

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การใช้โพลีเมอร์นาโนแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนในการดูดซับ
สารออกแทนโนคลอรีนจากดินและการพยากรณ์การดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ

โดย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์

พฤษภาคม 2551

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยการสนับสนุนเงินวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผ่านทางกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ จากสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาฯ จากศูนย์วิจัยและฝึกอบรมสภาวะแวดล้อม กรม คำนะนำในการสังเคราะห์โพลีเมอร์นาโนจาก ดร. วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร นายเชาว์วุฒิ สิงห์แก้ว ผู้ช่วยวิจัยในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัย การใช้โพลีเมอร์นาโนแอมฟิฟิลิกโพลียูรีเทนในการดูดซับสารออกแทนโนคลอรีน จากดินและการพยากรณ์การดูดซับ

ผู้วิจัย ดร. เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ พฤศจิกายน 2550

บทคัดย่อ

ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโพลียูรีเทนกิ่งขอบกึ่งไม่ชอบน้ำ (APU) เพื่อใช้ดูดซับ/กำจัดสารฆ่าแมลงออกแทนโนคลอรีน 5 ชนิด ได้แก่ เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ เฮปตะคลอไรด์ อัลดริน ดีลดริน เอ็นดริน และดีดีที จากดิน APU ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่มีขนาด 55-155 nm. และใช้ความเข้มข้น ที่ให้ผลดีที่สุด 10 g. l.^{-1} ตลอดจนการทดลอง ระยะเวลาสัมผัสที่ทำให้ APU และดินที่ใส่สารผู้สมมูล คือ 48 h และให้ผลดูดซับดีที่สุด ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปัจจัยอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ สมบัติของสารและดิน องค์ประกอบคาร์บอนอินทรีย์และดินเหนียวมีบทบาทต่อการดูดซับเช่นเดียวกับค่า $\log K_{OC}$ ทั้งนี้เนื่องจากสารทดสอบไม่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกันทั้งหมด การพยากรณ์จากสมบัติของสารจึงไม่สำเร็จยกเว้นในกลุ่มของเฮปตะคลอไรด์ อัลดริน ดีลดริน เอ็นดริน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกัน ค่าของ $\log K_{OW}$ และการละลายน้ำ (S) ในงานวิจัยมีค่าต่าง ๆ กันขึ้นกับเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นจึงไม่มีค่าที่เชื่อถือได้มาใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์กับการดูดซับได้ ส่วนในกลุ่มที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกัน น้ำหนักโมเลกุล (MW) และการดูดซับมีความเกี่ยวพันกันอย่างไม่มีข้อสงสัย ความสามารถในการดูดซับ/กำจัดอยู่ในช่วง 85.2-92.8% ในทุกตัวอย่างดินโดยที่ เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ > เอ็นดริน > ดีลดริน > เฮปตะคลอไรด์ > อัลดริน > ดีดีที ซึ่งสอดคล้องกับค่า $\log K_{OC}$ ที่เพิ่มขึ้นของสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title: Use of amphiphilic polyurethane nanopolymer to sorb organochlorine from soil and sorption prediction

Investigator: Dr. Benjalak Karnchanasest

Year: November 2007

ABSTRACT

Amphiphilic polyurethane nanoparticles (APU) were synthesized to examine sorption/removal of five organochlorine insecticides including benzene hexachloride, heptachlor, aldrin, dieldrin, endrin, and DDT from soil. Synthesized APU in the most size range of 55-155 nm and with concentration of 10 g. l.⁻¹ were found most effective and used for the whole experiment. Contact time which allowed APU solution and spiked soil to reach equilibrium was of 48 h exhibited most efficient sorption/removal. The results indicated influencing factors for the sorption were both properties of soil and compounds. Organic carbon and clay contents play important role on the sorption as well as log K_{oc} values. Since the testing compounds were not all similar molecular structure, the prediction from their properties were not successful except those of heptachlor, aldrin, dieldrin, endrin which have similar in molecular structures. Log K_{ow} and aqueous solubility (S) values in the literature were varied depending on their experimental conditions, therefore no reliable values can be used for the test of their relationships to the sorption activity. In the group of similar molecular structure, MW and sorption was undoubtedly related. The sorption/removal capacity found to be in the range of 85.2-92.8% for all soil samples and in the order of benzene hexachloride>endrin>dieldrin>heptachlor>aldrin>DDT according to their increasing log K_{oc} .

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	iv
รายการตารางประกอบ	vii
รายการรูปประกอบ	ix
รายการอักษรย่อ	x
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร	3
2.1 สารออกแกน โนคลอรีน	3
2.1.1 แหล่งกำเนิด การแพร่กระจายและการปนเปื้อน	3
2.1.2 สมบัติทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี	6
2.1.3 การกำจัดสารในดิน	9
2.1.4 มาตรฐานความเข้มข้น	11
2.2 โพลีเมอร์นาโน	22
บทที่ 3 การทดลอง	25
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.2 การสังเคราะห์โพลีเมอร์นาโน	26
3.2.1 การสังเคราะห์พรีเคอร์เซอร์ (precursor)	26
3.2.2 การเกิดอนุภาคนาโน	26
3.2.3 ปฏิกิริยาครอสลิงค์ (cross-link)	26
3.3 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน	28
3.3.1 การเก็บตัวอย่างดิน	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติดิน	28
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารทดสอบ	28
3.4.1 การสกัดสารทดสอบจากดิน	28
3.4.2 การทำให้สะอาด (clean-up)	28
3.4.3 การสกัดสารทดสอบจากน้ำ	29
3.4.4 สภาพที่เหมาะสมของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี	29
3.4.5 ช่วงเวลาที่ปรากฏ (retention times) ของสารทดสอบ และอินเทอร์เน็ลแสดนคาร์ด (internal standard)	29
3.4.6 สร้างกราฟมาตรฐาน	29
3.4.7 ควบคุมคุณภาพวิธีวิเคราะห์	31
3.5 การกำจัดสารทดสอบโดยใช้โพลีเมอร์นาโน	31
3.5.1 ความพรุนของดินในคอลัมน์	31
3.5.2 ระยะเวลาสัมผัสที่มีประสิทธิภาพ	33
3.5.3 การกลับคืน (recovery) ของโพลีเมอร์นาโน	33
3.5.4 การชะสารด้วยน้ำแยกอออน	33
3.5.5 อิทธิพลของสมบัติของดิน	33
3.5.6 ชีดจำกัดของโพลีเมอร์นาโน	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	35
4.1 โพลีเมอร์นาโน	35
4.1.1 ขนาด	35
4.1.2 การกลับคืน	35
4.2 สมบัติของดิน	38
4.2.1 ดินที่ใช้ในการทดลอง	38
4.2.2 ดินในคอลัมน์	41
4.3 การชะดินในคอลัมน์ที่ใส่สารทดสอบ	41
4.3.1 ชะด้วยน้ำแยกอออน	41
4.3.2 ระยะเวลาที่ใช้	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 เซลล์พอลิเมอร์นาโนความเข้มข้นต่างๆ	42
4.3.4 เซลล์ประเภทต่างๆ	47
4.4 การพยากรณ์ประสิทธิภาพดูดซับ	53
4.5 ทดสอบโมเดลพยากรณ์	57
4.5.1 สมบัติของดินปนเปื้อน	57
4.5.2 ประสิทธิภาพดูดซับจากการพยากรณ์และจากการตรวจวัด	57
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	64
5.1 ขีดจำกัดการใช้พอลิเมอร์นาโน	64
5.2 อิทธิพลของสมบัติของดินต่อการดูดซับ	64
5.3 อัตราการไหลของพอลิเมอร์นาโนที่ให้ประสิทธิภาพสูง	65
5.4 อัตราการดูดซับของพอลิเมอร์นาโน	65
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของสารออกแกนโนคลอรีนและดินต่อ การดูดซับออกจากดิน	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	69
ผนวกที่ 1	69
ผนวกที่ 2	70
ผนวกที่ 3	72

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพ เคมี ที่เกี่ยวข้องของสารทดสอบ	8
2.2 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำผิวดิน	13
2.3 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ	14
2.4 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำใต้ดินและน้ำประปา	15
2.5 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำทะเลชายฝั่ง	16
2.6 มาตรฐานสาร OCs ในน้ำทิ้ง	17
2.7 ค่าความปลอดภัยของสาร OCs ในนม	18
2.8 ค่าสูงสุดของสาร OCs ที่ยอมให้มีได้ในอาหารสัตว์ของ ประเทศสหรัฐอเมริกา	19
2.9 ค่าสูงสุดของสาร OCs ที่ยอมให้มีได้ในเนื้อสัตว์และ ผลิตภัณฑ์จากสัตว์	20
2.10 มาตรฐานสาร OCs ในดินเพื่อการใช้ประโยชน์อยู่อาศัยเกษตรกรรม และอื่นๆ	21
3.1 น้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้สังเคราะห์โพลีเมอร์นาโน	27
3.2 สัมประสิทธิ์สมการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ของสาร (แกน x) กับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของสารทดสอบกับพื้นที่ผิวของอินเตอร์นัล สแตนดาร์ด (แกน y)	30
3.3 ขีดจำกัดวิธีวิเคราะห์ของสารทดสอบ	32
3.4 ร้อยละการกลับคืนของสารทดสอบ	32
3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสที่ทำให้ประสิทธิภาพสูง โดยใช้ดินชนิดที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุด	34
3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบอิทธิพลของคาร์บอนอินทรีย์	34
3.7 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหาขีดจำกัดของโพลีเมอร์นาโน โดยใช้ดินชนิดที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุด	34
4.1 ขนาดและปริมาตรต่างๆของอนุภาคโพลีเมอร์นาโนที่สังเคราะห์ขึ้น	36
4.2 เปรียบเทียบขนาดและปริมาตรของโพลีเมอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้กับผลการศึกษาอื่น	37
4.3 สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของดินที่ใช้ทดสอบ	40
4.4 น้ำหนัก (mg.) และประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัด ของสารอแกโนคลอรีนออกจากดิน 0.06 mg. (2 mg. kg. ⁻¹) โดยใช้สารละลายโพลีเมอร์นาโน 10 g. l. ⁻¹ แช่ในดิน 48 h. ก่อนชะออกด้วยน้ำแยกไอออน	52

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 สมการพยากรณ์ร้อยละสารออกแทน โนคลอรีนในดินที่กำจัดได้ (Y) จากร้อยละคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (x)	54
4.6 สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของดินปนเปื้อน	60
4.7 ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทน โนคลอรีนปนเปื้อนในดินที่เก็บจากภาคอีสาน โดยใช้โพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 g. l.^{-1} แช่ในดิน 48 h. ก่อนชะออกด้วยน้ำแยกไอออน	61
4.8 เปรียบเทียบร้อยละของประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทน โนคลอรีนปนเปื้อน ในดินที่ได้จากการทดลองและจากการพยากรณ์โดยใช้คาร์บอนอินทรีย์ MW และ $\log K_{oc}$ เป็นดัชนี	62
4.9 ร้อยละของความแตกต่างของประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดที่ได้จากการพยากรณ์ เทียบกับร้อยละที่ได้จากการทดลองดูดซับ/กำจัดจริง	63

รายการประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารทดสอบ	7
4.1 ปริมาณโพสิเมอร์นาโน (APU) ในแต่ละ Pore volume (PV) จากการชะ โพสิเมอร์นาโนที่แช่ไว้ในคอลัมน์ดิน (30 g.) ด้วยน้ำแยกอออนที่มีอัตราการไหล 20 ml. min ⁻¹ และใช้โพสิเมอร์นาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	39
4.2 ปริมาณโพสิเมอร์นาโน (APU) ในแต่ละ Pore volume (PV) จากการชะ โพสิเมอร์นาโนที่แช่ไว้ในคอลัมน์ดิน (30 g.) ด้วยน้ำแยกอออนที่มีอัตราการไหล 20 ml. min ⁻¹ และใช้โพสิเมอร์นาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	43
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารออกจากดินชนิดที่ 5 (30 g.) ที่ใส่สารออกแทนโนคลอรีนไว้ 0.06 mg. (2 mg. kg. ⁻¹) กับความเข้มข้นของสาร โพสิเมอร์นาโนที่แช่ไว้ในดิน 48 h. ก่อนชะด้วยน้ำแยกอออน	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารออกแทนโนคลอรีนออกจาก ดินชนิดที่ 1- 5 กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน	48
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนกับชนิดเนื้อดิน	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนจากดิน 5 ชนิด กับ Log K _{oc} ของสาร	55
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดเฉลี่ยสารออกแทนโนคลอรีนจากดิน ทั้ง 5 ชนิด กับค่า Log K _{oc} ของสาร	56
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนจากดินทั้ง 5 ชนิด กับน้ำหนักโมเลกุลของสาร	58
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดเฉลี่ยสารออกแทนโนคลอรีนจากดิน ทั้ง 5 ชนิด กับน้ำหนักโมเลกุลของสาร	59

รายการอธิบายคำย่อ

APU	amphiphilic polyurethane	mg.	มิลลิกรัม
cm.	เซ็นติเมตร	min.	นาที
g.	กรัม	ml.	มิลลิลิตร
h.	ชั่วโมง	mm.	มิลลิเมตร
K_D	สัมประสิทธิ์แบ่งภาคระหว่างดินกับ	MW	molecular weight
อากาศ		na	ไม่พบ ไม่มี
kg.	กิโลกรัม	nd	ตรวจวัดไม่พบโดยวิธีที่ใช้
K_{OC}	สัมประสิทธิ์แบ่งภาคออกتانอลกับ	ng.	นาโนกรัม
คาร์บอน		nm.	นาโนเมตร
K_{ow}	สัมประสิทธิ์แบ่งภาคออกتانอลกับ	OCs	สารประกอบออกแทนในคลอรีน
น้ำ		ppb	หนึ่งในพันล้านส่วน (10^{-9})
l.	ลิตร	ppt	หนึ่งในล้านล้านส่วน (10^{-12})
cmol	centimole	ppm	หนึ่งในล้านส่วน (10^{-6})
mequi	milliequivalent	PV	pore volume
S.	aqueous solubility		
μ g.	ไมโครกรัม		
นน.	น้ำหนัก		
ลบม.	ลูกบาศก์เมตร		
บีเอสซี	เบนซีนเฮกซะคลอไรด์		

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม (EPA) ได้จัดสารออร์แกโนคลอรีน (organochlorines, OCs) 9 ชนิด ได้แก่ อัลดริน (aldrin), ดีลด์ริน (dieldrin), ดีดีที (DDT), เอ็นดริน (endrin), คลอเดน (chlordane), เฮกซะคลอโรเบนซีน (hexachlorobenzene, HCB), เฮปตะคลออร์ (heptachlor), ไมเร็กซ์ (mirex) และ ท็อกซาฟีน (toxaphene) เป็นสารมลพิษตกค้างยาวนาน (persistent organic pollutants, POPs) สารกลุ่มนี้มีความทนทานสูงต่อการสลายตัวทั้งทางเคมีและชีวะ ละลายในไขมันได้ดี แต่ละลายในน้ำได้น้อย สามารถสะสมในสิ่งแวดล้อม เนื้อเยื่อของมนุษย์และสัตว์ แม้มีปริมาณน้อยมากก็มีผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม OCs แม้จะมีการห้ามนำเข้า ห้ามผลิต และห้ามใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ปี 2523-2526 แต่ยังมีการใช้ทางด้านสาธารณสุข เช่น ดีดีที ในการฉีดป้องกันแมลงและยุง นอกจากนี้แล้วในหลายประเทศ เช่น ประเทศในแอฟริกา อินเดีย ยังมีการใช้ยูเรเนียมแพร่หลาย สารเหล่านี้สามารถถูกพัดพาโดยอิทธิพลของลมฟ้าอากาศ หรือ น้ำ หรือถูกชะล้างไปกับดิน จึงทำให้สามารถตรวจพบสารเหล่านี้ได้ในที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดของสาร เนื่องจาก OCs มีครึ่งชีวิตที่ยาวนานมากถึง 50 ปีก็มี สำหรับประเทศไทยมีการนำเข้าสาร OCs เป็นจำนวนมากมาตั้งแต่ในอดีต จึงสามารถตรวจพบสารเหล่านี้ตกค้างในน้ำ ดิน และในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ตรวจพบดีดีทีในผลผลิตพืชไร่ ไม้ผล พืชผัก จากพื้นที่ทางการเกษตร 25 จังหวัดทั่วประเทศ ตรวจพบ เอ็นดริน และดีดีที ในข้าวและธัญพืช และสาร OCs ในไข่ของนกยางเป็ยที่อาศัยอยู่ในจังหวัดอยุธยา (ศรัณย์ เกียรติมาลีสถิตย์, 2546) เป็นต้น นอกจากนี้ การนำกากตะกอน (sludge)จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ปลูก หรือเป็นปุ๋ยของพืช เป็นการเติมสาร OCs ลงในดิน และสู่พืชในที่สุด เนื่องจากในกากตะกอนยังมี OCs ตกค้างอยู่ ปุ๋ยที่ได้จากการนำสลายตัวของพืชและสัตว์ และจากมูลสัตว์ก็เช่นกันเป็นแหล่งเติม OCs ในดินที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ดังนั้นการกำจัดสารเหล่านี้จากดินจึงมีความสำคัญมากในการป้องกันการชะ OCs ลงสู่แหล่งน้ำ หรือถูกดูดซับโดยพืช และส่งผ่านสู่คนโดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้พัฒนาก้าวหน้าไปมากมีการผลิตอนุภาคนาโนให้สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์พวกฟิแนนทรีน (phenanthrene) จากดิน (Tungittiplakorn et al., 2004) ให้ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวมาก การแยกดินและอนุภาคนาโนภายหลังการดูดซับทำได้ไม่ยาก จึงทำให้เทคนิคการใช้อนุภาคนาโนมีศักยภาพในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ อย่งไรก็ดี

จำเป็นต้องศึกษาวิจัยความสามารถและประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนกรณีสารอินทรีย์ต่างชนิดกัน สมบัติของดินต่างๆกันจะให้ผลอย่างเดียวกันหรือไม่อย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ชี้แจงจำกัดความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโน ที่สามารถดูดซับ OCs ได้

1.2.2 ศึกษาสมบัติของดินที่มีผลต่อการดูดซับ OCs ของ แอมฟิฟิลลิกโพลียูรีเทน (amphiphilic polyurethane, APU) จากดิน

1.2.3 ศึกษาการป้อน (flow) โพลีเมอร์นาโน ในคอลัมน์ดินที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูง

1.2.4 ศึกษาอัตราการดูดซับ OCs ของโพลีเมอร์นาโน จากดิน

1.2.5 ศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของ OCs และของดินกับการดูดซับ OCs ออก จากดิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

OCs ที่ทดสอบมี 6 ชนิด ได้แก่ เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ เฮปตะคลอไรด์ อัลคริน ดีลคริน เอ็นคริน และดีดีที

โพลีเมอร์นาโน ที่สังเคราะห์ คือ APU

ดินที่ใช้เป็นดินที่ปราศจาก OCs โดยให้มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 5 ระดับ

สมบัติของดินที่ใช้ศึกษาหาความสัมพันธ์ คือ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ร้อยละของ ส่วนประกอบเนื้อดิน

สมบัติของสารทดสอบที่ใช้ศึกษาหาความสัมพันธ์ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW) การละลายน้ำ (aqueous solubility, S) สัมประสิทธิ์แบ่งภาคออกทานอลและน้ำ (octanol-water partition coefficient, $\log K_{ow}$) , สัมประสิทธิ์แบ่งภาคออกทานอลและคาร์บอน (octanol-water partition coefficient, $\log K_{oc}$)

บทที่ 2

การทบทวนเอกสาร

2.1 สารออกแทนโนคลอรีน

2.1.1 แหล่งกำเนิด การแพร่กระจาย และการปนเปื้อน

สาร OCs ที่ศึกษาทั้งหมด 6 ชนิดเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารป้องกันและกำจัดแมลง ผลจากการผลิตและการนำไปใช้ประโยชน์ทำให้เกิดการแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ดิน น้ำ และพืช ตัวอย่างเช่น จากโรงงานผลิตสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยสารเหล่านี้ที่สำคัญออกมาจากโรงงานโดยตั้งใจหรือไม่ตั้งใจก็ตาม จากโรงงานอบเมล็ดพันธุ์พืชต่างๆที่มีการใช้เบนซีนเฮกซะคลอไรด์คลุกเคล้าเมล็ดพันธุ์พืชเพื่อฆ่าเชื้อรา ใช้เอ็นโดรลินในการควบคุมไม่ให้หนูกัดแทะผลิตผลทางการเกษตร เช่นเดียวกับทางปศุสัตว์ที่ต้องกำจัดแมลงและสัตว์ต่างๆที่รบกวนและก่อให้เกิดโรคในสัตว์ ได้แก่ พวกเห็บ หมัด ไร แมลง หรือการผสมสารกำจัดแมลงกับเมล็ดพันธุ์ หรือพ่นพ่นงาไซโลเก็บพืชผลด้วยสารกำจัดปลวก เป็นต้น นอกจากนี้แล้วแหล่งกำเนิดของสาร OCs จากชุมชนนับว่าสำคัญไม่น้อยเหมือนกัน เนื่องจากมีการใช้สาร OCs เพื่อกำจัดแมลงโดยควบคุมการแพร่กระจายและการระบาดของพาหะของโรค เช่น โรคมาลาเรีย ไข้รากสาดใหญ่ และโรคอื่นๆที่มีแมลงเป็นพาหะ ได้แก่ การใช้ดีดีที เฮปตะคลออร์ และคลอเดนในบ้านเรือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียรวมทั้งทั่วประเทศ ทำให้น้ำเสียที่ผ่านบ้านเรือน รวมทั้งสถานที่ราชการ สถาบันการศึกษา โรงแรม ตลาด ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ ผ่านพื้นที่ว่างเปล่า และลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกช่องทางหนึ่งของการแพร่กระจายไปของสาร OCs คือ สารสามารถเกาะตัวกับละอองฝุ่น เศษดินในบริเวณบ้านเรือน และถูกพัดพาไปกับน้ำหรือลม รวมทั้งการนำน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ปนเปื้อนไปใช้ในภาคการเกษตรก็เป็นอีกช่องทางของการแพร่กระจายและสะสมในพืช เนื่องจากพืชสามารถดูดซับสารกำจัดแมลงเหล่านี้ได้อีกทางหนึ่งจากรากพืช และดูดซับไว้ที่ตามต้นตามใบ

การแพร่กระจายของสาร OCs ส่วนหนึ่งมาจากการนำไปใช้ประโยชน์ และมีผลให้เกิดการปนเปื้อน ดังนี้

-อัลดริน เป็นสารกำจัดศัตรูพืช ใช้ฆ่าพวกปลวก หนอนข้าวโพด ตั๊กแตน ส่วนใหญ่จะใช้ฉีดพวกข้าวโพด มันฝรั่ง และฉีดไม้กันปลวก ยังพบมีการใช้อยู่หลายประเทศแต่ภายใต้เงื่อนไขที่เข้มงวด ได้แก่ ออสเตรีย ประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น นิวซีแลนด์ ฟิลิปปินส์ อาร์เจนตินา แคนาดา เวเนซุเอลา สหรัฐอเมริกา (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543ก)

-ดีลิตริน ใช้ในการกำจัดแมลงในดินและแมลงที่เป็นพาหะของโรค รวมทั้งใช้ควบคุมปลวก และแมลงศัตรูของเส้นใย (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541ก)

-ดีดีที มีการนำมาใช้ป้องกันมาเลเรียมากระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ภายหลังสงครามจึงใช้กันมากในพืชผลทางการเกษตรและควบคุมโรค ต่อมาเมื่อทราบปัญหาของดีดีทีต่อกบป่า จึงเริ่มมีการจำกัดการใช้ในหลายประเทศ ฝ่ายนับเป็นพืชที่สหรัฐอเมริกาใช้ดีดีทีมากที่สุดประมาณ 80% ของการใช้ดีดีทีทั้งหมด ปัจจุบันก็ยังมีการผลิตและใช้เพื่อควบคุมยุงที่เป็นต้นเหตุของโรคมาลาเรีย (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541ข)

-เอ็นดริน ใช้กำจัดแมลงศัตรูพืชใบ ได้แก่ พวกไรฝ้ายและพืชเมล็ด ตลอดจนใช้ควบคุมหนู นก (สุขุม วงศ์เอก, 2543)

-เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมดอกไม้ไฟ อุตสาหกรรมยางสังเคราะห์และอุตสาหกรรมยาฆ่าแมลง การผลิตสารเคมี ทางอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbontetrachloride) เปอร์คลอเอทิลีน (perchloroethylene) ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) เพนตาคลอโรเบนซีน (pentachlorobenzene) และเป็นสารปนเปื้อนในสารกำจัดศัตรูพืช เช่น เพนตาคลอโรฟีนอล (pentachlorophenol) ไดคลอแรม (dichloram) พบมีการใช้เป็นสารฆ่าราในเมล็ดพืช ยังพบมีการใช้ อยู่ในหลายประเทศภายใต้เงื่อนไขที่เข้มงวด (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543ข)

-เฮปตะคลออร์ เฮปตะคลออร์ผลิตโดยคลอรีนชั้นคลอเดน มีการใช้เฮปตะคลออร์เป็นสารฆ่าแมลงมานานกว่า 30 ปี โดยเฉพาะใช้ฆ่าปลวก และแมลงในดิน สหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นต้นกำเนิดของสารปัจจุบันจำกัดการใช้โดยให้ฆ่าปลวกเฉพาะที่อยู่ใต้พื้นดิน (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543ค, สุขุม วงศ์เอก, 2543)

การปนเปื้อนในดิน/ดินตะกอนของไทยมีมานานแล้ว จากผลการศึกษาของ ภิญญา จำรัสกุล และคณะ (2542) ที่ได้ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินตะกอนจากแม่น้ำแม่กลองและคลองแยกต่างๆในทั้ง 3 จังหวัดในหน้าแล้งติดต่อกัน 4 เดือนของปี พ.ศ. 2539 และพบสารอัลดริน เอ็นดริน ดีดีที ดีลิตริน และเฮปตะคลออร์ในความเข้มข้นต่างๆ อันเป็นผลจากการที่น้ำแม่กลองไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมสำคัญของจังหวัดสมุทรสงคราม ราชบุรี และกาญจนบุรี ซึ่งเป็นแหล่งปลูกพืชไร่ ข้าว รวมทั้งพืชผักและผลไม้ และมีการใช้สารเคมีทางการเกษตรต่อเนื่องมานาน สำหรับในกลุ่มน้ำอื่น เช่น ทางภาคใต้ของประเทศไทยในจังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งมีแม่น้ำสายสำคัญ คือ แม่น้ำปากพนัง ครอบคลุมพื้นที่การเกษตรเป็นส่วนใหญ่โดยเป็นนาข้าว สวนยางพารา ไม้ผลพืชผัก พืชไร่พวก ข้าวโพดและถั่วต่างๆ และใช้น้ำจากคลองแยกจากแม่น้ำปากพนัง แต่เนื่องจากแม่น้ำปากพนังมีระดับท้องน้ำต่ำกว่าระดับน้ำทะเลทำให้น้ำทะเลรุกเข้ามาตามลำน้ำ กอปรกับน้ำเสียจากนาทุ่งได้ไหล

ลงในลำน้ำต่างๆ จึงทำให้ลำน้ำมีความเค็มไม่เหมาะกับการเพาะปลูก และจากผลการตรวจวัดดิน ตะกอนในลำน้ำปากพนัง ในปี พ.ศ. 2540-2541 พบว่ามีสาร OCs 46.7% จาก 22 ตัวอย่าง ในปริมาณ ตั้งแต่ 1.2 ถึง 288.4 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ โดยเป็นพวกอัลดริน ดีดีทีและดีลดริน ส่วนบริเวณคลองแยกจากแม่น้ำแม่กลองจังหวัดสมุทรสงครามพบดินตะกอนมีอัลดริน ดีลดริน ดีดีที เฮปตะคลอร์ ตั้งแต่ <0.01 ถึง 0.03 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ และตั้งแต่ <0.01 ถึง 0.03 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ เช่นกัน สำหรับอัลดริน ดีลดริน ดีดีที เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ และเอ็นครินในดินบริเวณคลองแยกแม่น้ำแม่กลองจังหวัดราชบุรี (ภิญญา จำรัสกุลและคณะ, 2542)

สำหรับดินที่ใช้เพาะปลูกในพื้นที่สูงภาคเหนือของไทย กรมควบคุมมลพิษได้ทำการสำรวจในช่วงพ.ศ. 2538 บริเวณจังหวัดเชียงใหม่และตากพบว่ามีสารดีดีที 0.1 และ 0.3 mg. kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ และดินตะกอนของห้วยวะเลย์ อำเภอพบพระ จังหวัดตากมีดีดีที 0.03 mg. kg^{-1} (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ทั้งนี้เป็นผลจากการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชหลายชนิดทั้งกลุ่มออกแทนโนฟอสเฟต ไพรีทรอยด์ และออกแทนโนคลอรีนกันแพร่หลายในภาคเหนือ จากรายงานสถานการณ์การตกค้างที่ได้ตรวจสอบในหลายจังหวัดได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน และเพชรบูรณ์ เมื่อปี พ.ศ. 2537-2545 พบตกค้างในตัวอย่างดิน และตะกอนดิน และน้ำ แม้จะไม่เกินมาตรฐาน แต่สารเหล่านี้พืชสามารถดูดซึมและตกค้างในพืชได้ (จกมล ศรีไชยและมโนรัตน์ ฤทธิเต็ม, 2546) ผลการวิเคราะห์ดินเพาะปลูกในพื้นที่ภาคเหนือของ ไทยสูงกว่าดินในภาคตะวันออก และพบ สารOCsในอัตราส่วนที่มากกว่าสารในกลุ่มอื่น และในดิน สูงกว่าในน้ำ เช่น ค่าสูงสุดของดีลดรินพบในน้ำเท่ากับ 0.58 $\mu\text{g. l}^{-1}$ ในดินเท่ากับ 249.3 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ ต่ำ กว่ามาตรฐาน ค่าต่ำสุดของสาร OCs จากภาคตะวันออกของไทย มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 3.35 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ ในปี 2540 และ ในปี 2539 ความเข้มข้นในดินจากภาคเหนือเท่ากับ 0.28 ถึง 599.4 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานดินที่ใช้เพื่ออยู่อาศัยและการเกษตร (Thapinta and Hudak, 2000)

จากการเก็บตัวอย่างดินโดย Thao et al. (1993) ทั้งจากพื้นที่นา พื้นที่สวนและดินข้างถนน ในเขตเมืองต่างๆของประเทศไทย รวมทั้งประเทศเพื่อนบ้าน คือ เวียดนาม ใต้หวัน พบว่าสารดีดีที พีซีบี เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ ที่ตกค้างในดินดังกล่าวในประเทศไทยต่ำกว่าประเทศเพื่อนบ้าน และ ต่ำกว่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีในดินได้ในการอยู่อาศัยและการเกษตร กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 8.3, 2.7 และ 0.4 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ ในเวียดนาม ใต้หวัน และไทยตามลำดับ ขณะที่ดีดีที พีซีบี และเบนซีนเฮกซะคลอไรด์ พบสูงสุดถึง 110, 95 และ 4.8 $\mu\text{g. kg}^{-1}$ ในดินจากใต้หวัน ใต้หวัน และเวียดนามตามลำดับ

2.1.2 สมบัติทางกายภาพ ชีวภาพและทางเคมี

สาร OCs เป็นสารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ สมบัติส่วนใหญ่ของสารกลุ่มนี้โดยรวมแล้ว เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic compounds) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ละลายในน้ำได้น้อยมาก แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) ได้ดี ขยายสลายทางชีวภาพได้ยาก ครึ่งชีวิตค่อนข้างยาว มีความเป็นพิษสูงจึงนำไปใช้ในการฆ่าแมลงสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหารได้ อย่างไรก็ตามสารแต่ละชนิดในกลุ่มนี้อาจมีสมบัติแตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลที่แตกต่างกันได้ (สุขุม วงศ์เอก, 2543 และ Mackay et al., 1992) ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของสารทดสอบและสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1

-อัลดริน สามารถเปลี่ยนเป็นดีลดรินได้อย่างรวดเร็วและทันทีในสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะอยู่ในสัตว์หรือในพืช ด้วยเหตุนี้จึงไม่ค่อยพบอัลดรินตกค้าง แม้พบก็อยู่ในปริมาณน้อยมาก สามารถยึดติดแน่นกับดินจึงไม่ถูกชะล้างลงสู่ลำน้ำได้ดินได้ง่ายนัก แต่จะระเหยออกจากดินมากกว่า

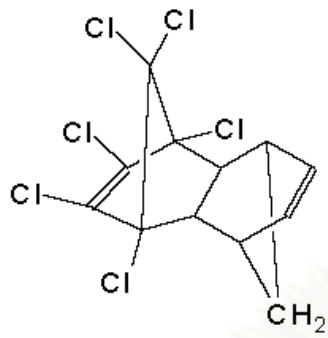
-ดีดีที นับเป็นสารที่มีการละลายน้ำน้อยมาก ละลายในสารอินทรีย์ และเป็นกึ่งระเหย สามารถพบตกค้างในแถบอาร์คติก สะสมและเพิ่มขยายทางชีวภาพ ดีดีทีเมื่อสลายตัวได้แก่ ดีดีดี ดีดีอี และดีดีไอ และพบว่ามีความคงทนในสิ่งแวดล้อมยิ่งกว่าดีดีที

-ดีลดริน สามารถจับกับดินได้ดีมากและยากที่จะถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำได้ดิน ส่วนใหญ่จะสูญสลายจากดินโดยการระเหย และมีคุณสมบัติการสะสม ครึ่งชีวิตในดินประมาณ 5 ปี

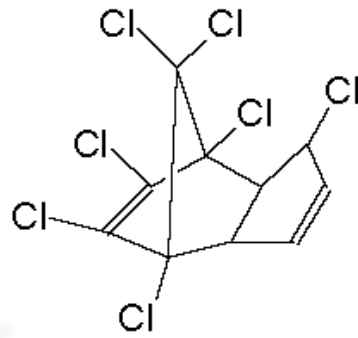
-เอ็นดริน สามารถจับกับดินตะกอนได้ดี สามารถสลายได้ด้วยความร้อนสูงหรือด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และคีโตนของเอ็นดรินถูกย่อยสลายได้รวดเร็วจากกระบวนการทางเคมีในสิ่งมีชีวิต (metabolization) โดยเฉพาะในสัตว์ จึงไม่พบสะสมในไขมันเช่นเดียวกับสารอื่นที่มีโครงสร้างคล้ายๆกัน ระเหยได้ และปนเปื้อนอยู่ในน้ำจากการชะล้างผิวดิน ยังพบใช้ในหลายประเทศในโลก เช่น ญี่ปุ่น แคนาดา ชิลี อินเดีย ประชาคมยุโรป นิวซีแลนด์และสหรัฐอเมริกา

-เบนซีนเฮกซะคลอไรด์เป็นสารที่คงทนมาก ครึ่งชีวิตในดินประมาณ 2.7-22.9 ปี ภายใต้อากาศที่ไม่มีอากาศ มีค่า $\log K_{ow}$ เท่ากับ 3.03-6.42 จึงทำให้สามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ มีค่าปัจจัยการเพิ่มขยายทางชีวภาพ (biomagnification factor, BF) เท่ากับ 22,000 และ 106,840 ในปลา *fathead minnows* และ *Lumbricus variegates* ตามลำดับ

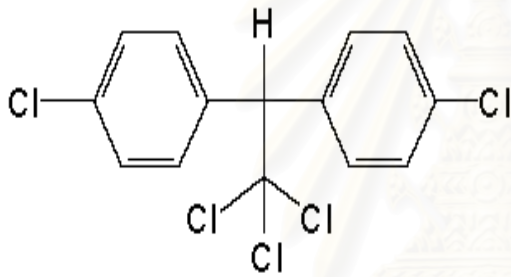
-เฮปตะคลอไรด์ เป็นสารที่ค่อนข้างเสถียรต่อแสง จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถย่อยเฮปตะคลอไรด์ให้เป็นอีพอกไซด์ (epoxide) เมื่อถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) จะเปลี่ยนเป็นไฮดรอกซีคลอไดน (hydroxychloridine) และเป็นไฮดรอกซีอีพอกซีคลอไดน (hydroxyl epoxy chloridine) จากการกระทำของจุลินทรีย์



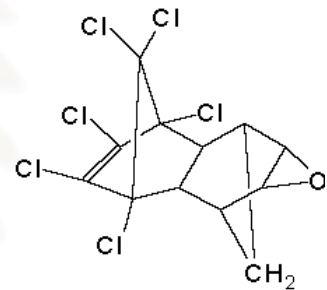
Aldrin



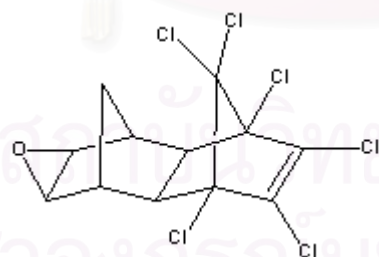
Heptachlor



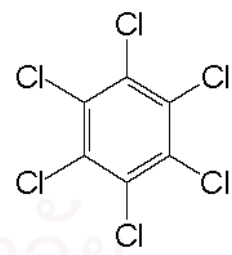
DDT



Dieldrin



Endrin



HCB

รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารทดสอบ

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพ เคมี ที่เกี่ยวข้องของสารทดสอบ

สาร	MW	log K _{ow}	log K _{oc}	S (mg.l. ⁻¹)
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์	290.85	3.77, 3.79, 3.80, 3.89, 3.81,	3.25, 3.32,	1.51, 1.0, 2.01
		4.44	3.53	
ดีดีที	354.5	4.98, 5.10, 5.55, 5.75, 5.9, 6.0, 6.12, 6.20, 6.38, 6.69, 6.89, 6.91, 7.35	5.0, 5.15, 5.38,	0.0002-0.001, 0.002, 0.0031, 0.0055, 0.035, 0.0374, 0.16, 1.20, 1.30, 1.31, 2.36, 2.90, 6.0, 73.0,
อัลดริน	364.93	5.17, 5.39, 5.49, 5.52, 5.66, 5.74, 6.5	3.7	0.013, 0.017, 0.017-0.18, 0.02, 0.027, 0.18, 0.20
เฮปตะคลอรั	373.3	4.40, 4.61, 5.24, 5.27, 5.34, 5.44, 5.44, 5.46, 5.53, 5.58	4.38	0.03, 0.056, 0.10, 0.18
เอ็นดริน	380.92	3.21-5.34, 3.63, 4.56, 4.71, 4.82, 5.195, 5.20	4.0, 4.53	0.125, 0.22-0.26, 0.23, 0.25, 0.255
ดีลดริน	380.93	3.17, 3.69, 4.32, 4.49, 4.51, 4.55, 4.6, 4.76, 5.16, 5.2, 5.4, 5.88	4.0, 4.03, 4.08, 4.10, 4.15, 4.5, 4.08-4.55	0.14, 0.17, 0.186, 0.19, 0.195, 0.20, 0.25, 0.468, 2.0,

ที่มา: Mackay et al. (1992)

2.1.3 การกำจัดสารอแกโนคลอรีนในดิน

สาร OCs เป็นสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำ การที่ดินหรือดินตะกอนจะดูดซับสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำได้มากหรือน้อย สามารถอธิบายได้ในรูปของสัมประสิทธิ์แพร่กระจาย (distribution coefficient, K_d) ระหว่างดินกับน้ำในสารละลายเจือจาง การฟื้นฟูดินปนเปื้อนด้วยสาร OCs โดยการใช้ออกุภาคนาโนมีน้อยมากๆ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactants) เป็นตัวดูดซับ ในกรณีการล้างดิน (soil washing) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายนี้เปลี่ยนแปลงไปได้เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในดิน เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวช่วยสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำให้ละลายมากขึ้น โดยไปละลายอยู่ในไมเซลล์ (micelle) (ซึ่งหมายถึง โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่จับกันเป็นกลุ่ม การเกิดขึ้นกับสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ โดยที่สารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวเอื้อต่อการเกิดไมเซลล์ สารลดแรงตึงผิวมีโมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งเป็นสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่มีขั้ว อาจมีมีประจุหรือไม่ก็ได้ เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำส่วนที่ไม่มีขั้วเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำได้น้อย ตรงข้ามกับส่วนที่มีขั้วยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลน้ำได้ดี (พรเพ็ญ วีระวัฒนานนท์, 2548) เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) และอุณหภูมิของระบบสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของไมเซลล์ (aka Krafft temperature) ดังนั้นการแพร่กระจายของสารประกอบอินทรีย์ในดินจะน้อยลงเหตุโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวละลายอยู่ในสารละลายนั่นเอง ค่าสัมประสิทธิ์แพร่กระจายนี้สามารถใช้เป็นดัชนีประเมินการล้างดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวได้ (Kim et al., 2003) ตัวอย่างเช่น การศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์พวกโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ที่ปนเปื้อนออกจากดิน โดยละลายสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าวสู่ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว (Yeom et al., 1995) เทคนิควิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวนี้นี้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียที่ไมเซลล์แตกตัวได้ และดินสามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวได้อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นวิธีการนี้จะได้ผลเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ด้วยเหตุที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะถูกดินดูดซับไว้เมื่อความเข้มข้นของสารต่ำกว่า CMC (Chu and So, 2001) ดังนั้นการพัฒนาวิธีฟื้นฟูดินหรือล้างดินต่อๆมา จึงมุ่งที่ทำอะไรจึงจะลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากการที่ดินดูดซับไว้ รวมทั้งการพัฒนาการกลับคืน (recovery) ของสารลดแรงตึงผิว ตลอดจนการนำสารลดแรงตึงผิวกลับมาใช้ได้

การศึกษาของ Kim et al. (2003) ทำการทดลองการคายออก (desorption) ของพีแนนธรีนออกจากทราย-ชั้นหินใต้ดิน (sand aquifer) พบว่า (1) ความเข้มข้นของออกุภาคนาโนโพลีเมอร์ชนิด

APU และ สารลดแรงตึงผิวชนิด triton X-100 ยิ่งมาก ส่วนของฟิแนนธรินที่สกัดออกมาได้ก็ยิ่งมากเช่นกัน นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์แพร่กระจาย K_D ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากความเข้มข้นของสารฟิแนนธรินในทราย-ชั้นหินใต้ดิน ต่อความเข้มข้นของสารฟิแนนธรินในน้ำ ยิ่งน้อยลง (2) กรณีใช้กับความเข้มข้นของสารฟิแนนธรินที่ทรายดูดซับไว้ต่ำ และใช้ triton X-100 ค่า K_D อาจสูงหรือต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่า K_D ที่ได้จากน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า triton X-100 ไม่ได้สกัดสารฟิแนนธริน แต่ไปเพิ่มการดูดซับสารฟิแนนธรินที่อยู่ในน้ำไปยังทราย-ชั้นหินใต้ดิน อย่างไรก็ตาม ค่า K_D ที่ลดลงเนื่องจาก APU เป็นเพราะ APU สามารถสกัดสารฟิแนนธรินออกจากทราย-ชั้นหินใต้ดินได้ดี (3) กรณีความเข้มข้นสารฟิแนนธรินสูง ทั้ง APU และ triton X-100 มีประสิทธิภาพสกัดสารเท่ากัน แม้ว่า triton X-100 จะมีแรงดูดซับฟิแนนธรินได้ดีกว่า APU ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจาก APU ถูกทราย-ชั้นหินใต้ดินดูดซับไว้ในปริมาณน้อยกว่า triton X-100 มาก (Kim et. al., 2003) รวมทั้ง triton X-100 มีแรงดูดซับกับฟิแนนธรินได้ดีกว่า และฟิแนนธรินละลายใน triton X-100 ได้ดีกว่า APU เช่นกัน สรุปได้ว่ากรณีสารปนเปื้อนความเข้มข้นสูง ตัวดูดซับ (sorbent) ทั้งสองชนิดสกัดสารได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้น การล้างดินขึ้นกับตัวดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับบนทราย-ชั้นหินใต้ดิน ไม่ใช่แรงดูดซับสาร (Kim et. al., 2003)

สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าค่า CMC สารลดแรงตึงผิวนี้สามารถสกัดสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำได้แต่สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะถูกดินดูดซับไว้ซึ่งเป็นการเพิ่มการบ่อนอินทรีย์ในดินและละลายสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำมีผลส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำถูกดูดซับบนดินมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวในระบบดิน-น้ำ (soil-water system) มีค่าสูงกว่าค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวในน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนดินสูงกว่านั่นเอง ผลต่อเนื้อคือ สารลดแรงตึงผิวสามารถสกัดมลพิษไม่ชอบน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ณ ความเข้มข้นที่สูงกว่าค่า CMC ของมันในน้ำบริสุทธิ์ triton X-100 ก็เช่นกันสามารถสกัดฟิแนนธรินที่ถูกดินดูดซับได้เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 312 มก. ลิ.⁻¹ หรือประมาณ 3 เท่า ของค่า CMC (Kim et al., 2003)

Kim et al. (2004) ได้ทดลองเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารลดแรงตึงผิวและอนุภาคนาโนโพลีเมอร์ชนิด APU ที่ความเข้มข้นเท่ากัน (4000 mg. ลิ.⁻¹) ผ่านคอลัมน์ดินที่ใส่สารฟิแนนธรินไว้บนทราย-ชั้นหินใต้ดินหนัก 10 g. โดยใช้อัตราการไหล 0.12 และ 0.02 ml. min.⁻¹ ประสิทธิภาพการสกัดของตัวดูดซับทั้งสองชนิดให้ผลเหมือนกัน กล่าวคือ เพิ่มขึ้นถ้าอัตราการไหลลดลงทำให้การดูดซับได้ดีขึ้นและความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการสกัดของสารลดแรงตึงผิว triton X-100 และอนุภาคนาโนโพลีเมอร์ ณ อัตราการไหล 0.12 ml. min.⁻¹ และที่ความเข้มข้น 4000 mg. ลิ.⁻¹

เท่ากับ 32.6 และ 46.9 % ตามลำดับ ขณะที่ ณ อัตราการไหล 0.02 ml. min.⁻¹ ตัวดูดซับทั้งสองชนิดให้ประสิทธิภาพดีขึ้น แต่ อนุภาคนาโนสัคตสารได้มากกว่า (88%) triton X-100 (43%) ที่อัตราการไหลช้า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลช้าทำให้มีระยะเวลาสัมผัสนานกว่านั่นเอง ผลการศึกษาการชะ triton X-100 และ APU ที่ความเข้มข้น 4000 mg. l.⁻¹ ปริมาณ 2.5 pore volume (PV) ที่แช่ในคอลัมน์ดินที่มีทรายชั้นหินใต้ดิน (คาร์บอนอินทรีย์เท่ากับ 0.049%) โดยใช้น้ำชะที่อัตราการไหล 0.02 และ 0.12 ml. min.⁻¹ ปรากฏว่าที่อัตราความเร็วสูงกว่าให้ break through curve เกือบเหมือนกันมาก แสดงว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีระดับการดูดซับเหมือนกันภายใต้สภาวะที่กำหนด ส่วนอัตราการไหลที่ช้ากว่าปรากฏเห็น break through curve แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งชี้ว่า APU ดูดซับทรายได้น้อยกว่า triton X-100 ภายใต้สภาวะที่กำหนด เมื่อพิจารณาการกลับคืนของ APU เท่ากับ 98% (โดยน้ำหนัก) ไม่แตกต่างกัน เมื่อใช้อัตราการไหล 0.12 ml. min.⁻¹ อัตราการไหลที่ช้ากว่านี้ คือ 0.02 ml. min.⁻¹ พบว่าการกลับคืนของ APU ได้ (98%) มากกว่า triton X-100 (96%)

สรุปจากการทดลองได้ว่าการล้างสารประกอบอินทรีย์ไม่ชอบน้ำออกจากดินภาคสนาม ปัจจัยสำคัญคือ สมรรถนะการดูดซับของตัวดูดซับมีความสำคัญมากกว่าความสามารถของสารประกอบอินทรีย์จะละลายในตัวดูดซับ และแม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีสมรรถนะละลายสารฟิเนนทรินในช่วงความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่า แต่ APU มีประสิทธิภาพในการสัคตสารได้ดีทั้งการทดลองแบบเบช (batch) และคอลัมน์ (column) ทั้งนี้เพราะสภาพครอสลิงค์ทำให้โครงสร้างของ APU สามารถคงสภาพแม้จะต้องสัมผัสกับดินเป็นระยะเวลานาน และทำให้ดินไม่ ดูดซับมันไว้มากนัก เมื่อเทียบกับ triton X-100 ซึ่งถูกดินดูดซับได้มากกว่า และเนื่องจาก APU มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของไมเซลล์ของ triton X-100 ทำให้มันสามารถนำกลับมาใช้อีกได้โดยการกรองผ่านกระบวนการกรองแบบอัลตรา (ultrafiltration)

นอกจากอนุภาคนาโนและสารลดแรงตึงผิวในการกำจัดกรปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์แล้วอนุภาคนาโนอื่น เช่น ดินเหนียว ก็มีการใช้กัน Liu and Zhang (2007) ศึกษาการใช้ดินเหนียวซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีพื้นที่ผิวสูง และใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านการดูดซับและกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ โดยใช้ดินเหนียวดิบ (raw clay) ดินเหนียวที่ผ่านการกระตุ้น (activate) และดินเหนียวอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีการใช้ดินเหนียวผสมเป็นโพลิเมอร์นาโน ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือในด้านปฏิกิริยาทางเคมีแสง เซรามิก ตัวเซ็นเซอร์ ใช้ในการเคลือบ ด้วยเหตุที่มันมีพื้นที่ผิวสูง มีความคงตัวทางเคมีและกล ดินเหนียวที่นำมาใช้มากที่สุด คือเป็นตัวดูดซับนาโน (nano-adsorbents) ได้แก่ พวกมอนต์มอริลโลไนท์/สมัคไตท์ (montmorillonite/smectite) และ เคาลินท์ (kaolinite)

เมมเบรนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการกำจัด แต่ส่วนใหญ่ใช้กรองกรณีสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหรือสารละลาย Kiso et al. (2000) ใช้เมมเบรนได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์โพ

ลืออะมีด (poly(vinyl alcohol)/polyamide), ซัลฟอนेटของพอลิเอเทอร์ซัลโฟน (sulfonated polyethersulfone) กรองสารเคมีป้องกันศัตรูพืชจำนวน 14 ชนิด ทั้งที่มีและไม่มี phenylic group หรืออีกนัยหนึ่ง สารเคมีเหล่านี้จะถูกเมมเบรนดูดซับไว้ อย่างไรก็ตาม เป็นไปไม่ได้ที่ผิวเมมเบรนจะสามารถกรองได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพในการกรองจากค่าสัมประสิทธิ์แบ่งภาค (partition coefficient) ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักสารต่อพื้นที่ ($\mu\text{g. cm.}^{-2}$) หารด้วยความเข้มข้นในสารละลาย (mg. l.^{-1}) โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แบ่งภาคระหว่างออกตา นอล-น้ำ

2.1.4 มาตรฐานความเข้มข้น

เกณฑ์มาตรฐานสาร OCs เฉพาะที่ใช้เป็นสารทดสอบในสิ่งแวดล้อมไทยได้มีการกำหนดไว้ 9 มาตรฐาน ได้แก่ เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดของสาร OCs ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำผิวดิน (ตารางที่ 2.2) เกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของสารที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ (ตารางที่ 2.3) เกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของสารในแหล่งน้ำใต้ดินและน้ำประปา (ตารางที่ 2.4) เกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของสารในแหล่งน้ำทะเลชายฝั่งประเภทต่างๆ (ตารางที่ 2.5) มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำทิ้งที่ระบายลงทางน้ำชลประทานโดยตรง หรือลงทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทาน (ตารางที่ 2.6) สำหรับมาตรฐานหลังนี้ไม่ได้ระบุชื่อสารแต่ระบุเป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์โดยรวมและไม่อนุญาตให้มีสารดังกล่าวในน้ำทิ้งดังกล่าวเลยตามวิธีการตรวจวัดที่กำหนด นอกจากนี้ยังมีค่าความปลอดภัยของสาร OCs ในนม (ตารางที่ 2.7) ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในอาหารสัตว์ของประเทศสหรัฐอเมริกา (ตารางที่ 2.8) ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากสัตว์ (ตารางที่ 2.9) และมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัย เกษตรกรรม และอื่นๆ (ตารางที่ 2.10)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำผิวดิน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	เกณฑ์สูงสุดของการแบ่งตามประเภท การใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำ (mg.l. ⁻¹)				
	ประเภทของแหล่งน้ำ				
	1	2	3	4	5
1. สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด	n		0.05		-
2. อัลดริน	n		0.1		-
3. เบนซีนเฮกซะคอลไรด์ (แอลฟา)	n		0.02		-
4. ดีดีที	n		1.0		-
5. ดีลดริน	n		0.1		-
6. เอ็นดริน	n	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีการ ตรวจสอบที่กำหนด			-
7. เฮปตะคลออร์และ เฮปตาคลออีพอกไซด์	n		0.2		-

ที่มา: ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-ก).

หมายเหตุ: วิธีการตรวจสอบใช้แก๊สโครมาโตกราฟี, n = เป็นไปตามธรรมชาติ

แหล่งน้ำประเภทที่ 1-สำหรับใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน สำหรับเป็นแหล่งขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน และเพื่อการอนุรักษ์ระบบนิเวศของแหล่งน้ำ

แหล่งน้ำประเภทที่ 2-สำหรับการอนุรักษ์สัตว์น้ำ การประมง ว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

แหล่งน้ำประเภทที่ 3-แหล่งน้ำที่เกิดจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อนและเพื่อการเกษตร

แหล่งน้ำประเภทที่ 4-แหล่งน้ำที่เกิดจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน และเพื่อการอุตสาหกรรม

แหล่งน้ำประเภทที่ 5- แหล่งน้ำที่เกิดจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการคมนาคม

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรง
ชีวิตของสัตว์น้ำ

OCs	ความเข้มข้นสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ (mg. l. ⁻¹)
1.ดีดีที	0.5×10^{-3}
2.ดีลดีริน	0.2×10^{-2}
3.เอ็นดีริน	0.01×10^{-3}
4.เฮปตะคลอรั	0.4×10^{-3}

ที่มา: ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานสารOCs ในแหล่งน้ำใต้ดินและน้ำประปา

OCs	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ ($\mu\text{g. l}^{-1}$)	
	น้ำใต้ดิน	น้ำประปา
อัลดริน	0.03	-
คลอเดน	0.2	0.2
ดีดีที	2	2
ดีลดริน	0.03	0.03
เฮปตะคลอรั	0.4	0.03
เฮปตะคลอรัอีพอกไซค์	0.2	-
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์	-	1
PCBs	0.5	-

ที่มา; ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-8) และ การประปานครหลวง (-)

หมายเหตุ : ใช้วิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) หรือตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของสมาคม วิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย และ วิธีการเก็บและรักษาตัวอย่างน้ำใต้ดินให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานสาร OCs ในแหล่งน้ำทะเลชายฝั่ง

OCs	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ (mg.l. ⁻¹)						
	ประเภทของแหล่งน้ำทะเลชายฝั่ง						
	1	2	3	4	5	6	7
1. สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด	n	0.05	0.05	0.05	-	-	**
2. PCBs	n	n	n	n	-	-	**

ที่มา: ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-ง)

n ธรรมชาติไม่ได้รับผลกระทบจากการกระทำของมนุษย์

** จะกำหนดตามความจำเป็น

ประเภทของคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง: 1 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการสงวนรักษาธรรมชาติ, 2 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งปะการัง, 3 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการอนุรักษ์แหล่งธรรมชาติอื่น ๆ นอกจากแหล่งปะการัง, 4 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อกาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, 5 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการว่ายน้ำ, 6 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการกีฬาทางน้ำอย่างอื่นนอกจากการว่ายน้ำ, 7 คุณภาพน้ำทะเลบริเวณแหล่งอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานสาร OCs ในน้ำทิ้ง

แหล่งน้ำทิ้ง	สารฆ่าแมลง	สารที่ใช้ ป้องกันหรือกำจัด ศัตรูพืชหรือสัตว์
1. น้ำทิ้งที่ระบายลงทางน้ำ ชลประทานและทางน้ำที่ ต่อเชื่อมกับทางน้ำ ชลประทาน	ไม่มีเลย	-
2. น้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม	-	ต้องตรวจไม่พบตามวิธี ตรวจสอบที่กำหนด

ที่มา : ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-จ)

ตารางที่ 2.7 ค่าความปลอดภัยของสาร OCs ในนม

OCs	ค่าสูงสุดที่ให้ตกค้างได้ (mg. l. ⁻¹)
อัลดรินและดีลดริน	0.006
ดีดีทีและอนุพันธ์	0.05
เอ็นดริน	0.0008
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ (แกมมา)	0.01
เฮปตะคลอรัลและเฮปตะคลอรัลอีพอกไซด์	0.006

ที่มา: Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues (-)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 ค่าสูงสุดของสาร OCs ที่ยอมให้มีได้ในอาหารสัตว์ของ ประเทศ
สหรัฐอเมริกา

OCs	ชนิดวัตถุดิบ/ อาหารสัตว์	ความเข้มข้น (ppm)
อัลดริน และดีลดริน	-อาหารสัตว์แปรรูป	0.03
	-ธัญพืช (ยกเว้น buckwheat, millet wild rice)	0.02
	-ไขมันและน้ำมัน	0.3
ดีดีทีและอนุพันธ์ (ดีดีทีและ ทีดีอี)	-อาหารสัตว์แปรรูป	0.5
	-ธัญพืช (ยกเว้น buckwheat, fresh sweetcorn, millet, popcorn teosinte, wild rice)	0.5
	-ถั่ว	0.2
คลอเดน	-อาหารสัตว์แปรรูป	0.1
	-ไขมันสัตว์	0.3
	-ถั่วลิสง	0.1
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์	-อาหารสัตว์แปรรูป	0.05
	-ธัญพืช (ยกเว้น buckwheat, millet wild rice)	0.05
	-หญ้าแห้ง	0.05
เฮปตะคลอรัลและเฮปตะคลอรัลอี	-อาหารสัตว์แปรรูป	0.01
พอกไซค์	-ธัญพืช	0.01

ที่มา: นีรนาม (2547)

ตารางที่ 2.9 ค่าสูงสุดของสาร OCs ที่ยอมให้มีได้ในเนื้อสัตว์และ
ผลิตภัณฑ์จากสัตว์

OCs	ความเข้มข้นสูงสุด	
	มาตรฐานของ กระทรวงสาธารณสุข ¹ (ppm)	มาตรฐานของ Codex ² (ppm)
อัลดรินและดีลดริน	0.2	0.2
คลอเดน	0.05	-
ดีดีที	1.0	0.5 (ไขมัน)
เอ็นดริน	-	0.1 (ไขมันไก่)
เฮปตะคลอรั	0.2	0.2 (ไขมันสุกร)

¹ กรมควบคุมมลพิษ (2538)

² Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues (-)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานสาร OCs ในดินเพื่อการใช้ประโยชน์อยู่อาศัย
เกษตรกรรม และอื่นๆ

OCs	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้มีได้* (mg. kg. ⁻¹)	
	เพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรม	เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัย และการเกษตรกรรม
คลอเดน	16	110
ดีดีที	17	120
ดีลดีริน	0.3	1.5
เฮปตะคลอรั	1.1	5.5
PCBs	2.2	10

ที่มา: ปรับปรุงจาก กรมควบคุมมลพิษ (-จ)

* ตรวจสอบโดยวิธี Gas Chromatography หรือ Gas Chromatography / Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธีที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 โพลีเมอร์นาโน

โพลีเมอร์ หมายถึง สารที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยที่เหมือนกันที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) มาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (chain) ด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) จึงมีโมเลกุลใหญ่ตั้งแต่ 1000 ถึง 1,000,000 g. ต่อโมเลกุล โพลีเมอร์ที่มีอยู่สามารถแบ่งออกง่ายๆ เป็นโพลีเมอร์จากธรรมชาติ (เช่น ยาง โปรตีน เซลลูโลส ชิติน) และที่สังเคราะห์ขึ้น (เช่น พีวีซี ไนลอน ซิลิโคน พลาสติก) (<http://www.pslc.ws/macrog/kidsmac/kfloor2.htm>)

สำหรับโพลีเมอร์นาโน ปัจจุบันจึงได้มีการเตรียมและสังเคราะห์ขึ้นอย่างแพร่หลายเพื่อนำมาใช้ทางเทคโนโลยีชีวภาพและการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโน (อนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1000 nm.) มีโครงสร้างทางเคมี พื้นที่ผิว และขนาดของอนุภาคนาโนที่สามารถควบคุมได้ การเตรียมโพลีเมอร์นาโนมี 2 แบบ คือ เตรียมจากโพลีเมอร์ธรรมชาติและจากโพลีเมอร์สังเคราะห์ สำหรับการเตรียมจากโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้กันในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ (1) วิธีทำให้เป็นโพลีเมอร์ (polymerization) และ (2) วิธีสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยตรง โดยทำให้เกิดการกระจายตัว (dispersion) (Akagi et al., 2007)

วิธีแรกนั้นแบ่งออกเป็นทำให้เป็นโพลีเมอร์แบบอิมัลชัน (emulsion) แบบกระจายตัว (dispersion) และแขวนลอย (suspension) ขึ้นกับความสามารถในการละลายของโมโนเมอร์และโพลีเมอร์ในตัวกลาง แบบอิมัลชันเป็นแบบที่นิยมมากในการเตรียมอนุภาคนาโน เพราะเป็นวิธีที่เร็วที่สุดและทำได้โดยการทำให้โมโนเมอร์ไม่ชอบน้ำกระจายเป็นอิมัลชันในวัฏภาคน้ำ (aqueous phase) และทำให้เกิดโพลีเมอร์อนุมูลอิสระ (radical polymerization) และอนุภาคโพลีเมอร์จะจับกันและเพิ่มปริมาณขึ้นจากโมโนเมอร์ที่อยู่ในอิมัลชันนั้น ระยะเวลาของการทำให้เป็นโพลีเมอร์และขนาดของอนุภาคขึ้นกับการเติมสารตั้งต้นและสภาวะทางกายภาพทั้งที่มีหรือไม่มีสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เพื่อให้อนุภาคคงที่ วิธีการนี้ในช่วงพัฒนาแรกๆทำจากโมโนเมอร์ไวનીลให้เป็นสไตรีน (styrene) อคริเลท (acrylate) หรือ เมทาอคริเลท (methacrylate)

วิธีที่สองนั้นมักใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากโพลีแลคติกแอซิด (poly (lactic acid), PLA) โพลีแลคไทด์-ไกลโคลิเด (Poly(lactide-co-glycolide), PLGA) (poly(ϵ -caprolactone), PCL) โดยการทำให้โพลีเมอร์กระจายตัว วิธีนี้สะดวกเพราะเมื่อให้โพลีเมอร์ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แล้วทำการระเหยตัวทำละลายไป เช่น ไคลอโรฟอร์ม (chloroform) หรือ เอทิลอะซิเตท (ethyl acetate) แล้วทำให้เป็นอิมัลชันในสารละลายเจือจางเพื่อทำให้เกิดน้ำมันในน้ำโดยใช้สารลดแรงตึงผิว เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ภายหลังจากที่อิมัลชันเริ่มคงตัวก็ระเหยตัวทำละลายอินทรีย์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใต้ความดัน ตัวอย่างเช่น การเตรียมอนุภาคนาโนแบบกึ่งชอบไม่ชอบน้ำประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ สามารถเตรียมได้ง่ายจากการ

รวมตัวกันเองทำให้เกิดเป็นโพลีเมอร์ในสารละลายเจือจาง เกิดอนุภาคนาโนลักษณะคล้ายไมเซลล์โดยมีรูปร่างต่างๆในสารละลายเจือจาง โดยทั่วไปอนุภาคนาโนแบบรวมตัวกันเองนี้จะประกอบด้วยลักษณะที่ไม่ชอบน้ำอยู่ภายในตรงกลางอนุภาค และด้านนอกของอนุภาคเป็นพวกชอบน้ำ อนุภาคแบบนี้เตรียมโดยใช้วิธีแทนที่ตัวทำละลายหรือทำให้กระจายตัวโดยตรงของโพลีเมอร์กึ่งชอบไม่ชอบน้ำ วิธีนี้ขึ้นกับการตกตะกอนของโพลีเมอร์จากสารละลายอินทรีย์และการกระจายตัวของตัวทำละลายอินทรีย์ โดยทำการไดอะไลซ์ (dialyzed) โพลีเมอร์กึ่งชอบไม่ชอบน้ำละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เพื่อทำให้เป็นอนุภาคนาโน รูปพรรณสัณฐานของอนุภาคนาโนที่ผลิตจากโคโพลีเมอร์แกรฟ (graft copolymer) หรือ บล็อกโพลีเมอร์ (block polymer) กึ่งชอบไม่ชอบน้ำมีหลายแบบโดยการปรับส่วนประกอบของส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โคโพลีเมอร์ชนิดบล็อก (block copolymer) กึ่งชอบไม่ชอบน้ำได้แก่ (poly(ethylene glycol)-b-poly(lactic acid), PEG-b-PLA) and PEG-b-PCL ซึ่งนิยมนำไปประยุกต์ใช้ด้านการป้อนยา

Kim et al. (2000) กล่าวว่าโพลีเมอร์ชนิดกึ่งชอบไม่ชอบน้ำมีการนำมาใช้แพร่หลาย เช่น เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ตัวทำโฟม (foamer) ตัวชะล้าง (rinser) ตัวทำให้ข้น (thickeners) เป็นต้น ค่า CMC ของโพลีเมอร์กึ่งชอบไม่ชอบน้ำมีค่าต่ำมากๆ และการกระจายตัวของโพลีเมอร์ประเภทนี้ค่อนข้างคงตัวแม้จะอยู่ในสารละลายที่เจือจางมากๆ จึงทำให้โพลีเมอร์ชนิดนี้สามารถใช้ในการกำจัดมลพิษไม่ชอบน้ำจากดินได้ มีหลายประเภทเช่น โฮโมโพลีเมอร์ (homopolymer) ไม่มีประจุ พวกมีขั้วลบ พวกมีขั้วบวก แม้ว่าการสังเคราะห์โพลีเมอร์พวกนี้จะยุ่งยาก ราคาสูง แต่ด้วยสมบัติดังกล่าวแล้ว ตลอดจนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และการสูญเสียโดยถูกดินดูดซับไว้น้อยมาก ทำให้โพลีเมอร์ประเภทนี้น่าสนใจศึกษา

APU สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีครอสลิงค์ (cross linked) ของนอนไอออนโนเมอร์ออกริเลทยูรีเทน (urethane acrylate nonionomer, UAN) ที่มีขนาดนาโน ซึ่งมีโครงสร้างของนาโนเหมือนไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวแต่มีข้อดีที่มีการกระจายตัวค่อนข้างคงที่มากในสภาพของสารละลายเจือจาง (Kim et al., 2000)

Kim et al. (2000) ทำการศึกษาใช้โพลียูรีเทนนาโนครอสลิงค์ประจุลบ (anionic cross-linked polyurethane) เพื่อสกัดสารพีแนนทริน ออกจากวัสดุใต้ชั้นดิน (aquifer material) โดยใช้ทราย-ชั้นหินใต้ดิน (sand aquifer) ดูดซับ ไม่ค่อยแข็งแรงนัก (weakly) เนื่องจากการครอสลิงค์ของโครงสร้างแต่มีการสูญเสียวัสดุนาโนเนื่องจากดินน้อยมากๆ โดยใช้การล้างเพียง 2-3 pore volume (PV) ทำให้ฟื้นฟูดินได้ในระดับสูงทีเดียว (95%) ข้อเสียคือ วัสดุนาโนนี้จะจับตัวรวมกันได้ง่ายและเร็วเมื่อมีสารที่มีประจุ เช่น CaCl_2 หรือ MgCl_2 การพัฒนาต่อมาคือวัสดุนาโนนอนไอโอโนเมอร์ ออกริเลทยูรีเทน (UAN) ชนิดกึ่งชอบไม่ชอบน้ำ (amphiphilic) ซึ่งจะมีโซ่ของออกไซด์โพลีเอทิลีน

(polyethylene oxide, PEO) ที่มีสมบัติชอบน้ำและโซ่ออกไซด์โพลีโพรไพรีน (polypropylene oxide, PPO) มีสมบัติไม่ชอบน้ำอยู่ตรงกลาง โซ่เหล่านี้ทำให้เกิดโพลียูรีเทนขนาดนาโนที่มีสมบัติครึ่งชอบน้ำไม่ชอบน้ำที่มีความเสถียรมากในสารละลายเจือจาง โดยมีโครงสร้างเหมือนไมเซลของสารลดแรงดึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Kim et al., 2003)

ในการสังเคราะห์โซ่ UAN นั้นมี 3 ขั้นตอนโดยใช้ขวด 3 กอเพื่อติดตั้งแท่งแก้วกวนเทอร์โมมิเตอร์ และช่องฟั่นแก๊สในโตรเจน น้ำหนักโมเลกุลของ TDI, PPO, HEMA, และ PEG ที่ใช้มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของ UAN ที่เกิดขึ้น ขั้นตอนต่อไปคือ การนำ UAN มาผสมกับน้ำกลั่นแยก อีออนด้วยการกวนอย่างแรง UAN อิมัลชันที่ได้จึงนำมาทำครอสลิงค์โดยการทำให้เป็นโพลีเมอร์จากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน โดยมีโปตัสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KSO) เพื่อให้เกิดโพลีเมอร์นาโน APU กระจายอยู่ในน้ำ อนุภาคนี้อิมัลชันที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายเจือจางจะแทรกเข้าไปในวัฏภาคน้ำมัน (oil phase) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์ระหว่างกลุ่มไวนิลของโซ่ต่างๆของ UAN ขนาดของวัสดุนาโนที่สังเคราะห์ได้ขึ้นกับความยาวของโซ่โพลีเอทิลีนไกลคอล กล่าวคือถ้าโซ่ยาวขึ้นขนาดของอนุภาคนาโนจะลดลง (Kim et al., 2003)

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องกวน (mechanical stirrer) เครื่องอ่างน้ำ (water bath) เตาให้ความร้อน (heating mantle) เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (rotary vacuum evaporator) เครื่องปั๊ม (pump) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมีตัวตรวจวัดเป็น electron capture (Gas chromatography, GC-ECD) รุ่น HP 6890 ของบริษัท Hewlett Packard เครื่องสกัดซอกซ์เลท (soxhlet extractor) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เครื่องสเปกโตรโฟริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (fourier transform infrared spectrometer) เครื่องแยกขนาดอนุภาค (particle size distribution analyzer)

สารเคมีที่ใช้ได้แก่

- 1) สาร OCs มาตรฐาน (อัลดริน ดีลดริน เอ็นดริน เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ เฮปตะคลอไรด์ ดีดีที และ เตตระคลอโรไซลีน (2, 4, 5, 6 Tetrachloro m-xylene))
- 2) นอร์มอลเฮกเซน (n-Hexane) ชนิด pesticide grade
- 3) ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) ชนิด pesticide grade
- 4) อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) ชนิด pesticide grade
- 5) ฟลอริซิล (Florisil) Pr 60/100
- 6) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate anhydrous) ชนิด granular
- 7) โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide)
- 8) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
- 9) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
- 10) ขี้เถ้า (glass wool)
- 11) โพลีเตตระเมทิลีนไกลคอล (Polytetramethylene glycol, PTMG)
- 12) โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (2,4-Toluene diisocyanate, TDI)
- 13) ไฮดรอกซีเอทิลเมทาอะคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA)
- 14) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)
- 15) ไดเมทิลอะซิตามิโด (N,N-Dimethylacetamide, DMAc)
- 16) โพแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate, KPS)

17) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas 99.99%)

3.2 การสังเคราะห์โพลีเมอร์นาโน

สารโพลีเมอร์นาโนที่มีทั้งขั้วบวกและลบ (amphiphilic) สังเคราะห์จากสารดังต่อไปนี้ TDI, PTMG, HEMA และ PEG ในอัตราส่วนของโมลาร์เท่ากับ 2:1:1:1 โดยปรับจาก Tungittiplakorn et al. (2004) มีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การสังเคราะห์ precursor

ซึ่งสาร TDI 6.9664 g. ผสมกับ PTMG 20.0000 g. (ดูตารางที่ 3.1) ใส่ในขวดแก้วกลมสามหัวที่แช่อยู่ในเครื่องอ่างน้ำซึ่งตั้งอยู่บนเตาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ มีแท่งกวนของเครื่องกวนใส่อยู่ในหัวขวดแก้วกลมสามหัวนั้น คนเป็นเวลา 30 min ณ อุณหภูมิ 35°C จากนั้นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 45°C และกวนต่อไปอีก 5 h. แล้วทำให้เย็นลงมาที่ 20°C จึงเติม HEMA 2.6028 g. ขณะที่กวนไปด้วยเป็นเวลา 30 min จากนั้นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 45°C และกวนต่อไปอีก 3 h. ในขั้นสุดท้ายเติม PEG 40.0000 g. ใน 0.25% DMAc โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 65°C และกวนต่อไป 12 h. ตลอดเวลาการสังเคราะห์ต้องพ่นก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99% ภายในขวดแก้วกลมนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ผลการสังเคราะห์จะได้ (precursor) ชื่อว่า โพลีเอทธีลินไกลคอลลโมดิฟายด์ยูรีเทนอะคริเลท (PMUA) โดยเมื่อผ่านเครื่องสเปกโตรโฟลูอริเมตริทรานฟอรัมอินฟราเรด จะไม่พบ functional group ของ NCO ณ 2270 cm^{-1}

3.2.2 การเกิดอนุภาคนาโน

โดยการหยดน้ำแยกออกกลงไปในขวดแก้วกลมที่มี precursor และให้ความร้อนไปที่ 35°C พร้อมกับกวนอย่างแรงจนกระทั่งเกิดอิมัลชัน (emulsion) ขึ้น

3.2.3 ปฏิกิริยาครอสลิงค์ (cross-link)

เพิ่มอุณหภูมิในขวดแก้วกลมไปที่ 65°C จึงเติม 5% ของ KPS ลงไป กวน 8 h. ในขวดแก้วกลมสามหัวนั้นซึ่งใส่แท่งแม่เหล็กไว้และพ่นก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลา อนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นให้กรองผ่าน GFC เพื่อคัดขนาดที่ใหญ่กว่า 1.2 μm . หรือ 1200 nm. ให้ออกไป ปรับ pH ให้ได้ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องแยกขนาดอนุภาค

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้สังเคราะห์โพลีเมอร์นาโน

สาร	น้ำหนัก โมเลกุล	โมลาร์	โมล (mole)	น้ำหนัก (g.)
TDI	174.16	2	0.04	6.9664
PEG	2000	1	0.02	40.0000
PTMG	1000	1	0.02	20.0000
HEMA	14	1	0.02	2.6028

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.3.1 การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินที่ระดับผิวดินถึงระดับลึก 10 cm. จากผิวดินจากพื้นที่ 5 แห่งตามเมืองอุดรธานีเพื่อให้ได้คาร์บอนอินทรีย์ต่างๆกัน 5 ระดับ ผสมคลุกเคล้าแต่ละตัวอย่างให้เข้ากัน และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 mm. เก็บในขวดแก้วสะอาดมีฝาปิด ที่อุณหภูมิห้อง

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติดิน

ทำการวิเคราะห์หา pH โดยใช้เครื่องวัด pH , ส่วนประกอบของเนื้อดินโดยวิธีร่อนตะแกรง (sieve analysis), ความชื้นโดยวิธีชั่งน้ำหนัก (gravimetric method), cation electro capacity (CEC) โดยวิธี Ammonium saturation and distillation, การนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (EC meter) และใช้อัตราส่วนดิน:น้ำ เท่ากับ 1:5 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ โดยวิธี Walkley-black และการปนเปื้อนของสารอ็อกซิเจนไนโตรเจนโดยวิธีการสกัด ทำให้บริสุทธิ์โดยผ่านคอลัมน์และฉีดเข้าเครื่อง GCMS-ECD ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารทดสอบ

3.4.1 การสกัดสารทดสอบจากดิน

ชั่งดิน 30 g. ใส่ในธิมเบิล (thimble) และดวงตัวทำละลายเฮกเซน 150 ml. และอินเตอร์นัล แสตนดาร์ดใส่ในขวดแก้วกลม ประกอบเข้ากับคอนเดนเซอร์ในชุดเครื่องสกัดซอกซ์เลท ใส่ pumic stone เล็กน้อยเพื่อกระจายความร้อน ให้ความร้อนพอประมาณที่ตัวทำละลายจะเดือดปุดๆเล็กน้อยเป็นเวลา 2 h. ปล่อยให้เย็น กรองเฮกเซนถ้าจำเป็นด้วยกระดาษกรอง GFC ลดปริมาตรเฮกเซนที่ได้ให้เหลือ 5 ml. โดยใช้ เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน และให้เหลือ 2 ml. อีกครั้งโดย เป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปทำให้บริสุทธิ์โดยผ่านคอลัมน์ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.4.2

3.4.2 การทำให้สะอาด (clean-up)

ใช้หลอดแก้วแบบ disposal pipette ดูดเฮกเซนที่ได้สกัดสารและลดปริมาตรแล้วในข้างต้นลงในคอลัมน์แก้วขนาด 40 x 2 cm. ที่มีฟลอริซิลอยู่ 20 g. ที่ได้เผา 250°C 4 h. โดยที่กั้นคอลัมน์ไปด้วยใยแก้วเล็กน้อยและทับด้วยโซเดียมซัลเฟตที่เผาที่อุณหภูมิ 450°C 6 h. มาใหม่ๆ ชะคอลัมน์ด้วยไดคลอโรมีเทนประมาณ 150 ml. ตัวทำละลายที่ชะรองเก็บไว้แล้วนำไปลดปริมาตรอีกครั้งด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน ให้เหลือประมาณ 5 ml. ถ่ายใส่หลอดทดสอบเพื่อไปลดปริมาตรอีกครั้งเหมือนข้างต้น จนมีปริมาตรเหลือ 2 ml. ดูดสารไว้ 1 µl. ด้วยไซริงค์ไปฉีดเข้าเครื่อง GC-ECD อ่านพื้นที่โครมาโตแกรมของสารแต่ละชนิดและของอินเตอร์นัล แสตนดาร์ด นำไปคำนวณหาความเข้มข้น

จากกราฟมาตรฐานที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับอัตราส่วนพื้นที่โครมาโตแกรมของสารทดสอบกับอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ด

3.4.3 การสกัดสารทดสอบจากน้ำ

ด้วยวิธี สกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid – liquid extraction method) โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน 50 ml. ใส่ในกรวยแยกที่ได้ดวงสารตัวอย่างและอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ดใส่ไว้แล้ว เขย่าอย่างแรงประมาณ 10 min. ทิ้งไว้ให้แยกชั้น ปล่อยให้ชั้นล่างลงเก็บในบีกเกอร์เพื่อทำการสกัดซ้ำอีกครั้งด้วยเฮกเซนอีก 50 ml. นำ ส่วนที่สกัดได้ไปรวมกับที่สกัดได้ในครั้งแรกเพื่อลดปริมาณด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศแบบหมุน และเป่าด้วยไนโตรเจนให้ปริมาณลดลงประมาณ 2 ml. นำไปฉีดเข้าเครื่อง GC-ECD ต่อไป

3.4.4 สภาวะที่เหมาะสมของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เครื่องที่ใช้ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น HP 6890 และมีตัวฉีด (injector) แบบอัตโนมัติ (auto splitless) รุ่น 7638 ส่วนตรวจวัด (detector) ใช้ ECD คอลัมน์ของบริษัท J & W Scientetific รุ่น HP-5 (5% Phenyl methyl siloxane) ความยาว 30 m. เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.32 mm. หน้า 0.25 μm . ทำการตั้งและปรับเครื่องเพื่อให้ได้พีค (peak) ของสารทดสอบแยกกัน ได้ชัดเจน โดยได้สภาวะที่เหมาะสม ดังนี้ อุณหภูมิของตัวฉีดตั้งที่ 250°C ของส่วนตรวจวัด ที่ 250°C โปรแกรมอุณหภูมิเริ่มที่ 120°C เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10°C min⁻¹ จนอุณหภูมิถึง 250°C ค้างไว้ 3 min. และเพิ่มอุณหภูมิต่อไปด้วยอัตรา 50°C min⁻¹ จนถึงอุณหภูมิ 325°C ค้างไว้ 3 min. ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา (carrier gas) ที่อัตราการไหล 20 ml. min.⁻¹ แก๊สไนโตรเจนเป็น makeup gas ที่อัตราการไหล 60 ml. min.⁻¹ ระบบ split เท่ากับ 5 : 1 ปริมาณสารที่ฉีดต่อตัวอย่างคือ 1 μl .

3.4.5 ช่วงเวลาที่ปรากฏ (retention times) ของสารทดสอบและอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ด

ทำการฉีดสารมาตรฐานและอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ดทีละชนิดๆ ละ 10 μl เข้าเครื่อง GC-ECD โดยใช้สภาวะของเครื่องที่เหมาะสมที่หาได้ในหัวข้อ 3.4.4 เพื่อให้ทราบเวลาปรากฏของพีคของสารแต่ละชนิดดังนี้ เตตระคลอโรไซลีน 5.29 min. (SD=0.07) เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ 6.17 min. (SD=0.08) เฮปตะคลอไรด์ 8.34 min. (SD=0.07) อัลดรินที่ 9.02 min. (SD=0.10) ดีลดริน 11.08 min. (SD=0.11) เอ็นดริน 11.46 min. (SD=0.11) และดีดีที 12.57 min. (SD=0.12)

3.4.6 สร้างกราฟมาตรฐาน

สร้างกราฟมาตรฐานของสารทดสอบโดยการฉีดสารทดสอบมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ พร้อมความเข้มข้นคงที่ของอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ด เข้าเครื่อง GC-ECD สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารทดสอบกับอัตราส่วนของพื้นที่พีคของสารทดสอบกับพื้นที่พีคของอินเทอร์นัลแอสแตนดาร์ด (ดูตารางที่ 3. 2)

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์สมการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร (แกน x) กับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของสารทดสอบกับพื้นที่ผิวของอินเทอร์นัลสแตนดาร์ด (แกน y)

สารทดสอบ	ความชัน	ส.ป.ส. ความสัมพันธ์ (r^2)
อัลคริน	46.45	0.96
เบนซินเฮกซะคลอไรด์	34.89	0.99
คีคีที	35.01	0.94
คีลคริน	49.09	0.97
เอ็นคริน	25.48	0.99
เฮปตะคลอรั	38.85	0.98

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.7 ประเมินวิธีวิเคราะห์

1) การปนเปื้อนของสารทดสอบในขั้นตอนการวิเคราะห์

ทำการสกัดดิน ทำความสะอาด และฉีดเข้าเครื่อง GC-ECD ตามวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.4.1-3.4.4 โดยไม่ต้องใส่สารทดสอบ ตรวจสอบไม่พบพีคของสารทดสอบ

2) ขีดจำกัดของวิธีตรวจวัด (method detection limit; MDL)

โดยเติมสารละลายมาตรฐานลงในตัวอย่างดิน 30 g. เพื่อให้มีความเข้มข้น 2 mg.kg^{-1} จากนั้นนำไปทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง สกัดวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเครื่อง GC-ECD ตามวิธีในข้อ 3.4.1 และข้อ 3.4.2 โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) ค่า MDL ได้จาก 3SD (ดูตารางที่ 3.3)

3) ร้อยละการกักเก็บคืนมาของสารทดสอบ

ร้อยละการกักเก็บคืนมาของสารทดสอบได้จากสัดส่วนของความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงในตัวอย่างแล้วผ่านการสกัดในข้อ 3.4.1 และข้อ 3.4.2 กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่ฉีดเข้าเครื่องโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ (3.2) ผลการทดลองดูตารางที่ 3.4

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคืนกลับของสาร} = \frac{\text{ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานที่ผ่านการสกัด} \times 100}{\text{ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่ฉีดตรงเข้าเครื่อง}} \quad (3.2)$$

3.5 การกำจัดสารทดสอบโดยใช้โพลีเมอร์นาโน

3.5.1 ความพรุน (porosity) ของดินในคอลัมน์

บรรจุตัวอย่างดินที่ได้ใส่ $0.02\% \text{ NaN}_3$ เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ในคอลัมน์แก้วปิด ($2.5 \times 10 \text{ cm.}$) ที่ทราบน้ำหนักแล้ว ชั่งน้ำหนักดินพร้อมคอลัมน์แก้ว ทำให้ทราบน้ำหนักดินที่ใส่ เติมน้ำแยกออกในดินจนอิ่มตัว ชั่งน้ำหนัก แล้วปล่อยน้ำในดินให้ไหลลงในบีกเกอร์วัดปริมาตรน้ำ จะได้ค่า pore volume (PV) เท่ากับ 16 ml. ชั่งคอลัมน์แก้วอีกครั้ง คำนวณหาค่าความพรุนของดิน จากค่า soil pore volume /soil column volume คูณด้วย 100

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดวิธีวิเคราะห์ของสารทดสอบ (mg.)

เบนซีนเฮกซะ คลอไรด์	เฮปตะคลอรั	อัลคริน	เอ็นคริน	ดีลคริน	ดีดีที
0.0005	0.0004	0.0003	0.0004	0.0002	0.0003

ตารางที่ 3.4 ร้อยละการคืนกลับของสารทดสอบ

เบนซีนเฮกซะ คลอไรด์	เฮปตะคลอรั	อัลคริน	เอ็นคริน	ดีลคริน	ดีดีที
97.5	98.60	98.33	97.42	97.50	96.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 ระยะเวลาสัมผัสที่มีประสิทธิภาพ

เตรียมคอลัมน์ดิน 9 คอลัมน์ๆละ 30 g. โดยใช้ดินชนิดที่ 5 ซึ่งเป็นดินที่มีคาร์บอนอินทรีย์มากที่สุด เดิมโซเดียมเอไซด์ และ spike สารทดสอบเข้มข้น 2 mg. kg.^{-1} ปล่อยสารละลายโพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 mg. l.^{-1} เข้าทุกคอลัมน์ แช่ไว้ 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96, 120 h. เมื่อครบเวลาชะด้วยน้ำแยกอออนที่ความเร็ว 20 ml. h.^{-1} ทำการเก็บน้ำชะ 300 ml. นำ filtrate ไปสกัดและวิเคราะห์หาสารทดสอบ (ดูตารางที่ 3.5)

3.5.3 การกลับคืนของโพลีเมอร์นาโน

โดยการปล่อยสารละลายโพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 mg. l.^{-1} ผ่านลงคอลัมน์ให้ท่วมดิน หรือ 1 PV แช่ไว้ 48 h. เมื่อครบเวลาปล่อยน้ำแยกอออนที่ความเร็ว 20 ml. h.^{-1} รองรับด้วยบีกเกอร์ให้ได้ปริมาตร 300 ml. นำบีกเกอร์นี้ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบแห้งชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ทำซ้ำอีกโดยเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายอนุภาคนาโนที่ 10, 15, 20, 30 mg. l.^{-1} เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละ PV กับ น้ำหนักของ APU ในแต่ละ PV นั้น คำนวณหา % การกลับคืนของ APU จากน้ำหนัก APU ที่ใส่ในคอลัมน์กับที่ออกจากคอลัมน์

3.5.4 การชะสารทดสอบด้วยน้ำแยกอออน

Spike สารทดสอบ 2 mg. kg.^{-1} ดิน พร้อมกับ อินเทอร์เน็ตแสดงนคาร์ดในตัวอย่างดิน 30 g. ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุด และผสมโซเดียมเอไซด์ลงไปเรียบร้อยแล้วเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ปล่อยสารละลายโพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 g. l.^{-1} ให้ได้เต็ม PV แช่ทิ้งไว้ 48 h. หลังจากนั้นปล่อยน้ำแยกอออนย้อนขึ้นไปในคอลัมน์ เก็บน้ำชะให้ได้ 300 ml. นำไปสกัดและวิเคราะห์หาสารทดสอบ

3.5.5 อิทธิพลของสมบัติของดิน

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโพลีเมอร์นาโน 10 mg. l.^{-1} ความเข้มข้นของสารทดสอบที่ 2 mg. kg.^{-1} ดิน โดยใช้ดินทั้ง 5 ชนิด (ดูตารางที่ 3.6) ดังนี้

3.5.6 ซีดจำกัดของโพลีเมอร์นาโน

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโพลีเมอร์นาโน 5, 10, 15, 20, 30 g. l.^{-1} ความเข้มข้นของสารทดสอบที่ 2 mg. kg.^{-1} และใช้ดินนา 30 g. แช่โพลีเมอร์นาโนไว้ 48 h. ก่อนปล่อยน้ำแยกอออนให้ชะสารออกมา ทำการเก็บน้ำชะ 300 ml. (ดูตารางที่ 3.7)

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงโดยใช้ดินชนิดที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุด

ความเข้มข้นของ APU (mg. l. ⁻¹)	10	10	10	10	10
ความเข้มข้นสาร OCs (mg. kg. ⁻¹)	2	2	2	2	2
ระยะเวลาสัมพัทธ์ (h.)	12	24	36	48	72

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบอิทธิพลของคาร์บอนอินทรีย์

ชนิดดิน	1	2	3	4	5
ความเข้มข้นสาร OCs (mg. kg. ⁻¹)	2	2	2	2	2
ความเข้มข้น APU (mg. l. ⁻¹)	10	10	10	10	10

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหาขีดจำกัดของโพลีเมอร์นาโนโดยใช้ดินชนิดที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุด

ความเข้มข้น APU (mg. l. ⁻¹)	5	10	15	20	30
ความเข้มข้นสาร OCs (mg. kg. ⁻¹)	2	2	2	2	2

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

4.1 โพลีเมอร์นาโน

4.1.1 ขนาด

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดต่างๆของโพลีเมอร์นาโนที่สังเคราะห์ขึ้น โดยมีขนาดตั้งแต่ 55 nm. ถึง 915 nm. ขนาดที่เป็นนาโนซึ่งมีปริมาณเป็นส่วนใหญ่มีขนาด 55- 100 nm. (48.8 % โดยปริมาตร) ขนาด 115- 175 nm.มี 14.4%, ขนาด 250- 275 nm.มี 2.8%, ขนาด 315-365 nm. มี 0.9%, ขนาด 425-495 nm. มี 0.5%, ขนาด 585 nm. มี 0.2%, ขนาด 675, 785 และ 915 nm.มี อย่างละ 0.1% เมื่อเทียบขนาดที่สังเคราะห์ได้นี้กับงานของ Karnchanasest and Santisukasem (2007) และงานของ Tungittiplakorn et al. (2004) ซึ่งงานหลังเป็นต้นแบบที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ครั้งนี้ ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ขนาดของโพลีเมอร์ที่ได้นั้นมีขนาดและปริมาตรต่าง ๆ กัน ซึ่งความแตกต่างนี้ Akagi et al. (2007) ได้อธิบายว่าขึ้นกับสารตั้งต้นที่ใช้ แต่เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้สารตั้งต้นเหมือนกันกับงานวิจัยทั้งสอง ดังนั้นเงื่อนไขทางกายภาพที่ใช้ขณะสังเคราะห์เหมือนกันก็จริงแต่อาจไม่เหมือนในรายละเอียด ได้แก่ ความเร็วและระยะเวลาของการกวนโดยใช้แท่งกวนขณะสังเคราะห์ รวมตลอดทั้งการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วย ดังนั้นในการสังเคราะห์แต่ละครั้งหากไม่มั่นใจว่าจะควบคุมเงื่อนไขทางกายภาพที่ไว้ได้ อาจทำการรวบรวมอนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์หลายครั้งเข้าด้วยกันก่อนนำไปใช้ เพื่อให้ได้อนุภาคที่นำไปใช้งานมีขนาดและจำนวนเหมือนกันตลอดการใช้งาน หากต้องการใช้จำนวนไม่มากและสามารถสังเคราะห์ให้เพียงพอในคราวเดียวก็จะไม่มีปัญหาเรื่องคุณภาพไม่เหมือนกัน

4.1.2 การกลับคืน

เนื่องจากการผ่านสารละลายของโพลีเมอร์ลงในคอลัมน์ดิน (ดินชนิดที่ 5 มีคาร์บอนอินทรีย์มากที่สุด) อาจมีการตกค้างอยู่ในอนุภาคของดินได้เพราะโพลีเมอร์นาโนมีอนุภาคเล็กมาก กอปรกับดินมีอนุภาคดินเหนียวเป็นส่วนประกอบด้วยซึ่งจะจับตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำ เป็นไปได้ว่าอนุภาคนาโนจะถูกกักไว้ในระหว่างอนุภาคดินเหนียวเหล่านี้ จากผลการทดลองแช่สารละลายโพลีเมอร์นาโน 1 PV (16 ml.) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 5, 10, 15, 20, และ 30 g. l.⁻¹ ในคอลัมน์ดิน 30 g. เป็นเวลา 48 h. แล้วจึงไล่ด้วยน้ำแยกออวนที่อัตรา 20 ml. min.⁻¹ จนกว่าจะไม่พบอนุภาคนาโนในน้ำชะที่รองรับไว้ โดยได้เก็บน้ำชะดังกล่าวทุก 1 PV จำนวน 21 PV (320 ml.) และนำไปชั่งน้ำหนักหาโพลีเมอร์นาโน

ตารางที่ 4.1 ขนาดและปริมาณต่างๆของอนุภาคโพลีเมอร์นาโนที่สังเคราะห์ขึ้น

ขนาดอนุภาค โพลีเมอร์ (มกม.)	ปริมาณ (%)				รวม
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0.055	7.33	7.64	7.36	7.44	
0.065	11.17	11.54	11.23	11.31	
0.075	11.74	12.03	11.83	11.87	
0.085	10.21	10.36	10.31	10.29	
0.095	7.89	7.93	7.98	7.93	48.84
0.115	5.7	5.68	5.78	5.72	
0.135	3.99	3.95	4.06	4.00	
0.155	2.76	2.71	2.81	2.76	
0.175	1.88	1.84	1.92	1.88	14.36
0.25	1.28	1.24	1.3	1.27	
0.235	0.87	0.85	0.89	0.87	
0.275	0.63	0.61	0.64	0.63	2.77
0.315	0.5	0.48	0.51	0.50	
0.365	0.41	0.4	0.42	0.41	0.91
0.425	0.31	0.31	0.32	0.31	
0.495	0.23	0.22	0.23	0.23	0.54
0.585	0.17	0.16	0.17	0.17	
0.675	0.11	0.11	0.12	0.11	
0.785	0.11	0.11	0.11	0.11	
0.915	0.11	0.11	0.12	0.11	

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดและปริมาณของโพลีเมอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้กับผล
การศึกษาอื่น

ผลการศึกษานี้		การศึกษาของ Karnchanasest and Santisukasem (2007)		การศึกษาของ Tungittiplakorn et al. (2004)	
ขนาด	% ปริมาตร	ขนาด	% ปริมาตร	ขนาด	% ปริมาตร
55	7.44	50	2.66	↑↑	
65	11.31	60	5.45	60-80	na
75	11.87	70	8.28	↓↓	
85	10.29	80	10.77		
95	7.93	90	12.07		
115	5.72	110	11.29		
135	4.00	130	8.45		
155	2.76	150	4.88		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โน น้ำหนักโพลีเมอร์นาโนในแต่ละ PV ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์นาโน แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1 และรูปที่ 4.1 พบว่าใน PV แรกๆ โพลีเมอร์นาโนจะถูกชะออกมาเป็น ส่วนใหญ่ และลดลงตามลำดับ และจะได้หมดที่ 10-20 PV ของทุกความเข้มข้น แสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์นาโนเข้มข้นที่ 10 g. l.^{-1} โพลีเมอร์นาโนถูกกักไว้ในดินน้อยที่สุด (5.1%) หรือ อีกนัยหนึ่งสามารถกลับคืนมาได้สูงสุด 94.9% จึงเป็นความเข้มข้นที่นำมาใช้ตลอดการทดลอง ส่วนความเข้มข้นอื่น ตกค้างประมาณ 7.3-9.4% หรือ กลับคืนได้ 90.6-92.7%

4.2 สมบัติของดิน

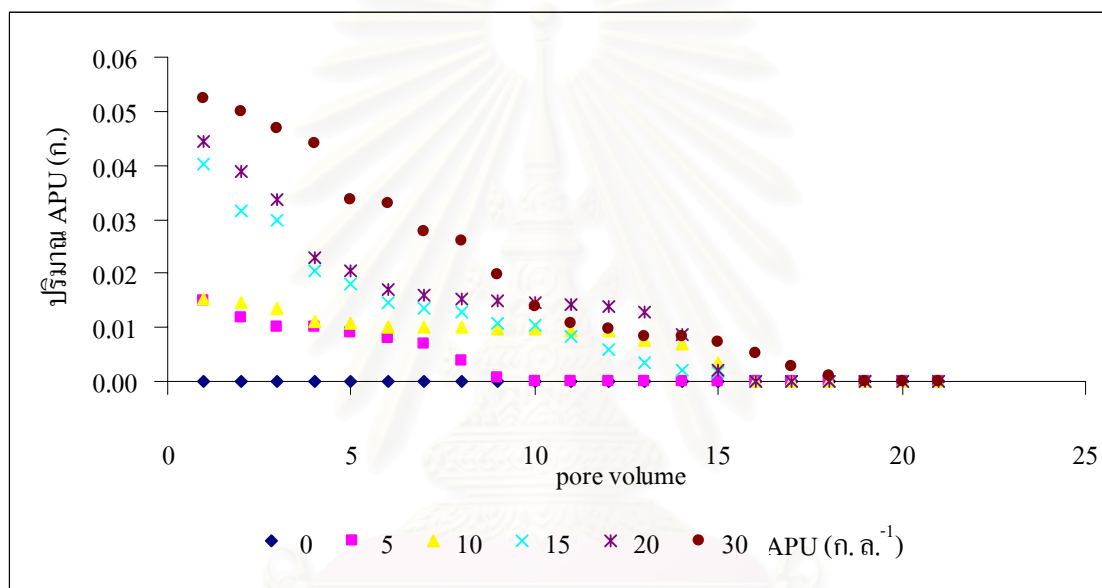
4.2.1 ดินที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของดิน 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon) ต่างๆกัน 5 ระดับคือ 0.9, 1.3, 1.7, 1.8 และ 2.5% โดยน้ำหนักดิน และจัดเป็นดินอนินทรีย์ (mineral soil) ทั้งหมดเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์น้อยกว่า 20% (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) แสดงว่าดินมีส่วนประกอบของเศษเหลือของพืชและสัตว์เน่าเปื่อยผุพังน้อย

ดินที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นดินประเภทดินเหนียว 2 ตัวอย่าง ดินร่วนเหนียว 2 ตัวอย่าง และดินร่วน 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างดินที่ 1-4 มีปริมาณของอนุภาคดินเหนียวเพิ่มขึ้นตามลำดับไปในทางเดียวกันกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ยกเว้นตัวอย่างดินที่ 5 ที่มีอนุภาคดินเหนียวลดลงจากตัวอย่างดินที่ 4 แต่กลับมีคาร์บอนอินทรีย์เพิ่มขึ้นและมีมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกตัวอย่าง ดินชนิดที่ 5 เป็นดินสวนในบ้านชาวไร่ซึ่งมีการถมดินเป็นระยะๆและใส่ปุ๋ยตลอดฤดูการเพาะปลูก อนุภาคดินเหนียวเมื่อเรียงตัวกันเป็นก้อนดินจะเกิดช่องว่างขนาดเล็ก ระหว่างอนุภาค และมีปริมาตรรวมสูง ทำให้มีความพรุนสูง อุ่นน้ำได้มาก

ดินทุกชนิดที่ใช้ทดสอบมีฤทธิ์เป็นกรด (pH 4.8-6.7) โดยที่ค่าระหว่าง 6-7 เป็นระดับเหมาะสมที่ธาตุอาหารในดินถูกดูดซับไปใช้โดยพืชได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ค่าความเป็นกรดต่างโดยทั่วไปไม่มีผลต่อการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ในดิน มีผลน้อยมากในด้านการดูดดึงสารประกอบอินทรีย์ออกจากดิน

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินที่ใช้ทดสอบ แสดงถึงปริมาณแคตไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะดูดจับไว้ได้ที่ผิวดิน สำหรับในดินทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าระหว่าง 4.8-18.9 cmole ของประจุบวกต่อดิน 1 kg. หรือเท่ากับ 1mequivalent ต่อดิน 100 g. ค่าดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับความร่วนซุย ความเหนียวของดิน การดูดธาตอาหารของพืช เป็นต้น ไม่



รูปที่ 4.1 ปริมาณโพลีเมอร์นาโน (APU) ในแต่ละ Pore volume (PV) จากการชะโพลีเมอร์นาโนที่แช่ไว้ในคอลัมน์ดิน (30 g.) ด้วยน้ำแยกอออนที่มีอัตราการไหล 20 ml. min⁻¹ และใช้โพลีเมอร์นาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของดินที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่าง ดิน	เนื้อดิน	% ส่วนประกอบเนื้อดิน			pH	CEC (cmol kg^{-1})	% คาร์บอน อินทรีย์
		ทราย	ทราย แป้ง	ดิน เหนียว			
1	loam	40.2	35.6	24.2	4.87	4.8	0.92
2	clay loam	41.8	26.0	32.2	4.84	7.1	1.35
3	Clay	21.8	25.8	52.4	5.20	14.6	1.66
4	Clay	13.8	21.8	64.4	5.42	11.3	1.84
5	Clay loam	43.8	27.8	28.4	6.71	18.9	2.51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีผลตรงต่อการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ในดิน เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกไม่มีประจุหรือขั้ว

4.2.2 ดินในคอลัมน์

ความพรุนของดินในคอลัมน์ บอกถึงขนาดของช่องในดินต่อปริมาตรดิน ความพรุนของดิน ร่วนเหนียวในดินชนิดที่ 5 นั้น จัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) โดยจะมีช่องระหว่างอนุภาคขนาดเล็ก และมีปริมาตรรวมของช่องมาก ทำให้ดูดซับน้ำได้มาก สารละลายโพลีเมอร์นาโนสามารถเข้าถึงผิวเนื้อดินได้มากและทั่วถึง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพความพรุนจะมีผลส่วนใหญ่ในช่วงเวลาแรกๆ เมื่อเวลาผ่านไปสารละลายจะทำให้ดิน โดยเฉพาะอนุภาคดินเหนียวละเอียดจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้ยากต่อการสกัดสารออกมายังสารละลายนาโน ความง่ายยากในการสกัดออกมาขึ้นกับปริมาณอนุภาคละเอียดที่มีอยู่ (Bayley and Biggs, 2005)

4.3 การชะดินในคอลัมน์ที่ใส่สารทดสอบ

4.3.1 ชะด้วยน้ำแยกอออน

ผลการชะสารทดสอบในดินด้วยน้ำแยกอออนจำนวน 20 PV ไม่พบสารทดสอบในน้ำชะ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Conte et al. (2005) โดยที่ไม่พบความแตกต่างของความเข้มข้นของสารกลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobics) ได้แก่ PAHs, biphenyl, hydrophilic halogenated and nitrogenated ในดินก่อนและหลังล้างด้วยน้ำแยกอออนซึ่งมีการเขย่าในเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 h. ที่ $10 \text{ cycle min}^{-1}$ เมื่อทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ดินอีก 4 ชนิดที่เหลือไม่พบสารทดสอบในน้ำชะดินเลย แม้ว่าในดินทั้ง 5 ชนิดจะมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวแตกต่างกันตั้งแต่ 24.2-64.4% โดยปกติแล้วเมื่อมีการล้างดินจะด้วยน้ำก็ดี มักทำให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวเพื่อจับกันเป็นก้อนอีกครั้งในระหว่างนี้จะเผยแพร่สารประกอบอินทรีย์ที่จับกับอนุภาคละเอียดนั้นและหากมีการสกัดด้วยวิธีโซนิค (sonic extraction) ก็อาจจะทำให้อนุภาคหยาบแตกออกเป็นอนุภาคละเอียดกว่าเผยแพร่สารที่เกาะยึดที่อนุภาคละเอียดนี้ง่ายต่อการกำจัดออกโดยเฉพาะเมื่อสารถูกสกัดออกด้วยวิธีโซนิค ซึ่งได้ผลดีกว่าวิธีซอกเลท (soxhlet extraction) ซึ่งใช้ความร้อนสูง แต่ในการศึกษานี้ใช้น้ำแยกอออนไหลผ่านดินเท่านั้น จึงไม่มีประสิทธิภาพพอจะสกัดสารออกมาได้ และยืนยันผลการทดลองต่อไปที่ชะด้วยโพลีเมอร์นาโนว่าน้ำแยกอออนไม่มีส่วนทำให้สารทดสอบถูกสกัดสารออกมาด้วยโพลีเมอร์นาโน

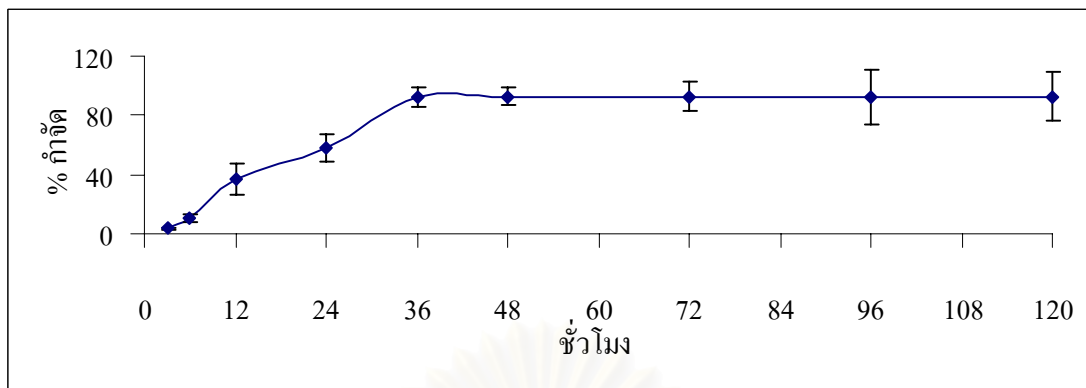
4.3.2 ระยะเวลาที่ใช้

เมื่อแ่สารละลายโพลีเมอร์นาโนปริมาณ 1 PV โดยทดลองใช้ที่ความเข้มข้น 10 g. l.^{-1} ซึ่งให้การกลับคืนสูงที่สุดดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.2 ในคอลัมน์ดิน 30 g. ที่ใส่สารทดสอบไว้แล้ว 2 mg. kg.^{-1} ที่ระยะเวลาต่างๆ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.5.2 และปล่อยน้ำแยกออกที่อัตราการไหล 20 ml. min.^{-1} ให้ไหลผ่านคอลัมน์ดินเพื่อไล่สารละลายมาเก็บไว้ในบีกเกอร์ปริมาณ 300 ml. (หรือประมาณ 18-19 PV) นำไปตรวจวิเคราะห์สารทดสอบในสารละลาย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารทดสอบโดยโพลีเมอร์นาโนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แ่หรือสัมผัส โดยที่ 36 h. เริ่มมีประสิทธิภาพสูง และที่ 48 h. มีประสิทธิภาพสูงในทุกชนิดของสารทดสอบโดยที่หากนานกว่า 48 h. ประสิทธิภาพจะคงที่ไม่เพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ณ เวลา 48 h. สารทดสอบในดินและในโพลีเมอร์นาโนถึงจุดสมดุล (equilibrium) (ดูรูปที่ 4.2 และภาคผนวกที่ 2) ดังนั้น ณ เวลา 48 h. จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับสารทดสอบ/กำจัดสารออกจากดิน และระยะเวลาสัมผัสมีผลในทางบวกต่อการกำจัด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Gong et al. (2005) ที่ทดลองเติมน้ำมันดอกทานตะวันเท่าๆกัน 2 แบบ เพื่อละลายสาร PAHs จากดิน แบบแรกเติม 5 ครั้ง และแบบที่ 2 เติมเพียงสองครั้ง การดูดซับสาร PAHs ของน้ำมันดอกทานตะวันแบบหลังได้มากกว่า แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นปัจจัยหลักการดูดซับของน้ำมันจากดิน เนื่องจากการเติมครั้งละมาก (แบบที่ 2) ทำให้ไหลซ้ำมีโอกาสสัมผัสกับสารยาวนานกว่า ส่วนที่เติมบ่อยครั้งแต่ปริมาณน้อยทำให้ไหลเร็วขึ้นมีผลให้ดูดซับสารเข้ามาในน้ำมันดอกทานตะวันได้น้อยกว่า

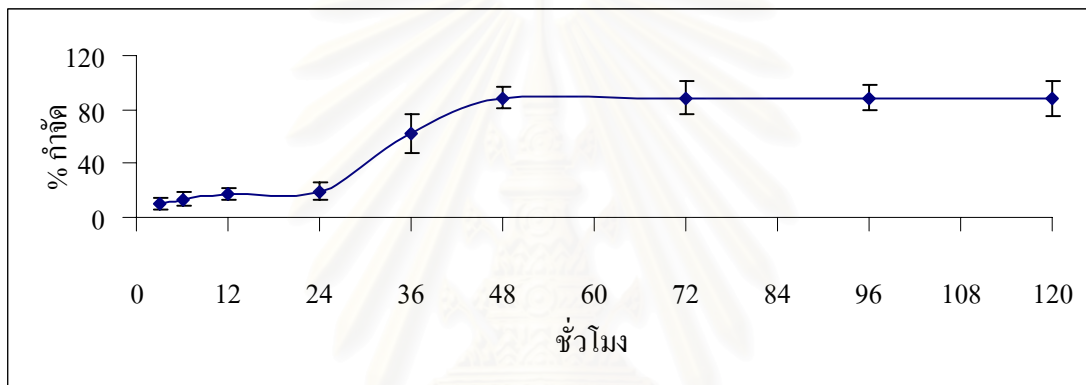
4.3.3 ชะด้วยโพลีเมอร์นาโนความเข้มข้นต่างๆ

จากการทดลองใช้ความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์นาโนปริมาตรเท่ากัน 5 ความเข้มข้นที่ระยะเวลาแ่โพลีเมอร์นาโนที่ 48 h. และภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่า % ดูดซับ/กำจัดสารเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นนาโน 5 g. l.^{-1} และเริ่มคงที่ที่ 10 g. l.^{-1} ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจากนี้ไม่ทำให้ % ดูดซับ/กำจัดมากขึ้น นั่นคือได้ถึงสถานะสมดุลระหว่างสารประกอบอินทรีย์ในดินและในโพลีเมอร์นาโนแล้ว (รูปที่ 4.3 และภาคผนวกที่ 3) และเมื่อทดลองต่อไปโดยใช้สารละลายนาโนเข้มข้นเท่าเดิม (10 g. l.^{-1}) แต่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น พบว่าสามารถดูดซับสารทดสอบได้มากขึ้นกว่าความเข้มข้นเดิมซึ่งใช้ปริมาตรน้อยกว่า สอดคล้องกับการทดลองของ Bayley and Biggs (2005) ที่ว่าอัตราส่วนปริมาตรของเหลว/ของแข็งมีส่วนสำคัญในการดึงสารจากของเหลวสู่ของแข็ง แม้ว่าสารปนเปื้อนในที่นี้อยู่ในสภาพของเหลว และมีของแข็งเป็นตัวดูดดึงสารเข้ามาก็ตาม เนื่องจากการดูดซับและการคายออกเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) เหมือนกัน ดังนั้นปัจจัยจำกัด (limiting factor) ของการใช้สารละลาย

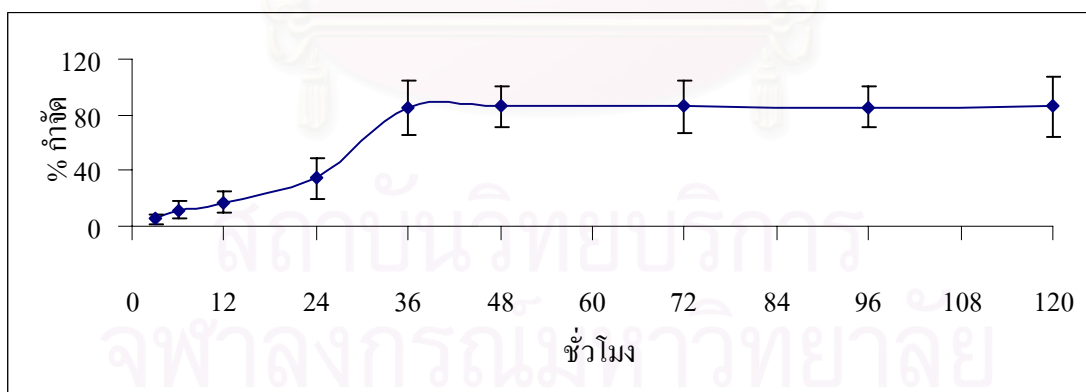
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์



เฮปตะคลอรั

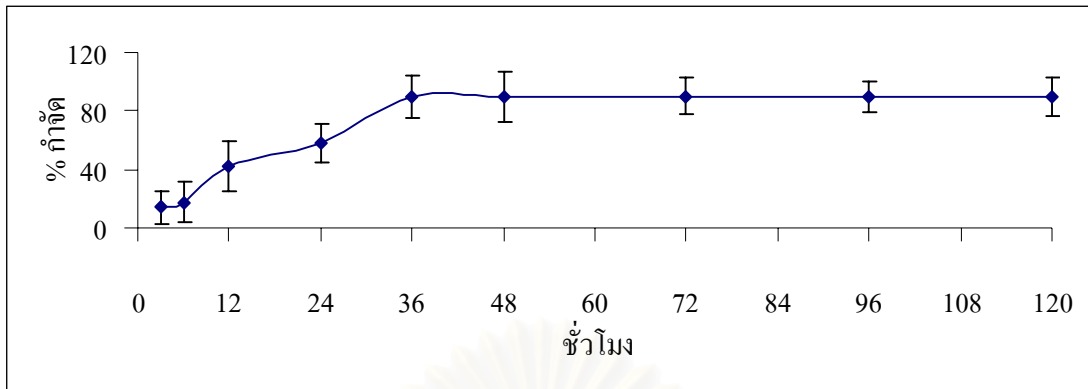


อัลดริน

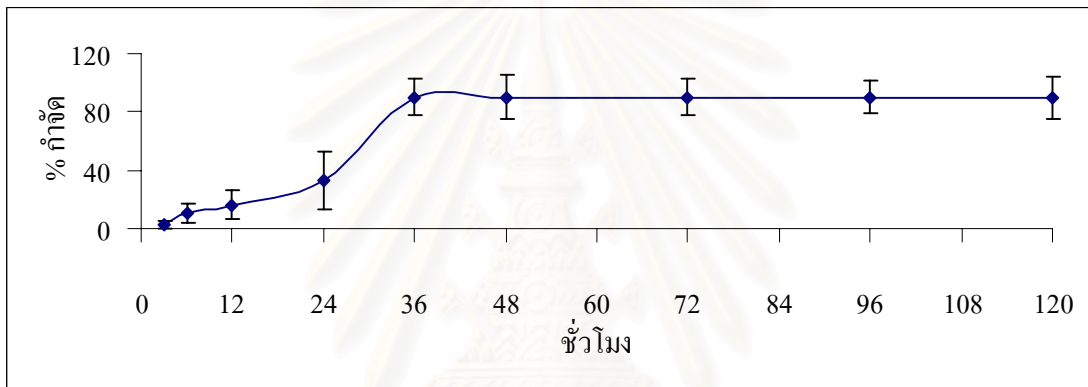


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทน โนคลอรีนออกจากดินชนิดที่ 5 (30 g.) ที่ได้ใส่สารไว้ 0.06 mg. (2 mg. l.⁻¹) กับ h. ที่แซ่โพลีเมอร์นาโนไว้ในดินก่อนชะด้วยน้ำแยกอื้ออน

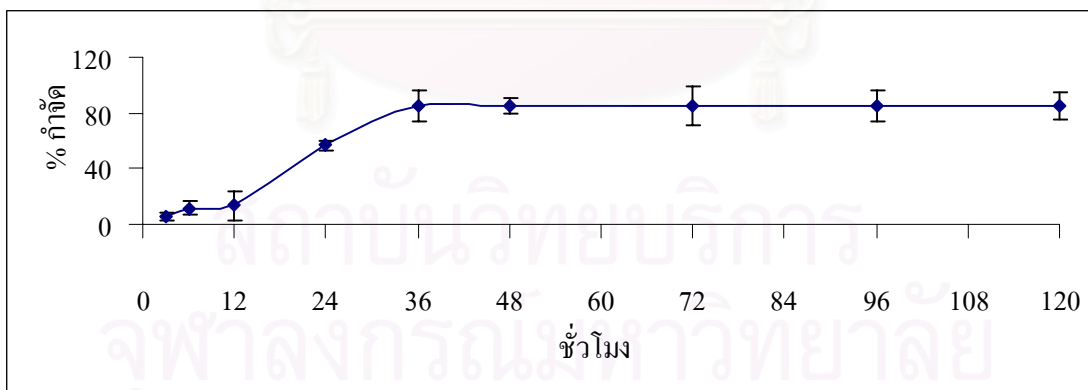
คีลคริน



เอนคริน

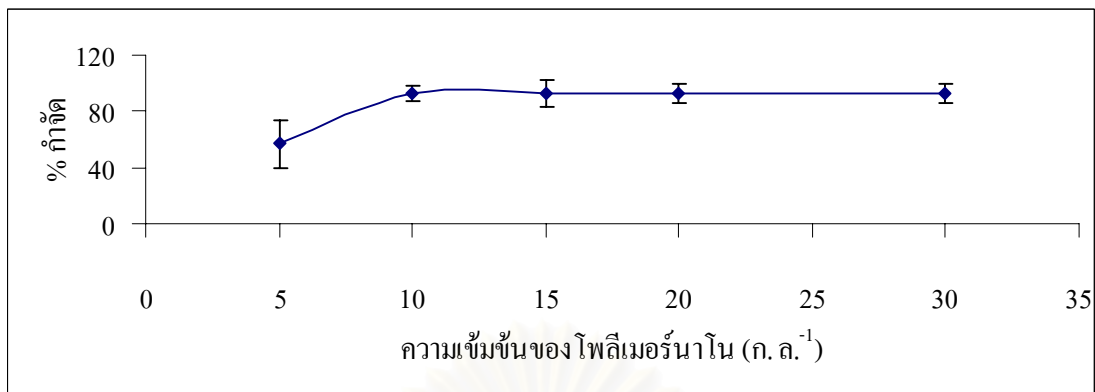


คีลิติ

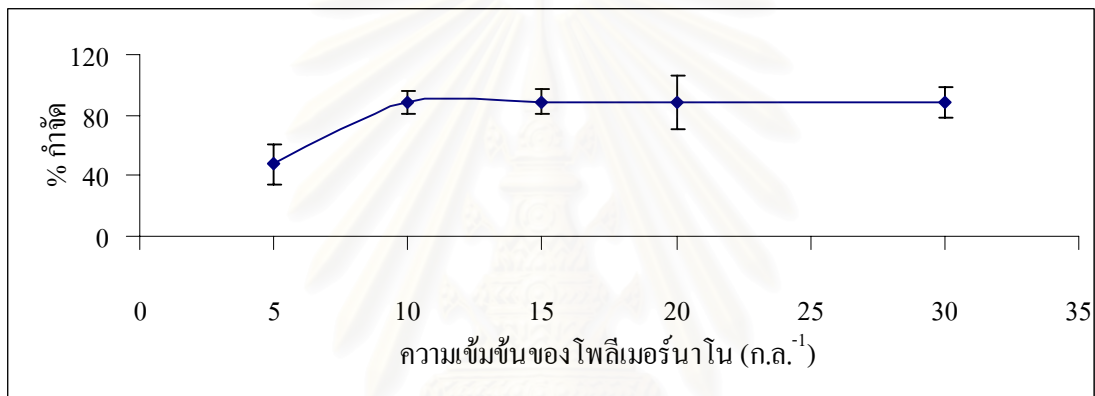


รูปที่ 4.2 (ต่อ)

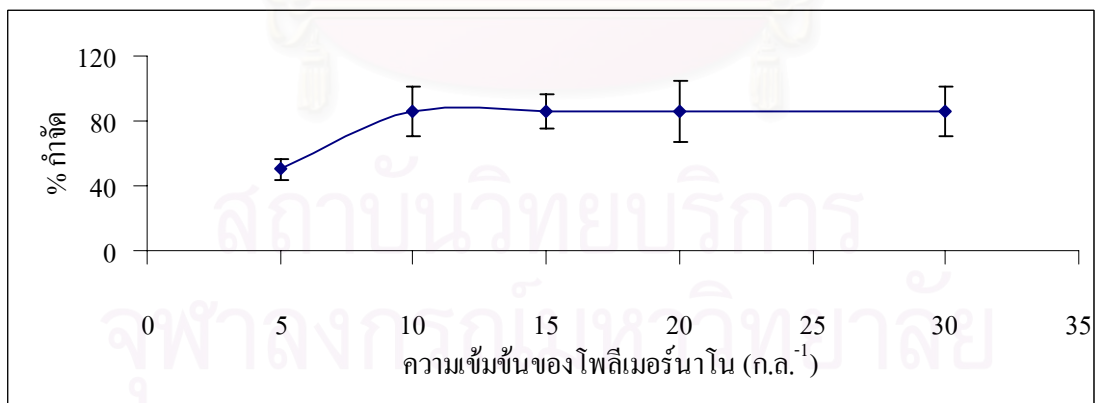
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์



เฮปตะคลอไรด์

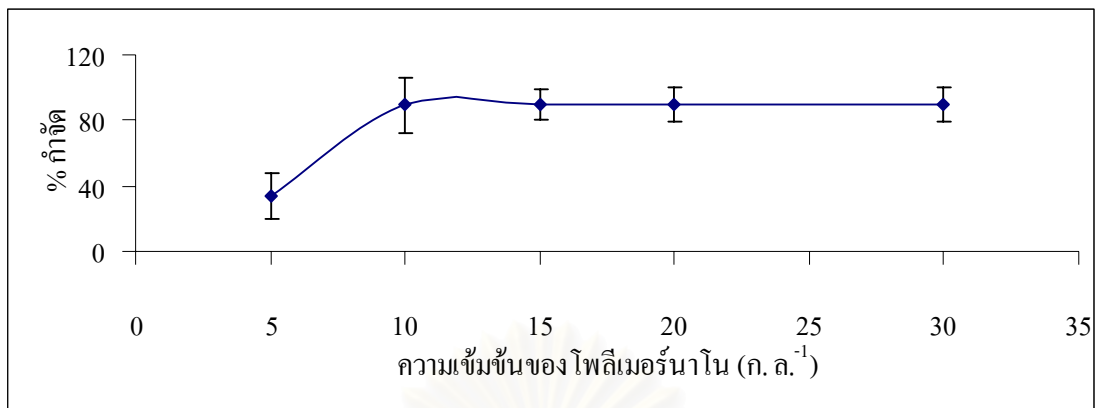


อัลดริน

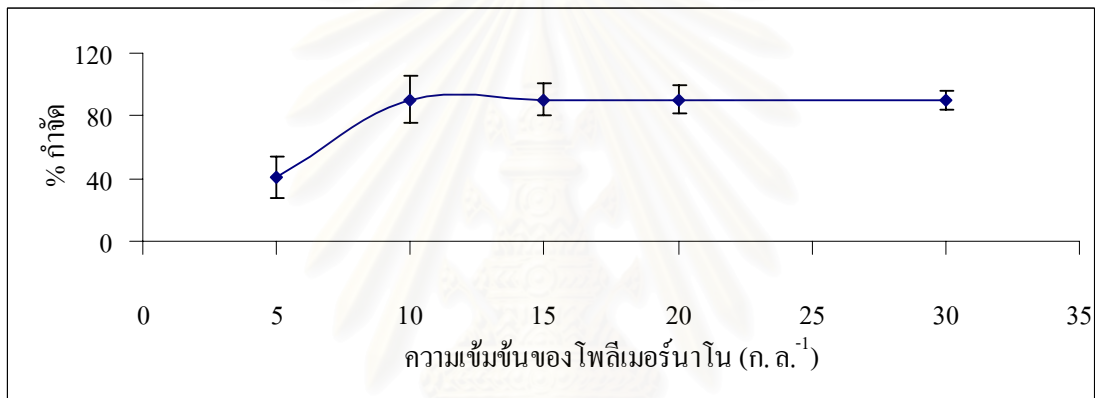


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกจากดินชนิดที่ 5 (30 g.) ที่ใส่สารออกแกนนอลอรินไว้ 0.06 mg. (2 mg. kg.⁻¹) กับความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโนที่แช่ไว้ในดิน 48 h. ก่อนชะด้วยน้ำแยกอออน

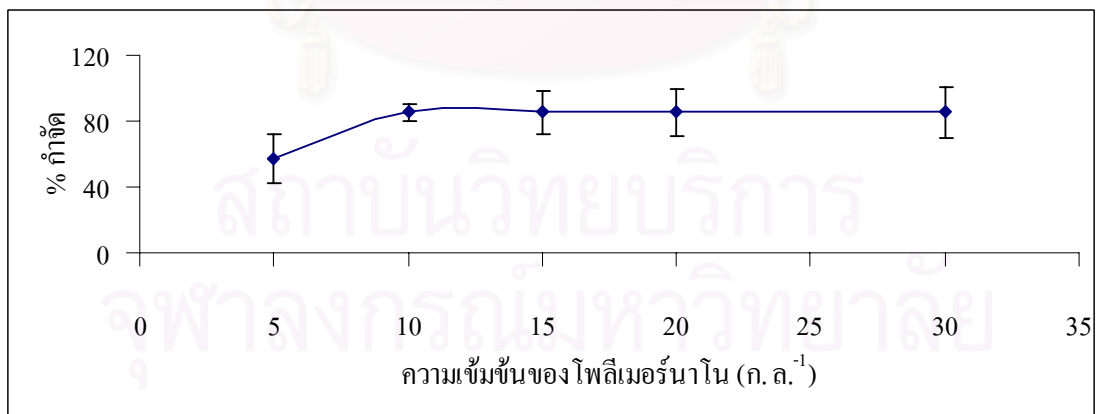
คีลคริน



เอ็นคริน



คีคีที



รูปที่ 4.3 (ต่อ)

โพลีเมอร์นอกเหนือจากระยะเวลาสัมผัส ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายนาโนแล้ว ปริมาตรระหว่างตัวดูดซับกับตัวปนเปื้อน (ไม่ใช่สารปนเปื้อนในที่นี้คือ ดิน) มีอิทธิพลต่อการกำจัด สารปนเปื้อนเช่นกัน

4.3.4 ชะดินประเภทต่างๆด้วยโพลีเมอร์นาโน

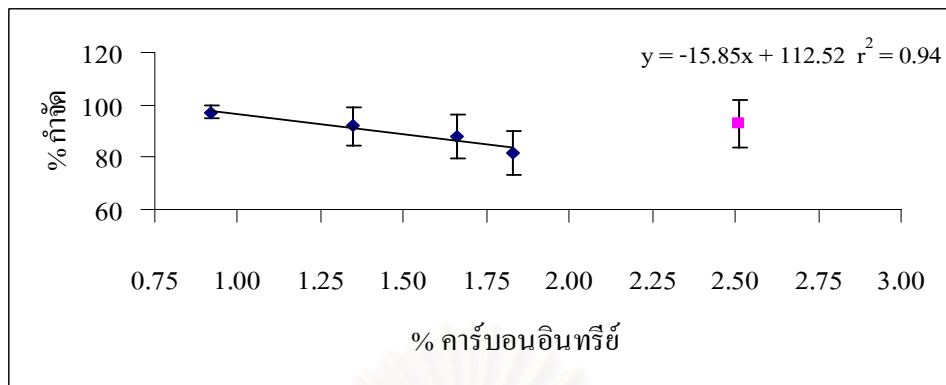
จากการชะสารทดสอบ 2 mg. kg.^{-1} ที่ใส่ในดิน 30 g. โดยใช้ดินประเภทต่างๆ 5 ชนิดด้วย สารละลายโพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 g. l.^{-1} ที่ให้ประสิทธิภาพดี (หัวข้อ 4.3.3) และไม่สิ้นเปลืองโพลีเมอร์นาโน (หัวข้อ 4.3.3) และแช่สารละลายไว้ 48 h. (หัวข้อ 4.3.2) เพื่อชะเอาสารละลายดังกล่าว ออกมาและทำการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คาร์บอนอินทรีย์ในดินกับประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัด (ดูรูปที่ 4.4) พบว่าในสารทดสอบทุกตัวให้ผล เหมือนกัน กล่าวคือไปในทิศทางเดียวกันดังนี้ คาร์บอนอินทรีย์ในดินที่มากขึ้นดูดซับสารปนเปื้อน ไปได้ดี ทำให้กำจัดสารออกมาได้น้อยลง ยกเว้นตัวอย่างดินที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์สูงสุดในดิน ทั้งหมดน่าที่จะดูดซับสารได้ดี แต่กลับกำจัดสารได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินชนิดที่ 4 ที่มีคาร์บอน อินทรีย์น้อยกว่า และปรากฏว่าสารทดสอบทุกชนิดให้ผลในลักษณะดังกล่าวแล้วไปในทางเดียวกัน นี้ ในกรณีดินชนิดที่ 5 เป็นดินที่เก็บจากสวนในบริเวณบ้านชาวไร่ จากการสัมภาษณ์เจ้าของบ้าน พบว่ามีการเติมปุ๋ยคอกในสวนและการนำดินมาถมเป็นครั้งคราวเป็นหย่อมๆ จึงคาดว่าในการเก็บ ตัวอย่างดินนี้จะใช้ความลึกจากผิวดิน $10-15 \text{ h.}$ จะทำให้ได้สัดส่วนของส่วนประกอบเนื้อดิน ผิดพลาดได้ โดยทำให้ปริมาณดินเหนียวที่วิเคราะห์ได้ผิดพลาด (ดูตารางที่ 4.3)

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินชนิดต่างๆกับประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัด จะเห็นได้ ว่าเนื้อดินเหนียวมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับ/กำจัดสารทดสอบทั้งหมดในเชิงผกผัน กล่าวคือ ปริมาณเนื้อดินเหนียวที่มากขึ้นทำให้ดูดซับ/กำจัดสารออกมาได้น้อยลง กรณีดินชนิดที่ 4 แม้จะมี คาร์บอนอินทรีย์ (1.8%) แต่มีเนื้อดินเหนียวมากที่สุด (64.4%) ขณะที่ดินชนิดที่ 5 มีคาร์บอนอินทรีย์ (2.5%) และเนื้อดินเหนียว (28.4%) ผลรวมทำให้ดินชนิดที่ 4 มีการดูดจับกับสารได้ดีกว่าดินชนิดที่ 5 ส่งผลให้กำจัดออกยากกว่า

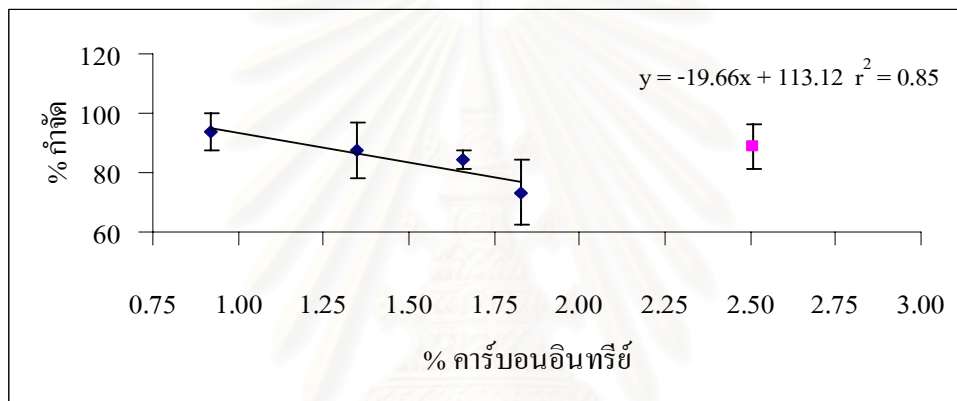
สำหรับทราย และทรายแป้งเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับดินเหนียว โดยที่ทิศทางความสัมพันธ์ ของปริมาณทราย และทรายแป้ง กับ % ดูดซับ/กำจัดสารไปในทิศทางเดียวกัน

โดยสรุปแล้ว ประสิทธิภาพดูดซับสารทดสอบจากดินทั้ง 5 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่าง 85.2-92.86% (ตารางที่ 4.4) เมื่อพิจารณาเรียงอัตราดูดซับสารจากมากไปน้อยในทุกตัวอย่างดิน พบว่าเป็นไปใน รูปแบบเดียวกัน ดังนี้ เบนซีน>เฮกซะคลอไรด์> เอ็นทริน> คีลทริน>เฮปตะคลอไรด์>อัลทริน>ดีดีที ซึ่ง สอดคล้องกับค่า $\log K_{oc}$ ที่เพิ่มขึ้นของสารทดสอบแต่ละชนิด แต่ไม่สัมพันธ์กับค่า MW

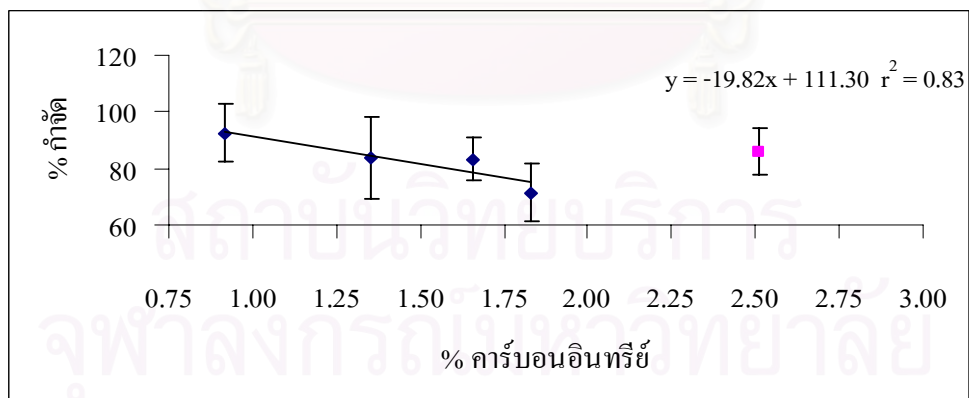
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์



เฮปตะคลอริ์

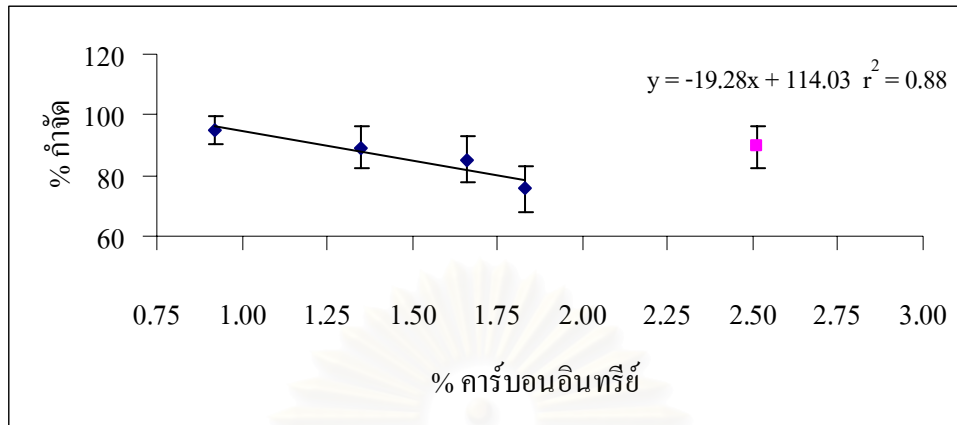


อัลดริน

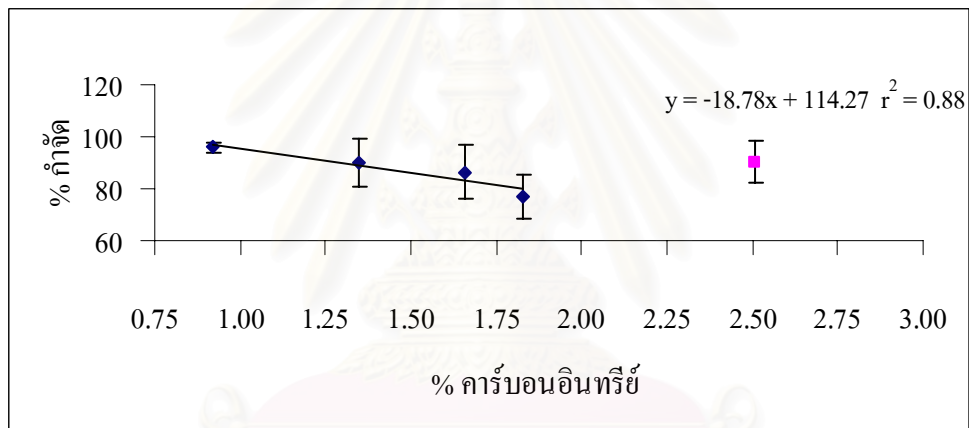


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนออกจากดินชนิดที่ 1- 5 กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน

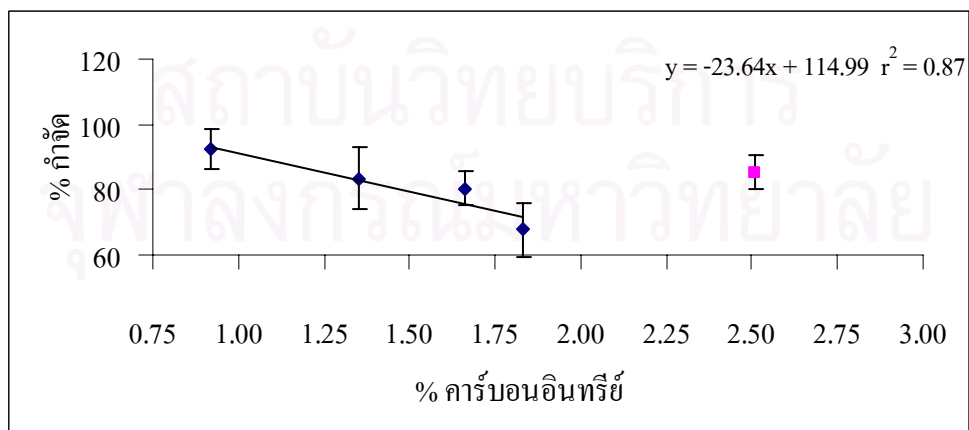
คีลคริน



เอนคริน

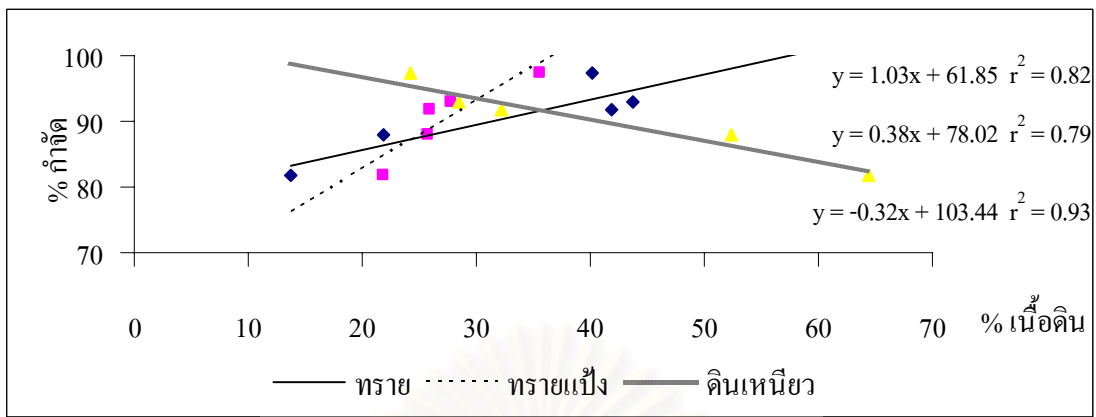


คีลที

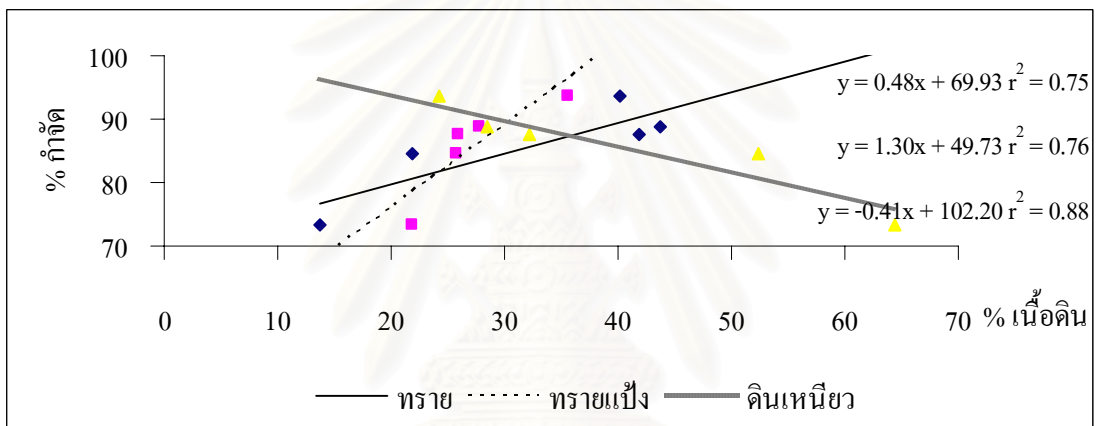


รูปที่ 4.4 (ต่อ)

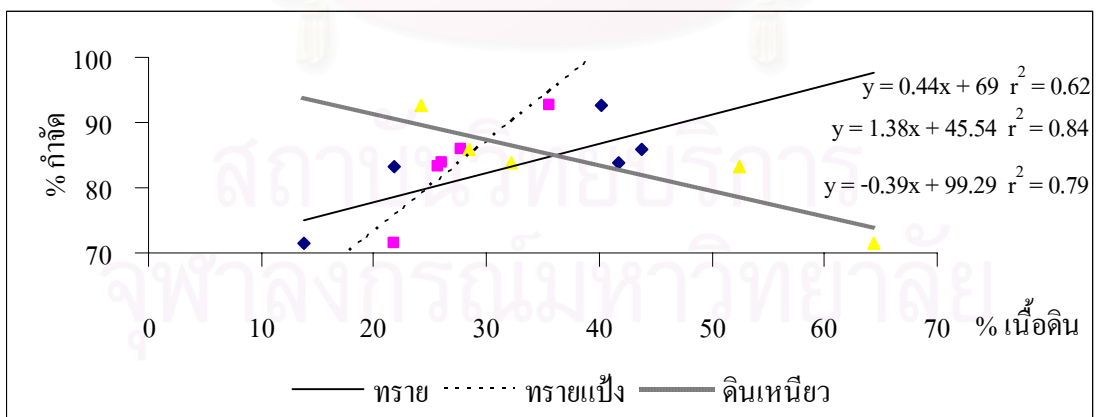
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์



เฮปตะคลอไรด์

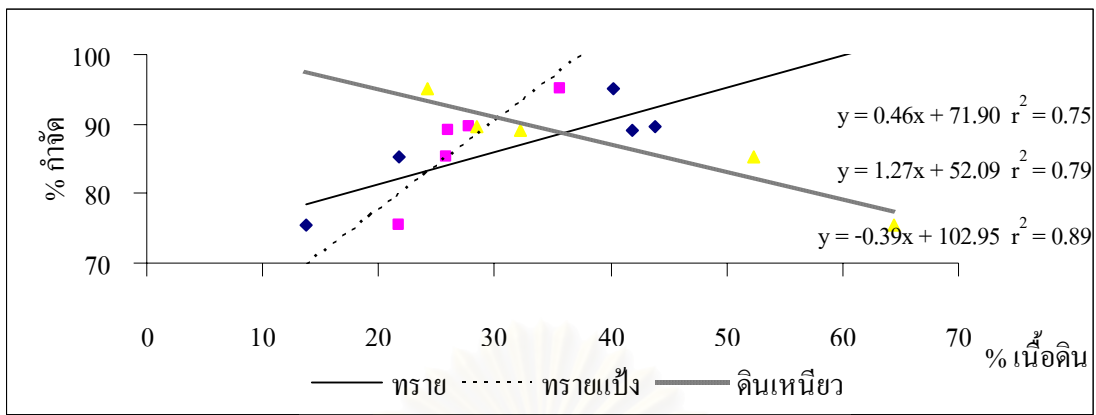


อัลดริน

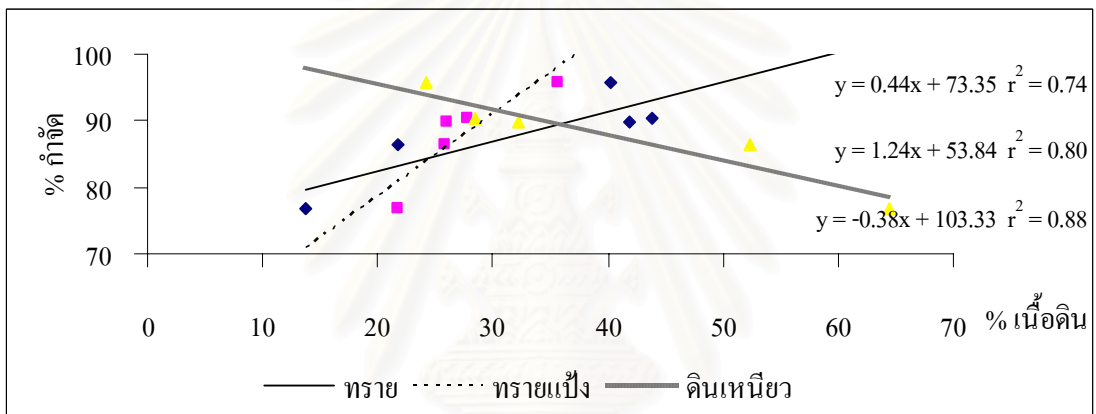


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนกับชนิดเนื้อดิน

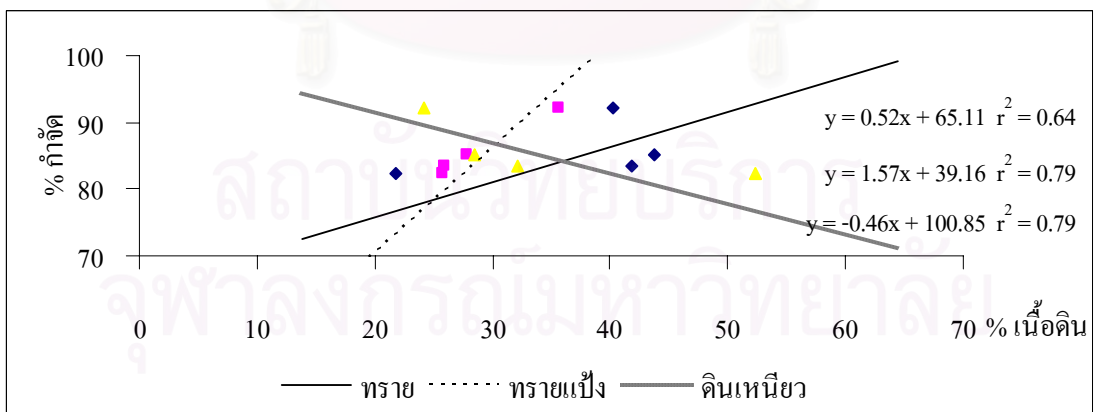
คิลดริน



เอนดริน



คิสิที



รูปที่ 4. 5 (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 น้ำหนัก (mg.) และประสิทธิภาพ กำจัดของสารออกแทนโนคลอรีนออกจากดิน 0.06 mg. (2 mg. kg.⁻¹) โดยใช้สารละลายโพลีเมอร์นาโน 10 g. l.⁻¹ แฉะในดิน 48 h. ก่อนชะออกด้วยน้ำแยกอออน

สาร	ชนิดดิน									
	1		2		3		4		5	
	น้ำหนักสาร	% กำจัด	น้ำหนักสาร	% กำจัด	น้ำหนักสาร	% กำจัด	น้ำหนักสาร	% กำจัด	น้ำหนักสาร	% กำจัด
บีเอชซี	0.0583	97.26	0.0550	91.80	0.0527	87.86	0.0491	81.84	0.0557	92.86
เฮปตะคลอร์	0.0562	93.71	0.0525	87.65	0.0506	84.41	0.0440	73.40	0.0532	88.68
อัลดริน	0.0555	92.51	0.0503	83.85	0.0499	83.30	0.0428	71.36	0.0515	85.87
ดีลดริน	0.0570	95.10	0.0534	89.09	0.0511	85.29	0.0453	75.57	0.0537	89.59
เอ็นดริน	0.0575	95.87	0.0539	89.91	0.0518	86.34	0.0460	76.80	0.0541	90.25
ดีดีที	0.0553	92.20	0.0500	83.36	0.0482	80.46	0.0406	67.73	0.0511	85.25

4.4 การพยากรณ์ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัด

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารทดสอบ ปริมาณดินเหนียว ทราย ทรายแป้ง และคาร์บอนอินทรีย์ในดิน ตลอดจนสมบัติของสารทดสอบ ได้แก่ $\log K_{OC}$, $\log K_{OW}$, MW, S ได้นำมาหาความสัมพันธ์กับร้อยละของการดูดซับ/กำจัด เพื่อประเมินผลถึงความเป็นไปได้ในการใช้ความสัมพันธ์เหล่านี้ในการพยากรณ์ OCs พบว่า

(1) คาร์บอนอินทรีย์ในดินสามารถใช้พยากรณ์ได้ (ดูรูปที่ 4.4) เนื่องจากคาร์บอนอินทรีย์เป็นคาร์บอนอินทรีย์รวมทั้งหมดที่มีอยู่ในดินและมีบทบาทหลักในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์สำหรับปริมาณดินเหนียว ทราย ทรายแป้ง ไม่สามารถใช้พยากรณ์ได้เนื่องจากดินแต่ละประเภทประกอบด้วยเนื้อดินหลายประเภทสัดส่วนต่าง ๆ กัน แต่ละประเภทมีอิทธิพลมากน้อยในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์แตกต่างกัน ดังเห็นได้จากดินชนิดที่ 5 ที่มีคาร์บอนอินทรีย์มากที่สุดซึ่งได้มาจากการใส่ปุ๋ยหมักแต่ให้ผลการดูดซับไม่แปรผันตรง คาดว่าน่าจะมาจากคาร์บอนอินทรีย์จากปุ๋ยหมักไม่อยู่ในฟอร์มที่จะจับสารทดสอบได้ดี ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ซึ่งใช้พยากรณ์อาจมีความไม่แน่นอนในกรณีดังกล่าว (ตารางที่ 4.5)

(2) ค่า $\log K_{OC}$ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของสาร OCs แต่ละชนิด และบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระหว่างไขมัน (ซึ่งใช้ออกทานอลแทนไขมันสัตว์) กับคาร์บอนในดินใช้พยากรณ์ได้ (ดูรูปที่ 4.6) ความถูกต้อง แม่นยำของสมการขึ้นกับค่าของ $\log K_{OC}$ ด้วย ซึ่งอ้างอิงงานวิจัยและมีค่าค่อนข้างแตกต่างเล็กน้อยจากเอกสารวิจัยหลายฉบับ (เมื่อเทียบกับค่าของ S และ $\log K_{OW}$) รูปที่ 4.7 แสดงภาพรวมความสัมพันธ์อาจใช้พยากรณ์ได้ดีกว่ารูปที่ 4.6 เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากดินทั้ง 5 ชนิด นั่นคือ $y = -2.03x + 96.29$, $r^2 = 0.88$ (y -%ดูดซับ/กำจัด, x - $\log K_{OC}$)

(3) MW, S และ $\log K_{OW}$ ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้ ทั้งนี้เพราะ

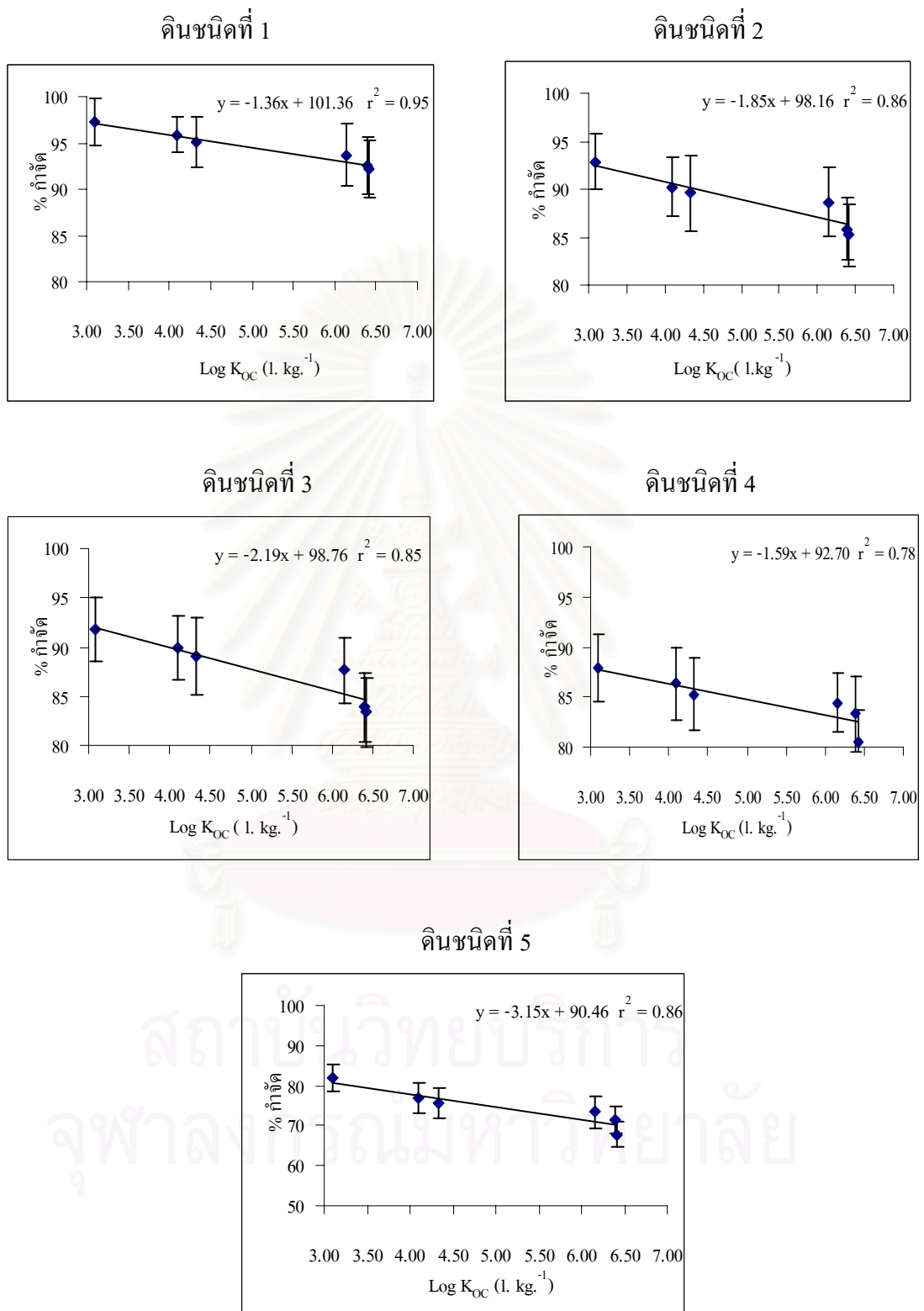
-ค่า MW ที่เพิ่มขึ้นของสารออลิโกเมอร์โนคลอรีน มิได้เพิ่มขึ้นตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายกัน (ยกเว้นอัลดริน ดีลดริน เอ็นดริน และเฮปตะคลอร์) การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลไม่ใช่การเพิ่มขององค์ประกอบโครงสร้างย่อยที่เหมือนกัน ซึ่งผิดกับโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มอัลดริน ดีลดริน เอ็นดริน และเฮปตะคลอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายกัน หรือกลุ่ม PAHs ซึ่ง MW ที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่ เป็นการเพิ่มวงเบนซีน (benzene ring) ซึ่งหมายถึงสมบัติของสารจะแปรเปลี่ยนไป อัตราเพิ่มของวงเบนซีนและ MW ที่เพิ่มขึ้นด้วย

-ค่า S และ $\log K_{OW}$ ของสารทดสอบในเอกสารงานวิจัยหลายๆชิ้นตั้งแต่ พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา จนถึงปัจจุบันพบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก (ดูตารางที่ 2.1) ขึ้นกับวิธีการทดลอง เงื่อนไขการทดลอง

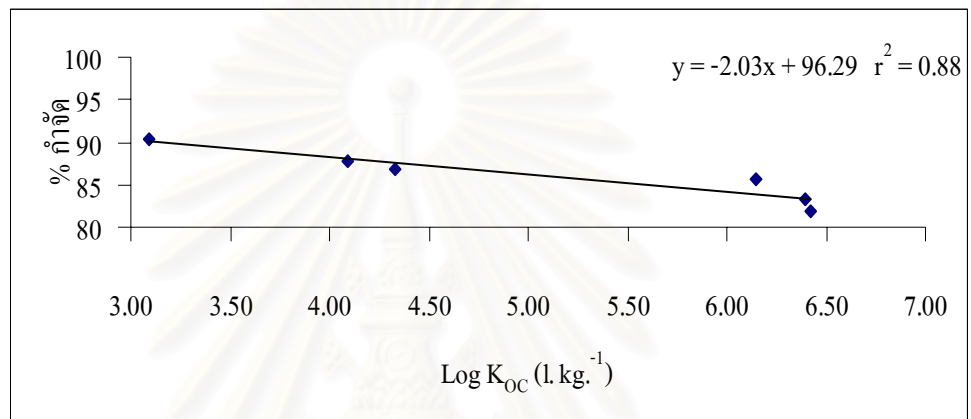
ตารางที่ 4.5 สมการพยากรณ์ร้อยละสารออกแทนโนคลอรีนในดินที่ดูดซับไว้ได้ (Y) จากร้อยละคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (x)

สาร	สมการเชิงเส้น	r^2
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์	$Y = -15.85x + 112.52$	0.94
เฮปตะคลอรั	$Y = -19.66x + 113.12$	0.85
อัลคริน	$Y = -19.82x + 111.30$	0.83
คิลคริน	$Y = -19.28x + 114.03$	0.88
เอ็นคริน	$Y = -18.78x + 114.27$	0.88
ดีดีที	$Y = -23.64x + 114.99$	0.87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนจากดิน 5 ชนิด กับ $\text{Log } K_{\text{OC}}$ ของสาร



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดเจือปนสารออกแทน โคลอรีนจากดินทั้ง 5 ชนิด กับค่า Log K_{OC} ของสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความละเอียดในการตรวจวัด วิเคราะห์ ฯลฯ ดังนั้นทำให้ไม่สามารถเลือกค่าใดมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ได้

(4) หากพิจารณาเฉพาะกลุ่มอัลตริน คีลคริน เอ็นคริน และเฮปตะคลอร์ พบว่ามีความสัมพันธ์กันกับ MW (รูปที่ 4.8) โดยที่ความสัมพันธ์ที่ได้จากดินทั้ง 5 ชนิดแสดงไว้ใน รูปที่ 4.9 และดังสมการต่อไปนี้คือ $y = -2.03x + 96.29$, $r^2 = 0.88$ (y-%ดูดซับ/กำจัด, x-MW)

สำหรับค่า S และ $\log K_{ow}$ ซึ่งหาความสัมพันธ์ไม่ได้เช่นกันเนื่องจากค่า S และ $\log K_{ow}$ มีหลายค่ามาก

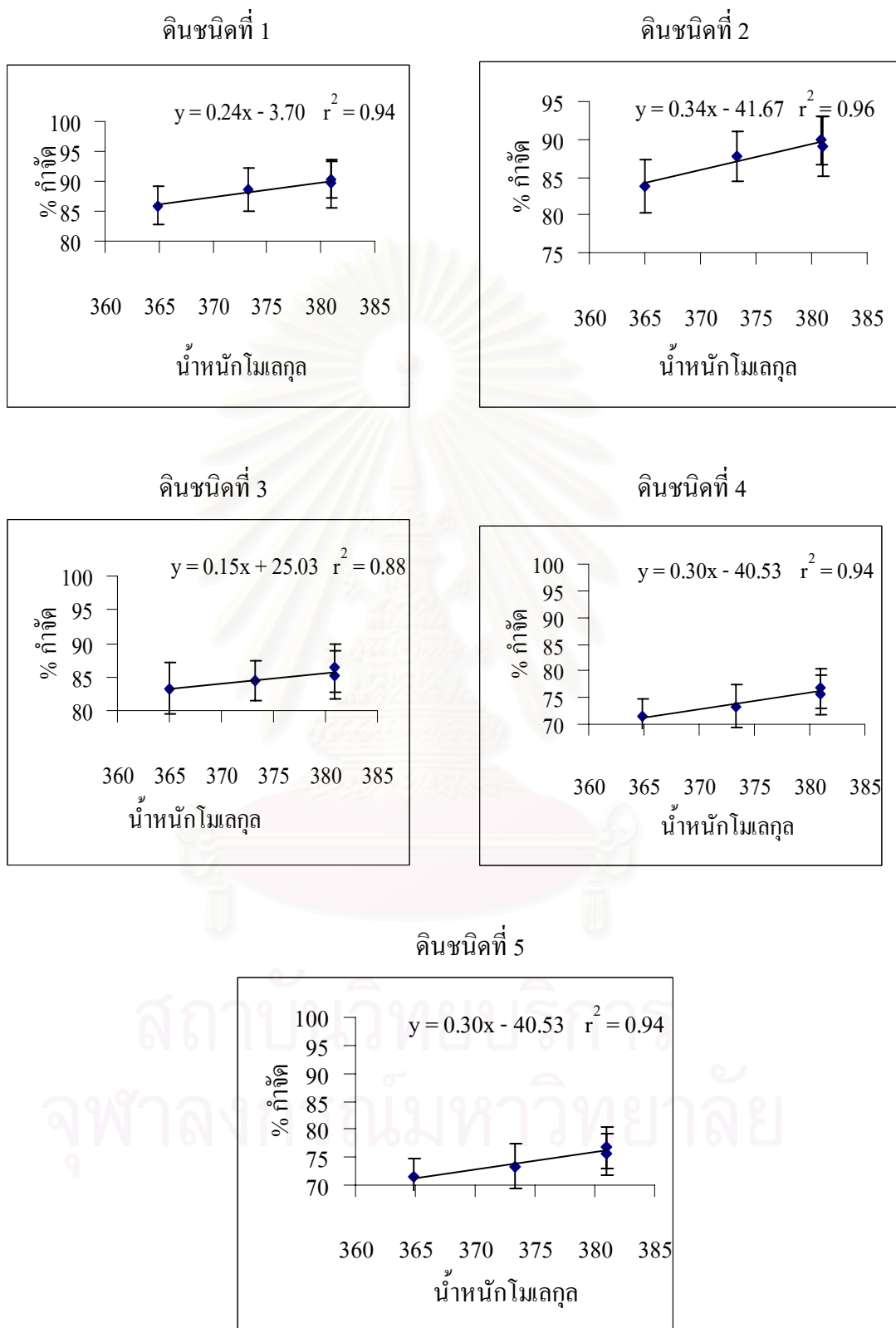
4.5 ทดสอบโมเดลพยากรณ์

4.5.1 สมบัติของดินปนเปื้อน

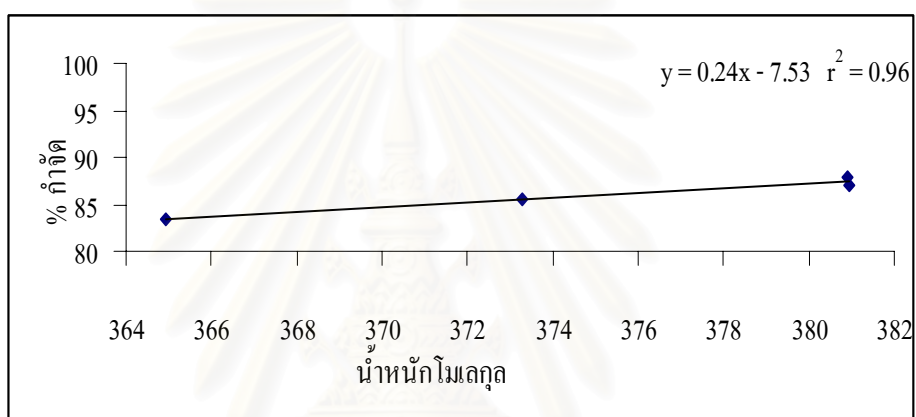
ดินปนเปื้อน 3 ตัวอย่าง (ดินชนิดที่ 6-8) ที่นำมาใช้เพื่อทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการทดลองกำจัด พบว่าสมบัติสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ/กำจัด (ตารางที่ 4.6) ได้แก่ คาร์บอนอินทรีย์ 0.21-0.7 % และดินเหนียว 4.8-10.5% ขณะที่ดินที่ใช้ทดสอบมีคาร์บอนอินทรีย์ 0.9-2.5% และดินเหนียว 24.2-64.4% ซึ่งค่อนข้างต่ำกว่าสารทดสอบมาก มีผลให้การดูดซับ/กำจัดสารง่ายขึ้น

4.5.2 ประสิทธิภาพดูดซับจากการพยากรณ์และจากการตรวจวัด

จากผลการทดลองดูดซับ/กำจัดสารปนเปื้อนออกจากดิน 3 ตัวอย่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และผลการดูดซับ/กำจัดที่ได้จากการพยากรณ์โดยใช้คาร์บอนอินทรีย์ MW และ $\log K_{oc}$ เป็นดัชนีได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ความแตกต่างของการใช้ดัชนีทั้งสามพยากรณ์แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ประเมินได้ว่าค่าที่พยากรณ์ได้มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองประมาณ 5% ทั้งในกรณีของ $\log K_{oc}$ และ MW ส่วนคาร์บอนอินทรีย์มีความแตกต่างสูงกว่า (~20%) ซึ่งยอมรับไม่ได้ ดังนั้น สามารถใช้ค่า MW และ $\log K_{oc}$ ในการพยากรณ์การดูดซับภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองในการศึกษา นี้ นั่นคือ ความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์นาโนที่ 10 g. l.⁻¹ ปริมาณ 1 PV ระยะเวลาสัมผัส 48 h. และความเข้มข้นสารปนเปื้อน 2 mg. kg.⁻¹ อย่างไรก็ตามหากความเข้มข้นสารปนเปื้อนมากกว่านี้สามารถคำนวณประเมินความเข้มข้นของสารละลายนาโนที่ต้องใช้เพื่อให้สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในอัตราเดิมได้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กักน้ำสารออกแกนนอกเซลล์จากดิน 5 ชนิด กับน้ำหนักรีดของสาร



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดเฉลี่ยสารออกเทน โนคลอรีนจากดินทั้ง 5 ชนิด กับน้ำหนักโมเลกุลของสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของดินปนเปื้อน

ตัวอย่าง ดิน	ชนิด เนื้อดิน	% ส่วนประกอบเนื้อดิน			pH	CEC (mol. kg. ⁻¹)	% คาร์บอนอินทรีย์
		ทราย	ทรายแป้ง	ดิน เหนียว			
6	sand	55.00	46.00	5.00	5.20	6.78	0.21
7	sandy loam	52.63	36.84	10.53	5.92	12.52	0.44
8	sand	71.43	23.81	4.76	5.12	4.50	0.72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนปนเปื้อนในดินที่เก็บจากภาคอีสานโดยใช้โพลีเมอร์นาโนเข้มข้น 10 g. l.⁻¹ แช่ในดิน 48 h. ก่อนชะออกด้วยน้ำแยกอื้ออน

สาร	ดินชนิดที่								
	6			7			8		
	ก่อน	หลัง	% ดูดซับ	ก่อน	หลัง	% ดูดซับ	ก่อน	หลัง	% ดูดซับ
บีเอชซี	-	-	-	0.0029	0.0027	93.46	0.0341	0.0316	92.58
เฮปตะคลอรั	0.0492	0.0438	88.96	0.0029	0.0026	88.06	0.0341	0.0292	85.57
อัลดริน	0.0154	0.0131	85.17	0.0160	0.0134	83.54	0.0253	0.0208	82.12
ดีลดริน	0.0101	0.0092	90.37	0.0118	0.0105	88.73	-	-	-
เอ็นดริน	0.0420	0.0383	91.17	0.0494	0.0445	90.08	-	-	-
ดีดีที	0.0118	0.0098	83.19	0.0011	0.0009	82.43	0.1096	0.0882	80.51

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบร้อยละของประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดสารออกแทนโนคลอรีนปนเปื้อนในดินที่ได้จากการทดลองและจากการพยากรณ์โดยใช้คาร์บอนอินทรีย์ MW และ $\log K_{oc}$ เป็นดัชนี

สารทดสอบ	ชนิดดิน											
	6				7				8			
	ทดลอง	C ¹	MW ²	$\log K_{oc}$ ³	ทดลอง	C	MW	$\log K_{oc}$	ทดลอง	C	MW	$\log K_{oc}$
พีเอชซี	-	-	-	-	93.46	105.55	62.27	89.47	92.58	101.11	62.27	89.47
เฮปตะคลอรั	88.96	108.99	82.06	87.40	88.06	104.47	82.06	87.40	85.57	98.96	82.06	87.40
อัลคริน	85.17	107.14	80.05	88.78	83.54	102.58	80.05	88.78	82.12	97.03	80.05	88.78
ดีลคริน	90.37	109.98	83.89	87.89	88.73	105.55	83.89	87.89	-	-	-	-
เอ็นคริน	91.17	110.33	83.89	87.64	90.08	106.01	83.89	87.64	-	-	-	-
ดีดีที	83.19	110.03	77.55	85.79	82.43	104.59	77.55	85.79	80.51	97.97	77.55	85.79

¹ ใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นดัชนี ตามสมการในตารางที่ 4.5

² ใช้ MW เป็นดัชนี ตามสมการในรูปที่ 4.9

³ ใช้ $\log K_{oc}$ เป็นดัชนี ตามสมการในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของความแตกต่างของประสิทธิภาพดูดซับ/กำจัดที่ได้จากการพยากรณ์ เทียบกับร้อยละที่ได้จากการทดลองดูดซับ/กำจัดจริง

สาร	ดินชนิดที่											
	6				7				8			
	ทดลอง	C ¹	MW ²	log K _{oc} ³	ทดลอง	C	MW	log K _{oc}	ทดลอง	C	MW	log K _{oc}
บีเอชซี	-	-	-	-	93.46	12.93	-	-4.27	92.58	9.21	-	-3.36
เฮปตะคลอร์	88.96	22.52	-7.75	-1.76	88.06	18.63	-6.81	-0.75	85.57	15.65	-4.10	2.14
อัลดริน	85.17	25.79	-6.01	4.24	83.54	22.79	-4.17	6.27	82.12	18.16	-2.52	8.11
ดีลดริน	90.37	21.70	-7.17	-2.75	88.73	18.95	-5.45	-0.95	-	-	-	-
เอ็นดริน	91.17	21.01	-7.98	-3.87	90.08	17.68	-6.87	-2.71	-	-	-	-
คีคีที	83.19	32.26	-	3.13	82.43	26.88	-	4.08	80.51	21.69	-	6.56

¹ ใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นดัชนี ตามสมการในตารางที่ 4.5

² ใช้ MW เป็นดัชนี ตามสมการในรูปที่ 4.9

³ ใช้ log K_{oc}เป็นดัชนี ตามสมการในรูปที่ 4.7

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 ชีตจำกัดการใช้โพลีเมอร์นาโน

ในการสังเคราะห์สารในแต่ละครั้ง สารตั้งต้น อุณหภูมิ ระยะเวลา และความเร็วในการกวนสาร จะมีผลต่อขนาดอนุภาคและปริมาณที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละครั้ง ดังนั้นการควบคุมอย่างเคร่งครัดในปัจจุบันดังกล่าวขณะสังเคราะห์จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันมากกว่านี้ และทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีก กรณีที่ได้มีวัตถุประสงค์เฉพาะเจาะจงต้องมีขนาดนาโน อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ที่ใหญ่กว่านาโนดังที่สังเคราะห์ได้ในการศึกษานี้มีขนาดใหญ่สุด 915 nm. หรือ 0.915 μm . นั้น ก็ยังคงให้สมบัติการดูดซับ หรือ กำจัด แม้จะไม่ดีเท่ากับขนาดนาโนก็ตาม การนำไปใช้งานในปริมาณมากที่ต้องการขนาดเหมือนกันสามารถนำการสังเคราะห์แต่ละครั้งมารวมกัน แล้วจึงนำไปวัดขนาด และ/หรือ นำไปกรองเอาขนาดที่ใหญ่ออกได้ตามต้องการ

และด้วยความที่อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมาก เล็กกว่าขนาดของอนุภาคดิน ทำให้อนุภาคนาโน ถูกกักไว้ในอนุภาคของดินเหนียวได้ ผลการศึกษานี้สรุปว่าความเข้มข้นของสารละลายนาโนที่ 10 g. l^{-1} ให้การกลับคืนสูงสุดเมื่อเทียบกับ 5-30 g. l^{-1} ในการนำไปใช้งานจึงต้องคำนึงถึงประเด็นการกลับคืนซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโน ทั้งจะช่วยให้ไม่สูญเสียโพลีเมอร์นาโนที่อยู่ในเนื้อดินไปโดยใช่เหตุ ปริมาณอนุภาคนาโนที่กักไว้ได้น่าจะขึ้นกับอนุภาคดินเหนียวโดยคาดว่าจะมีความสัมพันธ์กันในเชิงบวก การศึกษาต่อไปจึงน่าจะทำการยืนยันในประเด็นนี้เพื่อให้ทราบสมการความสัมพันธ์เนื่องจากการศึกษานี้ใช้ดินชนิดเดียวทดสอบการกลับคืน

5.2 อิทธิพลของสมบัติของดินต่อการดูดซับ

สมบัติของดิน ได้แก่ ปริมาณทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว และคาร์บอนอินทรีย์ มีผลต่อการดูดซับสารออกแทนโกลอรีนได้มากน้อย โดยที่ปริมาณอนุภาคดินเหนียว และคาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ของดิน แต่เป็นไปในทางตรงกันข้ามกับการกำจัดสารออกจากดินของโพลีเมอร์นาโน สำหรับทราย และทรายแป้งไม่สามารถดูดซับสารได้ดีจึงทำให้โพลีเมอร์นาโนสามารถกำจัดหรือดูดซับไปได้ง่าย อย่างไรก็ตามการทดลองอนุภาคของดินสามารถสกัดออกมามาได้จากคอลัมน์ทำให้ค่าที่อ่านได้มีความเป็นไปได้ที่จะค่าสูงเกินจริง

5.3 อัตราการไหลของโพลีเมอร์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง

ในการชะสารประกอบอินทรีย์ออกจากดิน อัตราการไหลเร็วเข้ามีผลต่อระยะเวลาสัมผัสของสารกับโพลีเมอร์นาโน โดยที่สัมผัสนานประสิทธิภาพการดูดซับออกจากดินดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ อัตราการไหลที่เร็วไปจนดินเกิดการกระเพื่อม เวลาชะออกจะทำให้สูญเสียเนื้อดินไปในน้ำชะด้วย ดังนั้นแนะนำว่าควรชะสารละลายโพลีเมอร์นาโนในคอลัมน์ดิน แล้วจึงปล่อยน้ำค่อยๆไหลออกไป ผลการทดลองสรุปว่ามี ณ เวลาหนึ่งที่ทำให้การกำจัดหรือดูดซับสารออกจากดินมีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือ ณ เวลาสั้นจะให้ประสิทธิภาพดูดซับสารจากดินหรือกำจัดออกจากดินต่ำ แต่ถ้านานไปก็ทำให้เสียเวลาเพราะไม่ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ช่วงเวลาทดลองที่ 4-120 h. นั้นที่ 48 h. โพลีเมอร์นาโนจะดูดซับได้ดีที่สุดในทุกสารอแกเนโนคลอรีนที่ทดสอบ

5.4 อัตราการดูดซับของโพลีเมอร์นาโน

สารละลายโพลีเมอร์นาโนที่ความเข้มข้น 10 g. l.^{-1} ให้การดูดซับสารอแกเนโนคลอรีนทุกตัวที่ทดสอบได้ดีที่สุด สามารถดูดซับสารได้ 85.2-92.86% ใช้ความเข้มข้นสูงกว่านี้ทำให้สิ้นเปลืองสารละลาย โดยที่อัตราการดูดซับเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้เบนซีนเฮกซะคลอไรด์ > เอ็นคริน > ดีลคริน > เฮปตะคลอไรด์ > อัลคริน > ดีดีที ซึ่งสอดคล้องกับค่า $\log K_{oc}$ ที่เพิ่มขึ้นของสารทดสอบแต่ละชนิด แต่อัตราดูดซับไม่สัมพันธ์กับค่า MW

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของสารอแกเนโนคลอรีนและดินต่อการดูดซับออกจากดิน

สมบัติของดินที่มีความสัมพันธ์กับการดูดซับโดยโพลีเมอร์นาโน ได้แก่ ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว คาร์บอนอินทรีย์ โดยที่ทราย ทรายแป้งมีผลด้านบวกต่อการดูดซับ ขณะที่ดินเหนียวและคาร์บอนอินทรีย์มีผลด้านลบ สำหรับสมบัติของสารอแกเนโนคลอรีนนั้น ค่า $\log K_{oc}$ มีความสัมพันธ์ไปในทางตรงข้ามกับการดูดซับ ค่า $\log K_{oc}$ ที่เพิ่มขึ้นสามารถดูดซับสารไว้กับดินได้ดี มีผลให้ดูดซับออกจากดินได้ยากหรือน้อย ค่า MW มีความสัมพันธ์ดีเฉพาะในกลุ่มสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายคลึงกัน ซึ่งได้แก่ เฮปตะคลอไรด์ อัลคริน ดีลคริน และเอ็นคริน ค่า S และ $\log K_{ow}$ ของสารแต่ละชนิดมีค่าต่างๆ จึงไม่สามารถนำค่าใดมาหาความสัมพันธ์ได้

เอกสารอ้างอิง

การประปานครหลวง (-) มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา <http://www.mwa.co.th/standard.html>

กรมควบคุมมลพิษ (2539). รายงานสถานการณ์สารมลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2538.

กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

กรมควบคุมมลพิษ (-ก). มาตรฐานคุณภาพน้ำ พศจิกายน 2547.

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html

กรมควบคุมมลพิษ (-ข) มาตรฐานมาตรฐานคุณภาพน้ำ พศจิกายน

2547. http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water06.html

กรมควบคุมมลพิษ (-ค). มาตรฐานคุณภาพน้ำ พศจิกายน 2547.

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water03.html

กรมควบคุมมลพิษ (-ง). มาตรฐานคุณภาพน้ำ พศจิกายน 2547.

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water02.html

กรมควบคุมมลพิษ (-จ). มาตรฐานคุณภาพน้ำ พศจิกายน 2547.

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html

กรมควบคุมมลพิษ (-ฉ). มาตรฐานคุณภาพดิน พศจิกายน 2547.

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html#s1

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย (2541ก) เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง ดีดีที (DDT).

กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย (2541ข) เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง ดีดริน

(Dieldrin). กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย (2543ก). เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง อัลดริน

(Aldrin). กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย (2543ข). เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง เฮกซะคลอโรเบน

ซีน (Hexachlorobenzene). กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย (2543ค). เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง เฮปตะคลอร์ (*Heptachlor*). กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ สิ่งแวดล้อม.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548) ปฐพีวิทยาเบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จกมล ศรีไชยและมโนรัตน์ ฤทธิ์เต็ม (2546).กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543ขปัญหา การใช้สารเคมีในพื้นที่สูงภาคเหนือ *ข่าวสารอันตรายและของเสีย* 14 (2): 5-12.

เซาท์เทอร์นมิสซิสซิปปี มหาวิทยาลัย what is polymer ?2550

<http://www.pslc.ws/macrog/kidsmac/kfloor2.htm>

นิรนาม (2547). โครงการวิเคราะห์ปัญหาสภาพความเสี่ยงในห่วงโซ่อาหารที่มีต่อผู้บริโภค: อันตรายการตกค้างสารเคมีทางการเกษตร. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรเพ็ญ วีระวัฒนานนท์ 2548) วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์ 19(2): 165-181

กัญญา จารัสกุล, ศิวาภรณ์ สกฤตเที่ยงตรง, พงศ์ศรี ไบอดุลย์, และพูลสุข หุตัทธนาสันต์ (2542). การแพร่กระจายของวัตถุมีพิษในน้ำและดินตะกอนบริเวณแม่น้ำแม่กลองและคลองแยก.

ข่าวสารวัตถุมีพิษ. 26 (2): 43-56

ศรัณย์ เกียรติมาลีสถิตย์ (2546). ปริมาณสารออกแทนโนคลอรีนในไข่แดงและความสำเร็จในการสืบพันธุ์ของนกยางเปียง ปรินญาณีพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร

สุชุม วงศ์เอก (2543). ปัญหาของสารมลพิษตกค้างยาวนานในประเทศไทย *ข่าวสารวัตถุมีพิษ* 27 (4), 27-34

Akagi, T., Baba, M., and Akashi, M (2007) Preparation of nanoparticles by the self-organization of polymers consisting of hydrophobic and hydrophilic segments: potential applications.

Polymer : 1-19.

Bayley, R.W. and Biggs C.A. (2005). Characterisation of an attrition scrubber for the removal of high molecular weight contaminants in sand. *Chem. Engineer.* 111 (1):71-79

Chu, W. and So, W.S. (2001) Modeling the two stage of surfactant-aided soil washing. *Water.Res.* 35 (3): 761-767.

Conte, P., Agretto, A., Spaccini, R. and Piccolo, A. (2005). Soil remediation: humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soil. *Environ. Pollut* 135: 515-522.

Gong, Z., Wike, B.-M., Alef, K., Li, P. and Shou, Q. (2005) Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from manufactured gas plant-contaminated soils using sunflower oil: Laboratory column experiments. *Chemosphere* 62 (5): 780-787

Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues (-) September, 2004.

<http://www.who.int/ipcs/food/jmpr/en/2004>

Karnchanasest, B. and Santisukaseam P. (2007). A preliminary study for removing phenanthrene and benzo(a)pyrene from soil by nanoparticles. *J. Appli. Sci.* 7 (21): 3317-3321

Kim, J.Y., Cohen, C., Shuler, M.L. and Lion, L.W. (2000) Use of amphiphilic polymer particles for in situ extraction of sorbed phenanthrene from a contaminated aquifer material. *Environ. Sci. Technol.*: 34: 4113-4139

Kim, J.U., Shim, S.B. and Shim, J.K. (2003) Effect of amphiphilic polyurethane nanoparticles on sorption-desorption of phenanthrene in aquifer material. *Hazard. Mater.* B98: 145-160.

Kim, J.Y., Shim, S.B., and Shim, J.K. (2004) Comparison of amphiphilic polyurethane nanoparticles to non-ionic surfactants for flushing phenanthrene from soil. *Hazard. Mater* B116: 205-212

Kiso Y., Nishimura, Y., Kitao, T. and Nishimura, K. (2000). Rejection properties of non-phenylic pesticides with nanofiltration membranes. *J. Mem. Sci.* 171: 229-237.

Liu, P. and Zhang, L. (2007). Adsorption of dyes from aqueous solutions or suspensions with clay nano-adsorbents. *Sep. Purif. Technol.*

Mackay, D., Shiu, W.Y. and Ma, K.C. (1992). *Illustrated handbook of Physical-chemical properties and Environmental Fate for organic chemical*. USA: Lewis Publisher.

Thao, V.D., Kawano M., and Tatsukawa, R. (1993). Persistent organochlorine residues in soils from Tropical and subtropical Asian countries. *Environ. Pollut.* 81 (1): 61-71

Thapinta, A. and Hudak, P.F. (2000). Pesticide use and residual occurrence in Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment* 60 : 103-114.

Tungittiplotorn, W., (2004). Engineered polymeric nanoparticles for soil remediation. *Environ. Sci. Technol* 38: 1605-1610.

Yeom, I.T., Ghosh, M.M., Cox, C.D. and Robinson, K.G. (1995). Micellar solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal-tar contaminated soils. *Environ. Sci. Technol.* 29: 3015-3021.

ภาคผนวกที่ 1 ความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโนในแต่ละ pore volume จากการชะออกจากดิน
ด้วยน้ำแยกอีออนและเปอร์เซ็นต์การกลับคืน

pore volume	ความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโน (ก. ล ⁻¹)					
	0	5	10	15	20	30
1	0	0.0150	0.0152	0.0402	0.0444	0.0525
2	0	0.0118	0.0147	0.0317	0.0388	0.0501
3	0	0.0099	0.0135	0.0298	0.0337	0.0469
4	0	0.0099	0.0110	0.0205	0.0229	0.0440
5	0	0.0090	0.0106	0.0180	0.0205	0.0335
6	0	0.0080	0.0102	0.0145	0.0171	0.0330
7	0	0.0069	0.0102	0.0136	0.0159	0.0276
8	0	0.0038	0.0100	0.0130	0.0153	0.0261
9	0	0.0006	0.0098	0.0108	0.0148	0.0199
10	0	0.0000	0.0096	0.0105	0.0145	0.0138
11	0	0.0000	0.0095	0.0082	0.0143	0.0107
12	0	0.0000	0.0095	0.0059	0.0140	0.0097
13	0	0.0000	0.0075	0.0036	0.0127	0.0084
14	0	0.0000	0.0070	0.0020	0.0086	0.0082
15	0	0.0000	0.0035	0.0019	0.0021	0.0072
16	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0052
17	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027
18	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010
19	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
รวม	0	0.0749	0.1518	0.2242	0.2896	0.4005
น้ำหนักโพลีเมอร์ที่เติม						
ทั้งหมด (ก.)		0.0800	0.1600	0.2475	0.3100	0.4800
% การกลับคืน		93.6	94.9	90.6	93.4	83.4

ภาคผนวกที่ 2. ประสิทธิภาพกำจัดสารออกแกนโนคลอรีนด้วยสารละลายโพลีเมอร์นาโนกับระยะเวลาที่แช่ในคอลัมน์ดิน (30 g.) ที่ใส่สารออกแกนโนคลอรีนไว้แล้ว (2 mg. kg.⁻¹)

สารออกแกน โนคลอรีน	ระยะเวลา (h.)	น้ำหนักสารที่กำจัด (mg.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% กำจัด
เบนซีนเฮกซะ คลอไรด์	3	0.0022	0.0005	3.68
	6	0.0062	0.0014	10.28
	12	0.0224	0.0064	37.25
	24	0.0350	0.0054	58.36
	36	0.0557	0.0033	92.89
	48	0.0557	0.0101	92.86
	72	0.0558	0.0059	92.92
	96	0.0557	0.0110	92.78
	120	0.0557	0.0098	92.88
เฮปตะคลอรั	3	0.0060	0.0023	10.03
	6	0.0081	0.0030	13.57
	12	0.0102	0.0027	16.95
	24	0.0114	0.0039	18.93
	36	0.0372	0.0087	62.07
	48	0.0532	0.0087	88.68
	72	0.0531	0.0075	88.45
	96	0.0531	0.0058	88.54
	120	0.0531	0.0078	88.58
อัลคริน	3	0.0031	(0.0019)	5.16
	6	0.0068	(0.0037)	11.39
	12	0.0108	(0.0045)	18.02
	24	0.0206	(0.0090)	34.41
	36	0.0512	(0.0118)	85.38
	48	0.0515	(0.0091)	85.87
	72	0.0515	(0.0113)	85.90
	96	0.0514	(0.0087)	85.68
	120	0.0515	(0.0128)	85.82

ภาคผนวกที่ 2. (ต่อ)

สารออกแกน โนคลอรีน	ระยะเวลา (h.)	น้ำหนักสารที่กักจัด (mg.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% กักจัด
ดีลคริน	3	0.0086	0.0068	14.39
	6	0.0106	0.0081	17.71
	12	0.0253	0.0105	42.23
	24	0.0349	0.0076	58.14
	36	0.0537	0.0085	89.42
	48	0.0538	0.0102	89.59
	72	0.0539	0.0076	89.83
	96	0.0538	0.0064	89.63
	120	0.0538	0.0081	89.66
เอ็นดริน	3	0.0029	0.0016	2.80
	6	0.0076	0.0042	10.59
	12	0.0111	0.0060	16.44
	24	0.0208	0.0118	32.66
	36	0.0554	0.0078	90.33
	48	0.0553	0.0090	90.25
	72	0.0553	0.0079	90.24
	96	0.0553	0.0066	90.24
	120	0.0553	0.0087	90.21
ดีดีที	3	0.0030	0.0016	5.03
	6	0.0069	0.0030	11.53
	12	0.0082	0.0063	13.67
	24	0.0343	0.0021	57.11
	36	0.0511	0.0067	85.24
	48	0.0511	0.0031	85.25
	72	0.0511	0.0081	85.18
	96	0.0511	0.0067	85.22
	120	0.0511	0.0056	85.25

ภาคผนวกที่ 3 ประสิทธิภาพของโพลีเมอร์นาโนที่ความเข้มข้นต่างๆในการกำจัดสารออกแทนโนคลอรีน จากดิน 30 g. ที่ใส่สารดังกล่าวไว้ 2 mg. kg.⁻¹

สารออกแทนโนคลอรีน	ความเข้มข้นของโพลีเมอร์นาโน (g. l. ⁻¹)	น้ำหนักสารที่ถูกกำจัด (mg.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	% กำจัด
เบนซีนเฮกซะคลอไรด์	5	0.0340	0.0104	56.6
	10	0.0557	0.0033	92.9
	15	0.0558	0.0056	93.0
	20	0.0557	0.0042	92.7
	30	0.0557	0.0041	92.8
เฮปตะคลอไรด์	5	0.0287	0.0080	47.8
	10	0.0532	0.0046	88.7
	15	0.0531	0.0050	88.6
	20	0.0531	0.0104	88.4
	30	0.0531	0.0060	88.4
อัลดริน	5	0.0301	0.0039	50.2
	10	0.0515	0.0091	85.9
	15	0.0515	0.0064	85.8
	20	0.0515	0.0115	85.8
	30	0.0515	0.0090	85.9
ดีลด์ริน	5	0.0202	0.0083	33.6
	10	0.0538	0.0102	89.6
	15	0.0538	0.0054	89.6
	20	0.0538	0.0065	89.6
	30	0.0538	0.0065	89.6
เอ็นดริน	5	0.0244	0.0079	40.7
	10	0.0541	0.0090	90.2
	15	0.0541	0.0062	90.1
	20	0.0541	0.0055	90.2
	30	0.0541	0.0038	90.2

ภาคผนวกที่ 3 (ต่อ)

สารออกแทนโนคลอรีน	ความเข้มข้นของ โพลีเมอร์นาโน (g.l. ⁻¹)	น้ำหนักสารที่ถูก กำจัด (mg.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% กำจัด
ดีดีที	5	0.0341	0.0088	56.9
	10	0.0511	0.0031	85.2
	15	0.0511	0.0082	85.2
	20	0.0511	0.0084	85.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย