของสารออร์กาโนคลอรีนและอวัยวะที่เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง.....	26
ตารางที่ 4.1	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังการ ทำปฏิกริยารัดกั้นด้วยผงเหล็กในปริมาณต่าง ๆ ในระยะเวลา การทดลอง 3 วันและประสิทธิภาพของผงเหล็กในการเพิ่มการสลายตัว ของสารกลุ่มนี้ที่ระดับผงเหล็กต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 4.2	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลัง การทำด้วยผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ ที่ระยะเวลา ทดลอง 3 วัน.....	51
ตารางที่ 4.3	ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่ม ออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ ที่ระยะ เวลาทดลอง 3 วัน.....	53
ตารางที่ 4.4	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลัง การทำปฏิกริยารัดกั้นด้วยผงเหล็กที่ระยะเวลาทดลองต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลัง  
 การทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็กที่ระยะเวลาทดลองต่าง ๆ  
 ที่อุณหภูมิตั้งที่ 40 องศา เซลเซียส.....55



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างของโมเลกุลของออร์กาโนคลอรีน 3 ชนิด ซึ่งจัดอยู่ในแต่ละกลุ่มย่อย.....	4
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนย้ายของสารฆ่าแมลงในสิ่งแวดล้อม.....	12
รูปที่ 2.3 เมแทบอลิซึมของ DDT.....	16
รูปที่ 2.4 การเพิ่มขยายทางชีวภาพในทะเลสาบซึ่งมีการปนเปื้อนของ DDD.....	18
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยารีดักทีฟ ดีฮาโลจีนเนชันที่ผิวของโลหะเหล็ก.....	33
รูปที่ 2.6 การเกิดรีดักชัน โดยเฟอร์รัสซึ่งเป็นผลจากการผุกร่อนของโลหะ.....	33
รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 3 ของการเกิดดีฮาโลจีนเนชัน.....	34
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยใช้ผงเหล็กที่ปริมาณ 0, 0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม.....	48
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่ระดับพีเอชต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารแกมมาบีเอชซีระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารเฮปตาคลอร์ระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารอัลดรินระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	57
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสาร o,p'-DDTระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	57
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสาร p,p'-DDTระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	58

## คำย่อ

GC-ECD = เครื่องแกสโครมาโตกราฟที่มีตัวตรวจวัดเป็นแบบจับอิเล็กตรอน  
(Gas Chromatography with Electron Capture Detector)

# บทที่ 1

## บทนำ



### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้สารเคมีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ สารพิษกลุ่มใหญ่ซึ่งมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยคือสารฆ่าแมลง โดยเฉพาะกลุ่มที่เป็นสารสังเคราะห์ได้ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ ปัญหาพิษเฉียบพลันต่อผู้ใช้ และพิษเรื้อรังซึ่งเกิดขึ้นต่อผู้ใช้หลังจากได้รับสารเป็นระยะเวลายาวนาน ปัญหาสารตกค้างในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นอุปสรรคในการส่งผลผลิตเป็นสินค้าออก ปัญหาความเสี่ยงต่ออันตรายของ ผู้บริโภค ผลผลิตดังกล่าว และปัญหาการเกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน น้ำ อากาศและวัฏจักรของระบบนิเวศ

สารฆ่าแมลงที่ใช้ในประเทศไทยทุกชนิดได้จากการนำเข้ามาจากประเทศต่าง ๆ มากกว่า 20 ประเทศ สารฆ่าแมลงเหล่านี้นำมาใช้ในการเกษตร การสาธารณสุข และการกำจัดแมลงในบ้านเรือน จากสถิติปริมาณการนำเข้าสารฆ่าแมลงเมื่อแยกตามองค์ประกอบทางเคมีตั้งแต่ปีพ.ศ. 2528-2538 พบว่ากลุ่มออร์กาโนฟอสเฟอรัส มีการนำเข้ามาใช้เป็นอันดับหนึ่ง คิดเป็นร้อยละ 58 ของปริมาณการนำเข้าทั้งหมด อันดับที่สองได้แก่กลุ่มคาร์บาเมต และอันดับที่สามได้แก่ กลุ่มออร์กาโนคลอรีน สารฆ่าแมลงกลุ่มนี้หลายชนิดได้ถูกห้ามนำเข้าหรือห้ามใช้ในทางการเกษตร ปริมาณการนำเข้าจึงลดลง (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

สารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน เป็นกลุ่มของสารฆ่าแมลงสังเคราะห์ที่ยังมีผู้นิยมใช้ในประเทศไทยเพื่อกำจัดขุง กำจัดปลวก และกำจัดแมลงอื่น ๆ ที่อยู่ได้ดิน สารฆ่าแมลงกลุ่มนี้เป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นสารฆ่าแมลงที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ แต่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดพิษเรื้อรังในระยะยาว เนื่องจากสลายตัวยากและสะสมในสิ่งแวดล้อมสูง เพราะสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้มีคุณสมบัติหลายประการซึ่งทำให้มีศักยภาพสูงในการก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่

1. มีความคงทนสูง (high persistence) สารฆ่าแมลงในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะถูกทำลายจากระบบของสิ่งมีชีวิต หรือถูกทำลายได้ในสิ่งแวดล้อมอย่างช้า ๆ และแม้จะถูกเปลี่ยนแปลงก็ยังคงได้อนุพันธ์ที่มีความเป็นพิษและมีความคงทนสูง เช่น คีคีที (DDT) ถูกเปลี่ยนแปลงเป็นคีคีอี (DDE)

เฮปตาคลอร์ (Heptachlor) ถูกเปลี่ยนแปลงเป็นเฮปตาคลอร์ อีพอกไซด์ (Heptachlor epoxide) และ อัลดริน (Aldrin) ถูกเปลี่ยนแปลงเป็นคิลดริน (Dieldrin) เป็นต้น

2. มีการละลายในไขมันได้ดี คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (partition coefficient) ในตัวทำละลายไขมันเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำสูง สารดังกล่าวจะสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิต ในระดับสูงกว่าที่พบในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป และปริมาณการสะสมจะสามารถเพิ่มขึ้นตามวงจรห่วงโซ่อาหาร การที่สารมีการสะสมเช่นนี้จะทำให้สามารถแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น และมนุษย์มีความเสี่ยงต่อพิษของสารสูงขึ้น (พาลาก สิงหเสนี, 2540)

3. โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยพันธะ C-C, C-H และ C-Cl ซึ่งเป็นลักษณะที่ทำให้มีเสถียรภาพ การแตกสลายเกิดขึ้นได้ช้ามาก ออร์กาโนคลอรีนส่วนใหญ่สามารถอยู่ในดินได้นานเป็นเดือนหรือปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง โดยทั่วไปค่าครึ่งชีวิต (half life) ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งคือ ส่วนประกอบของสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น ในสภาพสิ่งแวดล้อมเขตร้อน คีตีทีจะมีการสลายตัวเร็วกว่าในเขตหนาว (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

ด้วยคุณสมบัติสำคัญดังกล่าว จึงควรหาวิธีการที่จะควบคุมการใช้สารฆ่าแมลงดังกล่าวมิให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และหาวิธีการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้เพื่อมิให้ก่อให้เกิดพิษเรื้อรังในระยะยาว ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการลดอันตรายที่จะเกิดกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้

ในการกำจัดสารฆ่าแมลงมีหลายวิธี เช่น การเผาที่อุณหภูมิสูง (High temperature incineration) หรือใช้กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment process) ได้แก่ Wet oxidation, Chlorolysis, Ozone/Ultraviolet (UV) Irradiation เป็นต้น หรือใช้การกำจัดโดยวิธีทางชีววิทยา (Bioconversion technology) ซึ่งในแต่ละวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด ตัวอย่างเช่น การเผาที่อุณหภูมิสูงแม้ว่าจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 99.9% แต่ต้องลงทุนสูงมากและสามารถใช้ได้กับกลุ่มสารฆ่าแมลงบางกลุ่มเท่านั้น (Kennedy, 1978)

นอกจากวิธีการกำจัดสารฆ่าแมลงดังกล่าว ยังมีวิธีการกำจัดที่ให้ผลรวดเร็วโดยการใช้ผงโลหะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกำจัดหมู่คลอรีน (Dechlorination) ออกจากสารกลุ่มคลอรีนอินทรีย์ได้ (Chlorinated organics) (Schlimm and Heitz, 1996) โลหะที่ใช้มีหลายชนิด เช่น โลหะสังกะสีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารฆ่าแมลงพวกคลอรีนไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbon Pesticides) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด (pH 1.5-4) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สาร p,p'-DDT แยกสลายเป็น bis (p-chlorophenyl) ethane เป็นผลิตภัณฑ์หลัก (Sweeny, 1972) การใช้โลหะผสมคือแท่งเหล็กเคลือบด้วยพัลลาเดียม (Pd/Fe Bimetallic System) ในการรีดคลอรีนอะตอมออกจาก

สาร PCBs (Grittini et al,1995) การใช้โลหะเหล็ก (Zero-valent iron) เป็นตัวส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร Halogenated Aliphatics (Gillham,1994) เป็นต้น

ดังนั้น การใช้ผงเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ ในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนจึงน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการลดการสะสมของสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้ในสิ่งแวดล้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนออกจากน้ำเสียโดยวิธีการรีดักชันด้วยผงเหล็ก ร่วมกับ พีเอช (pH) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสีย

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

ปริมาณของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสีย จะลดลงโดยวิธีการรีดักชันด้วยผงเหล็ก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณผงเหล็ก พีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสีย

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้ใช้วิธีการรีดักชันด้วยผงเหล็กในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ DDT (o,p'-DDT และ p,p'-DDT), Heptachlor, Aldrin และแกมมาบีเอชซี (gamma BHC) โดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงเหล่านี้ประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้ เช่น ปริมาณผงเหล็ก พีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสีย ทั้งนี้ในการตรวจวิเคราะห์จะวิเคราะห์หาปริมาณของสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่เปรียบเทียบกับปริมาณเริ่มต้น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางในการเร่งการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ
2. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนออกจากน้ำเสีย
3. ได้วิธีการในการนำผงเหล็กกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์

## บทที่ 2

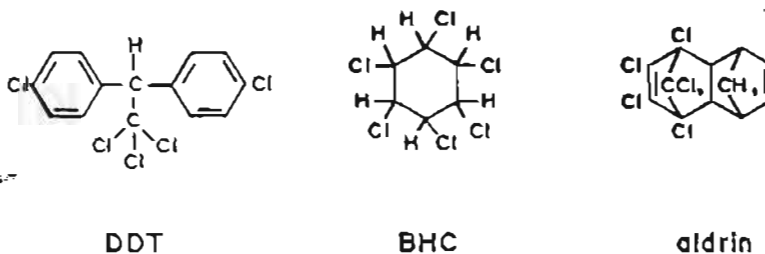
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะทางเคมีของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน

สารฆ่าแมลงที่มีสูตร โครงสร้างออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine pesticides) หรืออาจเรียกว่าสารฆ่าแมลงกลุ่มคลอรีนไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbons) ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างโมเลกุลของสารฆ่าแมลงในกลุ่มนี้ ได้แก่

- ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และคลอรีน เป็นองค์ประกอบหลัก (บางกรณีอาจมีออกซิเจนและกำมะถันด้วย) และมีพันธะ C-Cl ในโมเลกุล
- ไม่มีตำแหน่งทำปฏิกิริยา (reactive site) ภายในโมเลกุล
- มีโครงสร้างส่วนที่เป็นวงแหวนคาร์บอนอยู่ใน โมเลกุล รวมทั้งวงแหวนเบนซีน (benzene ring) ด้วย
- โมเลกุล ไม่มีขั้ว (nonpolar molecule) ละลายในไขมัน ได้ดี
- มีเสถียรภาพ ไม่สลายตัวง่ายในสิ่งแวดล้อม

สารฆ่าแมลงออร์กาโนคลอรีนจัดแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มย่อย (รูปที่ 2.1) ได้แก่



รูปที่ 2.1 : ลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลของออร์กาโนคลอรีน 3 ชนิด ซึ่งจัดอยู่ในแต่ละกลุ่มย่อย (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)



**กลุ่มย่อยที่ 1 :** คีลีทีและสารคล้ายคีลีที (DDT and DDT analogues) Othmar Zeidler ชาวเยอรมัน เป็นผู้สังเคราะห์คีลีทีขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ.2416 โดยที่ยังไม่รู้ว่ามันมีผลในการฆ่าแมลงได้ดี Paul Muller ชาวสวิสเซอร์แลนด์ เป็นผู้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติในการฆ่าแมลง และมีการผลิตออกสู่ตลาดในปี พ.ศ.2485 ในชื่อการค้า เกซารอล (Gesarol) เพื่อใช้ในการเกษตร และชื่อการค้านี้ โนซิด (Neocid) เพื่อใช้ในการสาธารณสุข คีลีทีเป็นสารฆ่าแมลงที่มีการใช้แพร่หลายทั่วโลกในช่วงระยะกว่า 20 ปีนับจากออกขาย ในช่วงเวลาดังกล่าว คีลีทีได้รับการยกย่องว่าเป็นสารฆ่าแมลงสมบูรณ์แบบ เพราะเหตุผลหลายประการ คือ มีพิษต่อแมลงมากชนิด มีความคงทนออกฤทธิ์อยู่ได้นาน มีพิษเฉียบพลันต่อคนและสัตว์เลือดอุ่นค่อนข้างต่ำ (จัดอยู่ในระดับพิษปานกลาง) และราคาถูก เพราะต้นทุนการผลิตต่ำ ปริมาณการใช้คีลีทีเริ่มลดลงภายหลังปี พ.ศ.2514 เนื่องจากปัญหามลภาวะในสิ่งแวดล้อมและการสร้างความต้านทานโดยแมลงศัตรู ได้มีการประกาศห้ามใช้คีลีทีในประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศ รวมทั้งสหรัฐอเมริกา ซึ่งประกาศห้ามใช้ภายในประเทศ แต่ยังคงมีการผลิตเพื่อส่งขายประเทศกำลังพัฒนาเพื่อใช้ในการควบคุมโรคมาลาเรียและแมลงเบียนภายนอก เช่น หมัดและเหา ในประเทศไทยก็มีการห้ามใช้คีลีทีในการเกษตร

สารคล้ายคีลีทีซึ่งเคยมีการใช้เป็นสารฆ่าแมลง ได้แก่ TDE หรือ DDD, methoxychlor, perthane, dicofol และ chlorobenzilate แต่ในปัจจุบันเฉพาะสองชนิดหลังเท่านั้นที่ยังมีการใช้ทั่วไปรวมทั้งในประเทศไทย เพื่อกำจัด ไรศัตรูพืช

**กลุ่มย่อยที่ 2 :** เฮกซาคลอโรไซโคลเฮกเซน (Hexachlorocyclohexane) สารฆ่าแมลงในกลุ่มนี้มีชนิดเดียว คือ บีเอชซี[BHC (benzenehexachloride)] บีเอชซีเป็นสารผสมของ 5 ไอโซเมอร์ซึ่งมีระดับความเป็นพิษต่อแมลงแตกต่างกัน แกมมาไอโซเมอร์ (gamma isomer) มีความเป็นพิษสูงสุด จึงมีการผลิตแยกเฉพาะแกมมาไอโซเมอร์อย่างเดียวนี้ชื่อสามัญว่า ลินเดน (lindane) มีสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าคีลีทีประมาณ 100 เท่า และเนื่องจากมีค่าความดันไอสูง ระเหยเป็นไอได้ง่าย จึงมีความเป็นพิษทางการหายใจด้วย บีเอชซีใช้ได้กับแมลงประเภทปากกัดกิน เช่น หนอนผีเสื้อ และประเภทปากดูดกิน เช่น เพลี้ย และมวน บีเอชซีมีพิษสูงต่อปลวก ผึ้ง และศัตรูธรรมชาติ

**กลุ่มย่อยที่ 3 :** ไซโคลไดเอิน (Cyclodiene) เป็นสารเคมีกลุ่มไดเอิน (diene) สังเคราะห์ขึ้นตามหลักการของปฏิกิริยาดีลส์-อัลเดอร์ (Diels-Alder reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารเคมีวงแหวนที่มีคาร์บอน 6 คาร์บอนประกอบเป็นวงแหวน จากไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวแบบไซโคลเพนทาไดเอิน ซึ่งในกรณีนี้คือ เฮกซาคลอโรไซโคลเพนทาไดเอิน (hexachlorocyclopentadiene) ตัวอย่างสารฆ่าแมลงในกลุ่มนี้ได้แก่ คลอร์ดาน (chlordane) และอัลดริน

คลอร์เดน เป็นสารฆ่าแมลงในกลุ่มไซโคลไดอินชนิดแรกที่ผลิตออกขาย ออกฤทธิ์ฆ่าแมลงได้โดยการสัมผัส การกิน และการหายใจ จึงใช้กำจัดแมลงได้มากชนิด แต่การใช้มีข้อจำกัดเนื่องจากมีพิษต่อพืช ปัจจุบันจึงใช้เฉพาะการกำจัดแมลงที่อยู่ในดิน เช่น มด และปลวก

อัลดริน คริลดริน (dieldrin) และเอนดริน (endrin) เป็นสารฆ่าแมลงในกลุ่มไซโคลไดอินที่มีฤทธิ์ตกค้างนาน และมีพิษสูงโดยการสัมผัส เมื่ออัลดรินเข้าสู่พืชและสัตว์ และรวมทั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโดยจุลินทรีย์ในดินจะได้เมแทบอลิต์ในรูปอีพอกไซด์ (epoxide) ซึ่งก็คือคริลดริน และจะมีความคงทนอยู่ในดินได้นานหลายปี ในการทดสอบพิษเรื้อรังกับหนูทดลอง พบว่า aldrin และ dieldrin แสดงพิษในการก่อมะเร็ง แม้จะยังไม่มีข้อสรุปในการเกิดกับคนก็ตาม หลายประเทศรวมทั้งสหรัฐอเมริกาจึงห้ามใช้ในการเกษตรมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2517 ในประเทศไทยได้มีการประกาศห้ามใช้ในการเกษตรเช่นกัน แต่ยังให้ใช้ได้ในการป้องกันกำจัดปลวกตามอาคารบ้านเรือน ส่วนเอนดรินนั้น เป็นไอโซเมอร์ของคริลดริน เป็นสารที่มีพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นสูง ปัจจุบันจึงเลิกใช้

เอนโดซัลแฟน (endosulfan) เป็นสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนชนิดที่มีออกซิเจนและกำมะถันเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล เอนโดซัลแฟน เป็นส่วนผสมของไอโซเมอร์ 2 ชนิด คือแอลฟา (alpha) และบีตา (beta) ผสมอยู่ในอัตรา 4:1 มีฤทธิ์ในการฆ่าแมลงได้มากชนิดเช่นเดียวกับอัลดรินแต่มีความคงทนปานกลาง (ประมาณ 2-3 สัปดาห์) จึงใช้ฉีดพ่นบนพืชได้ แต่ถ้าใส่ในดินจะเปลี่ยนรูปเป็นเอนโดซัลแฟนซัลเฟต (endosulfan sulfate) ซึ่งจะมีความคงทนมาก เอนโดซัลแฟน มีพิษสูงต่อปลวก มีพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นในระดับปานกลาง และมีพิษในการฆ่าไรด้วย แต่มีพิษต่ำต่อผึ้งและแมลงที่มีประโยชน์ และไม่สะสมในไขมันในร่างกาย จึงเป็นสารออร์กาโนคลอรีนชนิดเดียวที่ยังไม่ถูกห้ามใช้ในสหรัฐอเมริกา นอกจากนั้นยังมีผลในการเสริมพิษของสารฆ่าแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัสอีกด้วย

มีสารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนอีกชนิดหนึ่ง เป็นสารผสมของไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 100 ชนิด เรียกรวมว่า คลอรีเนตแคมเฟน (chlorinated camphene) ชื่อสามัญของสารผสมนี้คือท็อกซาเฟน (toxaphene) เป็นสารฆ่าแมลงที่มีสมบัติทางชีววิทยาค้ำคลึงดินแดน ไม่มีการสะสมในไขมัน ไม่มีพิษต่อพืช ยกเว้นพืชตระกูลแตง อย่างไรก็ตามปัจจุบันท็อกซาเฟนถูกห้ามใช้ในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทยด้วย เนื่องจากพบว่าทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง

ตารางที่ 2.1 สารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

ชื่อสามัญ	ชื่อเคมี	LD <sub>50</sub> หนู มก./กก.	
		ทางปาก	ทางผิวหนัง
Aldrin	1,2,3,4,10,10-hexachloro-1,4,4a,5,8,8a-hexahydro-exo-1,4-endo 5,8-dimethanonaphthalene	38-67	98
DDT(p,p'-DDT)	1,1,1,-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane	113	2,510
Heptachlor	1,4,5,6,7,8,8-heptachloro-3a,4,7,7a-tetrahydro-4,7-methanoinden	147-220	119-320
Lindane	Gamma isomer 1,2,3,4,5,6-hexachlorocyclohexane	88-125	1,000

## 2.2 อันตรายจากการใช้สารฆ่าแมลง

สารฆ่าแมลงซึ่งนำมาใช้ในการป้องกันการทำลายของแมลงศัตรูพืช เพื่อรักษาผลผลิตหรือเพื่อป้องกันการรบกวนของแมลงตามเคหะสถานนั้น สารฆ่าแมลงส่วนใหญ่โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์สังเคราะห์เป็นสารซึ่งมีความเป็นพิษสูง และบางชนิดยังมีความคงทนในสิ่งแวดล้อม การนำมาใช้นอกจากให้ประโยชน์แล้ว ย่อมมีโทษควบคู่ไปด้วยเสมอ สารฆ่าแมลงอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ได้ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม ทางตรงเกิดจากการได้รับสารระหว่างใช้ ทางอ้อมเกิดจากการได้รับสารฆ่าแมลงตกค้างที่มีอยู่ในอาหารที่**ใช้บริโภค** ตลอดจนสภาวะแวดล้อม

### 2.2.1 อันตรายจากพิษเฉียบพลันของสารฆ่าแมลง

#### 2.2.1.1 อันตรายโดยตรงต่อมนุษย์

การได้รับพิษเฉียบพลันโดยตรงเป็นอันตรายที่เด่นชัดที่สุด อาจมีผลให้ต้องสูญเสียชีวิต เสียเวลา ลดความสามารถในการทำงาน ตลอดจนเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาล วิธีทางที่สารฆ่า

แมลงเข้าสู่ร่างกายได้มี 3 ทาง คือ ทางปาก ทางการหายใจ และทางผิวหนัง สาเหตุของการได้รับพิษ อาจเกิดจาก

(ก) การนำคั่วตายโดยเจตนา

(ข) การประกอบอาชีพ ได้แก่ ผู้ที่ประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร หรือผู้ที่ทำงานในโรงงานผลิตสารพิษ เกษตรกรมักได้รับสารพิษในขณะที่ทำการพ่นสารจากการหายใจรับละอองสารเข้าสู่ร่างกาย และจากการซึมผ่านเข้าทางผิวหนัง รวมถึงอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานด้วย เช่น ทำหกรคผิวหนัง หรือกระเด็นเข้าตาระหว่างผสมสาร การใช้สารฆ่าแมลงของเกษตรกรนั้น ถ้าใช้โดยการปฏิบัติตามคำแนะนำอย่างถูกต้องย่อมจะไม่มีอันตรายต่อเกษตรกรผู้ใช้ สาเหตุของการเกิดอันตรายเนื่องมาจาก

- เกษตรกรนิยมใช้สารฆ่าแมลงที่มีพิษร้ายแรง เพราะไม่ตระหนักในปัญหา นี้ เพียงแต่ต้องการใช้สารที่ราคาถูก และให้ผลในการกำจัดที่รวดเร็วทันใจ
- เกษตรกรไม่นิยมใช้เครื่องป้องกันในขณะที่ใช้สาร เนื่องจากอากาศร้อน หรือประหยัดไม่ยอมเสียเงินซื้อ

(ค) อุบัติเหตุ ได้รับสารโดยไม่เจตนา เช่น โดยการกินเนื่องจากความเข้าใจผิดว่าเป็นยารักษาโรค กินสารที่บรรจุในภาชนะที่ใช้บรรจุเครื่องดื่ม ในกรณีเด็กอาจเกิดจากการหยิบสิ่งของเข้าปาก เช่น การอมช้อนที่ใช้ตักสารฆ่าแมลง

(ง) กินอาหารที่มีสารฆ่าแมลง โดยการปนเปื้อนมากับผักและผลไม้ที่มีวิธีปฏิบัติในการใช้สาร ไม่ถูกต้อง เช่น เก็บเกี่ยวผลผลิตทันทีหลังจากการใช้สาร

(จ) การฆาตกรรม ได้รับพิษโดยผู้อื่นเจตนา

ในปี พ.ศ.2529 องค์การสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติรายงานสถิติผู้ได้รับพิษจากสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ ซึ่งประเมินโดยองค์การอนามัยโลกว่า มีผู้ได้รับพิษเฉียบพลันโดยไม่ตั้งใจประมาณ 1 ล้านคนต่อปี โดยมีอัตราการตายประมาณร้อยละ 0.5-2 มีรายงานว่าทวีปเอเชียมีจำนวนผู้ได้รับพิษเฉียบพลันสูงสุด กล่าวคือ คิดเป็นร้อยละ 44.3 ทวีปอเมริกา ร้อยละ 42.6 ทวีปยุโรป ร้อยละ 10 ทวีปแอฟริกา ร้อยละ 2.8 และทวีปออสเตรเลีย ร้อยละ 0.3 ในบรรดาสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ที่ก่อให้เกิดพิษพบว่าเป็นสารในกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส ร้อยละ 73.4 และสารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ร้อยละ 12.6

ในประเทศไทย กองระบาดวิทยา กระทรวงสาธารณสุข ได้รายงานสถิติผู้ป่วยและเสียชีวิตอันเนื่องมาจากสารอันตรายในปี พ.ศ.2537 ว่ามีจำนวนผู้ป่วยทั้งสิ้น 3,281 ราย และเสียชีวิต 42

ราย โดยผู้ป่วยที่ได้รับอันตรายจากการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ ในขณะที่ประกอบอาชีพจะมีจำนวนสูงสุดถึง 3,165 ราย โดยผู้ป่วยเหล่านี้จะมีอาชีพเป็นเกษตรกรถึงร้อยละ 73.8 และมีอาชีพรับจ้างหรือกรรมกรร้อยละ 16.4

ภูมิภาคที่มีอัตราการป่วยจากสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์สูงสุด ได้แก่ ภาคเหนือ รองลงมาคือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ โดยมีอัตราการป่วย 13.78, 3.42, 1.94 และ 1.34 คนต่อประชากรหนึ่งแสนคน ตามลำดับ ทั้งนี้กำแพงเพชรเป็นจังหวัดที่มีอัตราป่วยสูงสุดของประเทศ รองลงมาคือ นครปฐม นครสวรรค์ และสุโขทัย ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงกลุ่มและชนิดของสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ซึ่งเป็นสาเหตุของการป่วยและเสียชีวิตแล้ว พบว่าเกิดจากสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัสสูงที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 55.37 จากจำนวนผู้ป่วยที่ทราบชนิดของสารเคมี นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากสารฆ่าวัชพืช ร้อยละ 25.34 และสารฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมต ร้อยละ 13.34

การจัดลำดับสารฆ่าแมลงซึ่งก่อให้เกิดพิษเท่าที่ทราบชื่อ เรียงลำดับดังนี้ parathion, methyl parathion, methomyl, propoxur, DDT, carbofuran, mevinphos, monocrotophos, carbaryl และ endrin

โดยทั่วไปความเป็นอันตรายของสารฆ่าแมลงขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น

- ก. คุณสมบัติของสารฆ่าแมลงและระดับความเป็นพิษของสารออกฤทธิ์ ตลอดจนลักษณะทางกายภาพ เช่น อยู่ในรูปผง น้ำ หรือเม็ด
- ข. วิธีทางที่เข้าสู่ร่างกาย
- ค. ระยะเวลาที่ได้รับสารและความถี่ของการได้รับสาร
- ง. ปริมาณสารที่ได้รับ
- จ. ความเร็วในการชำระล้างสารออกจากร่างกาย
- ฉ. สภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ และความชื้น

ระดับความเป็นพิษของสารออกฤทธิ์ ซึ่งแสดงโดยค่า  $LD_{50}$  นั้น เป็นดัชนีซึ่งนิยมใช้ทั่วไปในหมู่นักวิชาการ อย่างไรก็ตาม การที่จะสรุปว่าสารฆ่าแมลงชนิดใดมีอันตรายต่อมนุษย์หรือสัตว์ มากน้อยเพียงไร จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ ตามที่กล่าวข้างต้นประกอบด้วย

กรณีสารออร์กาโนคลอรีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่ได้รับสาร DDT จะแสดงอาการไวต่อสิ่งเร้ามาก กระวนกระวาย เวียนศีรษะ เสียการทรงตัว มีการชัก ติดตามด้วยอาการตัวเขียวคล้ำเนื่องจากขาดออกซิเจน

### 2.2.1.2 อันตรายที่เกิดกับสัตว์นอกเป้าหมายในการกำจัด

สัตว์เลี้ยงและสัตว์ป่ามีโอกาสได้รับสารฆ่าแมลงได้เช่นกัน จากการฉีดพ่นทั้งทางภาคพื้นดินหรือทางอากาศโดยเครื่องบิน นอกจากนี้ในการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูที่มารบกวนสัตว์เลี้ยง ก็จะทำให้สัตว์ได้รับอันตรายได้ ถ้าหากการใช้ไม่ถูกวิธี

แมลงที่มีประโยชน์ต่าง ๆ ได้แก่ แมลงช่วยผสมเกสร เช่น ผึ้ง และศัตรูธรรมชาติของแมลง ได้แก่ ตัวห้ำ และตัวเบียน ก็อาจได้รับอันตรายจากการใช้สารฆ่าแมลง ทั้งนี้โดยทั่วไปพบว่าแมลงที่มีประโยชน์หรือแมลงเป้าหมายในการกำจัดเหล่านี้ มักจะมีความอ่อนแอต่อสารฆ่าแมลงมากกว่าแมลงศัตรูที่เป็นเป้าหมายซึ่งต้องการกำจัด

ในกรณีของศัตรูธรรมชาติซึ่งถูกทำลายเนื่องจากการใช้สารฆ่าแมลงเป็นประจำ อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบตามมา 2 อย่าง ได้แก่

ก. การเกิดรีเซอเรนซ์ (resurgence) ของแมลงศัตรู หมายถึง การเกิดการระบาดของแมลงศัตรูครั้งใหม่ภายหลังการใช้สารฆ่าแมลง และเป็นการระบาดที่มีความรุนแรงมากกว่าเดิม การเกิดรีเซอเรนซ์อาจเป็นผลมาจากการขาดปัจจัยทางชีวภาพที่สำคัญในการควบคุมปริมาณของแมลงศัตรู คือ ศัตรูธรรมชาติที่ถูกทำลายไปเมื่อมีการใช้สารฆ่าแมลง

ข. การเกิดการระบาดของแมลงศัตรูชนิดอื่น ซึ่งปกติเคยมีศัตรูธรรมชาติเป็นปัจจัยควบคุมปริมาณอยู่

สารฆ่าแมลงแต่ละชนิดมีอันตรายต่อผึ้งในระดับแตกต่างกัน ชนิดที่มีอันตรายสูงมากต่อผึ้ง เช่น acephate, aldicarb, carbaryl, carbofuran, dimethoate, malathion, methomyl, monocrotophos และ resmethrin เป็นต้น ชนิดที่มีอันตรายปานกลาง เช่น endosulfan, phosalone, carbophenothion, coumaphos, dimeton และ temephos เป็นต้น ชนิดที่เกือบไม่มีอันตราย เช่น allethrin, Bt, pyrethrin, rotenone และ trichlorfon เป็นต้น

## 2.2.2 สารฆ่าแมลงตกค้างและอันตรายจากสารตกค้าง

สารฆ่าแมลงตกค้าง (insecticide residues) หมายถึง สารฆ่าแมลง รวมทั้งเมแทบอไลต์ของสารฆ่าแมลงนั้น ๆ ซึ่งมีเหลืออยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของสภาวะแวดล้อม (ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต) ภายหลังจากใช้สารฆ่าแมลง ตลอดจนมีอยู่ภายในพืชภายหลังเก็บเกี่ยวแล้ว ปริมาณสารฆ่าแมลงตกค้างใช้หน่วยเป็นพีพีเอ็ม (ppm; parts-per-million) ซึ่งหมายถึงปริมาณเป็นมิลลิกรัมของสารฆ่าแมลงต่อซับสเตรท (substrate) 1 กิโลกรัม

### 2.2.2.1 การปนเปื้อนของสารฆ่าแมลงในสิ่งแวดล้อม

สารฆ่าแมลงอาจเข้าปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก

ก. การใช้เพื่อการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูทางการเกษตรและการสาธารณสุข การใช้สารฆ่าแมลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งการพ่นโดยทางเครื่องบิน ถ้าไม่มีการคำนวณทิศทางลมและเพดานบินให้ถูกต้อง อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมาก เนื่องจากปริมาณสารที่พ่นเพียงร้อยละ 25 เท่านั้นที่จะตกลงถึงพืชเป้าหมายที่เราต้องการให้ได้รับสาร อีกร้อยละ 75 จะลอยปะปนอยู่ในอากาศ และตกลงในพื้นที่ที่ไม่ต้องการใช้สารฆ่าแมลง บางส่วนอาจตกลงในแหล่งน้ำ บ้านเรือนที่พักอาศัย ยิ่งละอองยามีขนาดเล็กลงเท่าไร การลอยไปตกนอกเป้าหมายก็จะเกิดมากยิ่งขึ้นเท่านั้น กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะตกลงดินในพื้นที่เป้าหมาย ส่วนอนุภาคขนาดเล็กอาจลอยไปตกในบริเวณที่ห่างพื้นที่เป้าหมายออกไปหลายกิโลเมตร

สำหรับการใช้ในลักษณะฉีดพ่นภาคพื้นดิน มีการประมาณว่าร้อยละ 50 ของปริมาณสารฆ่าแมลงที่ใช้จะตกบนพื้นผิวพืช และจะมีผลในการป้องกันกำจัดแมลงได้ และประมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 เท่านั้นที่จะถูกตัวแมลงโดยตรง

สารฆ่าแมลงที่ใช้ในการเกษตรมีปริมาณประมาณร้อยละ 50 ของปริมาณสารฆ่าแมลงที่มีการใช้ทั้งหมด สารฆ่าแมลงที่ถูกใช้ไปจะสลายไปได้โดยปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น การชะละลายโดยฝนและน้ำค้าง โดยปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลออกซิเดชัน (photochemical oxidation) รวมทั้งโดยปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ในพืชและสัตว์ ระยะเวลาที่ใช้ในการเสื่อมสลายจะแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของสารฆ่าแมลง และปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมอื่น ๆ

ข. ของเสียจากโรงงานผลิตสารฆ่าแมลง เช่น น้ำทิ้งจากการล้างเครื่องจักรและโรงงาน ซึ่งระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและจากมลพิษทางอากาศ ซึ่งในกรณีนี้โรงงานที่ผลิตสารในรูปผงจะมีการฟุ้งกระจายสูงกว่าโรงงานที่ผลิตสารในรูปของเหลว





การเคลื่อนย้ายของสารฆ่าแมลงในอากาศ มักเกิดขึ้น โดยมีไอน้ำและฝุ่นผงเป็นพาหะ อาจมีการระเหยของสารจากผิวดินหรือผิวน้ำพร้อมกับไอน้ำ (co-distillation) ในทางตรงข้าม สารฆ่าแมลงอาจกลับสู่ดินหรือน้ำได้อีก พร้อมกับฝนและฝุ่นที่ตกลงมา

ในดินมักจะพบสารฆ่าแมลงสะสมอยู่บริเวณหน้าดินลึก 1-2 นิ้ว สารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมโดยอนุภาคดิน โดยทั่วไปสารฆ่าแมลงที่มีคุณสมบัติการละลายน้ำได้สูงกว่า 5 พีพีเอ็ม จึงจะมีการชะละลาย (leaching) เกิดขึ้นได้ การทำให้แตกสลาย (degradation) ของสารฆ่าแมลงในดินเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในดินเป็นตัวละครสำคัญ ดังนั้น ปัจจัยใด ๆ ก็ตามที่มีผลในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ดิน ย่อมมีผลให้สารฆ่าแมลงเกิดการแตกสลายเร็วขึ้นด้วย ปัจจัยดังกล่าวเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ความโปร่ง และปริมาณอินทรีย์วัตถุ เป็นต้น

ในน้ำ อนุภาคดินที่มีอยู่ในน้ำจะมีผลทำให้สารฆ่าแมลงตกตะกอนมากขึ้นและเร็วขึ้น ดินตะกอนซึ่งอยู่ที่ก้นสระ ทะเลสาบ หรือแม่น้ำ จึงเป็นแหล่งสะสมของสารฆ่าแมลงตกค้างในปริมาณสูงกว่าระดับของสารตกค้างที่มีอยู่ในน้ำมาก รายงานการศึกษาปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างและคลองที่เชื่อมต่อไปเขตกรุงเทพมหานคร พบว่าการแพร่กระจายของสารขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำและปริมาณการตกค้างของสารดังกล่าวในตะกอนดินมีค่าสูงกว่าในน้ำ 200-300 เท่า

ออร์กาโนคลอรีนเป็นสารฆ่าแมลงกลุ่มที่มีพิษตกค้างนานที่สุด สารกลุ่มนี้โดยเฉพาะ คีคิที ได้เคยเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ ฆ่าแมลงได้มาก ชนิด สังเคราะห์ได้ง่ายจึงมีราคาถูก มีพิษเฉียบพลันต่อสัตว์เลื้อยคุดำ และออกฤทธิ์อยู่ได้นาน ในปัจจุบันนี้ถึงแม้จะมีความตื่นตัวในเรื่องผลเสียระยะยาวเนื่องจากสารตกค้างของคีคิทีอย่างมาก ประเทศที่พัฒนาแล้วส่วนใหญ่ได้ยกเลิกหรือจำกัดการใช้ตั้งแต่ปี พ.ศ.2513 เป็นต้นมา แต่ก็ยังคงมีการแนะนำให้ใช้คีคิทีเพื่อกำจัดยุงในโครงการกำจัดโรคมalaria เพราะมีราคาถูกกว่าสารฆ่าแมลงในกลุ่มอื่น ๆ การมีพิษตกค้างที่ยาวนานของสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเนื่องจากสมบัติ 2 ประการ ได้แก่

ก. โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยพันธะ C-C, C-H และ C-Cl ซึ่งเป็นลักษณะที่ทำให้มีเสถียรภาพ การแตกสลายเกิดขึ้นได้ช้ามาก ออร์กาโนคลอรีนส่วนใหญ่สามารถอยู่ในดินได้นานเป็นเดือนหรือเป็นปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง โดยทั่วไปค่าครึ่งชีวิต

(half life) (ตารางที่ 2.2 และ 2.3) ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง คือ ส่วนประกอบของสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น ในสภาพสิ่งแวดล้อมเขตร้อนชื้นที่ดีจะมีการสลายตัวเร็วกว่าในเขตหนาว

ข. ละลายในน้ำได้น้อย แต่ละลายได้ดีในไขมัน ตัวอย่างเช่น ดีดีที ละลายในน้ำได้เพียง 0.02 พีพีเอ็ม ทำให้มีการสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิตได้ โดยเมื่อเข้าไปสะสมแล้วการขับถ่ายออกมาจะเกิดขึ้นได้ยาก

ตารางที่ 2.2 ความคงทนของสารฆ่าแมลงบางชนิดในดิน ระยะเวลา (ปี) ที่ใช้ในการสลายตัว 50% (ค่าครึ่งชีวิต)<sup>v</sup> และการสลายตัว 95% (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

ชนิดสาร	ระยะเวลาสลายตัว 50% (ปี)	ระยะเวลาสลายตัว 95%(ปี)
<b>กลุ่มออร์กาโนคลอรีน</b>		
aldrin	1-4	2-6
chlordane	2-4	3-5
ดีดีที	3-10	4-30
dieldrin	1-7	2-25
endrin	4-8	-
heptachlor	3-5	6-12
toxaphene	10	-
BHC	2	-
<b>กลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส</b>		
fonofos	0.2	-
carbophenothion	0.5	-
<b>กลุ่มคาร์บาเมต</b>		
Carbofuran	0.05-1	-

<sup>v</sup> ค่าครึ่งชีวิต (half life) หมายถึง เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ปริมาณของสารลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม

ตารางที่ 2.3 ความคงทนของสารฆ่าแมลงบางชนิดในน้ำธรรมชาติ (สุภาณี พิมพ์สมาน,2540)

ไม่คงทน <sup>1/</sup>	คงทนเล็กน้อย <sup>2/</sup>	คงทนปานกลาง <sup>3/</sup>	คงทนสูง <sup>4/</sup>
azinphos-methyl	aldrin	aldicarb	dieldrin
carbaryl	diazinon	carbofuran	endrin
chlorpyrifos	disulfoton	chlordan	heptachlor
demeton	methoxychlor	dimethoate	monocrotophos
dichlorvos	phorate	ethion	
dicrotophos		fonofos	
endosulfan		lindane	
fenitrothion		toxaphene	
malathion			
methoprene			
methyl parathion			
mevinphos			
propoxur			
pyrethrin			
retenone			

<sup>1/</sup> ค่าครึ่งชีวิตต่ำกว่า 2 อาทิตย์

<sup>2/</sup> ค่าครึ่งชีวิต 2-6 อาทิตย์

<sup>3/</sup> ค่าครึ่งชีวิต 6 อาทิตย์ ถึง 6 เดือน

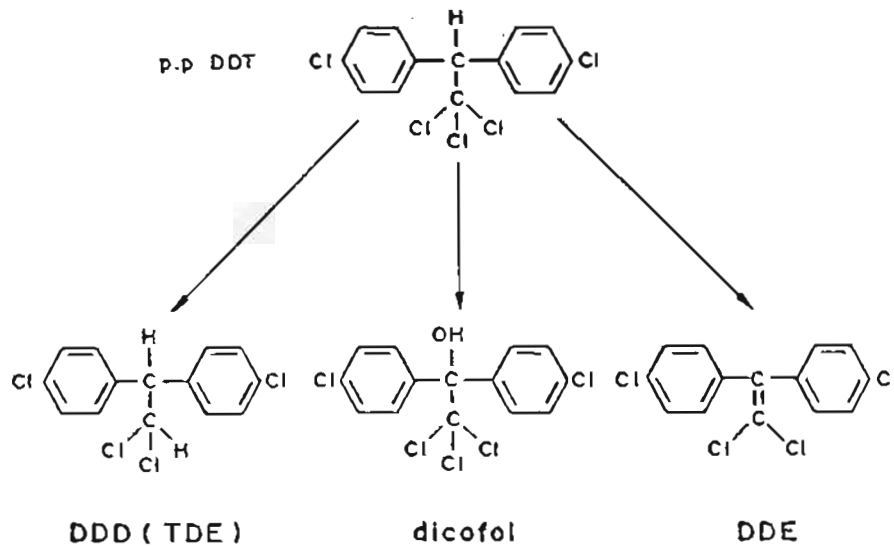
<sup>4/</sup> ค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 6 เดือน

ในกรณี ดีดีที ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเมแทบอลิต์ในรูปอื่น เช่น จากดีดีทีที่เป็น DDE แต่เมแทบอลิต์เหล่านั้นก็ยังเป็นสารพิษซึ่งมีพิษและมีความคงทนสูง โดยทั่วไปเมแทบอลิซึมของดีดีทีเกิดขึ้นได้ 3 วิธีทาง (รูปที่ 2.3) ได้แก่

ก. โดยปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน (dehydrochlorination) ผลจากปฏิกิริยาจะได้สาร DDE ซึ่งยังคงมีความเป็นพิษ แต่อยู่ในระดับต่ำกว่าดีดีที วิธีทางนี้เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตทั่วไป โดยมี เอนไซม์ดีดีทีดีไฮโดรคลอรีเนส (DDT dehydrochlorinase; DDTase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา DDE จะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันได้ต่อไป

ข. โดยปฏิกิริยารีดักทีฟดีคลอรีเนชัน (reductive dechlorination) เป็นวิธีทางซึ่งอาจเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ โดยการทำงานของจุลินทรีย์บางชนิด ผลจากปฏิกิริยาจะได้สาร DDD (TDE)

ค. โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลจากปฏิกิริยาจะได้สาร dicofol ซึ่งมีสมบัติเป็นสารฆ่าไร วิธีทางนี้เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแมลง โดยเกี่ยวข้องกับระบบเอนไซม์โมโนออกซิเจเนส



รูปที่ 2.3 : เมแทบอลิซึมของ ดีดีที (สุภาณี พิมพ์สมาน,2540)

### 2.2.2.3 การสะสมในสิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation)

สิ่งมีชีวิตสามารถสะสมสารฆ่าแมลงไว้ในเนื้อเยื่อไขมันในพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชหัว เช่น แครอท อาจพบปริมาณสารคลอรินหรือเฮปตาคลอร์ อยู่ในระดับใกล้เคียงกับที่มีอยู่ในดินปลูก ในสัตว์น้ำ เช่น หอย ซึ่งกินอาหารโดยการกรองเอาอาหารจากน้ำ พบว่าอาจมีการสะสมของ ดีดีทีไว้ในเนื้อเยื่อได้ในระดับประมาณ 70,000 เท่าของระดับดีดีทีที่มีอยู่ในน้ำทะเล ในปลากินพืช ซึ่งอยู่ในน้ำที่มีเอนครินปนเปื้อนอยู่เพียง 2-3 เดือน จะมีปริมาณสารสะสมในร่างกายได้ถึงประมาณ 10,000 เท่าของที่มีอยู่ในน้ำ

อัตราการสะสมสารฆ่าแมลงในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ โดยทั่วไปจะมีอัตราสูงกว่าสิ่งแวดล้อมทางบก เหตุผลสำคัญที่สุดในการอธิบายเรื่องนี้ก็คือ คุณสมบัติในการละลายได้ดีในไขมันของสารออร์กาโนคลอรีน และโดยมีน้ำเป็นตัวกลางที่ดีในการเคลื่อนย้ายไปสะสมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เหตุผลอีกข้อหนึ่งก็คือ สิ่งมีชีวิตในน้ำมีโอกาสได้รับสารตกค้างได้สองทางโดยผ่านทางอาหาร และโดยการได้รับโดยตรงจากน้ำซึ่งอยู่ล้อมรอบ ดังจะเห็นได้จากความแตกต่างของการเพิ่มขยายความเข้มข้น

ของคิตีทีในระดับที่แตกต่างกันของพืชและสัตว์ในสิ่งแวดล้อมทางบก (ในดิน) และสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของอัตราความเข้มข้นของคิตีทีในสิ่งแวดล้อมทางบกและสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

สิ่งสังเกด		คอนเซนเทรชันแฟกเตอร์ <sup>1/</sup>			
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด		
พืช	ในดิน	ใบพืช	-	0.09	
		รากพืช	0.04	0.13	
ในน้ำ		แพลงก์ตอน	250	16,666	
		สาหร่าย	0.34	33	
		พืชชั้นสูง	0.45	100,000	
สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง	ในดิน	ไส้เดือน	0.67	73	
		แมลง (ด้วง)	0.31	2.8	
	ในน้ำ	หอย	144	1,480	
		หอยนางรม	15,000	70,000	

$$\text{คอนเซนเทรชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของคิตีทีที่พบในสิ่งสังเกด}}{\text{ความเข้มข้นของคิตีทีในดินหรือน้ำที่อยู่ในบริเวณ}}$$

(concentration factor)

สิ่งมีชีวิตมีความสัมพันธ์ต่อเนื่องของอาหารที่กิน เช่น เป็นผู้กินสิ่งมีชีวิตอย่างหนึ่งเป็นอาหาร ก็อาจจะถูกสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นกินเป็นอาหารอีกทอดหนึ่ง จากชั้นของอาหาร (trophic level) ค่าไปสู่ระดับสูงเป็นลำดับไป เรียกลักษณะนี้ว่า โซ่อาหาร (food chain) ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งในโซ่อาหาร คือ สามารถสะสมสารพิษที่ยังไม่ถูกทำให้แตกสลายในชั้นของอาหารของสิ่งมีชีวิต พบว่า สิ่งมีชีวิตที่จัดอยู่ในชั้นของอาหารต่างกัน มักมีออร์กาโนคลอรีนสะสมอยู่ในปริมาณต่างกัน ปริมาณสารที่สะสมจะสูงกว่าในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในชั้นของอาหารสูงกว่า การสะสมของสารพิษในโซ่อาหารนี้จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตระดับสูงที่อาศัยสิ่งมีชีวิตระดับต่ำเป็นอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งมนุษย์ ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดของโซ่อาหาร มนุษย์มีโอกาสดังกล่าวได้รับสารพิษในปริมาณสูงจนหลายเท่าตัว

การเพิ่มขยายทางชีวภาพ (biomagnification) เป็นคำที่ใช้อธิบายลักษณะการเกิดการเพิ่มความเข้มข้นของสารพิษตกค้างขึ้นตามชั้นของอาหาร โดยทั่วไปมักพบในกรณีของสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ซึ่งมีการทำให้แตกสลายช้ามาก ต้องใช้เวลานานหลายปี ตัวอย่างกรณีศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มขยายทางชีวภาพแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในระบบนิเวศทางน้ำ เช่น กรณีศึกษาในทะเลสาบแห่งหนึ่ง พบว่าปลาและนกที่กินสัตว์เป็นอาหาร ซึ่งอาศัยอยู่ในบริเวณทะเลสาบจะมีปริมาณสะสมของ DDD ซึ่งเป็นสารคล้ายดีดีทีเพิ่มมากขึ้นกว่าปริมาณดีดีทีที่มีอยู่ในน้ำในทะเลสาบถึงประมาณ 80,000 เท่า (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 : การเพิ่มขยายทางชีวภาพในทะเลสาบซึ่งมีการปนเปื้อนของ DDD  
(สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

จากตัวอย่างนี้ ปลากินสัตว์และนกกินสัตว์ซึ่งอยู่ในตำแหน่งยอดของโซ่อาหาร อาจได้รับผลกระทบ 2 ลักษณะ กล่าวคือ ถ้าปริมาณสารที่ได้รับสูงเกินกว่าระดับที่ร่างกายทนได้ อาจตายหรืออาจเกิดผลเรื้อรัง

ในระบบนิเวศทางบก การเพิ่มขยายทางชีวภาพก็อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโซ่อาหารซึ่งอยู่ในระบบนิเวศการเกษตร ตัวอย่างเช่น ในไร่ข้าวโพดที่มีการใช้อัลดรินฉีดพ่นในอัตรา 1 ปอนด์/เอเคอร์ พบมีสารตกค้างของคริลดริน (ซึ่งเป็นเมแทบอลิต์ของอัลดริน) ในดิน 0.03 พีพีเอ็ม ในสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน (ไส้เดือน และด้วงดิน) 1.0-1.5 พีพีเอ็ม ในหนู 1.0 พีพีเอ็ม และในงู (ซึ่งอาศัยในไร่ข้าวโพดและกินหนูเป็นอาหาร) 12.4 พีพีเอ็ม

**ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับปลา :** ปลาหลายชนิดมีความอ่อนแอต่อสารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน พบว่าสารตกค้างของดีดีทีและเมแทบอลิต์ในรูปต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ในทะเลสาบมิชิแกน (Michigan) ทำให้ปลาแซลมอน (salmon) บางชนิดที่เคยมีอยู่ชุกชุมในทะเลสาบแห่งนี้สูญพันธุ์ไป

ออร์กาโนคลอรีนมีผลต่อภาวะเจริญพันธุ์ (fertility) ของปลา ดีดีทีในน้ำในระดับความเข้มข้นเพียง 5 พีพีเอ็ม อาจมีผลทำให้ออมบริโอของไข่ปลาคาร์พ (carp) ตายไปประมาณครึ่งหนึ่ง ในกรณีของลินเคนพบว่าความเข้มข้นเพียง 1 พีพีเอ็มเท่านั้น ก็ทำให้เปอร์เซ็นต์การฟักไข่ของปลาเทราต์ (trout) ลดลงร้อยละ 20 นอกจากนั้นลูกปลาที่ฟักออกมาได้ยังมีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตลดลง และมีความผิดปกติของตัวนครีบ

**ผลกระทบที่เกิดกับนก :** การสูญพันธุ์และการลดจำนวนประชากรของนกหลายชนิด เป็นผลกระทบที่เกิดจากสารตกค้างของออร์กาโนคลอรีนในร่างกายนก ทำให้เกิดความผิดปกติทางสรีรวิทยา ซึ่งเป็นผลเสียต่อการดำรงชีวิต

ในช่วงเวลาประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา นกหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มที่กินสัตว์ รวมทั้งปลาเป็นอาหาร มีปริมาณลดลงมาก ตัวอย่างเช่น เหยี่ยวชนิด *Falco peregrinus* ซึ่งเคยมีอยู่มากในสแกนดิเนเวีย อังกฤษ และสหรัฐอเมริกา มีจำนวนลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่พบเลยในปัจจุบัน นกที่กินปลาเป็นอาหารมีโอกาสได้รับสารตกค้างออร์กาโนคลอรีนที่มีอยู่ในเหยื่อเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่การย่อยสลายสารตกค้างเหล่านี้เกิดขึ้นช้ามาก ทำให้มีปริมาณสารตกค้างในร่างกายในระดับสูง จนเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตและการแพร่พันธุ์

ดีดีทีและสารออร์กาโนคลอรีนอื่น ๆ มีผลกระทบต่อภาวะเจริญพันธุ์ของนก ประมาณ พ.ศ.2494 มีรายงานผลการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ดีดีที คริลอรีน และทีออกซาฟิน ซึ่งมีอยู่ในอาหารในปริมาณ 25-100 พีพีเอ็ม มีผลทำให้ปริมาณการวางไข่ของไก่ฟ้าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดลองข้างต้นเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาความผิดปกติต่าง ๆ ของขบวนการทางสรีรวิทยาที่เป็นผลเนื่องมาจากออร์กาโนคลอรีน อันทำให้ศักยภาพทางชีววิทยา (biotic potential) ของนกลดลง สมมติฐานอย่างหนึ่งที่ตั้งขึ้นก็คือ การมีผลทำให้เปลือกไข่บางลงกว่าปกติ ได้มีการวิจัยแสดงให้เห็นในกรณีของเหยี่ยวชนิด *F. peregrinus* ว่า คำนีความหนาของเปลือกไข่ (อัตราส่วนของน้ำหนักเปลือกต่อความยาวของฟองไข่) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงปี พ.ศ.2488-2489 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการนำสารกลุ่มออร์กาโนคลอรีนมาใช้อย่างมาก

การที่เปลือกไข่บางลง เป็นผลจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมในเปลือกไข่ ในบางครั้งพบว่าเปลือกไข่ที่มีลักษณะดังกล่าวมีปริมาณสะสมของ DDE ในเนื้อเยื่อไขมันสูงถึง 2,500 พีพีเอ็ม คีตีทีและออร์กาโนคลอรีนหลายชนิดทำให้เกิดความผิดปกติในการสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในเปลือกไข่ ข้อมูลดังกล่าวนี้ปัจจุบันได้มีการทดลองเพื่อพิสูจน์อย่างแน่นอนแล้วในนกและสัตว์ปีกหลายชนิด ตัวอย่างเช่น ผลการทดลองโดยใช้เป็ด *Anas platyrhynchos* พบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเปลือกไข่ที่ลดลงจากปกติ และปริมาณสารตกค้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาของเปลือกไข่เพิ่มจาก 10% เป็น 18% เมื่อความเข้มข้นของ DDE หรือดริลดรินเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาของเปลือกไข่ *Anas platyrhynchos* กับปริมาณสารออร์กาโนคลอรีน (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

% การลดลงของ ความหนาของเปลือกไข่	ปริมาณสารตกค้าง (พีพีเอ็ม)	
	DDE	Dieldrin
10	2.4	0.25
18	8.9	0.61

### 2.2.3 สารฆ่าแมลงตกค้างในอาหารและผลิตผลการเกษตร

ปัญหาที่เกิดจากสารฆ่าแมลงตกค้างในผลิตผลการเกษตร นอกจากปัญหาสำคัญในเรื่องอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภคแล้ว ยังเป็นปัญหาในการส่งออกขายต่างประเทศอีกด้วย ประเทศไทยได้เคยพบปัญหานี้ในปี พ.ศ.2524 เนื่องจากสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นผู้ซื้อข้าวไทยรายใหญ่ของไทยไม่ยอมให้มีการนำเข้าข้าวไทยจากประเทศไทย เนื่องจากตรวจพบปริมาณสารเอนครินดกค้างอยู่ในปริมาณสูงกว่าค่าปริมาณสูงสุดของสารมีพิษตกค้างที่ได้กำหนดไว้ คือ 0.05 พีพีเอ็ม

2.2.3.1 ปริมาณสูงสุดของสารมีพิษตกค้างในอาหาร (Maximum Residue Limit; MRL) : หมายถึง ปริมาณสูงสุด หรือความเข้มข้นสูงสุดของสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ ที่อนุญาตให้มีตกค้างได้ในอาหาร หรือผลิตผลการเกษตรที่ใช้เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ ใช้นหน่วยเป็นพีพีเอ็ม หรือมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น เนเธอร์แลนด์ และออสเตรเลีย ได้กำหนดปริมาณสูงสุดของสารพิษตกค้างในอาหารและผลิตภัณฑ์เกษตรที่ใช้บริโภค เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากสารพิษตกค้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารฆ่าแมลงที่จะเกิดแก่สุขภาพอนามัยของคนในประเทศ นอกจากนี้บางประเทศยังถือโอกาสใช้กฎหมายเรื่องนี้เป็นประโยชน์ในการต่อรองเพื่อลดราคาสินค้าที่จะซื้อ ทำให้เกิดความไม่เป็นธรรมในด้านการค้าผลิตภัณฑ์เกษตรกรรมและอาหารระหว่างประเทศ เนื่องจากบางประเทศ โดยเฉพาะประเทศกำลังพัฒนาไม่มีศักยภาพพอที่จะดำเนินการวิจัยเพื่อกำหนดค่า MRL ขึ้นเองได้ และค่า MRL ที่กำหนดขึ้นโดยแต่ละประเทศนั้นยังไม่เท่ากันอีกด้วย

ดังนั้น เพื่อความเป็นธรรมและเพื่อมาตรการความปลอดภัยของการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ในระยะยาว องค์การสหประชาชาติโดยความร่วมมือระหว่างองค์การอาหารและเกษตรและองค์การอนามัยโลก จึงจัดตั้งคณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศ เรียก Codex Alimentarius Commission (CAC) ขึ้นในปี พ.ศ.2505 โดยมีสมาชิกประมาณ 130 ประเทศ รวมทั้งประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค และเพื่อความยุติธรรมในด้านการค้าผลิตภัณฑ์อาหารและเกษตรระหว่างประเทศ คณะกรรมการอาหารมีหน้าที่และความรับผิดชอบเกี่ยวข้องกับ

- ก. มาตรฐานอาหาร
- ข. ให้ความร่วมมือกับสถาบันต่าง ๆ ที่อยู่ในความดูแลของภาครัฐและเอกชน
- ค. กำหนดรายละเอียดและจัดพิมพ์มาตรฐานอาหารในวารสารเกี่ยวกับอาหาร (Codex Alimentarius)
- ง. ส่งเสริมให้รัฐบาลประเทศต่าง ๆ ยอมรับ เพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกในการค้าขายแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศ

การกำหนดค่า MRL ดำเนินการโดยคณะกรรมการที่ CAC ตั้งขึ้น เรียกว่า Codex Committee on Pesticide Residues (CCPR) โดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากประเทศสมาชิก ข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย

- ก. ข้อมูลการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์อย่างเหมาะสมและปลอดภัย (good agricultural practice, GAP) หมายถึง การใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์เท่าที่จำเป็นและเหมาะสมในการทำการเกษตรตามรูปแบบที่เป็นมาตรฐานโดยทั่วไป หรือทำตามคำแนะนำที่จัดทำขึ้นอย่างเป็นทางการ เพื่อให้มีสารตกค้างน้อยที่สุดในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

อย่างยิ่งคริโตรินและดีดีทีในผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหารที่ใช้ในการบริโภคมากกว่าสารชนิดอื่น ๆ บางครั้งยังพบในปริมาณสูงเกินค่ามาตรฐาน MRL ที่ได้กำหนดไว้อีกด้วย (ตารางที่ 2.6)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างค่าปริมาณสูงสุดของสารมีพิษตกค้างในอาหาร (MRL) ที่กำหนดขึ้นโดย Codex Committee on Pesticide Residues (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

สารฆ่าแมลง	ผลิตผล	ค่า MRL (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
อัลตรินและคริโตริน	เนื้อสัตว์	0.2
	ไข่	0.1
	มันฝรั่ง	0.1
	ข้าว	0.02
	นมและผลิตภัณฑ์จากนม	0.15
	ผักกาดหัว	0.1
คาร์บาริล (carbaryl)	เนื้อสัตว์	0.2
	สั้ม	7
	ผักกินใบ	10
	ถั่ว	5
ดีดีที	เนื้อสัตว์	7
	สั้ม	3.5
	ไข่	0.5
	นมและผลิตภัณฑ์จากนม	1.25
	ผลไม้เมืองร้อน	3.5
	ผักต่าง ๆ	7
Malathion	ผักกาดเขียว	0.5
	ผักกินราก	0.5
	ข้าวต่าง ๆ	8
	ผลไม้แห้ง	8
	ถั่ว	0.5
Monocrotophos	เนื้อสัตว์	0.02
	ไข่	0.02
	นมและผลิตภัณฑ์จากนม	0.02
	ถั่วเหลือง	0.05
	มะเขือเทศ	1
	สั้ม	0.2

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างค่าปริมาณสูงสุดของสารมีพิษตกค้างในอาหาร (MRL) ที่กำหนดขึ้น โดย Codex Committee on Pesticide Residues (ต่อ)

สารฆ่าแมลง	ผลิตผล	ค่า MRL (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
Methomyl	เนื้อสัตว์	0.02
	นม	0.02
	สัสม	2
	องุ่น	5
	ถั่วเหลือง	0.1
	ถั่ว (อาหารสัตว์)	10
	ยาสูบ	1

จากการสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดงาจากแหล่งปลูกตามภาคต่างๆ ของประเทศไทย นำมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนตกค้าง พบปริมาณสารตกค้างสูงสุดในตัวอย่างเมล็ดงาจากภาคเหนือ (ตารางที่ 2.7) โดยพบปริมาณเฮปตาคลอร์สูงสุด 0.224 พีพีเอ็ม (ค่า MRL ของเฮปตาคลอร์และเฮปตาคลอร์ อีพอกไซด์ในเมล็ดถั่วเหลืองกำหนดไว้ 0.02 พีพีเอ็ม) คริลครินและอัลครินพบในปริมาณสูงสุด 0.436 พีพีเอ็ม (ค่า MRL ของคริลครินในเมล็ดธัญพืช กำหนดไว้ 0.02 พีพีเอ็ม) และดีดีทีและเมแทบอลิต์ของดีดีที พบในปริมาณสูงสุด 2.012 พีพีเอ็ม ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณคริลครินและอัลครินสะสมอยู่น้อยกว่าภาคอื่น คือ 0.001-0.002 พีพีเอ็ม แต่พบเอนครินในตัวอย่างเมล็ดงาจากภาคนี้ด้วยในปริมาณ 0.014-0.040 พีพีเอ็ม ในขณะที่ตรวจไม่พบในภาคอื่น ตัวอย่างเมล็ดงาจากภาคกลางมีปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนตกค้างอยู่ต่ำที่สุด

ตารางที่ 2.7 ปริมาณ (พีพีเอ็ม) ของสารออร์กาโนคลอรีนที่พบตกค้างในตัวอย่างเมล็ดงาจากภาคต่าง ๆ (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

ภาค	เฮปตาคลอร์และ เฮปตาคลอร์ อีพอกไซด์	คริลครินและ อัลคริน	ดีดีที และ อนุพันธ์	เอนคริน
ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.001-0.028	0.001-0.022	0.002-0.292	0.014-0.040
เหนือ	0.002-0.224	0.011-0.436	0.005-2.012	-
กลาง	0.003	0.002-0.040	0.004-2.021	-
ตะวันตก	0.004-0.009	0.003-0.354	0.003-0.139	-

ผลจากการศึกษาในระดับสารออร์กาโนคลอรีนตกค้างในผลิตภัณฑ์การเกษตรประเภทน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ จากตัวอย่างทั้งหมดที่สำรวจ 252 ตัวอย่าง พบสารตกค้างในน้ำมันพืชและน้ำมันหมู่อ้อยละ 88.3 และ 100 ตามลำดับ ชนิดของสารที่ตรวจพบ ได้แก่ เฮปตาคลอร์ อีพอกไซด์ อัลดริน คริลดรินและเอนคริน ปริมาณสารที่พบส่วนใหญ่อยู่ในปริมาณต่ำ พบว่าใน 2 กรณี คือเฮปตาคลอร์ อีพอกไซด์ในน้ำมันหมู และอัลดรินและคริลดรินในน้ำมันพืชมีปริมาณสารตกค้างในระดับสูงกว่าค่า MRL (ค่า MRL ซึ่งกำหนดไว้ในน้ำมันพืชและธัญพืชของสารทั้ง 3 ชนิดนี้เท่ากัน คือ 0.02 พีพีเอ็ม) โดยพบร้อยละ 13 และ 18.2 ของตัวอย่างน้ำมันพืชและน้ำมันหมูทั้งหมด

#### 2.2.4 ปัญหาต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

สารฆ่าแมลงในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนมีการรวมตัวกับไขมันในร่างกายในลักษณะการรวมตัวทางฟิสิกส์ (physical binding) กล่าวได้ว่าสารฆ่าแมลงเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะถูกเก็บไว้ในไขมันของเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) (ยกเว้นเอนครินซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงและกำจัดออกจากร่างกายได้รวดเร็ว) ผลจากการวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณของคีตีทีในไขมันตามระยะเวลาและปริมาณที่ได้รับสารฆ่าแมลงชนิดนี้ ทรายาคือไขมันยังไม่ละลายหรือยังดูดซับสารไว้ได้ ความเป็นพิษต่อร่างกายส่วนอื่นจะยังไม่ปรากฏ แต่พิษของสารนี้ยังไม่หมดไปจริง ๆ เมื่อมีการสลายตัวของไขมันให้เป็นพลังงานตามความต้องการของร่างกายเมื่อใด สารพิษเหล่านี้จะถูกปล่อยเข้าสู่กระแสโลหิตและอวัยวะสำคัญอื่น ๆ ความเป็นพิษจึงอาจปรากฏขึ้นได้ภายหลัง จากผลการวิจัยพบว่า คีตีทีมีค่าครึ่งชีวิตในไขมันในร่างกายมนุษย์ประมาณ 1 ปี แต่เมแทบอลิต์ของคีตีทีคือ DDE มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 8 ปี

สารหลายชนิดในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน เช่น เฮปตาคลอร์ และ อัลดรินจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยเอนไซม์ในตับ ได้สารอีพอกไซด์ (epoxide) ซึ่งมีความเป็นพิษสูงขึ้น ละลายในไขมันได้ดี และสะสมในเนื้อเยื่อไขมันในร่างกาย ตามหลักการทางพิษวิทยาสารเคมีอาจทำให้เกิดอันตรายในลักษณะของพิษเรื้อรังต่อมนุษย์ได้ 3 ประการ ได้แก่ เป็นสิ่งก่อการกลายพันธุ์ (mutagen) เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และเป็นสารก่อลูกวิรูป (teratogen)

2.2.4.1 สารออร์กาโนคลอรีนและการเกิดมะเร็ง : มีรายงานว่าสารฆ่าแมลงในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนหลายชนิดมีฤทธิ์ก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง แต่ยังมีข้อถกเถียงกันอยู่ว่าวัตถุที่มีพิษซึ่งทำให้เกิดความผิดปกติในสัตว์ทดลองนั้น จะทำให้เกิดความผิดปกติดังกล่าวขึ้นได้เช่นเดียวกับในมนุษย์หรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากสัตว์แต่ละชนิด (species) หรือแม้แต่ชนิดเดียวกันแต่คนละสายเชื้อ (strain) อาจมีการตอบสนองต่อวัตถุมีพิษในลักษณะที่แตกต่างกัน จึงเป็นการยากที่จะนำเอาสิ่งที่เกิด

ขึ้นกับสัตว์ทดลองมาเปรียบเทียบ โดยตรงกับมนุษย์ นอกจากนั้นการเกิดมะเร็งอาจปรากฏขึ้นภายหลังจากการได้รับสารเป็นเวลานาน (5-30 ปี) ปัจจุบันจึงยังไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างความเป็นพิษที่เกิดขึ้นจากการศึกษาในสัตว์ทดลอง และอันตรายที่เกิดขึ้นต่อมนุษย์ได้ อย่างไรก็ตาม องค์การวิจัยโรคมะเร็งระหว่างประเทศ (IARC; International Agency Research on Cancer) ได้แบ่งระดับการประเมินฤทธิ์ก่อมะเร็งของสารเคมีในคนเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่ม 1 : สารเคมีที่มีหลักฐานบ่งชี้แน่ชัดว่าทำให้คนเป็นมะเร็งได้
- กลุ่ม 2A : สารเคมีที่มีหลักฐานบ่งชี้ค่อนข้างแน่ชัดว่าทำให้คนเป็นมะเร็งได้
- กลุ่ม 2B : สารเคมีที่มีหลักฐานบ่งชี้พอสมควรว่าทำให้คนเป็นมะเร็งได้
- กลุ่ม 3 : สารเคมีที่ยังไม่สามารถบ่งชี้ว่าทำให้คนเป็นมะเร็งได้
- กลุ่ม 4 : สารเคมีที่มีหลักฐานว่าไม่ทำให้คนเป็นมะเร็ง

จากการศึกษาผลของสารออร์กาโนคลอรีนในการก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองชนิดต่าง ๆ IARC ได้ให้ข้อสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ฤทธิ์ก่อมะเร็งของสารออร์กาโนคลอรีนและอวัยวะที่เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

สารฆ่าแมลง	ฤทธิ์ก่อมะเร็ง		อวัยวะที่เป็นมะเร็ง
	ชนิดสัตว์ทดลอง	คน (กลุ่ม)	
อัลดริน	หนู	3	ตับ
คลอร์เดน, เฮปตาคลอร์	หนู	3	ตับ
ดีดีที	หนู	2B	ปอด ตับ
คริลควิน	หนู	3	ตับ
เฮกซาคลอโรไซโคลเฮกเซน (บีเอชซี)	หนู	2B	ตับ, leukemia
methoxychlor	หนู	3	ตับ
toxaphene	หนู	2B	leukemia, ตับและต่อมไทรอยด์

## 2.3 กระบวนการบำบัดของเสียที่ปนเปื้อนสารฆ่าแมลง (Hapeman-Somich, 1992)

การกำจัดของเสียที่ปนเปื้อนสารฆ่าแมลงได้รับความสนใจมาหลายทศวรรษแล้วสังเกตจากมีงานวิจัยในเรื่องเหล่านี้มากขึ้น ประกอบกับมีการประกาศใช้กฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น กลุ่มเกษตรกรเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมและปัญหาที่เกิดจากการกำจัดสารฆ่าแมลงที่ไม่เหมาะสมมากขึ้น กระบวนการกำจัดพิษของสารต้นกำเนิด (parent material) จะเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน เกิดได้อย่างรวดเร็ว แต่ต่อมาได้มีการพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ เนื่องจากเทคนิคเหล่านี้อาจจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นที่รู้จักหรือมีความเข้าใจเกี่ยวกับสารเหล่านี้น้อย หรือมีพิษโดยตัวมันเองก็ได้

ในการกำจัดสารฆ่าแมลงมีหลายวิธี เช่น การเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 99.9% แต่ต้องลงทุนสูงมากและสามารถใช้ได้กับกลุ่มสารฆ่าแมลงบางกลุ่มเท่านั้น (Kennedy, 1978) โดยทั่วไปสารพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะถูกเผาทำลายด้วยหมุดที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส สารพวกคลอโรฟินอล (chlorophenol) ที่เกิดจากสารกำจัดวัชพืช 2,4,5-T และ 2,4-D พวกเอสเทอร์ (ester) กรด เอมีน (amine) และเพนทคลอโรฟินอล (pentachlorophenol) ที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้ สารพวกนี้สามารถทำให้เกิดสารไดออกซินได้ในขณะเผาไหม้ (ธีระพล อุ่นจิตต์วรรณะ, 2541)

วิธีการกำจัดสารฆ่าแมลงอีกวิธี ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางเคมี ได้แก่ โฟโตไลซิส (Photolysis) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดีฮาโลจิเนชัน (Dehalogenation) และออกซิเดชัน (Oxidation) หลักเกณฑ์ในการเลือกแต่ละวิธีจะต้องพิจารณาถึงปริมาณที่จะกำจัดด้วย

### 1. กระบวนการโฟโตไลซิส

สภาวะที่สำคัญของการเกิดกระบวนการนี้ คือ ช่วงการดูดกลืนสเปกตรัมของสารฆ่าแมลง จะเลื่อมกับช่วงของการปล่อยสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงในขณะเดียวกันที่มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลสารเกิดขึ้น สารฆ่าแมลงส่วนมากกำหนดให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงพลังงานสูง ช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 254 นาโนเมตร การเกิดปฏิกิริยานี้ในสิ่งแวดล้อมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากพลังงานของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้นต่ำและช่วงความยาวคลื่นบนพื้นผิวโลกมีค่ามากกว่า 280 นาโนเมตร

ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารฆ่าแมลงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาคีคลอรีเนต (Dechlorinated) และหรือถูกออกซิไดซ์ได้โดยการเกิดโฮโมไลติกคลิเวจ (Homolytic cleavage) การแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl substitution) หรือกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transfer process) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกทำให้สลายตัวได้เร็วโดยพวงจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน

## 2. กระบวนการไฮโดรไลซิส

วิธีการบำบัดของเสียพวกสารฆ่าแมลงที่ง่ายที่สุดอาจจะเป็นวิธีการบำบัดด้วยสารจำพวกด่าง (caustic soda) สำหรับสารฆ่าแมลงบางตัวภายใต้สภาวะของการไฮโดรไลซิสจะให้ผลิตภัณฑ์หลายตัว ตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ไฮโดรไลซิส (Alkaline hydrolysis) ของมาลาไรออนในน้ำ จะส่งเสริมให้เกิดการแตกออกของพันธะระหว่างฟอสฟอรัสกับกำมะถัน ซึ่งจะให้สารเมอร์แคปโตซัคซิเนต (mercaptosuccinate) สามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

## 3. กระบวนการดีฮาโลจิเนชัน

เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสอย่างหนึ่ง โดยใช้โพสิเทอรีลินไกลคอลกับด่าง บางครั้งก็เพิ่มอุณหภูมิด้วย วิธีการนี้ใช้ทดสอบสารพวกฮาโลจิเนตไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbons) รวมทั้งคริลดริน ลินเดน 2,4-D และ 2,4,5-T ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดออกจากดินได้น้อย

## 4. กระบวนการออกซิเดชัน

วิธีที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความจำเพาะเจาะจงของปฏิกิริยา แต่กระบวนการออกซิเดชันมีความจำเพาะน้อย สามารถกำจัดแอกทิฟไฮโดรเจนจากอัลกิลฮออล คาร์บอนิลและกรด ตำแหน่งทำปฏิกิริยา (reactive sites) ประกอบด้วยอัลคิลเชน (alkyl chains) อยู่ใกล้กับส่วนให้อิเล็กตรอน (electron donating) และวงแหวนอะโรมาติกที่ไม่ขาดอิเล็กตรอน การเกิดออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ของด้านอัลคิลเชนจะเห็นได้ชัดเหมือนกับการเกิดการแตกของวงแหวนอะโรมาติก

สารประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สารฆ่าแมลงสำเร็จรูปซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล(OH) นั้นไม่ใช่ส่วนผสมของสารฆ่าแมลงที่แอกทิฟ หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า สารเฉื่อย

(inert) เช่น สารที่สังเคราะห์ขึ้นมา และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ซึ่งมักจะทำให้เกิดสายอัลคิลที่ยาว และสารนี้มักจะถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม

ดังนั้นความเข้มข้นและโครงสร้างของสารเหล่านี้ อาจจะมีผลกระทบที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ เช่น ในตอนเริ่มต้นปฏิกิริยา หมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้ช้า แต่ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (peroxide radical) ซึ่งจะทำให้การสลายตัวของสารฆ่าแมลงเพิ่มขึ้น

การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โดยการเติมหรือเกิดขึ้นเองในการทดลอง) ร่วมกับตัวเร่งและรีเอเจนต์หลากหลาย รวมทั้งเกลือของเหล็ก โทเทเนียม ไดออกไซด์ โอโซน แสงอัลตราไวโอเลต การตกตะกอนด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical precipitation) และไฮดรอกซิล (การควบคุมพีเอช)

#### - กระบวนการใช้โอโซน (Ozonation processes)

ที่ระดับพีเอชเป็นค่าสูง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวให้โปรตอน ( $pK_a = 11.6$ ) และผลของการจับกับเบสทำให้เกิดเปอร์ออกซิแอนไอออน ( $HO_2^-$ ) ทำปฏิกิริยากับโอโซนทำให้เกิดโอโซนไนต์ ( $O_3^-$ ) และ เปอร์ออกซิเรดิคัล ( $HO_2$ ) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะค่ากับ  $O_3$  ได้ ซึ่งเรดิคัลชนิดนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับโอโซน ในช่วงนี้จะเกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแก่โอโซนไนต์ ซึ่งจะแตกสลายเป็น  $OH^-$  จากนั้นไฮดรอกซิเรดิคัลจะทำปฏิกิริยากับ  $RH_2$  เกิดเป็นเรดิคัลของสารอินทรีย์ ( $RH$ ) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดเปอร์ออกซิเรดิคัล ( $O_2RH$ ) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาข้างต้นนั้นมีการเกิดการย่อยสลายให้ออกซิไดซ์ อาร์ (oxidized R) และซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^-$ ) ด้วย ในระหว่างการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ วงจรการย่อยสลายด้วยโอโซนและการเกิดไฮดรอกซิเรดิคัลก็ยังคงดำเนินอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามก็อาจมีการขัดขวางประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการนี้ได้ ข้อจำกัดของการเกิดปฏิกิริยานี้คือความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนเนื่องจากมันละลายได้น้อย

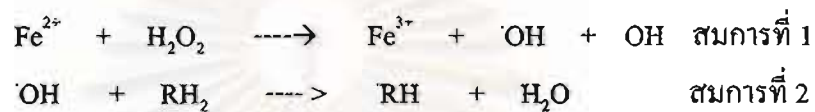
มีการศึกษาการนำโอโซนกับแสงอัลตราไวโอเลตหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษ และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการลดการปนเปื้อนของสารฆ่าแมลงด้วย มีการทดสอบการนำโอโซนมาทำปฏิกิริยากับกลุ่มออร์กาโนคลอรีนแต่ไม่มีการบันทึกการเปลี่ยน



แปลงโครงสร้าง กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะให้สารที่มีความเป็นพิษสูงเกิดขึ้น

- สารประกอบเชิงซ้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็ก

วิธีการหนึ่งของการใช้ไฮดรอกซิลเรดิคัลย่อยสลายสารฆ่าแมลงโดยใช้สารรีเอเจนต์เฟนตัน (Fenton's reagent) (เป็นเกลือเฟอร์รัสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) โดยอาศัยสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ดังสมการ 1 และ 2



การทดลองในระยะแรกจะใช้อะทราซีน (atrazine) ทำให้เสียหมู่อัลคิลและทำให้วงแหวนแตกออก ต่อมาได้มีการทดลองการย่อยสลายอะทราซีนโดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และรังสีอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการ และได้มีการทดลองใช้กับกลุ่มอื่น ๆ ด้วย โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับเกลือของเหล็ก พบว่า แสงที่ใช้ศึกษาในภาคสนามอาจจะเป็นตัวช่วยยังการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (photo catalyst) โดยเป็นตัวกระตุ้นแหล่งกำเนิดแสง มีการนำมาใช้ในสภาวะห้องทดลองกับสาร s-triazines เทคนิคนี้มีแนวโน้มว่าจะเหมาะสมกับสารฆ่าแมลงที่มีช่วงสเปกตรัมกว้าง อย่างไรก็ตามพบว่ายังมีข้อจำกัดกับน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน

- การบำบัดโดยใช้ปฏิกิริยาร่วมระหว่างปฏิกิริยาเคมีและชีววิทยา (Combined Chemical and Biological Treatment)

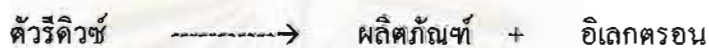
การเปลี่ยนแปลงทางเคมีช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางอย่างของสารที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพในทางธรรมชาติได้ เช่น การเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของ 2,4-dichlorophenol และ 2,4,5-trichlorophenol ในสภาวะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นเป็นตัวช่วยในการเพิ่มการสลายตัวโดยการย่อยสลายด้วยสิ่งมีชีวิต เป็นต้น

การกำจัดของเสียสารฆ่าแมลงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยสภาพเศรษฐกิจและกฎหมายจะเป็นตัวผลักดันให้มีการจัดการเกี่ยวกับสารฆ่าแมลงได้ดีขึ้น

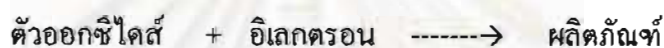
## 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของผงเหล็ก

ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ให้อิเล็กตรอนซึ่งเราเรียกลักษณะนี้ว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และอีกสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งเราเรียกลักษณะนี้ว่าตัวออกซิไดส์ (Oxidising agent) ถ้าเราแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วนเราจะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน (ครึ่งปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ครึ่งปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) ถ้าจะกล่าวโดยสรุปเราคงเขียนย่อ ๆ ได้ดังนี้

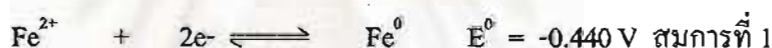
ครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน



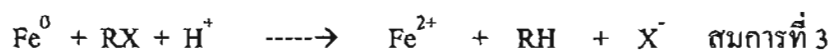
สมการศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันของเหล็ก มีดังนี้



ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชัน เท่ากับ  $-0.440$  (ศุภชัย ใช้เทียบวงศ์, 2537) โลหะเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสารรีดอกซ์อื่น ๆ รวมทั้งไฮโดรเจนอออน คาร์บอนเนต ซัลเฟต ไนเตรท และออกซิเจน อัลคิลเฮไลด์ (Alkyl halides, RX) สามารถถูกรีดิวซ์โดยโลหะเหล็กได้ ในสภาวะที่ตัวให้โปรตอน เช่น น้ำ ปฏิกิริยาจะดำเนินดังสมการที่ 2



ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันโดยประมาณของครึ่งปฏิกิริยาของสมการที่ 2 สำหรับอัลคิลเฮไลด์จะอยู่ในช่วง  $+0.5$  ถึง  $+1.5$  โวลต์ ที่พีเอช 7 (Vogel, 1987 อ้างถึงใน Matheson และ Tratnyek, 1994) สมการรวมของสมการที่ 1 และ 2 ดังนี้

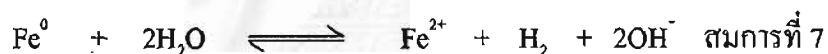


จากสมการที่ 3 แสดงถึงปฏิกิริยารีดักทีฟ ดีฮาโลจิเนชัน (Reductive dehalogenation) โดยโลหะเหล็ก เทียบได้กับการเกิดการกัดกร่อน (corrosion) ของเหล็กซึ่งอัลคิลเฮไลด์เป็นตัวออกซิไดส์ อัลคิลเฮไลด์เป็นที่ใช้อย่างกว้างขวาง โดยใช้เป็นตัวทำละลายและสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรม

ในสถานะที่ไม่มีตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงจะเกิดครึ่งปฏิกิริยารีดักชันสองอันที่ควบคู่ไปกับปฏิกิริยาในสมการที่ 1 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนโดยตัวมันเองในน้ำ หากมีออกซิเจนละลายในน้ำ (สมการที่ 4) เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนเป็นไปอย่างรวดเร็ว (สมการที่ 5)



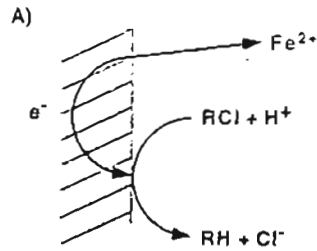
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) กับออกซิเจนจะทำให้เกิดเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์หรือสนิมเหล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อมีน้ำเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนภายใต้สถานะไร้ออกซิเจนได้ ดังสมการที่ 6 และ 7



ผลของปฏิกิริยาจากสมการที่ 5 และ 7 ในสถานะที่มีการเพิ่มพีเอชและมีบัฟเฟอร์อย่างอ่อน แม้ว่าจะพิจารณาผลกระทบภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนก็ตามมันก็ยังคงเกิดการกัดกร่อนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์เคลือบที่ผิวของโลหะ ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาได้

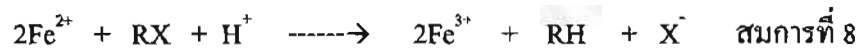
การเกิดปฏิกิริยาดีฮาโลจิเนชัน สามารถเกิดได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. เป็นการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับโลหะเหล็ก ซึ่งเกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะ

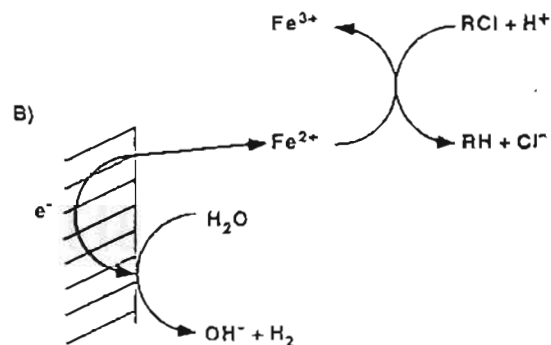


รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยารีดักทีฟ ดีฮาลोजินเนชันที่ผิวของโลหะเหล็ก  
(Hapeman-Somich, 1992)

2. การเกิดปฏิกิริยาโดยผ่านตัวกลาง ได้แก่ เฟอร์รัส ดังสมการที่ 8

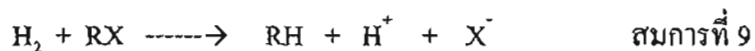


เฟอร์รัสที่ละลายอยู่นี้เป็นตัวรีดิวซ์ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีฮาลोजินเนชันของอัลคิลเฮไลด์ซึ่งปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ (Klecka, 1984: 391-402; Doong, 1992: 1063-1075 อ้างถึงใน Matheson and Tratnyek, 1994)

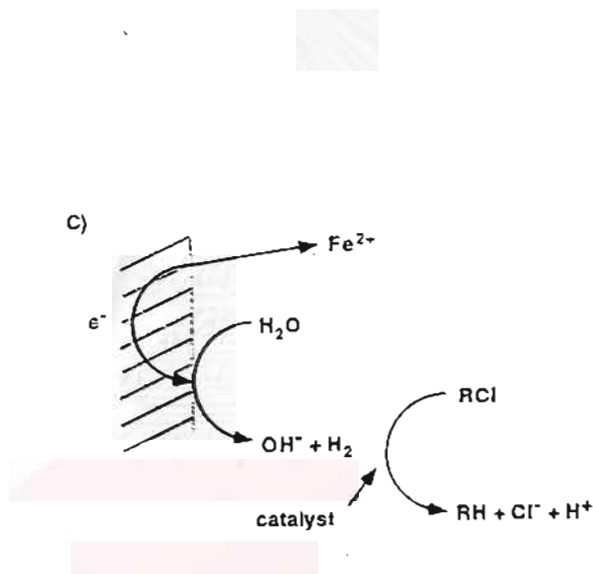


รูปที่ 2.6 การเกิดรีดักชันโดยเฟอร์รัสซึ่งเป็นผลจากการผุกร่อนของโลหะ  
(Hapeman-Somich, 1992)

3. การเกิดปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับเกิดการเกิดไฮโดรเจนจากการทำปฏิกิริยาของโลหะเหล็กกับน้ำ ดังสมการที่ 9



ในสถานะที่ไม่มีตัวเร่ง ไฮโดรเจนไม่ใช่ตัวรีดิวซ์ และปฏิกิริยานี้จะไม่ทำให้เกิดคิซาโลจินเนชันได้ ไฮโดรเจนที่มากเกินไปจะไปล้อมรอบผิวของโลหะทำให้ไม่เกิดการผุกร่อนและปฏิกิริยารีดักชันในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ การเกิดคิซาโลจินเนชันอย่างรวดเร็วโดยไฮโดรเจนก็มีความเป็นไปได้ถ้ามีตัวเร่งอยู่ด้วย พื้นผิวของโลหะเหล็กที่มีรอยผุกร่อนหรือมีโลหะอื่นอยู่ในระบบก็สามารถเป็นตัวเร่งของปฏิกิริยานี้ได้



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 3 ของการเกิดคิซาโลจินเนชัน (Hapeman-Somich, 1992)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีการศึกษาปฏิกิริยาของการนำโลหะมาใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการแก้ปัญหาสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ได้แก่

Carollo (1945) อ้างถึงใน Faust และ Aly (1964) ทำการศึกษาการกำจัดคลอรีนออกจากน้ำโดยวิธีการใช้คาร์บอนร่วมกับการใช้สารเคมีช่วยตกตะกอนกับเหล็กและเกลืออลูมิเนียม เขาพบว่าการตกตะกอนและการกรองสามารถกำจัดคลอรีนได้ถึง 80-98 % ที่ความเข้มข้น 0.1-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เขาแนะนำว่าถ้าจะให้การกำจัดสารฆ่าแมลงนี้สมบูรณ์ควรมีการเติมผงคาร์บอน (activated carbon) ให้มีเวลาในการสัมผัส 15 นาที ภายหลังจากการตกตะกอนและการกรอง

Hornstein (1957) ศึกษาการใช้คอลัมน์แก้วที่บรรจุด้วยโลหะสังกะสี (Granulated Zinc) ขนาด 20 mesh จำนวน 200 กรัม ทำการทดสอบปฏิกิริยาการกำจัดคลอรีน โดยการผ่านสารละลายสารฆ่าแมลงลงในคอลัมน์ ปรับอัตราการไหลให้คงที่ ๖๖๖ ด้วย 10 % อะซิติก แอซิด (acetic acid) นำส่วนที่ได้จากการชะคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาคลอไรด์ไอออน โดยวิธีการไตเตรทด้วยความต่างศักย์ (potentiometric titration) พบว่าภายใต้สภาวะดังกล่าวมีสารบางตัวที่ไม่ถูกกำจัดคลอรีนอะตอม คือ ไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride) คีซีที 2,4-D และ 2,4,5-T เนื่องจาก resonance stabilization ทำให้คลอรีนหนี ส่วนคลอรีนใน ethylene dichlorides ทำปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ แต่ในเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (hexachlorocyclohexane) จะถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็วได้เป็นรูปเบนซีน (benzene form) นอกจากนี้เขายังแนะนำให้เปลี่ยนมาใช้โลหะที่แอคทีฟ (active) น้อย เช่น เหล็ก คิงก์ หรือ amalgamated zinc

Cohen และคณะ (1960) อ้างถึงใน Faust และ Aly (1964) ได้รายงานเกี่ยวกับการกำจัดโรตีโนนและที่ออกซาฟีนออกจากน้ำโดยการบำบัดด้วยคาร์บอน คลอรีน และ คลอรีนไดออกไซด์ การใช้คาร์บอนจะมีผลในการกำจัดสารพิษและกลิ่นจากน้ำ คลอรีนและคลอรีนไดออกไซด์จะมีผลโดยตรงกับโรตีโนนและโรตีโนนอยด์ แต่ในระยะยาวจะก่อให้เกิดสารตกค้างสูงและต้องการกำจัดออก ในการทดลองในภาคสนามพบว่าการใช้คาร์บอน 61 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลในการลดความเข้มข้นของโรตีโนน เหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

Faust และ Aly (1964) ได้กล่าวถึงการดูดซับโดยดินเหนียว ซึ่งอาจจะมีปัจจัยทางเคมีหรือทางชีวภาพที่ทำให้ 2,4-D และ 2,4-DCP ในน้ำผิวดินมีความคงทน เขาจึงแนะนำให้เติมดินเหนียวลงไปเพื่อดูดซับพวกสารฆ่าแมลงอินทรีย์แล้วจึงนำไปกำจัดโดยวิธีทางเคมีต่อไป

Sweeny (1972) ศึกษาการทำให้สารฆ่าแมลงพวกฮาโลเจนเตต แดกสลายด้วยวิธีการรีดักชันด้วยโลหะสังกะสี พบว่า สารฆ่าแมลงพวกคลอรีเนเตต ไฮโดรคาร์บอน ที่มีอยู่ในปริมาณที่เจือจางในน้ำหรือดิน จะถูกทำให้แตกสลายได้โดยการสัมผัสกับผงสังกะสีภายใต้สภาวะที่เป็นกรด (พีเอช 1.5-4) ปฏิกิริยาค่าเนินที่อุณหภูมิห้อง แต่อาจจะใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ การย่อยสลาย

p,p'-DDT โดยเทคนิคนี้จะได้ bis (p-chlorophenyl) ethane เป็นผลิตภัณฑ์หลัก นอกจากนี้เขายังได้กล่าวถึงเทคนิคในการย่อยสลายสารฆ่าแมลงไว้อีก เช่น คีตีทีใช้สาร anhydrous ammonia chloride ทำให้เกิด dehydrohalogenate ได้บางส่วน ในขณะที่โซเดียมใน liquid anhydrous ammonia จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ เขาอ้างถึงการศึกษาของ Romano (1950) ว่า คลอรีน 3 ใน 5 อะตอม ของ คีตีที อาจถูกรีดิวซ์โดยการรีฟลักซ์ (reflux) สารละลาย alcoholic kerosene ของ คีตีที ด้วย ammonium sulfate และ โลหะสังกะสี

Gillham และ O'Hannesin (1994) ทำการศึกษาการเพิ่มการสลายตัวของสาร 14 ชนิด ประเภทมีเทน (methanes) เอเทน (ethanes) และ เอทีน (ethenes) โดยใช้โลหะเหล็ก (zero-valent iron) การทดลองนี้ใช้ electrolytic iron ขนาด 100 mesh จำนวน 10 กรัมเติมลงในขวดทดลองขนาด 40 มิลลิลิตร เติมสารละลายที่ทำการศึกษา และทำการตรวจติดตามความเข้มข้นของสารที่ลดลงตลอดเวลา เขาพบว่าอัตราการสลายตัวของสารเป็นอัตราคงที่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของเหล็กต่อปริมาตรและจะเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาคลอรีเนชันเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เหล็กจำนวน 1 ตารางเมตรต่อมิลลิลิตร จะได้ค่า  $t_{50}$  0.013-20 ชั่วโมง

Matheson และ Tratnyek (1994) ทำการศึกษาการสลายตัวของสารคลอรีเนเตดโดยใช้ผงเหล็กขนาดละเอียดภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ผงเหล็กทำให้เกิดปฏิกิริยาดีฮาโลจิเนเตด พบว่าคาร์บอนเตตระคลอไรด์มีการสลายตัวเป็นคลอโรฟอร์ม อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นคลอโรฟอร์มประมาณ 70 % ของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่หายไป เมื่อคาร์บอนเตตระคลอไรด์ระดับलगงจนกระทั่งถึง detection limit ก็จะตรวจพบเมทิลีนคลอไรด์ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการรีดักชันของคลอโรฟอร์ม ปริมาณที่ตรวจพบเมทิลีนคลอไรด์ ประมาณ 50 % ของคลอโรฟอร์มที่หายไป การเพิ่มพื้นที่ผิวที่สะอาดของผงเหล็กจะช่วยให้อัตราการสลายตัวของคาร์บอนเตตระคลอไรด์เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มพีเอชจะทำให้อัตราการสลายตัวลดลงเล็กน้อย

Grittini และคณะ (1995) ศึกษาการดึงคลอรีนอะตอม (Dechlorination) ออกจากสารพีซีบี (PCBs) อย่างสมบูรณ์และรวดเร็วโดยใช้ระบบที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ แท่งเหล็กเคลือบด้วยพัลลาเดียม (Pd/Fe Bimetallic System) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้กระทำที่อุณหภูมิห้องพีซีบีที่ใช้ในการศึกษาเป็น PCBs Congeners ใน Aroclor 1260 และ Aroclor 1254 ทำปฏิกิริยากับ 0.05% w/w Pd/Fe bimetallic system พบว่าปฏิกิริยาการดึงคลอรีนนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบนผิวหน้าของโลหะนี้ คลอรีนอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนอะตอมได้เป็น biphenyl และคลอไรด์ไอออน ถ้าหากใช้เหล็กอย่างเดียวในการดึงคลอรีนอะตอมออกจากพีซีบีจะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส

Schlimm และ Heitz (1996) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โลหะในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทำการทดลองที่สภาวะความเป็นกรดอ่อนจนถึงกลาง (พีเอช 4-7) สามารถกำจัดสารแอมโมเนียออกจากร่างน้ำเสียได้มากถึง 99.3 % เกิดผลิตภัณฑ์หลักได้แก่ คลอไรด์ไอออนและเบนซีน ผลิตภัณฑ์รอง ได้แก่ คลอโรเบนซีน โดยศึกษาในโลหะหลายชนิด ได้แก่ เหล็กกับทองแดง อลูมิเนียมและทองแดง แมกนีเซียมและทองแดง สังกะสีอย่างเดียวก พบว่า สังกะสีจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ต่อมาได้ทำการศึกษาในสารคลอรีเนเตด ไฮโดรคาร์บอน หลาย ๆ ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม 1,1,1-Trichloroethane Perchloroethylene (Per) Trichloroethylene และ คลอโรเบนซีน โดยใช้โลหะสังกะสี พบว่า การสลายตัวของคลอโรฟอร์มเมื่อเวลาผ่านไป 85 นาที ตรวจพบคลอไรด์ไอออน 99.4 % การสลายตัวของ 1,1,1-Trichloroethane เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ตรวจพบคลอไรด์ไอออน 99.6 % การสลายตัวของ Trichloroethylene เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ตรวจพบคลอไรด์ไอออน 7.5 % การสลายตัวของ คลอโรเบนซีน เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ตรวจไม่พบคลอไรด์

Tratnyek (1996) อ้างถึงการศึกษาของนักศึกษาในความดูแลของ Professor Robert Gillham ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่จะใช้ทำท่อสำหรับบ่อน้ำใต้ดิน ซึ่งเขาพบว่าท่อที่ทำด้วย พลาสติกจะมีสารตัวทำละลายพวกคลอรีเนเตด (chlorinated solvent) ปนเปื้อน และพบว่าท่อที่ทำด้วยโลหะเป็นต้นเหตุที่ทำให้สารจำพวก perchloroethylene, trichloroethylene และ carbon tetrachloride ถูกย่อยสลายได้ และอ้างอีกว่า เหล็กเป็นโลหะตัวแรกที่น่าสนใจเพราะสามารถใช้ได้ทันที ราคาถูก ไม่เป็นพิษ และย่อยสลายสารพวกสารตัวทำละลายคลอรีเนเตดได้ ทำให้เหล็กอาจจะสามารถถูกนำไปใช้ในการจัดการปนเปื้อนของสารอื่นในสิ่งแวดล้อมได้ เช่น สารอินทรีย์ที่มีกลุ่มที่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ รวมทั้งสารฆ่าแมลง วัสดุที่ใช้เป็นสีสำหรับย้อม (dyestuffs)

Sayles และคณะ (1997) ศึกษาการใช้ผงเหล็ก (zero-valent iron) กับสารฆ่าแมลงประเภท คีตีทีและอนุพันธ์ ได้แก่ DDD [1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethane] DDE [2,2-bis(p-chlorophenyl)-1,1-dichloroethylene] โดยทดลองในสภาวะที่มีบีฟเฟอร์ ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีและไม่มีสารกลุ่ม surfactant Triton X-114 ผลการทดลองพบว่า ผงเหล็กสามารถสลายสารคลอรีนออกจากโครงสร้างของ คีตีที DDD และ DDE ได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณผงเหล็ก การเติมหรือไม่เติมสารพวก surfactant ด้วย และยังพบว่า การเติมสาร surfactant จะทำให้อัตราการสลายกลุ่มคลอรีนสูงกว่าการไม่เติมสารนี้ Initial first-order rate ของคีตีทีพบว่าการเติมไม่เติมสาร surfactant จะมีอัตราการสลาย  $1.7 \pm 0.4$  ต่อวัน บนพื้นที่ผิวหน้าของผงเหล็ก  $0.016 \pm 0.004$  ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ขณะที่กรณีเติมสาร surfactant จะมีอัตราการสลาย  $3.0 \pm 0.8$  ต่อวัน บนพื้นที่ผิวหน้าของผงเหล็ก  $0.029 \pm 0.008$  ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบและขั้นตอนการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

**ขั้นที่หนึ่ง** ศึกษาหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT สภาวะที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณของผงเหล็ก โดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น 0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม ทำการตรวจวัดปริมาณสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ด้วย GC-ECD (Gas Chromatography with Electron capture detector) ตามวิธีมาตรฐานของ EPA No. 608 เมื่อครบ 3 วันภายหลังจากเติมผงเหล็ก เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ใส่ผงเหล็ก)

**ขั้นที่สอง** ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยแปรเปลี่ยนพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตั้งแต่ 4-8 โดยใช้ปริมาณผงเหล็กเท่ากับจำนวนที่หาได้จากขั้นที่หนึ่ง ทำการตรวจวัดปริมาณสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ด้วย GC-ECD เมื่อครบ 3 วันภายหลังจากเติมผงเหล็ก โดยเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารฆ่าแมลงที่ไม่ใส่ผงเหล็ก

**ขั้นที่สาม** ศึกษาหาอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารฆ่าแมลงกับผงเหล็กเป็น 1, 3, 5 และ 7 วัน ทั้งนี้จะใช้ปริมาณผงเหล็กเท่ากับจำนวนที่หาได้จากขั้นตอนที่หนึ่งและระดับพีเอชที่มีประสิทธิภาพจากขั้นตอนที่สอง ทำการตรวจวัดปริมาณสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ด้วย GC-ECD ตามระยะเวลาที่กำหนด โดยเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารฆ่าแมลงที่ไม่ใส่ผงเหล็ก

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องแก้ว ได้แก่ ปีเปต ขวดวัดปริมาตร บีกเกอร์ กระบอกตวง แท่งแก้ว หลอดหยด กรวยกรอง กระจกนาฬิกา ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร พร้อมจุกยางและฝาอลูมิเนียม ขวดแก้วขนาด 2 มิลลิลิตร พร้อมฝาสำหรับใส่ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ด้วย GC-ECD

#### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่

1. เครื่องชั่งชนิดหยาบ (Mettler รุ่น PJ 3600 Delta Range, สวิสเซอร์แลนด์)
2. เครื่องชั่งชนิดละเอียด (Mettler รุ่น AT200, สวิสเซอร์แลนด์)
3. พีเอชมิเตอร์ (PHILIPS รุ่น PW 9421)
4. เครื่องแกสโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography with electron capture detector, GC-ECD ของ Hewlett Packard รุ่น 5890 Series II plus, U.S.A.)
5. ตู้อบ (Gallenkamp Vacuum Oven)

### 3.3 สารเคมีและวิธีการเตรียม

#### 3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ มีสารเคมีและวิธีการเตรียมดังนี้

1. สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเข้มข้น (Stock Standard Organochlorine Pesticides) ได้แก่ แกมมาบีเอสซี เฮปตาคลออร์ อัลดริน *o,p'*-DDT และ *p,p'*-DDT ความเข้มข้น 100,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยชั่งสารแต่ละตัวในปริมาณ 0.0100 กรัม

แกมมาบีเอสซี (Gamma isomer 1,2,3,4,5,6-hexachlorocyclohexane, 99.5% ของ Chem Service)

เฮปตาคลออร์ (1,4,5,6,7,8,8-heptachloro-3a,4,7,7a-tetrahydro-4,7-methanoinden, 99.5% ของ Chem Service)

อัลดริน (1,2,3,4,10,10-hexachloro-1,4,4a,5,8,8a-hexahydro-exo-1,4-endo 5,8-dimethanonaphthalene, 98.5% ของ Chem Service)

*o,p'*-DDT (98.4% ของ Chem Service)

*p,p'*-DDT (1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane, 98% ของ Chem Service)

นำสารทั้ง 5 ตัว ละลายด้วยอะซิโตน (Acetone, 99.8% ของ LAB-SCAN, ไอร์แลนด์) ประมาณ 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ ผสมให้ละลายแล้วจึงเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมอะซิโตนจนถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่ม ออร์กาโนคลอรีนเข้มข้น 100,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเปิดสารละลายมาตรฐานในข้อ 1 มา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยอะซิโตนให้มี ปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร

3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เปิดสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่ม ออร์กาโนคลอรีนเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร (ในข้อ 2) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำก้ำจัดอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้น้ำเสีย สังเคราะห์ที่มีสารมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเข้มข้น ประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนในช่วงการทำทดลองอีกครั้ง

### 3.3.2 สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล

1. สารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มัล โดยเจือจาง 3.0 มิลลิลิตร กรดซัลฟูริก เข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) ด้วยน้ำก้ำจัดอออน จนได้ปริมาตร 1 ลิตร

2. สารละลายกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล โดยเจือจางสารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มัล 200 มิลลิลิตร ด้วยน้ำก้ำจัดอออน จนได้ปริมาตร 1 ลิตร

### 3.3.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มัล

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 0.04 กรัม ละลายในน้ำก้ำจัดอออน 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล จากนั้นเปิดมา 10 มิลลิลิตร ใส่ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำก้ำจัดอออนจะ ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล

### 3.3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกสโครมาโตกราฟ (GC-ECD)

3.3.4.1 สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน สำหรับการวิเคราะห์ ด้วย GC-ECD

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมา บีเอชซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT ความเข้มข้น 100,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

โดยซึ่งสารเหล่านี้คือละ 0.0100 กรัม ละลายแต่ละตัวในอะซีโตน จนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร จากนั้นเจือจางสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงแต่ละตัวให้มีความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปีเปคมา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยอะซีโตนจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลง 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตรนี้

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงให้มีความเข้มข้นต่างกัน 4 ลำดับ ดังนี้

ลำดับที่ 1 สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสม (mixed standard) ที่มีความเข้มข้นของ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และ p,p'-DDT 30 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการปีเปตแกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน อย่างละ 1 มิลลิลิตร o,p'-DDT 2 มิลลิลิตร และ p,p'-DDT 3 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมอะซีโตนจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ลำดับที่ 2 สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสมที่มีความเข้มข้นของ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน 20 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT 40 ไมโครกรัมต่อลิตร และ p,p'-DDT 60 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการปีเปตแกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน อย่างละ 2 มิลลิลิตร o,p'-DDT 4 มิลลิลิตร และ p,p'-DDT 6 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมอะซีโตนจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ลำดับที่ 3 สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสมที่มีความเข้มข้นของ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน 30 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT 60 ไมโครกรัมต่อลิตร และ p,p'-DDT 90 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการปีเปตแกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน อย่างละ 3 มิลลิลิตร o,p'-DDT 6 มิลลิลิตร และ p,p'-DDT 9 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมอะซีโตนจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ลำดับที่ 4 สารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสมที่มีความเข้มข้นของ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน 50 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และ p,p'-DDT 150 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการปีเปตแกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน อย่างละ 5 มิลลิลิตร o,p'-DDT 10 มิลลิลิตร และ p,p'-DDT 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมอะซีโตนจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

### 3.3.4.2 การเตรียมโครมาโตแกรม (chromatogram)

#### 1. สภาวะของเครื่อง GC-ECD

คอลัมน์ : คอลัมน์อัลตราฟูล (Ultra II) ของบริษัท ฮิวเล็ท แพคการ์ด (Hewlett Packard) ความยาว 25 เมตร ความหนาของตัวเคลือบ (film thickness) 0.2 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ (column diameter) 0.320 มิลลิเมตร

ก๊าซที่ใช้ : ก๊าซฮีเลียม และก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999%

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง (Oven) มีการตั้งอุณหภูมิเป็นลำดับขั้น (Oven Temperature Program) ดังนี้ อุณหภูมิห้อง (oven) เริ่มต้น 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 180 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่ม 13 องศาเซลเซียสต่อ นาที เมื่ออุณหภูมิถึง 180 องศาเซลเซียส แล้วจะเพิ่มขึ้นอีกจนถึง 225 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่ม 1.50 องศาเซลเซียสต่อ นาที และจะคงที่ที่ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่ม 10 องศาเซลเซียส และจะคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 นาที

ส่วนของการฉีด (Injector port) ตั้งอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส

ส่วนของการตรวจวัด (Detector port) ตั้งอุณหภูมิที่ 320 องศาเซลเซียส

ส่วนของการตรวจวัด (Detector port) : เป็นแบบ Electron Capture Detector (ECD)

2. นิสิตสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสมความเข้มข้นที่เตรียม 4 ลำดับ ๆ ละ 1 ไมโครลิตร จะได้โครมาโตแกรม ดังรูปที่ 1 ในภาคผนวก ก โดยที่สารมาตรฐานฆ่าแมลงจะมี Retention time ดังนี้

<u>สารฆ่าแมลง</u>	<u>Retention Time<sup>a</sup></u>
แกมมาบีเอชซี	10.815
เฮปตาคลอร์	13.063
อัลดริน	14.397

สารฆ่าแมลง	Retention Time <sup>a</sup>
o,p'-DDT	22.764
p,p'-DDT	25.346

หมายเหตุ :a มีความคลาดเคลื่อน =  $\pm 0.050$  นาที โดยการทำงานของเครื่อง GC

3. นิดเบสงค์เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนวิธีการวิเคราะห์ จะได้โครมาโตแกรม ดังรูปที่ 2 ในภาคผนวก ก

4. นิดสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ จำนวน 1 ไมโครลิตร จะได้โครมาโตแกรม ดังรูปที่ 3 ในภาคผนวก ก ซึ่งจะประมวลผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ความเข้มข้นของสารออกมา โดยมีหลักการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง : การคำนวณความเข้มข้นของ o,p'-DDT (รูปที่ 4 ในภาคผนวก ก)

$$\text{ความเข้มข้นของ o,p'-DDT} = \frac{1}{2830.3} \times \text{พื้นที่ใต้พีกของ o,p'-DDT}$$

$$= \frac{1}{2830.3} \times 142,622$$

$$= 50.39 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$$

ทั้งนี้ในส่วนประมวลผลจะทำสำเร็จโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการวิเคราะห์ด้วย GC

3.3.5 ผงเหล็ก (IRON FILINGS Fe-55.85 About 60 mesh Product No. 28598 ของ

The British Drug Houses Ltd. Pool England)

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การศึกษาหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์มา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ซึ่งมีผงเหล็ก 0.50 กรัม ทำซ้ำจำนวน 3 ขวด และทำเช่นเดียวกันนี้กับชุดขวดที่มีผงเหล็ก 1.00 กรัม และ 2.00 กรัม และปิเปิดใส่ขวดแก้วที่ไม่มีผงเหล็กขวดละ 10 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด เพื่อเป็นชุดควบคุม ปิดฝาให้สนิทตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน จึงนำมาสกัดสารฆ่าแมลงด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (95% ของ LAB-SACN, ไอร์แลนด์) 2 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 1 นาที แล้วดูเฉพาะชั้นเฮกเซนไปวิเคราะห์ด้วย GC-ECD

#### 3.4.2 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร แบ่งมาใส่บีกเกอร์ ๆ ละ 200 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละบีกเกอร์เป็น 4, 7 และ 8
2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 4 จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ซึ่งมีผงเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.4.1 จำนวน 3 ขวด ทำในทำนองเดียวกันนี้กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 7, 8 และปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้ปรับพีเอชซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.20 ใส่ขวด ๆ ละ 10 มิลลิลิตร ทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงเริ่มต้น
3. สำหรับขวดที่มีผงเหล็กที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 8 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน จึงนำมาสกัดสารฆ่าแมลงโดยเติมตัวทำละลายเฮกเซนขวดละ 2 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 1 นาที แล้วดูเฉพาะชั้นเฮกเซนไปวิเคราะห์ด้วย GC-ECD

#### 3.4.3 การศึกษาหาอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยวิธีการรีดักชันด้วยผงเหล็ก

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชในระดับที่มีประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองข้อ 3.4.2

2. ปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์นี้จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ซึ่งมีผงเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.4.1 จำนวน 40 ขวด และใส่ในขวดที่ไม่มีผงเหล็กจำนวน 5 ขวด เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้น
3. นำขวดที่มีผงเหล็ก 20 ขวด ใส่ในตู้อบอุณหภูมิ 40°C และอีก 20 ขวดที่เหลือตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 ± 1 องศาเซลเซียส
4. เมื่อครบระยะเวลา 1 วัน นำขวดที่มีผงเหล็ก 3 ขวด ของทั้งสองอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้อง และที่ 40 องศาเซลเซียส เคมีเฮกเซนขวดละ 2 มิลลิลิตร ทำการสกัด 1 นาที แล้วนำสารละลายที่สกัดได้ไปฉีด GC-ECD ทำในทำนองเดียวกันนี้อีกเมื่อครบระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน

### 3.5 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

นำผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาหาปริมาณผงเหล็กและพีเอชที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยการปฏิบัติกริยารีดักชันด้วยผงเหล็กมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (Analysis of Variance – One Way Classification) ให้ตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณผงเหล็กและพีเอชของน้ำเสียที่ระดับต่าง ๆ ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ แกมมาบีเอชซี, เฮปตาคลอร์, อัลดริน, o,p'-DDT และ p,p'-DDT ภายหลังการเกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็ก ถ้าพบว่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 คู่ มีความแตกต่างกัน (Reject Null Hypothesis) จะทำการทดสอบต่อ โดยใช้ Multiple Comparison Test โดยวิธีของ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สำหรับผลการทดลองศึกษาหาอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว และแบบ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ของทั้งสองอุณหภูมิ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ให้ตัวแปรอิสระ คือ จำนวนวันในการทดลอง ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษานี้ใช้วิธีการรีดักชันด้วยผงเหล็กในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน DDT (o,p'-DDT และ p,p'-DDT) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้ สภาวะที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณผงเหล็ก พีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสีย ผลการทดลองมีดังนี้

#### 4.1 การหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสม

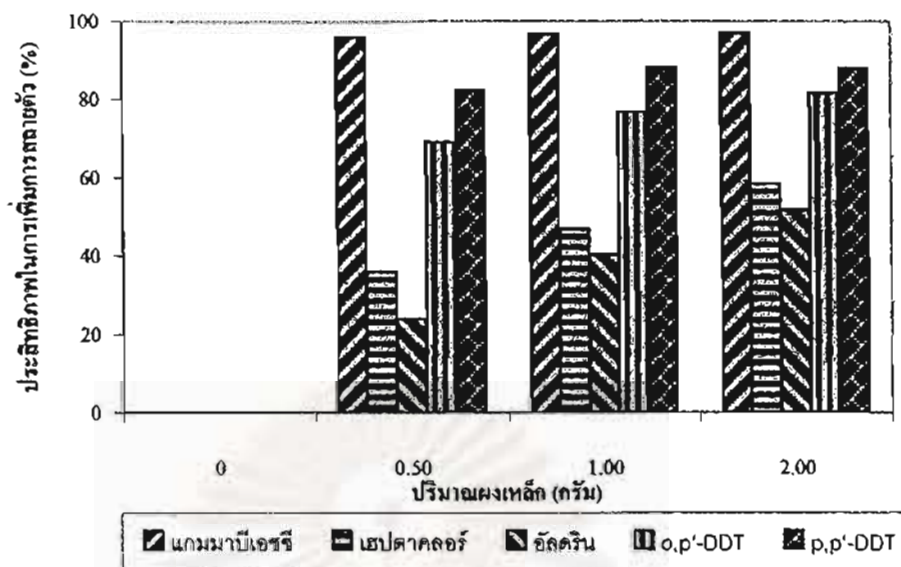
จากการทำปฏิกิริยารีดักชันสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนด้วยผงเหล็กในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม โดยใช้ระยะเวลาในการทดลอง 3 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์มาวิเคราะห์หาปริมาณสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม (ไม่มีผงเหล็ก) และชุดที่มีผงเหล็กในปริมาณที่ต่างกั้ดังกล่าว พบว่ามีปริมาณผงเหล็กแตกต่างกัน ทำให้น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงเหลืออยู่ในปริมาณต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ผลความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT) ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังจากการทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็กที่ปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็กสามารถลดปริมาณสารฆ่าแมลงดังกล่าวได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผงเหล็กสามารถเป็นตัวเร่งให้สารฆ่าแมลงดังกล่าวสลายตัวได้เร็วขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงเหล็กมากขึ้น ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีปริมาณลดลง โดยเมื่อทดลองที่ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม พบว่าความเข้มข้นของ แกมมาบีเอชซี ลดลงเหลือ 4.8836 ไมโครกรัมต่อลิตร ในทำนองเดียวกัน เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT มีความเข้มข้นลดลงเหลือ 61.3332, 63.4399, 32.7859 และ 23.5559 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกริยารัดกั้นด้วยผงเหล็กในปริมาณต่าง ๆ ในระยะเวลาการทดลอง 3 วัน และประสิทธิภาพของผงเหล็กในการเพิ่มการสลายตัวของสารกลุ่มนี้ที่ระดับผงเหล็กต่าง ๆ

ปริมาณ ผงเหล็ก (กรัม)	แกมมาบีเอชซี		เฮปตาคลอร์		อัลดริน		o,p'-DDT		p,p'-DDT	
	ความ เข้มข้น (ppb)	ประสิทธิภาพ ในการเพิ่มการ สลายตัวด้วยผง เหล็ก (%)	ความ เข้มข้น (ppb)	ประสิทธิภาพ ในการเพิ่มการ สลายตัวด้วยผง เหล็ก (%)	ความ เข้มข้น (ppb)	ประสิทธิภาพ ในการเพิ่มการ สลายตัวด้วยผง เหล็ก (%)	ความ เข้มข้น (ppb)	ประสิทธิภาพ ในการเพิ่มการ สลายตัวด้วยผง เหล็ก (%)	ความ เข้มข้น (ppb)	ประสิทธิภาพ ในการเพิ่มการ สลายตัวด้วยผง เหล็ก (%)
0	117.6272 <sup>a</sup>	0	95.6558 <sup>a</sup>	0	83.4276 <sup>a</sup>	0	106.3309 <sup>a</sup>	0	132.9863 <sup>a</sup>	0
0.50	4.8836 <sup>b</sup>	95.85	61.3332 <sup>b</sup>	35.88	63.4399 <sup>b</sup>	23.96	32.7859 <sup>b</sup>	69.17	23.5559 <sup>b</sup>	82.29
1.00	3.8236 <sup>c</sup>	96.75	50.8323 <sup>c</sup>	46.88	49.8213 <sup>c</sup>	40.28	24.7550 <sup>c</sup>	76.72	15.8618 <sup>c</sup>	88.07
2.00	3.5078 <sup>c</sup>	97.02	39.8210 <sup>d</sup>	58.37	40.3481 <sup>d</sup>	51.64	19.6049 <sup>d</sup>	81.56	15.9393 <sup>c</sup>	88.01

หมายเหตุ : ตัวยก (superscript) ที่แตกต่าง แสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์นี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)



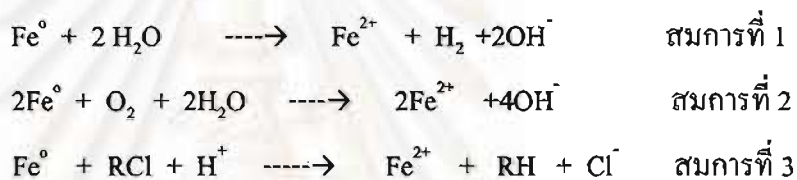
รูปที่ 4.1 : ประสิทธิภาพในการเพิ่มการตายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยใช้ผงเหล็กที่ปริมาณ 0, 0.50, 1.00 และ 2.00 กรัม ที่ 3 วัน

จากผลการทดลองนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบความแปรปรวนของความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมาบีเอซซี, สปินตาคลอร์, อิมิดาคลอพริล, o,p'-DDT และ p,p'-DDT ที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงดังกล่าวที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Multiple Comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่ปริมาณผงเหล็กคู่ใดมีความแตกต่าง พบว่าความเข้มข้นของแกมมาบีเอซซี และ p,p'-DDT ที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ แตกต่างกันทุกค่า ยกเว้นที่ปริมาณผงเหล็ก 1.00 และ 2.00 กรัม ที่ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าที่ปริมาณผงเหล็ก 2 ค่านี้สามารถลดความเข้มข้นของแกมมาบีเอซซี และ p,p'-DDT ในน้ำเสียถึงระดับให้อยู่ในระดับเดียวกันได้ สำหรับ สปินตาคลอร์, อิมิดาคลอพริล และ o,p'-DDT พบว่าที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ แตกต่างกันทุกค่า

ประสิทธิภาพในการเพิ่มการตายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนด้วยผงเหล็กที่ปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน สำหรับ แกมมาบีเอซซี และ p,p'-DDT ที่ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม พบว่ามีประสิทธิภาพในการตายตัวของสารด้วยผงเหล็กสูงถึง 95.85% และ 82.29% ตามลำดับ และเริ่มคงที่เมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 และ 2.00 กรัม สำหรับ สปินตา

คลอโร อัลคอริน และ o,p'-DDT พบว่าเมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารด้วยผงเหล็กสูงขึ้น กล่าวคือที่ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม ประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารด้วยผงเหล็กของ เฮปตาคลอโร เท่ากับ 35.88% เมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 กรัม ประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารด้วยผงเหล็กเท่ากับ 46.88% และ 58.37% เมื่อปริมาณผงเหล็กเป็น 2.00 กรัม ในทำนองเดียวกัน อัลคอริน และ o,p'-DDT ประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารด้วยผงเหล็กเท่ากับ 23.96%, 40.28% และ 51.64% สำหรับ อัลคอริน และเท่ากับ 69.17%, 76.72% และ 81.56% ของ o,p'-DDT ที่ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม, 1.00 กรัม และ 2.00 กรัม ตามลำดับ

การสลายกลุ่มคลออรินในสารประเภทคลอริเนเตด อะลิแฟติก (Chlorinated aliphatics) และคลอริเนเตด อะโรมาติก (Chlorinated aromatics) ด้วยผงเหล็ก (Zero-valent iron) จะเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่



โดยที่สมการที่ 1 และ 2 ผงเหล็กจะเป็นตัวรีดิวซ์ร่วมกับน้ำและออกซิเจนตามลำดับ ส่วนในสมการที่ 3 ผงเหล็กจะเป็นตัวรีดิวซ์ในปฏิกิริยา Thermodynamically favoured reaction โดยหมู่อัลคิลคลอไรด์ (alkyl chloride) จะถูกรีดิวซ์ในปฏิกิริยาได้เป็นคลอไรด์ไอออน (Matheson and Tramyeck, 1994 อ้างถึงใน Sayles และคณะ, 1997) อัตราการเกิดปฏิกิริยาดังคลออริน (Dechlorination) ออกจากสารตัวทำละลายพวกคลอริเนเตด (Chlorinated solvents) ด้วยผงเหล็กจะเป็นสัดส่วนที่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของผงเหล็ก (Sayles และคณะ, 1997) รวมทั้งปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบในโครอะโรมาติก (Nitroaromatic compounds) ด้วยผงเหล็กก็เช่นกัน (Agrawal and Tramyeck, 1997 อ้างถึงใน Sayles และคณะ, 1997) จากผลการวิจัยเหล่านี้จึงเป็นคำตอบว่าปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นเป็นการถ่ายทออคซิเลตรอนที่ผิวหน้าของผงเหล็ก (Sayles และคณะ, 1997)

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้น อัตราการสลายตัวของสารฆ่าแมลงก็เพิ่มสูงตาม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณผงเหล็กมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากขึ้น อัตราการสลายตัวของสารฆ่าแมลงด้วยผงเหล็กจะเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งเมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มมากขึ้นและจะเริ่มคงที่ สำหรับแกมมาบีเอชซีและ p,p'-DDT จะสลายตัวได้ดีเมื่อใช้ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม และจะเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณผงเหล็กเป็น 1.00 และ 2.00

กรัม ส่วนสารที่เหลืออีก 3 ตัว ได้แก่ เฮปตาคลออร์ อัลดริน และ o,p'-DDT จะมีอัตราการสลายตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงเหล็กเพิ่มขึ้น จะพบว่าปริมาณผงเหล็กที่ 2.00 กรัม ทำให้เหลือสารทั้งสามตัวนี้น้อยกว่าปริมาณผงเหล็กที่ 0.50 และ 1.00 กรัม แต่การทดลองนี้เป็นการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารฆ่าแมลงทั้ง 5 ชนิดนี้อยู่ผสมกัน ดังนั้นการเลือกปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมจึงพิจารณาจากประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสาร และการใช้ปริมาณผงเหล็กที่น้อยที่สุด ปริมาณผงเหล็กที่ 0.50 กรัมจึงเหมาะสม

#### 4.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

จากการทดลองหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสม พบว่าปริมาณผงเหล็กที่ 0.50 กรัม เป็นค่าที่มีความเหมาะสม สามารถทำให้สารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดการสลายตัวได้ดี ซึ่งประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลออร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT อยู่ที่ 95.85%, 35.88%, 23.96%, 69.17% และ 82.29% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าที่ปริมาณผงเหล็กที่ 0.50 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของ เฮปตาคลออร์ อัลดริน และ o,p'-DDT ในระดับต่ำกว่าที่ปริมาณผงเหล็ก 2.00 กรัม ก็ตาม แต่ทั้งนี้ผงเหล็ก 0.50 กรัม นี้สามารถทำให้ แกมมาบีเอชซี และ p,p'-DDT มีการสลายตัวในระดับที่สูง

ในการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจะศึกษาที่ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม โดยทำการทดลองที่ระดับพีเอช 4, 7, 8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แกมมาบีเอชซี เท่ากับ 134.9883 ไมโครกรัมต่อลิตร เฮปตาคลออร์ เท่ากับ 84.8961 ไมโครกรัมต่อลิตร อัลดริน เท่ากับ 69.1373 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT เท่ากับ 81.6650 ไมโครกรัมต่อลิตร และ p,p'-DDT เท่ากับ 100.8471 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของผงเหล็กกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ เป็นเวลา 3 วัน และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารฆ่าแมลง แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลออร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT ที่เหลืออยู่เมื่อครบ 3 วัน โดยใช้ GC-ECD พบว่าที่ระดับพีเอชต่าง ๆ ทำให้น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงเหลืออยู่ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

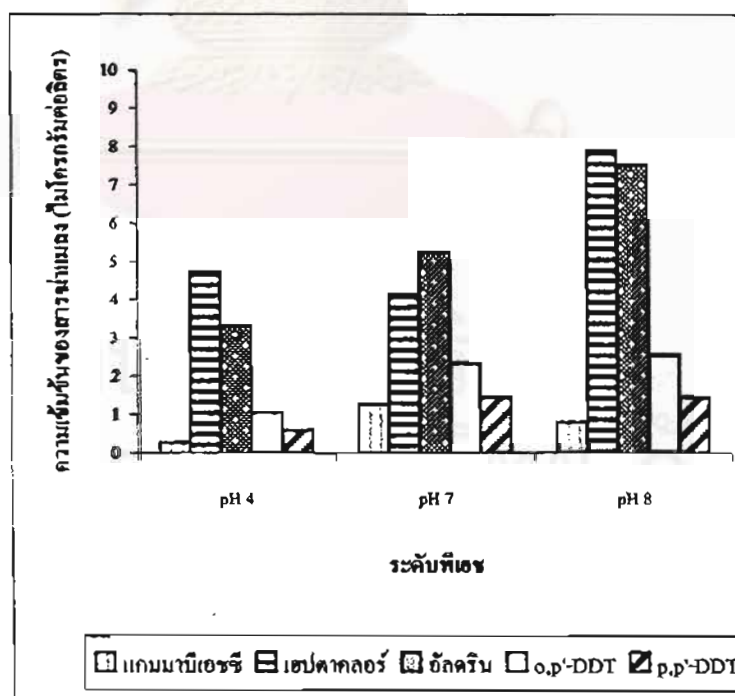
จากผลการทดลองนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบความแปรปรวนของความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลออร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงดังกล่าวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Multiple Comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่า

ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่ระดับพีเอชคู่ใดมีความแตกต่าง พบว่าความเข้มข้นของ แกมมาบีเอช ซีพีเอช 7 และ 8 ไม่แตกต่างกัน แต่ที่ระดับพีเอช 4 มีความแตกต่างกัน ที่ระดับพีเอช 7 และ 8 ความเข้มข้นของ เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน ที่ระดับพีเอช 4 และ 7 ไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกันที่ระดับพีเอช 8 ความเข้มข้นของ o,p'-DDT และ p,p'-DDT ที่ระดับพีเอช 4, 7 และ 8 ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าที่ 3 ระดับพีเอชนี้สามารถทำให้ o,p'-DDT และ p,p'-DDT สลายตัวได้เหมือนกัน

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยาด้วยผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ ที่ระยะเวลาทดลอง 3 วัน

ระดับพีเอช	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลอร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
4	0.2847 <sup>a</sup>	4.7252 <sup>a</sup>	3.3442 <sup>a</sup>	1.0552 <sup>a</sup>	0.5911 <sup>a</sup>
7	1.2693 <sup>b</sup>	4.1420 <sup>a</sup>	5.2382 <sup>a</sup>	2.3335 <sup>a</sup>	1.4647 <sup>a</sup>
8	0.8124 <sup>b</sup>	7.8934 <sup>b</sup>	7.5410 <sup>b</sup>	2.5467 <sup>a</sup>	1.4471 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวยก (superscript) ที่แตกต่างกันจะแสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยใช้ผงเหล็ก 0.50 กรัม มีประสิทธิภาพสูงมาก โดยทุกระดับพีเอชมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวมากกว่า 90% ยกเว้นประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของ อัลดริน ที่พีเอช 8 มีค่าต่ำกว่า 90% ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อนำประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยใช้ผงเหล็ก 0.50 กรัม ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวโดยใช้ผงเหล็กของ แกมมาบีเอชซี ที่ระดับพีเอช 4 มีความแตกต่างกับพีเอช 7 และ 8 โดยที่ระดับพีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวสูงถึง 99.79% ส่วน เฮปตาคลอร์ และ อัลดริน พบว่าที่ระดับพีเอช 4 และ 7 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวโดยใช้ผงเหล็กไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกันกับพีเอช 8 ส่วน *o,p'*-DDT และ *p,p'*-DDT พบว่าที่ระดับพีเอชทั้งสาม ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวโดยใช้ผงเหล็กไม่แตกต่างกัน แต่พบว่าที่ระดับพีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวดีที่สุดที่สุด คือ 98.71% และ 99.41% ตามลำดับ

จากการทดลองหาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสม พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของผงเหล็กเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนั้นการที่พีเอช 4 สามารถทำให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารฆ่าแมลงโดยใช้ผงเหล็กได้ผลดี อาจเนื่องมาจากที่พีเอช 4 มีจำนวนโปรตอน ( $H^+$ ) เป็นจำนวนมากจึงทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักทีฟ ดีไฮโดรเจนชันเกิดขึ้นได้ดีจึงทำให้สารเกิดการสลายตัวมาก และที่พีเอช 4 นี้สามารถทำให้สิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกที่เคลือบอยู่บนผิวของผงเหล็กหลุดออกจึงทำให้ผงเหล็กสามารถสัมผัสกับสารฆ่าแมลงได้อย่างทั่วถึงในขณะเดียวกันที่พีเอช 8 ซึ่งมีความเป็นด่าง อาจก่อให้เกิดเหล็กไฮดรอกไซด์ตกตะกอนเคลือบผิวหน้าของผงเหล็ก เป็นการขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างผงเหล็กกับสารฆ่าแมลงในน้ำ (Matheson and Tratnyek, 1994) จากผลการทดลองจะเห็นว่า ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงด้วยผงเหล็กที่ระดับพีเอชต่าง ๆ มีประสิทธิภาพสูงมากทุกระดับพีเอช แต่ที่ระดับพีเอช 4 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ระดับพีเอช	ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวด้วยผงเหล็ก (%)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลอรั	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
4	99.79 <sup>a</sup>	94.43 <sup>a</sup>	95.16 <sup>a</sup>	98.71 <sup>a</sup>	99.41 <sup>a</sup>
7	99.06 <sup>b</sup>	95.12 <sup>a</sup>	92.42 <sup>a</sup>	97.14 <sup>a</sup>	98.55 <sup>a</sup>
8	99.40 <sup>b</sup>	90.70 <sup>b</sup>	89.09 <sup>b</sup>	96.88 <sup>a</sup>	98.56 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวยก (superscript) ที่แตกต่างกันแสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

#### 4.3 การหาอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

ในการศึกษานี้ใช้ปริมาณผงเหล็ก 0.50 กรัม โดยปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 4 โดยเลือกศึกษาทั้งสองอุณหภูมิเปรียบเทียบกัน ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (ประมาณ  $30 \pm 1$  องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ 1, 3, 5 และ 7 วัน ซึ่งจากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงแกมมาบีเอชซี, เฮปตาคลอรั, อัลดริน, o,p'-DDT และ p,p'-DDT เมื่อครบระยะเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ของทั้งสองอุณหภูมิ เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ ดังแสดงในตารางที่ 4.4, 4.5 และรูปที่ 4.3-4.7

จากผลการทดลองนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบความแปรปรวนของความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน ได้แก่ แกมมาบีเอชซี เฮปตาคลอรั อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT ของทั้งสองอุณหภูมิและระยะเวลากักเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงดังกล่าวที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย โดยใช้วิธี Multiple Comparison แบบ Duncan เพื่อหาว่าความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่ระยะเวลาทดลองคู่ใดแตกต่างกันดังนี้

1. แกมมาบีเอชซี จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาทดลองเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแกมมาบีเอชซีจะลดลงอย่างมากที่ทั้งสองอุณหภูมิ โดยพบว่าความเข้มข้นลดลงถึง 95 % ในวันแรก และมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งตรวจไม่พบในวันที่ 7 ของการทดลอง จากการวิเคราะห์



ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยพบว่า ความเข้มข้นของแกมมาบีเอชซีที่ระยะเวลาทดลอง 1 และ 3 วัน แตกต่างกับที่ระยะเวลาทดลอง 5 และ 7 วันทั้งสองอุณหภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิห้องและที่ 40 องศาเซลเซียสพบว่าไม่แตกต่างกัน

2. เฮปตาคลอร์ จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยพบว่า ความเข้มข้นของสารที่ระยะเวลาทดลองต่าง ๆ กันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกค่าที่อุณหภูมิห้อง และพบว่าที่ระยะเวลาทดลอง 1 และ 3 วันแตกต่างกับที่ระยะเวลาทดลอง 5 และ 7 วันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองอุณหภูมิพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลาทดลอง 1, 3 และ 5 วัน ส่วนที่ 7 วันไม่แตกต่าง

3. อัลดริน จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยพบว่า ความเข้มข้นของอัลดรินที่ระยะเวลาทดลอง 1 วันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระยะเวลาทดลอง 3, 5 และ 7 วัน แต่ที่ระยะเวลาทดลอง 5 วันกับ 7 วันไม่มีความแตกต่างที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสพบว่า ความเข้มข้นที่ระยะเวลาทดลอง 1 วัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระยะเวลาทดลอง 3, 5 และ 7 วัน แต่ที่ระยะเวลาทดลอง 3, 5 และ 7 วันไม่มีความแตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องและที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่าง แสดงว่าที่ทั้งสองอุณหภูมิสามารถเกิดการสลายตัวของสารได้ดี

4. o,p'-DDT จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยพบว่าความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับผงเหล็กที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาทดลอง 1, 3 และ 5 วัน ไม่มีความแตกต่าง แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระยะเวลา 7 วัน ส่วนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสก็ไปในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสองอุณหภูมิพบว่าความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ไม่แตกต่างกัน

5. p,p'-DDT จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยพบว่าความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับผงเหล็กที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาทดลอง 1 วัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระยะเวลาทดลอง 3, 5 และ 7 วัน และพบว่าที่ระยะเวลาทดลอง 3 และ 5 วันไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสพบว่า ที่ระยะเวลาทดลองต่างกัน ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่มีความแตกต่างกันทุกค่า และตรวจไม่พบเมื่อครบ 7 วัน เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่เมื่อทำปฏิกิริยากับผงเหล็กที่อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียส พบว่า มีความแตกต่างกันที่ทุกระยะเวลาทดลอง

จากผลการทดลองเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้สารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์มีการสัมผัสกับพื้นผิวงเหตึกมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการรีดักชันถ่ายทอคิเลกตรอนจะดำเนินที่บริเวณผิวของผิวงเหตึก ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารฆ่าแมลงลดลงจนกระทั่งตรวจไม่พบในวันที่ 7 ของการทดลอง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเห็นว่าที่ 40 องศาเซลเซียสทำให้เฮปตาคลออร์และ p,p'-DDT มีอัตราการสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของสารฆ่าแมลงสองชนิดนี้ได้

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผิวงเหตึก ที่ระยะเวลาทดลองต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ระยะเวลาทดลอง (วัน)	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลออร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
0	166.0141 <sup>a</sup>	37.8522 <sup>a</sup>	30.3957 <sup>a</sup>	65.1479 <sup>a</sup>	92.8477 <sup>a</sup>
1	8.1561 <sup>b</sup>	27.2553 <sup>b</sup>	12.6309 <sup>b</sup>	9.3686 <sup>b</sup>	25.7533 <sup>b</sup>
3	6.3641 <sup>b</sup>	17.0727 <sup>c</sup>	3.2288 <sup>c</sup>	7.6548 <sup>b</sup>	16.7104 <sup>c</sup>
5	1.6252 <sup>c</sup>	6.4342 <sup>d</sup>	0.9762 <sup>d</sup>	7.4234 <sup>b</sup>	14.2781 <sup>c</sup>
7	0 <sup>c</sup>	1.1842 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>

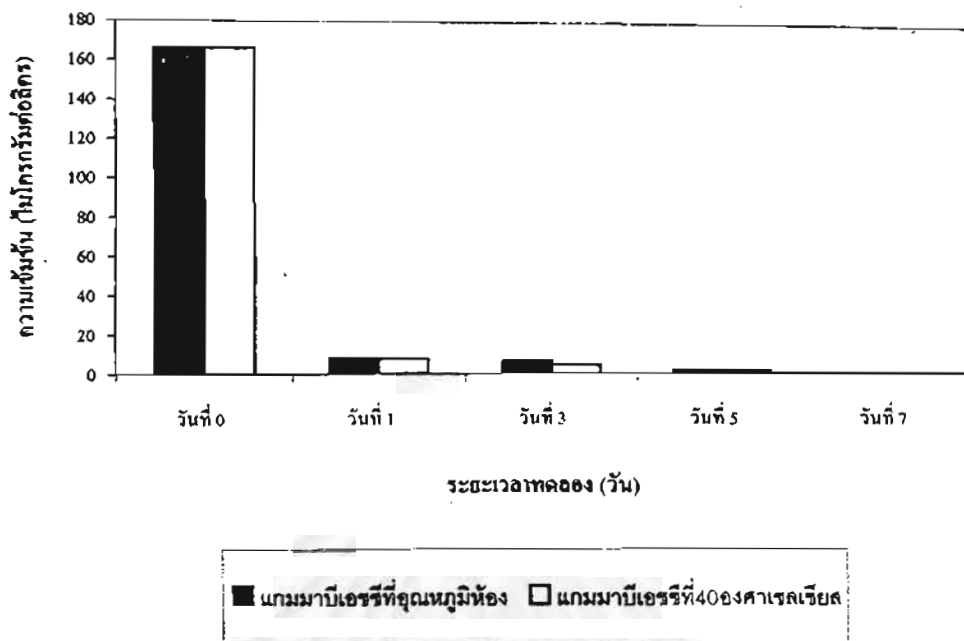
หมายเหตุ : ตัวยก (superscript) ที่แตกต่างกันแสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผิวงเหตึก ที่ระยะเวลาทดลองต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาทดลอง (วัน)	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลออร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
0	166.0141 <sup>a</sup>	37.8522 <sup>a</sup>	30.3957 <sup>a</sup>	65.1479 <sup>a</sup>	92.8477 <sup>a</sup>
1	7.4127 <sup>b</sup>	4.4460 <sup>b</sup>	7.8028 <sup>b</sup>	8.9915 <sup>b</sup>	13.6569 <sup>b</sup>
3	4.5048 <sup>b</sup>	3.3938 <sup>b</sup>	1.8527 <sup>c</sup>	7.2565 <sup>b</sup>	7.0684 <sup>c</sup>
5	1.8738 <sup>c</sup>	0.2453 <sup>c</sup>	0.9400 <sup>c</sup>	5.0676 <sup>b</sup>	3.1130 <sup>d</sup>
7	0 <sup>c</sup>	0.8879 <sup>c</sup>	1.0558 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>

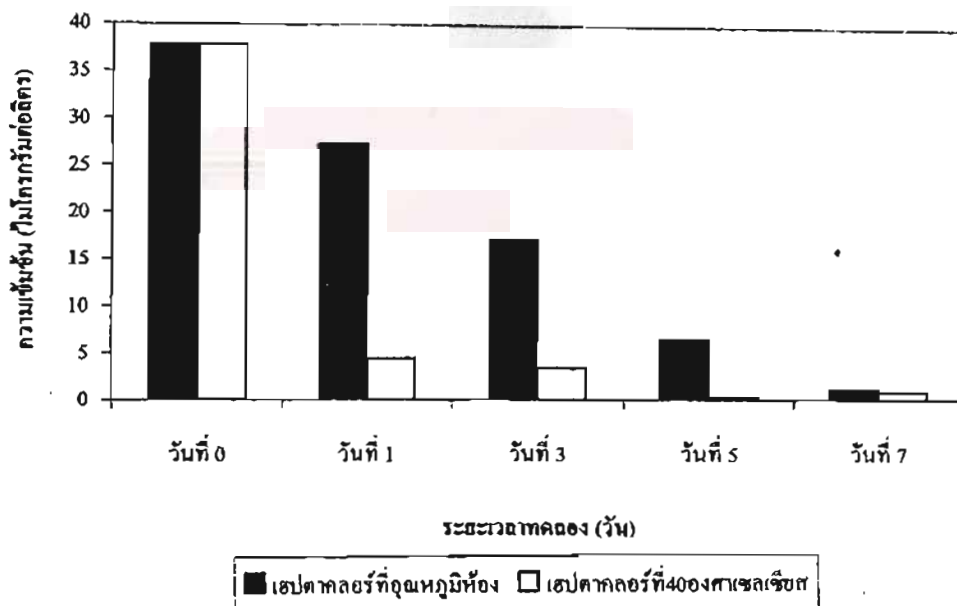
หมายเหตุ : ตัวยก (superscript) ที่แตกต่างกันแสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

### แกมมาบีเอชซี



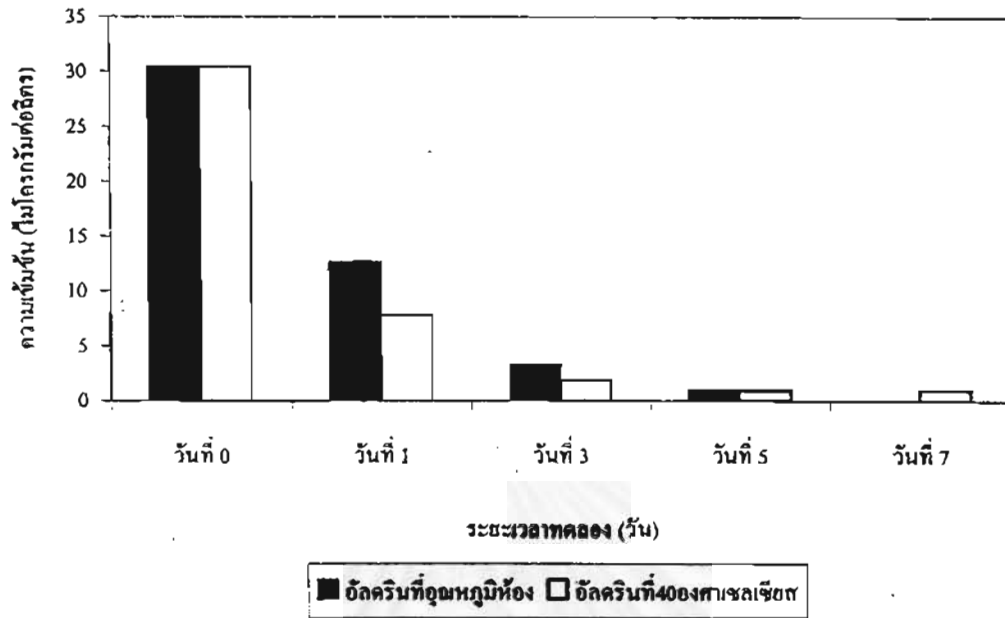
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารแกมมาบีเอชซีระหว่างอุทภูมิห้อง และอุทภูมิ 40 องศาเซลเซียส

### เฮปตาคลอร์



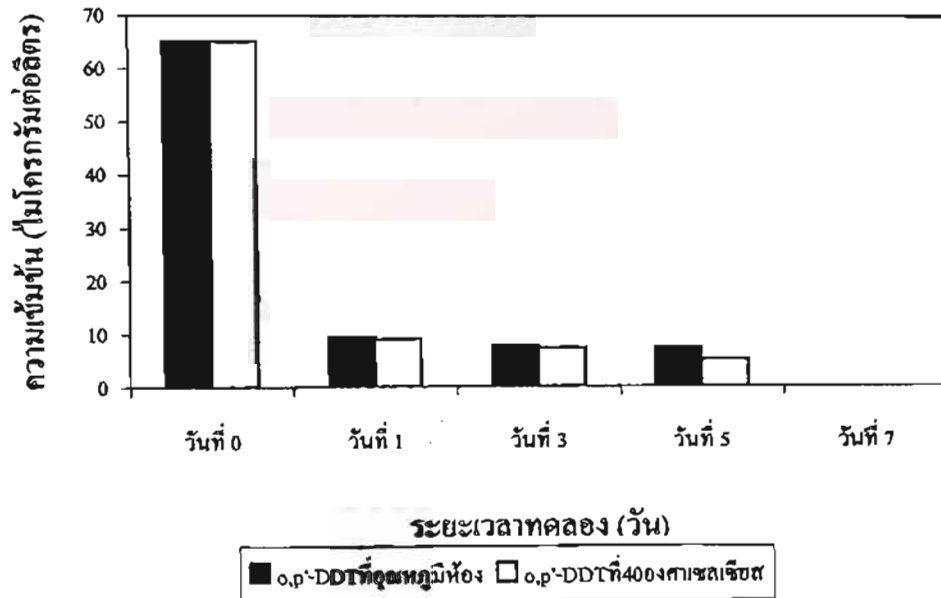
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารเฮปตาคลอร์ระหว่างอุทภูมิห้อง และอุทภูมิ 40 องศาเซลเซียส

### อัลดริน

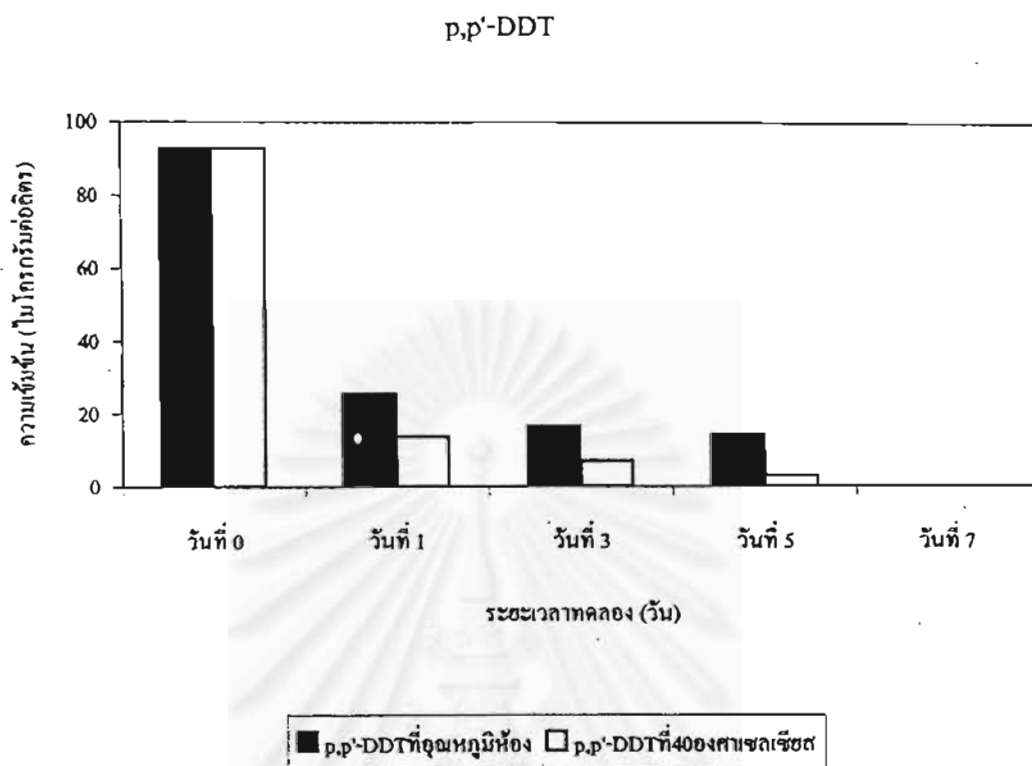


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารอัลดรินระหว่างอูณหงูมิห้อง และอูณหงูมิ 40 องศาเซลเซียส

### o,p'-DDT



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสาร o,p'-DDTระหว่างอูณหงูมิห้อง และอูณหงูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสาร p,p'-DDTระหว่างอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่ แกรมมาบีเอซซี เฮปตาคลอร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT โดยการทำให้ปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็ก สรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ คือ 0.50 กรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของแกรมมาบีเอซซี 95.85 % เฮปตาคลอร์ 35.88 % อัลดริน 23.96 % o,p'-DDT 69.77 % และ p,p'-DDT 82.29 % โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดังนี้ แกรมมาบีเอซซี 117.6272 ไมโครกรัมต่อลิตร เฮปตาคลอร์ 95.6558 ไมโครกรัมต่อลิตร อัลดริน 83.4276 ไมโครกรัมต่อลิตร o,p'-DDT 106.3309 ไมโครกรัมต่อลิตร p,p'-DDT 132.9863 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. ระดับพีเอชที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนด้วยผงเหล็กของการศึกษานี้คือ ระดับพีเอช 4 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มการสลายตัวของแกรมมาบีเอซซี 99.79 % เฮปตาคลอร์ 94.43 % อัลดริน 95.16 % o,p'-DDT 98.71 % และ p,p'-DDT 99.41 %

3. อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียที่เหมาะสมในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงในการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของสารกับผงเหล็กสำหรับเฮปตาคลอร์และ p,p'-DDT คือ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าสารสองตัวนี้มีความเข้มข้นเหลืออยู่ต่ำกว่าที่การทดลองอุณหภูมิห้อง ส่วนแกรมมาบีเอซซี อัลดริน และ o,p'-DDT พบว่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่สองอุณหภูมินี้ไม่แตกต่างกัน ส่วนระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 7 วัน

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผงเหล็กสามารถช่วยเพิ่มอัตราการสลายตัวของสารฆ่าแมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยวิธีการรีดักชัน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำผงเหล็กมาใช้และสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการตกค้างของสารฆ่าแมลงในสิ่งแวดล้อมได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็ก เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีสารฆ่าแมลงปนเปื้อน ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดได้ดีที่ผิวหน้าของผงเหล็ก ดังนั้นจึงควรศึกษากับผงเหล็ก ขนาดต่าง ๆ และให้มีการเคลื่อน ไหวมวลของน้ำ เพื่อให้การสัมผัสระหว่างผิวของผงเหล็กกับสารในน้ำเกิดได้ดีขึ้น
2. ผงเหล็กที่ใช้ควรมีการทำความสะอาดก่อนเพื่อขจัดสารปนเปื้อนที่เคลือบผิวซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้ทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น
3. บางสภาวะอาจจะเหมาะสมกับสารตัวหนึ่งแต่ไม่เหมาะสมกับสารอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาแยกแต่ละตัวเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับสารนั้น ๆ แล้วเอาลักษณะร่วมกันมาประยุกต์ใช้กับสารฆ่าแมลงผสมซึ่งจะได้สภาวะที่ค่อนข้างสมบูรณ์ในการกำจัดสารฆ่าแมลง
4. การศึกษานี้ศึกษาสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนจำนวน 5 ตัว ได้แก่ แกมมาบีเอช ซี เฮปตาคลออร์ อัลดริน o,p'-DDT และ p,p'-DDT โดยเลือกเป็นตัวแทนของประเภทสารตามโครงสร้าง ดังนั้นควรทำการศึกษาเพิ่มในสารฆ่าแมลงตัวอื่น ๆ และกลุ่มอื่น ๆ เพิ่มเติม
5. ในการศึกษาจะให้ความสนใจกับความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ไม่ได้วิเคราะห์ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดักชันด้วยผงเหล็กแล้วนั้นเป็นอะไร ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้
6. การศึกษานี้ทำการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปราศจากสารรบกวนอื่น ๆ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาในน้ำเสียจริงและในปริมาณที่มากขึ้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ธีระพล อุ่นจิตต์วรธนะ. 2541. การทำลายของเสียจากวัตถุมีพิษและสารเคมี. **ข่าวสารวัตถุมีพิษ** 1 : 21-24.
- นิภา ศรีไพโรจน์. 2527. หลักการวิจัยเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : วิกตอรีเพาเวอร์พอยท์.
- พาลาก สิงหเสนี. 2540. พิษของยาฆ่าแมลงต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 5.  
กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2537. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาณี พิมพ์สมาน. 2540. สารฆ่าแมลง. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.

### ภาษาอังกฤษ

- Carollo, J. A. 1945 The Removal of DDT From Water Supplies. *Journal American Water Works Association* 37 : 1310. cited in Faust, S. D. and Aly, O. M. *Water Pollution by Organic Pesticides. Journal American Water Works Association* 56 (1964) : 267-279.
- Cohen, J. M. , et al. 1960. Effect of Fish Poisons on Water Supplies, Part I – Removal of Toxic Materials. *Journal American Water Works Association* 52 : 1551. cited in Faust, S. D. and Aly, O. M. *Water Pollution by Organic Pesticides. Journal American Water Works Association* 56 (1964) : 267-279.
- Doong, R. A. and Wu, S. C. 1992. *Chemosphere* 24 : 1063-1075. cited in Matheson, L. J. and Tratnyek, P. G. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. *Environmental Science & Technology* 28 (1994) : 2045-2053.
- Environmental Protection Agency. Method 608 Organochlorine Pesticides and PCBs. 40CFR Ch. I (7-1-92 Edition).
- Faust, S. D. and Aly, O. M. 1964. *Water Pollution by Organic Pesticides. Journal American Water Works Association* 56 : 267-279.



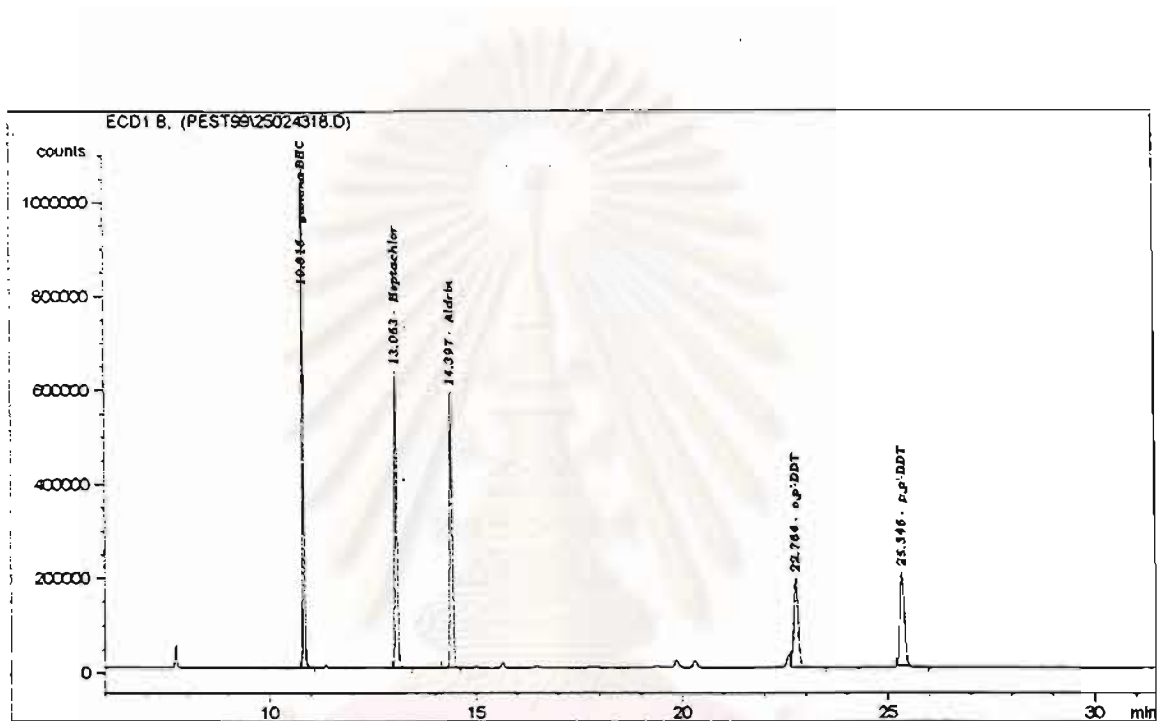
- Gillham, R. W. and O'Hannesin, S. F. 1994. Enhanced Degradation of Halogenated Aliphatics by Zero-Valent Iron. **Ground Water** 32 : 958-967.
- Grittini, C., Malcomson, M., Fernando, Q. and Korte, N. 1995. Rapid Dechlorination of Polychlorinated Biphenyls on the Surface of a Pd/Fe Bimetallic System. **Environmental Science & Technology** 29 : 2898-2900.
- Hapeman-Somich, C. J. 1992. Chemical Degradation of Pesticide Wastes. In Bourke, J. B., Felsot, A. S., Gilding, T. J., Jensen, J. K. and Seiber, J. N. (eds), **Pesticide Waste Management : Technology and Regulation**, pp.157-165. Washington : American Chemical Society.
- Hornstein, I. 1957. Use of Granulated Zinc Columns for Determining Chlorinated Organic Insecticides. **Agricultural and Food Chemistry**. 5(1) : 37-39.
- Klecka, G. M. and Gensior, S. J. 1984. Chemosphere 13 : 391-402. cited in Matheson, L. J. and Tratnyek, P. G. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. **Environmental Science & Technology** 28 (1994) : 2045-2053.
- Matheson, L. J. and Tratnyek, P. G. 1994. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. **Environmental Science & Technology** 28 : 2045-2053.
- Sayles, G. D., You, G., Wang, M. and Kupferle, M. J. 1997. DDT, DDD and DDE Dechlorination by Zero-Valent Iron. **Environmental Science & Technology** 31 : 3448-3454.
- Schlimm, C. and Heitz, E. 1996. Development of a Wastewater Treatment Process : Reductive Dehalogenation of Chlorinated Hydrocarbons by Metals. **Environmental Progress** 15 : 38-46.
- Sweeny, K. H. and Fischer, J. R. 1972. Reductive Degradation of Halogenated Pesticides. **U.S. Patent No. 3,640,821**. Feb. 8.
- Tratnyek, P. G. 1996. Putting Corrosion to use : Remediating Contaminated Ground Water with Zero-Valent Metals. **Chemistry & Industry** : 499-503.
- Vogel, T. M., Criddle, C. S. and McCarty, P. L. 1987. **Environmental Science & Technology** 21 : 722-736. cited in Matheson, L. J. and Tratnyek, P. G. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal. **Environmental Science & Technology** 28 (1994) : 2045-2053.

Wilkinson, R. R., et al. 1978. State of the Art Report on Pesticide Disposal Research. In Kennedy, M. V. (ed.), **Disposal and Decontamination of Pesticides**, pp. 73-80. Washington : American Chemical Society.

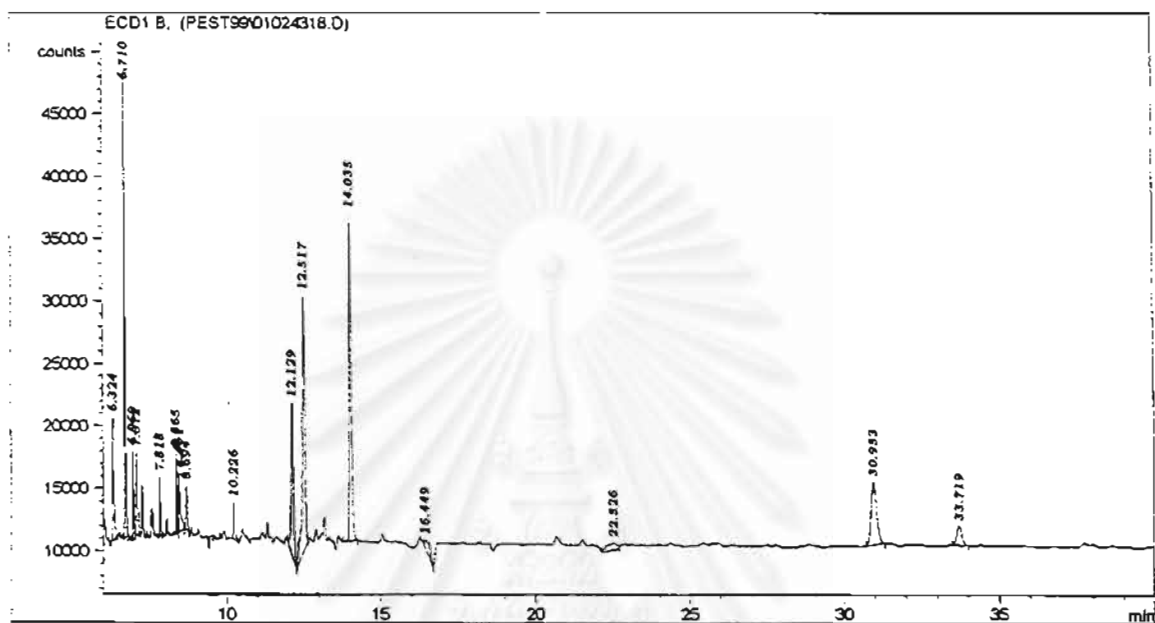


ภาคผนวก

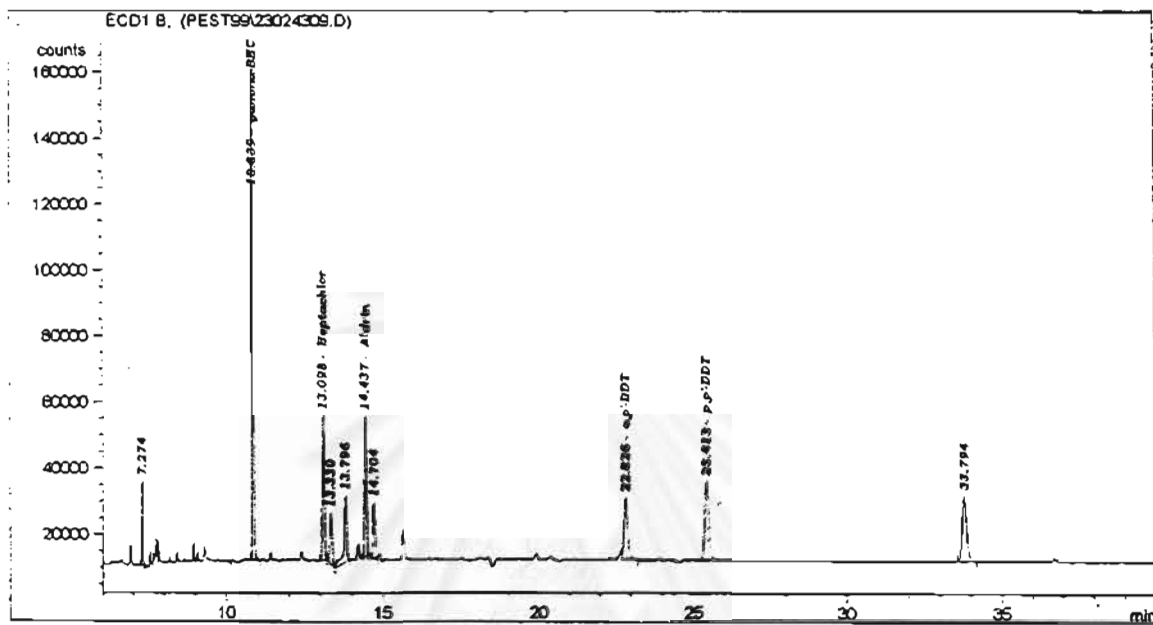
ภาคผนวก ก โครมาโตแกรมของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ



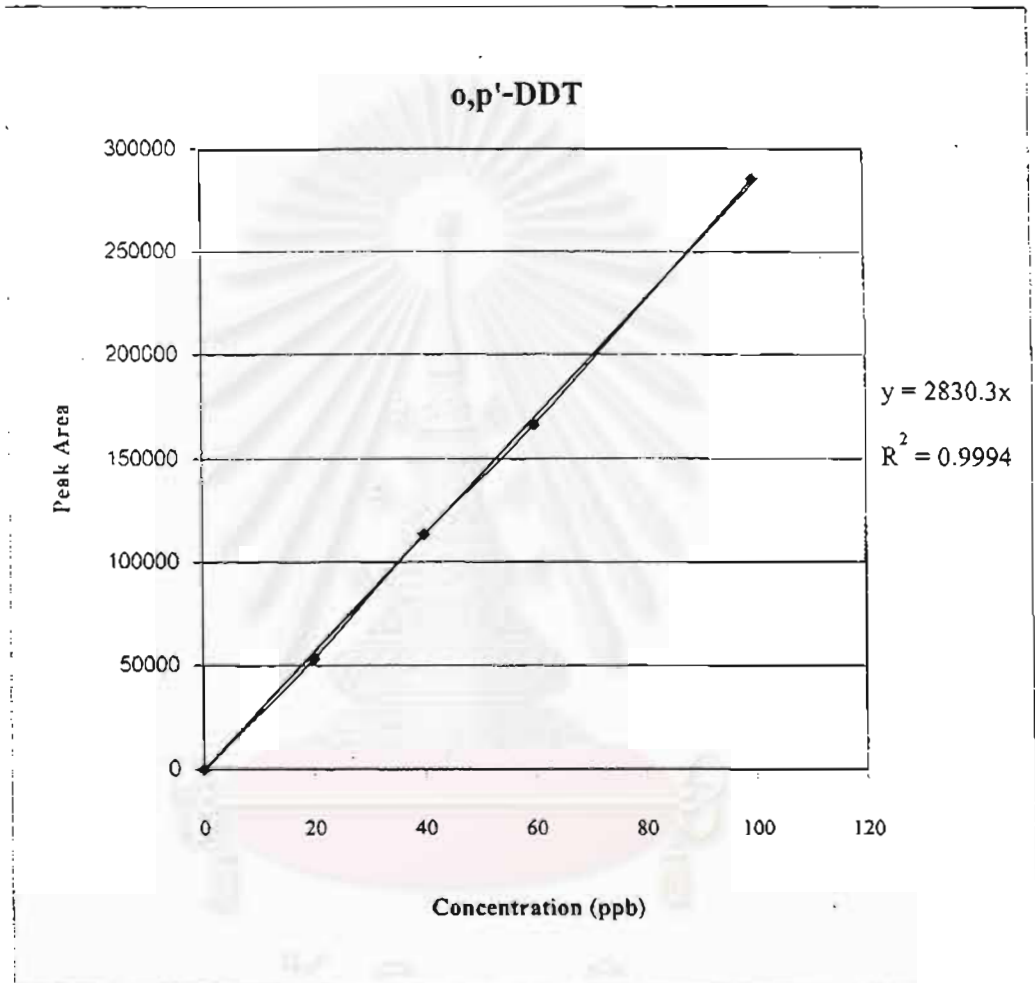
รูปที่ 1 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานฆ่าแมลงผสมกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้  
คอลัมน์อัลตราทู (Ultra II; Hewlett Packard)



รูปที่ 2 โครมาโตแกรมของแบลงค์โดยใช้คอลัมน์อัลตราทู (Ultra II; Hewlett Packard)



รูปที่ 3 โครมาโตแกรมของตัวอย่างโดยใช้คอลัมน์อัลตราทู (Ultra II; Hewlett Packard)



รูปที่ 4 กราฟมาตรฐานของ o,p'-DDT

## ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนภายหลังการเติมผงเหล็กที่เวลาในการทดลอง 3 วัน  
และปริมาณผงเหล็กต่าง ๆ โดยวิธี GC-ECD

ปริมาณผงเหล็ก (กรัม)	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลอร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
0	117.6486	94.5849	82.0260	105.1685	131.5841
	117.8937	95.6620	83.8505	106.8929	133.6554
	117.3392	96.7206	84.4063	106.9313	133.7195
ค่าเฉลี่ย	117.6272	95.6558	83.4276	106.3309	132.9863
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2779	1.0679	1.2452	1.0068	1.2148
0.50	5.2901	62.2288	62.1180	33.3789	22.9417
	4.6481	61.6017	64.3290	31.6978	23.8567
	4.7127	60.1691	63.8727	33.2811	23.8692
ค่าเฉลี่ย	4.8836	61.3332	63.4399	32.7859	23.5559
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3535	1.0558	1.1673	0.9436	0.5319
1.0	3.9335	51.8836	49.6295	25.3563	15.2207
	3.9333	50.4790	49.9405	24.4844	16.2136
	3.6040	50.1342	49.8938	24.4244	16.1510
ค่าเฉลี่ย	3.8236	50.8323	49.8213	24.7550	15.8618
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1902	0.9267	0.1677	0.5216	0.5561
2.0	3.3536	41.2303	39.9431	18.7695	15.0288
	3.4640	39.6778	41.3058	22.0005	17.1132
	3.7058	38.5550	39.7953	18.0446	15.6758
ค่าเฉลี่ย	3.5078	39.8210	40.3481	19.6049	15.9393
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1801	1.3434	0.8327	2.1061	1.0669



ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยาด้วย  
ผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่ระดับพีเอช (pH) ต่าง ๆ ระยะเวลาทดลอง 3 วัน

ระดับพีเอช	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	นกกมาบีเอชซี	เฮปตาคลอร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
4	0.8622	3.3907	3.0323	2.1372	1.7732
	0	4.1368	4.3507	0.5217	0
	0	6.6482	2.6496	0.5067	0
ค่าเฉลี่ย	0.2874	4.7252	3.3442	1.0552	0.5911
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4978	1.7066	0.8924	0.9371	1.0238
7	1.0813	2.9162	3.8551	1.0577	2.1530
	0.8947	3.7911	5.1104	3.9416	1.0012
	1.8320	5.7188	6.7492	2.0012	1.2398
ค่าเฉลี่ย	1.2693	4.1420	5.2382	2.3335	1.4647
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4961	1.4339	1.4513	1.4704	0.6079
8	0.6276	8.7727	8.1621	2.0468	1.2320
	0.8820	8.0118	7.7738	2.9386	1.6263
	0.9275	6.8958	6.6870	2.6548	1.4829
ค่าเฉลี่ย	0.8124	7.8934	7.5410	2.5467	1.4471
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1616	0.9440	0.7646	0.4556	0.1996

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ระดับพีเอช 4 ภายหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและระยะเวลาในการทดลองต่าง ๆ

ระยะเวลาทดลอง (วัน)	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่อุณหภูมิห้อง (ไมโครกรัมต่อลิตร)					
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลอรั	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT	
0	160.7768	36.5416	29.9686	58.1818	95.9200	
	172.3804	36.9795	29.9158	66.5954	93.6946	
	164.8851	40.0354	31.3026	70.6664	88.9283	
	ค่าเฉลี่ย	166.0141	37.8522	30.3957	65.1479	92.8477
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.8836	1.9034	0.7859	6.3669	3.5720
1	8.0663	28.7311	14.1983	10.4973	28.8303	
	8.2565	28.0438	12.5286	8.6047	28.3827	
	8.1455	24.9909	11.1659	9.0039	20.0471	
	ค่าเฉลี่ย	8.1561	27.2553	12.6309	9.3686	25.7533
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0955	1.9909	1.5188	0.9976	4.9468
3	6.7911	18.7864	1.3588	8.7310	17.8918	
	6.7923	16.9301	3.6556	7.0001	13.2942	
	5.5089	15.5017	4.6721	7.2332	18.9451	
	ค่าเฉลี่ย	6.3641	17.0727	3.2288	7.6548	16.7104
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.7406	1.6470	1.6973	0.9392	3.0050
5	1.6411	6.5784	0.9447	8.4909	14.9088	
	1.6513	6.2741	0.9954	8.0393	13.3674	
	1.5834	6.4501	0.9886	5.7400	14.5582	
	ค่าเฉลี่ย	1.6252	6.4342	0.9762	7.4234	14.2781
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0366	0.1528	0.0275	1.4752	0.8080
7	0	1.4248	0	0	0	
	0	1.3352	0	0	0	
	0	0.7926	0	0	0	
	ค่าเฉลี่ย	0	1.1842	0	0	0
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0	0.3421	0	0	0

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ระดับพีเอช 4 ภายหลังจากทำปฏิบัติการดีดักชันด้วย  
ผงเหล็ก 0.50 กรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทดลองต่าง ๆ

ระยะเวลาทดลอง (วัน)	ความเข้มข้นของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	แกมมาบีเอชซี	เฮปตาคลอร์	อัลดริน	o,p'-DDT	p,p'-DDT
0	160.7768	36.5416	29.9686	58.1818	95.9200
	172.3804	36.9795	29.9158	66.5954	93.6946
	164.8851	40.0354	31.3026	70.6664	88.9283
ค่าเฉลี่ย	166.0141	37.8522	30.3957	65.1479	92.8477
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.8836	1.9034	0.7859	6.3669	3.5720
1	7.6044	4.7060	8.2405	9.4526	13.1946
	7.1910	4.1090	7.1777	8.5951	13.9721
	7.4426	4.5231	7.9903	8.9269	13.8039
ค่าเฉลี่ย	7.4127	4.4460	7.8028	8.9915	13.6569
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2083	0.3059	0.5556	0.4324	0.4091
3	5.1149	3.0888	2.0892	7.4067	7.3690
	4.1728	0.02528	2.0339	7.0786	6.9784
	4.2266	3.8397	1.4349	7.2843	6.8579
ค่าเฉลี่ย	4.5048	3.3938	1.8527	7.2565	7.0684
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.5291	0.3948	0.3628	0.1658	0.2672
5	2.1008	0.1594	0.9319	4.5863	3.2330
	1.9754	0.3101	0.9189	5.9152	3.2022
	1.5453	0.2664	0.9691	4.7014	2.9039
ค่าเฉลี่ย	1.8738	0.2453	0.9400	5.0676	3.1130
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2913	0.0775	0.0205	0.7363	0.1818
7	0	0.6996	0	0	0
	0	1.1669	1.4861	0	0
	0	0.7971	1.6813	0	0
ค่าเฉลี่ย	0	0.8879	1.0558	0	0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0	0.2465	0.9195	0	0

## ประวัติผู้เขียน

นางศิริพรรณ วัฒนะรัตน์ เกิดวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ.2512 ที่อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2533 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2539 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้จัดการแผนกห้องปฏิบัติการเคมี (ระยอง) บริษัท ไอคิวเอ-นอร์เวส แล็บส์ จำกัด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย