



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

### ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยอัตรารากของดินร่วน  
ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์

Efficiency Study on Adsorption and Desorption of Atrazine onto Loamy Soils  
in Corn Field Area in Lakdan Sub-District, Nam Nao District, Phetchabun Province

นามผู้วิจัย นางสาวกนกวรรณ พาลูกา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์กณิดา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph.D. )

ประธานสาขาวิชา

( ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยอาหาราซีนของดินร่วน  
ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตำบลหลักค่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์

Efficiency Study on Adsorption and Desorption of Atrazine onto Loamy Soils  
in Corn Field Area in Lakdan Sub-District, Nam Nao District, Phetchabun Province

โดย

นางสาวกนกวรรณ พาลุกา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

กนกวรรณ พาลูกา 2553: การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อย  
อาหารจีนของดินร่วนในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว  
จังหวัดเพชรบูรณ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)  
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์, วท.ม. 83 หน้า

อาหารจีนเป็นสารกำจัดวัชพืชกลุ่มไตรอะซีนที่ถูกใช้เป็นสารควบคุมวัชพืชประเภทใบ  
กว้างและใบแคบในไร่ข้าวโพด ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของสารอาหารจีนในดิน  
ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการดูด  
ซับและการปลดปล่อยอาหารจีนของดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน จากพื้นที่ไร่  
ข้าวโพด ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ ใช้วิธีแบดซ์และใช้วิธี สเปกโทรโฟโต  
เมตริกในการตรวจวัดปริมาณอาหารจีนที่สกัดได้ที่ความยาวคลื่น 470 nm จากการศึกษาพบว่า  
ประสิทธิภาพการดูดซับอาหารจีนของดินทั้งสามชนิด เท่ากับ 55.28, 53.54 และ 21.78 เปอร์เซ็นต์  
ตามลำดับ การดูดซับของดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่างสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม  
และการดูดซับของดินตะกอนสอดคล้องกับฟรุนดิชไอโซเทอร์ม เมื่อเติมสารละลายกรดฮิวมิก  
ประสิทธิภาพการดูดซับอาหารจีนเพิ่มขึ้น เป็น 73.13, 73.13 และ 55.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ  
ประสิทธิภาพการปลดปล่อยอาหารจีนของดินทั้ง 3 ชนิด ที่เวลา 4 ชั่วโมง เท่ากับ 8.33, 18.92 และ  
53.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิจัยนี้แสดงว่า อาหารจีนถูกดูดซับในดินซึ่งสามารถทำให้  
เกิดการปนเปื้อนในไร่ข้าวโพด

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kanokwan Paluka 2010: Efficiency Study on Adsorption and Desorption of Atrazine onto Loamy Soils in Corn Field Area in Lakdan Sub-District, Nam Nao District, Phetchabun Province. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.S. 83 pages.

Atrazine is a selective triazine herbicide used to control broadleaf and grassy weed in corn field area. The use of atrazine may have caused the soil contamination and will affect both the environment and human health. This research was to study the efficiency of adsorption/desorption of atrazine onto loamy upper soil, loamy lower soil and sediment soil from corn field area in Lakdan Sub-District, Nam-Nao District, Phetchabun Province. The batch equilibrium method and a spectrophotometric at 470 nm were employed in this research. From the study, found that the efficiency of the atrazine sorbed onto the three soils were 55.28, 53.54 and 21.78 percent, respectively. Langmuir isotherm provided the best fit for loamy upper soil and loamy lower soil sorption data and Freundlich isotherm provided the best fit for sediment soil sorption data. Addition of organic material (humic acid) increase the efficiency sorption to 73.13, 73.13 and 55.56 percent, respectively. The efficiency of desorption atrazine for all of soils at 4 hour were 8.33, 18.92 and 53.54 percent, respectively. Our results suggest that attention should be paid to the atrazine sorbed to the soil which can be potentially contaminated in this corn field.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ รองกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
ที่ได้สละเวลาในการให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยเหลือการวางแผนวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับ  
นี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่  
วิจัยและอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรอนงค์ ศิวินิล ที่กรุณา  
ให้คำแนะนำที่ดี อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกานต์ นิตยพัทธ์ ที่คอยแนะนำแนวคิดที่ดีในการฝึก  
สมาธิ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ต่อไป ขอขอบคุณเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 30 และพี่น้อง  
ชาวสิ่งแวดล้อมอื่นๆ รุ่น ทุกท่าน ขอขอบคุณ คุณจิตพิชญ์ อุดมสิทธิพันธ์ และคุณชุตติกานต์ สุขเกษม  
ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัยขอขอบคุณที่  
เกิดขึ้นนี้ให้แก่คุณพ่อปรีชา คุณแม่สุพัตรา พาลุกาและครอบครัวทุกท่าน ที่คอยอบรมสั่งสอน เป็น  
กำลังใจและสนับสนุนทุกทางในการทำศึกษาวิจัย ขอขอบคุณ คุณอัมพันธ์ พาลุกาและคุณภาสวรรณ  
เรือนคำ ที่คอยเป็นกำลังใจเล็กๆ ที่มีความหมาย จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กนกวรรณ พาลุกา

ตุลาคม 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
สรุป	58
ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	60
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก การคำนวณไอโซเทอร์ม	67
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์อาหารจีนและไอโซเทอมการดูดซับ	70
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน	79
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	83

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายชื่อวัตถุอันตรายทางการเกษตร ในระหว่างปี พ.ศ. 2548-2550	9
2	คุณภาพดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ พ.ศ. 2551	48
3	อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับอาหารพืชในดินทั้ง 3 ชนิด	50
4	การดูดซับสารละลายอาหารพืชในดิน 3 ชนิด	53
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ข1	ปริมาณอาหารพืชเริ่มต้นที่ตกค้างในดิน	71
ข2	ปริมาณอาหารพืชหลังการเตรียมดินปฐมภูมิ	71
ข3	การดูดซับอาหารพืชในดินร่วนชั้นบนและพีเอช	72
ข4	การดูดซับอาหารพืชในดินร่วนชั้นล่างและพีเอช	73
ข5	การดูดซับอาหารพืชในดินตะกอนและพีเอช	73
ข6	การดูดซับอาหารพืชในดินร่วนชั้นบนที่เวลา 24 ชั่วโมง และพีเอช 6.5	73
ข7	การดูดซับอาหารพืชในดินร่วนชั้นล่างที่เวลา 24 ชั่วโมง และพีเอช 6.5	74
ข8	การดูดซับอาหารพืชในดินตะกอนที่เวลา 24 ชั่วโมงและพีเอช 6.5	74
ข9	การดูดซับอาหารพืชที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินร่วนชั้นบน ที่เวลา 24 ชั่วโมงและค่าพีเอช 6.5	74
ข10	การดูดซับอาหารพืชที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินร่วนชั้นล่าง ที่เวลา 24 ชั่วโมงและค่าพีเอช 6.5	75
ข11	การดูดซับอาหารพืชที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินตะกอน ที่เวลา 24 ชั่วโมงและค่าพีเอช 6.5	75
ข12	ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารพืชของดินร่วนชั้นบน	76
ข13	ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารพืชของดินร่วนชั้นล่าง	76

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข14	ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหาราซีนของดินตะกอน	76
ข15	อิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับอาหาราซีนในดินทั้ง 3 ชนิด	77
ข16	การปลดปล่อยอาหาราซีนของดินร่วนชั้นบน	77
ข17	การปลดปล่อยอาหาราซีนของดินร่วนชั้นล่าง	77
ข18	การปลดปล่อยอาหาราซีนของดินตะกอน	78

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบสิ่งแวดล้อมของพื้นที่เกษตรกรรม	5
2	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกำจัดวัชพืชอาหาราจีน	10
3	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ	23
4	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	29
5	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	30
6	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุณดิช	31
7	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นตรงของฟรุณดิช	32
8	กลไกการดูดซับแบบชั้นเดียว	33
9	ตัวดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวปริมาณตัวดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ผิวเท่ากับ $q_m$	33
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	34
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	35
12	การเก็บตัวอย่างดินตะกอนและลักษณะของดินตะกอน	38
13	ปฏิกิริยาของสารพารา-อะมิโนอะซิโตนกับอาหาราจีน	42
14	ดินปฐมภูมิ	43
15	กราฟมาตรฐานความเข้มข้นอาหาราจีน	49
16	กราฟแสดงการดูดซับอาหาราจีนที่พีเอชต่างๆ ในดินทั้ง 3 ชนิด	51
17	กราฟแสดงอิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับอาหาราจีนในดินทั้ง 3 ชนิด	52
18	แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินร่วนชั้นบนเป็นตัวดูดซับ	54
19	แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินร่วนชั้นล่างเป็นตัวดูดซับ	54
20	แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินตะกอนเป็นตัวดูดซับ	55
21	ฟรุณดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินร่วนชั้นบนเป็นตัวดูดซับ	55
22	ฟรุณดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินร่วนชั้นล่างเป็นตัวดูดซับ	56
23	ฟรุณดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหาราจีน โดยใช้ดินตะกอนเป็นตัวดูดซับ	56

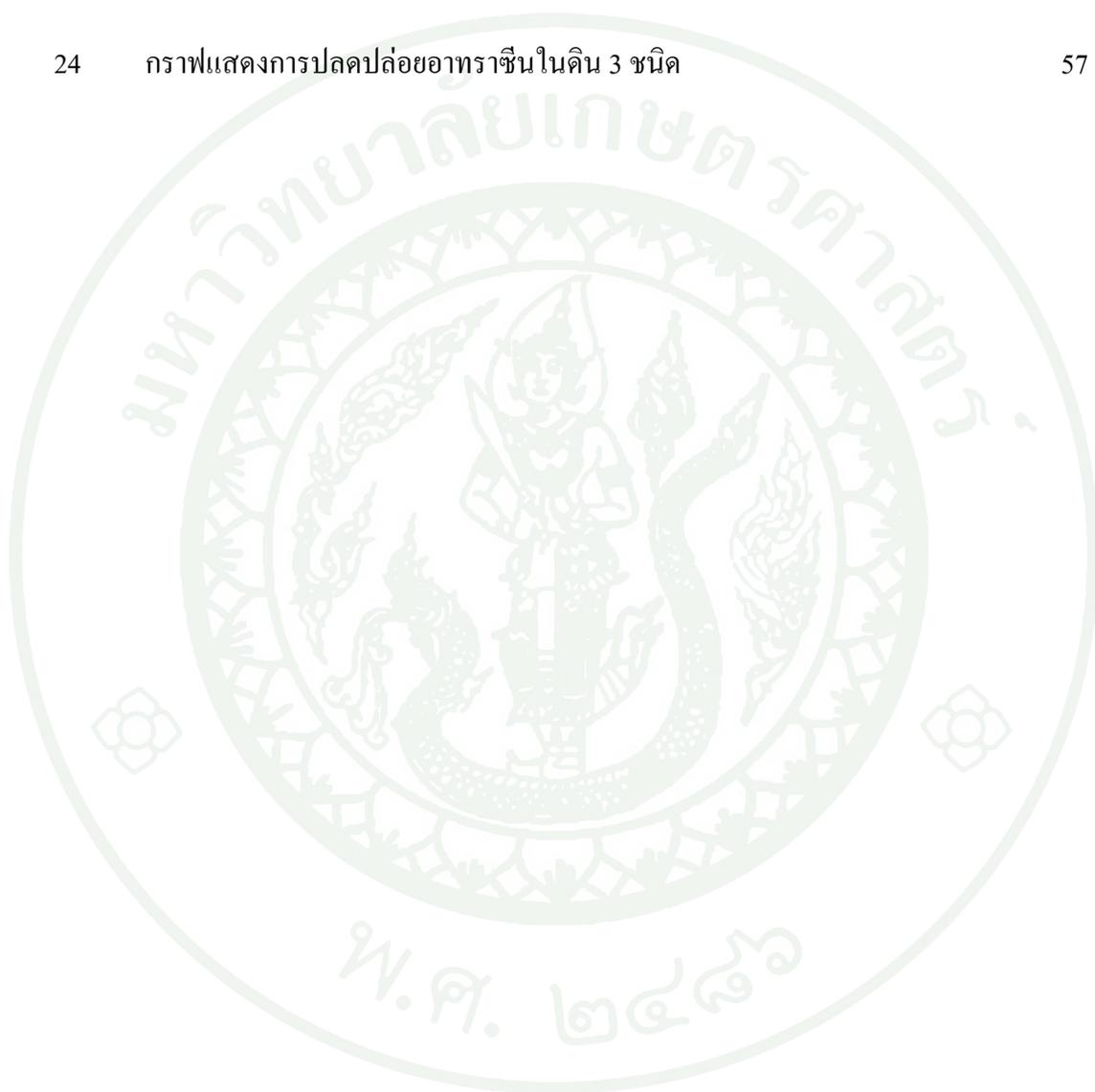
### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

24 กราฟแสดงการปลดปล่อยอาหารจีนในคืน 3 ชนิด

57



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- pH = ค่าความเป็นกรด-เบส  
CEC = ความจุของการแลกเปลี่ยนแคทไอออน  
mL = มิลลิลิตร  
L = ลิตร  
ppm = พีพีเอ็ม มีสัดส่วนเป็น หนึ่งในล้าน (มิลลิกรัมต่อลิตร)



การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยยาฆ่าวัชพืชของดินร่วน  
ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์

Efficiency Study on Adsorption and Desorption of Atrazine onto  
Loamy Soils in Corn Field Area in Lakdan Sub-District, Nam Nao District,  
Phetchabun Province

คำนำ

ตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 มนุษย์ได้เริ่มใช้สารเคมีทางการเกษตรกรรมเพื่อป้องกันกำจัดศัตรูพืชและความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของปริมาณผลิตผลทางการเกษตรให้เพียงพอกับจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งปัจจุบันได้มีการใช้สารกำจัดวัชพืชอย่างแพร่หลาย ในการแก้ไขปัญหาด้านการควบคุมวัชพืช (ดวงพร, 2543) และในประเทศไทยได้มีการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชในปริมาณสูง จากสถิติการนำเข้าในช่วงปี พ.ศ.2548-2550 (กรมวิชาการเกษตร, 2550) พืชเศรษฐกิจที่เป็นเป้าหมายสำคัญของการใช้สารกำจัดวัชพืช ได้แก่ ข้าวโพด ถั่วเหลือง ข้าวและฝ้าย ซึ่งล้วนเป็นพืชไร่ทั้งหมด หากมีการใช้ในปริมาณที่มากขึ้น อาจทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศการเกษตรเพิ่มขึ้นไปด้วย ดินจึงเป็นตัวการสำคัญในการแพร่กระจายสารพิษสู่แหล่งน้ำ (สุภมาส, 2545) ทำให้สารกำจัดวัชพืชเกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ อันจะส่งผลกระทบต่อวงจรห่วงโซ่อาหาร (food chain) ของมนุษย์ ก่อให้เกิดผลข้างเคียงในทางลบต่อผู้บริโภค สภาพแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่ไม่ใช่เป้าหมายในการกำจัด

อะตราซีน (atrazine, 2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-s-triazine) เป็นสารกำจัดวัชพืชชนิดหนึ่งในกลุ่มไตรอะซีน (triazine) ที่ใช้แบบก่อนงอก (pre-emergence) และหลังงอก (early post-emergence) ซึ่งใช้สำหรับควบคุมวัชพืชใบกว้างและพวกหญ้าในไร่ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และอ้อย (Beste, 1983) สารอะตราซีนยังมีความคงทนสภาพในสิ่งแวดล้อมได้นาน สลายตัวยากและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยเองก็มีการนำเข้าสารอะตราซีนสูงติดอันดับหนึ่งในสิบอีกด้วย นอกจากนี้ ได้พบว่าอะตราซีนเป็นสารที่ยับยั้งหรือลดปริมาณฮอร์โมน (endocrine disruptor) ที่ไปมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเพศของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำในทางผิดปกติอีกด้วย (Hayes *et al.*, 2003; Hase *et al.*, 2008)

จากการสำรวจพบว่าในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีการใช้อาหารเสริมกันแพร่หลาย ผู้วิจัย จึงเห็นความสำคัญของการศึกษาปริมาณอาหารเสริมที่ตกค้างและประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยสารอาหารเสริมของดินร่วนในพื้นที่ดังกล่าว โดยจะทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและอินทรีย์วัตถุของดิน เป็นต้น ที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารเสริมในดินทั้งสามชนิด คือ ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน จากพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และมีการใช้สารกำจัดวัชพืชสูงถึงร้อยละ 85.71 (โครงการฟื้นฟูคุณภาพชีวิตต้นน้ำ น้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์, 2552) และศึกษาหาสมการไอโซเทอร์มการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารเสริมจากดินทั้งสามชนิด โดยทำการตรวจวัดปริมาณอาหารเสริมด้วยวิธีการทำให้เกิดสารเชิงซ้อนระหว่างอาหารเสริมกับพารา-อะมิโนอะซีโตฟีโนน และตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทั้งสามชนิดที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารพืช
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารพืชของดินทั้งสามชนิด
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อการดูดซับอาหารพืชของดินทั้งสามชนิด

## ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารพืชในตัวอย่างดินปฐมภูมิ (primary soil sample) ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่เตรียมได้จากดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน ได้แก่ พีเอช ปริมาณสารดูดซับ ระยะเวลาการปลดปล่อยและอิทธิพลของกรดฮิวมิก โดยตรวจวัดปริมาณอาหารพืชด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารพืช

## การตรวจเอกสาร

### 1. ลุ่มน้ำ

“ลุ่มน้ำ หมายถึง หน่วยพื้นที่หนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำโดยเฉพาะ มีขนาดตามความต้องการของแต่ละบุคคลและประเภทของการศึกษา” (เกษม, 2545) หรือ คือ ระบบสิ่งแวดล้อมหนึ่งที่มีโครงสร้างหลากหลาย ได้แก่ ต้นไม้ คน สัตว์ ดิน หิน แร่ น้ำ อากาศ เมือง หรือชุมชน รวมกันเป็นโครงสร้างของระบบลุ่มน้ำ ที่มีหน้าที่สำคัญคือ การให้ปริมาณ คุณภาพ และเวลาการไหลของน้ำในลำธารอย่างสม่ำเสมอ มีเส้นสันปันน้ำ (divide) แบ่งเขตระหว่างลุ่มน้ำ หมายความว่า เส้นสันปันน้ำจะแบ่งน้ำฝนที่ตกลงมาสู่ผิวโลกด้วยการไหลลงสู่ลำน้ำสายหลัก ซึ่งประกอบด้วยลำน้ำย่อย (stream lets) อีกหลายลำดับ (orders) แล้วไหลผ่านปากน้ำ หรือ ปากลุ่มน้ำ (mouth) ลงสู่ที่ต่ำหรือที่ราบ ทะเล หรือมหาสมุทรต่อไป

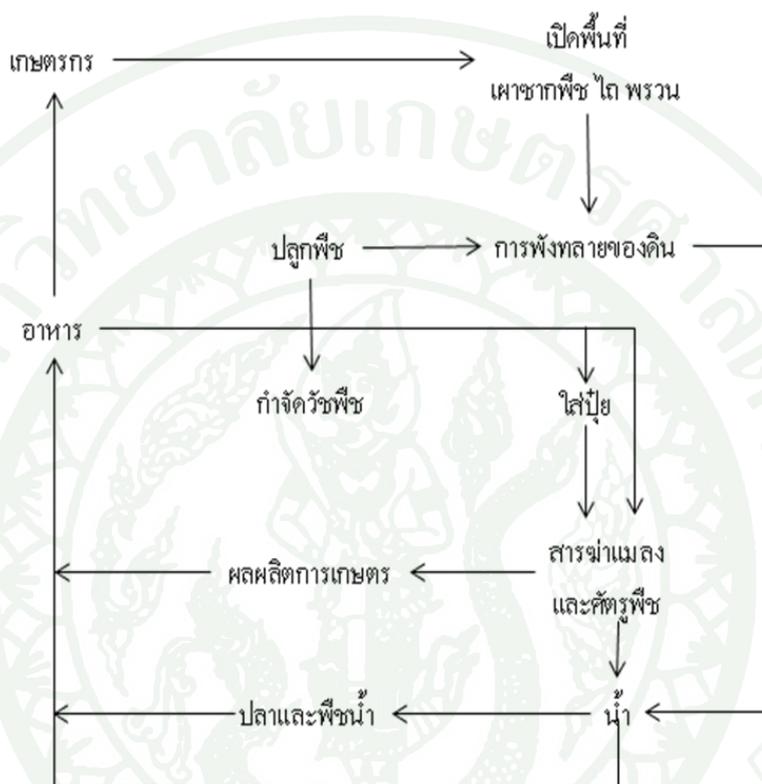
#### 1.1 ส่วนประกอบของลุ่มน้ำ

ลุ่มน้ำจะประกอบไปด้วยระดับพื้นที่อย่างน้อย 3 ระดับคือ ที่สูง (highland) ทำหน้าที่เป็นต้นน้ำ (headwater) หรือแหล่งต้นน้ำ มีฝนตกมาก การระเหยน้อย จึงมีน้ำท่า (streamflow) ปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ ตอนล่างลงมาคือ ที่เนิน (upland) เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมต่อการเกษตรอยู่ละกัน สามารถใช้ประโยชน์ที่ดินทำกิจกรรมอื่นๆ ได้ตามสมรรถนะที่ดิน ส่วนล่างที่สุดคือ ที่ราบ เป็นที่เหมาะสมต่อการเกษตร และการสร้างชุมชน โดยปกติแล้วลุ่มน้ำที่มีที่ราบมากก็จะช่วยให้กิจกรรมทางการเกษตรดีกว่าที่ชัน ถ้าจะทำการเกษตรที่ลาดชันในตอนกลางหรือที่เนิน ควรอย่างยิ่งต้องนำวิธีการอนุรักษ์ดินและน้ำมาใช้ จึงจะทำให้การใช้ประโยชน์ที่ดินแบบยั่งยืนได้ตลอดไป

#### 1.2 การทำเกษตรกรรมบนพื้นที่ลุ่มน้ำ

พื้นที่เกษตรกรรมเป็นการใช้ประโยชน์ที่ดินรูปแบบหนึ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำต่างๆ ที่มีการปรับพื้นที่ การเตรียมพื้นที่ปลูก มีการใช้ปุ๋ย สารกำจัดวัชพืชและสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืช มีผลให้เกิดภาวะมลพิษของน้ำอันเกิดจากสารกำจัดวัชพืชและสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชที่ติดมากับตะกอนและละลายมากับน้ำท่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่บริเวณตอนบนของพื้นที่ลุ่มน้ำมี

ลักษณะเป็นพื้นที่สูง ภูเขา และเทือกเขาต่างๆ จะมีน้ำไหลตกลงมาอย่างรวดเร็ว เกิดตะกอนแขวนลอย และภาวะมลพิษทางน้ำ (นิพนธ์, 2532) เพราะน้ำไหลบ่าหน้าดิน เป็นตัวการในการชะล้างและเคลื่อนย้ายอนุภาคดิน และสารเคมีทางการเกษตรลงสู่แหล่งน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 (เกษม, 2545)



ภาพที่ 1 ระบบสิ่งแวดล้อมของพื้นที่เกษตรกรรม

ที่มา: เกษม (2545)

## 2. ลักษณะทางกายภาพของกลุ่มน้ำห้วยกะโปะ

### 2.1 ภูมิประเทศ

พื้นที่กลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ตำบลหลักค่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นสาขาของแม่น้ำเลย ปรากฏอยู่ในแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร มาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 ระวัง 5342IV อำเภอน้ำหนาว ระหว่างพิกัด ที่ 1877900-1880800 เหนือ และ 0768600-

0771650 ตะวันออก กลุ่มน้ำห้วยกะโปะมีพื้นที่รับน้ำทั้งหมด 4.66 ตารางกิโลเมตร (2,912.5 ไร่) มีอาณาเขตโดยรอบดังนี้

-ทิศเหนือ	จรด พื้นที่เกษตรกรรมและบ้านห้วยกะโปะ
-ทิศใต้	จรด พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยผาตา ภูน้ำริน และลุ่มน้ำย่อยห้วยขอนแก่น
-ทิศตะวันออก	จรด พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยผาตา แม่น้ำเลย
-ทิศตะวันตก	จรด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยขอนแก่น บ้านหลักด่านและบ้านโนนชาด

## 2.2 อุดนียมวิทยา

### 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของกลุ่มน้ำ

พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ มีเนื้อที่รวม 5.03 ตารางกิโลเมตร มีความลาดชันเฉลี่ยร้อยละ 18 สภาพการใช้ที่ดินบริเวณนี้ปกคลุมไปด้วยป่าเบญจพรรณและมีการบุกรุกทำไร่ข้าวโพดเป็นจำนวนมาก ร่องลงมาคือข้าวไร่และสวนมะขามหวาน

### 2.2.2 จำนวน ชนิด และรูปแบบของลำธาร

รูปแบบของลำธาร (stream pattern) เป็นแบบ dendrite คือมีลักษณะของลำธารภายในพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นคล้ายเส้น vein ของใบไม้ ซึ่งเป็นแบบของลำธารที่แตกกิ่งก้านสาขาออกไปแบบมีทิศทางไม่แน่นอน เนื่องจากสภาพภูมิประเทศเป็นเทือกเขาและมีภูเขาสูงต่ำสลับกันไป ประกอบกับลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตซึ่งมีองค์ประกอบไม่สม่ำเสมอ ทำให้น้ำไหลไปได้ทุกทิศทางและแยกสาขาออกไป ชนิดของลำธาร (stream type) ของลุ่มน้ำทั้งสองเป็นชนิด intermittent stream ซึ่งเป็นลำธารที่มีน้ำไหลไม่ตลอดปี น้ำจะแห้งในฤดูแล้ง จากการสำรวจภาคสนาม พบว่า ในฤดูแล้งบริเวณต้นน้ำจะไม่มีน้ำไหล แต่ก็ยังมีน้ำขังอยู่ในลำธารเป็นบางช่วงและมีความชุ่มชื้นอยู่ ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ มีจำนวนลำธาร 2 สาย มีทางระบายน้ำตามธรรมชาติเป็นลักษณะของร่องน้ำถาวร

### 2.2.3 ความหนาแน่นของลำธาร

ความหนาแน่นของลำธาร (stream density) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนลำธารของพื้นที่ลุ่มน้ำ ถ้าพื้นที่ลุ่มน้ำมีความหนาแน่นของลำธารมากแสดงว่ามีความสามารถในการระบายน้ำดี จากการศึกษา พบว่า ลุ่มน้ำห้วยกะโปะมีความหนาแน่นของลำธารเท่ากับ 0.43 ลำธารต่อตารางกิโลเมตร

### 2.2.4 ความหนาแน่นของการระบายน้ำ

ความหนาแน่นของการระบายน้ำ (drainage density) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวทั้งหมดของลำน้ำต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ เป็นค่าที่บอกลักษณะความสามารถในการระบายน้ำของลุ่มน้ำโดยทั่วไปแล้ว พื้นที่ที่มีความยาวของลำน้ำมาก และมีความหนาแน่นของลำธารมาก พื้นที่ลุ่มน้ำก็จะมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี ลุ่มน้ำห้วยกะโปะมีความหนาแน่นของการระบายน้ำเท่ากับ 2.20 กิโลเมตรต่อตารางกิโลเมตร ลุ่มน้ำห้วยกะโปะมีพื้นที่รับน้ำ 4.66 ตารางกิโลเมตร มีศักยภาพในการให้น้ำท่าเฉลี่ยรายปี 1.65 ล้านลูกบาศก์เมตร มีปริมาณน้ำในลำธารในช่วงน้ำหลากประมาณ 1.4353 ล้านลูกบาศก์เมตร และในช่วงแล้งมีปริมาณน้ำในลำธารประมาณ 0.2147 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 87 และ 13 ของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี ในเดือนที่มีปริมาณน้ำท่าสูงสุดคือเดือนกันยายน มีค่าเท่ากับ 0.4546 ล้านลูกบาศก์เมตร และในเดือนที่มีปริมาณน้ำท่าต่ำสุด คือ เดือนกุมภาพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.0215 ล้านลูกบาศก์เมตร

### 2.2.5 การเกษตรกรรม

ในรอบปีที่ผ่านมา พืชไร่อายุสั้นที่ครัวเรือนส่วนมากนิยมปลูกเป็นอันดับหนึ่งคือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ครัวเรือนที่ปลูกพืชไร่ชนิดนี้ 109 ครัวเรือน พื้นที่เพาะปลูกในหมู่บ้านทั้งหมด 1,443 ไร่ ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลักและปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ และการสุ่มสำรวจโดยใช้แบบสอบถามเกษตรกรที่ใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชร้อยละ 85.71 ไม่ใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชร้อยละ 13.24 (โครงการฟื้นฟูคุณภาพชีวิตต้นน้ำน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์, 2552)

### 3. อาทราซีน (atrazine)

“สารกำจัดวัชพืช หมายถึง สารเคมีชนิดใดๆ ก็ตาม ที่นำมาใช้เพื่อฆ่าทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช ไม่ว่าจะเป็นในขณะที่วัชพืชกำลังงอกขึ้นมาหรือยังเป็นเมล็ดอยู่ ตลอดจนชิ้นส่วนต่างๆ ของวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้ที่อยู่ในดินหรืออยู่บนดิน” (ทศพล, 2545)

สารกำจัดวัชพืชในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ อาทราซีน เนื่องจากเป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีความอันตรายทางการเกษตรที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรก ดังตารางที่ 1 และนิยมใช้กันแพร่หลายทางด้านเกษตรกรรมในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ได้มีการบุกเบิกทำไร่ข้าวโพดเป็นจำนวนมาก และสารอาทราซีนมีสมบัติดังต่อไปนี้

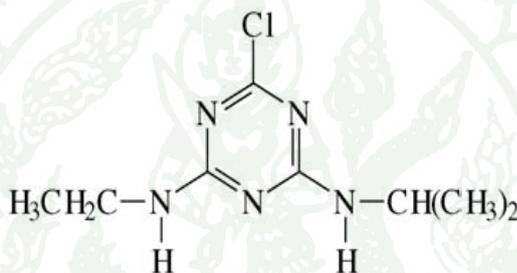
ตารางที่ 1 รายชื่อวัตถุดิบทางการเกษตร ในระหว่างปี พ.ศ. 2548-2550

ลำดับที่	พ.ศ. 2548		พ.ศ. 2549		พ.ศ. 2550	
	ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (กก.)	ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (กก.)	ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (กก.)
1	Glyphosate	21,311,657.35	Glyphosate	17,187,769.00	Glyphosate Isopropylammonium	34,983,316.00
2	2, 4-D acide	5,051,175.00	Paraquat dichlorrde	14,020,451.50	Paraquat dichlorrde	16,862,134.00
3	Cabofurna	4,293,175.00	Glyphosate Isopropylammonium	5,602,185.00	Abamectin	4,481,920.00
4	<b>Atrazine</b>	<b>2,398,300.00</b>	Glyphosate Isopropylamin salt	4,908,133.00	Cabofurna	4,405,328.00
5	Abamectin	1,795,198.00	Cabofurna	4,691,696.00	2,4-D sodium salt	4,038,400.00
6	Mancozeb	1,692,335.00	Abamectin	3,732,764.00	Ametryn	3,963,496.00
7	Cartap hydrochloride	1,570,862.00	2,4-D sodium salt	3,340,700.00	<b>Atrazine</b>	<b>3,686,650.00</b>
8	Ametryn	1,562,475.00	<b>Atrazine</b>	<b>2,839,161.00</b>	2,4-D dimethyl ammonium	2,744,469.00
9	Diuron	1,499,829.00	Ametryn	2,030,041.00	Mancozeb	2,249,315.00
10	Alachlor	1,189,939.00	2,4-D dimethyl ammonium	1,984,059.20	Butachlor	2,006,775.92

ที่มา: สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร (2550)

### 3.1 คุณสมบัติของอาทราซีน

อาทราซีนเป็นสารวัชพืชในกลุ่มไตรอาซีน (triazines) ที่ถูกใช้เป็นสารควบคุมวัชพืชประเภทใบกว้างและใบแคบในไร่ข้าวโพดที่ตำบลหลักค่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ควบคุมวัชพืชวงศ์หญ้าใน ข้าวฟ่าง อ้อย สับปะรด ส้ม กล้วยและใช้เป็นสารไม่เลือกทำลายในพื้นที่ที่ไม่ได้ทำการเกษตร ซึ่งอาจจะเป็นพิษกับพืชปลูกหลายชนิด เช่นผัก ถั่วลิสง และถั่วเหลือง เป็นต้น (ทศพล, 2545; สุพัตรา, 2548) รูปแบบอาทราซีนที่นิยมใช้ ได้แก่ ชนิดสารละลายเข้มข้น (emulsifiable concentrate) และชนิดผงไม่ละลายน้ำ (wetable powder, WP) เป็นต้น



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารกำจัดวัชพืชอาทราซีน

ที่มา: Lilian *et al.* (2006)

ชื่อทางเคมี	2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-s-triazine
สูตรโมเลกุล	$C_8H_{14}ClN_5$
ชื่อเคมีทั่วไป	Isobutylmercaptan
น้ำหนักโมเลกุล	215.69
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึกสีขาว
จุดหลอมเหลวและจุดเดือด	175-177 °C
ชื่อทางการค้า	Aatrex, Gesaprim, Atratol, Bullet, Boxer และ

Twintrazine

สภาพการละลายละลายน้ำได้  $33 \text{ mg L}^{-1}$  ในสภาพ pH 7 ที่  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และละลายใน organic solvents ชนิดต่างๆ ที่  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เช่น dimethyl sulfoxide, chloroform, ethyl acetate และ methanol เป็นต้น

### 3.2 พฤติกรรมในพืชของสารอาทราซีน

สารอาทราซีน ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ในอัตรา 160-716 กรัมสารออกฤทธิ์ต่อไร่ และเป็นสารประเภทเลือกทำลาย (selective herbicide) โดยจะถูกดูดซึมเข้าสู่ต้นพืชทางรากและสามารถผ่านเข้าทางใบได้บ้างเล็กน้อย จากนั้นสารจะเคลื่อนย้ายไปสู่ยอดและเข้าไปสะสมที่บริเวณเนื้อเยื่อเจริญ (apical meristem) และใบของวัชพืช จากนั้นจะออกฤทธิ์ทำลายวัชพืชโดยมีผลต่อการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ในพืชที่อ่อนแอต่อสารอาทราซีนจะแสดงอาการใบเหลืองซีดแห้งไหม้และตายในที่สุด ในพืชต้านทานต่อสารอาทราซีน พืชจะเปลี่ยนรูป (metabolize) ไปเป็น hydroxyatrazine และ amino acid conjugate โดยกระบวนการ alkylation และ hydrolysis ทำให้พืชสามารถดูดซึมสารหนูได้มากขึ้นอีกด้วย (WSSA, 1979; ทศพล, 2545)

นอกจากนี้ ถั่วพุ่มยังเป็นพืชที่มีความไวต่อสารอาทราซีนมาก ต้นถั่วอายุ 15 วัน จะสามารถดูดซึมสารได้รวดเร็วกว่าข้าวโพดถึง 2 เท่า และปริมาณสารที่ถูกดูดเข้าไปนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากถั่วไม่มีสารพวกไฮดรอกซามิท อย่างในข้าวโพด (สุมิตร, 2510) และในพืชที่มีความทนทานต่อสารพิษนั้นจะมีการย่อยสารพิษ ได้สารที่ไม่มีฤทธิ์ ส่วนพืชที่ถูกทำลาย เนื่องจากเกิดภาวะบกร่องของคลอโรฟิลล์ เรียกว่า คลอโรซิส (chlorosis) ส่วนในสัตว์ สารพิษทั้งหมดถูกย่อยแล้วขับออกทางปัสสาวะได้มากกว่าร้อยละ 50 และทางอุจจาระร้อยละ 33 (กรมวิชาการเกษตร, 2542)

### 3.3 พฤติกรรมในดินของสารอาทราซีน

สารพิษทางการเกษตรมีความจำเป็นต่อเกษตรกรทั้งก่อนปลูก ในขณะที่ปลูกจนถึงระยะเวลาก่อนเก็บเกี่ยว ในการฉีดพ่นสารพิษในไร่ ละอองสารพิษที่ไม่ตกลงบนส่วนต่างๆ ของพืช จะตกลงบนดินเป็นส่วนใหญ่ ดินจึงเป็นแหล่งรองรับสารพิษโดยตรง ทำให้โอกาสที่สารเหล่านี้จะสะสมในดินจึงมีมากยิ่งขึ้น สารพิษที่ตกค้างอยู่ในดิน อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปหลายลักษณะ ได้แก่

- 3.3.1 สลายตัวโดยปฏิกิริยาทางเคมี (chemical decomposition)
- 3.3.2 สลายตัวโดยแสง (photodegradation)
- 3.3.3 สลายตัวโดยจุลินทรีย์ย่อยสลาย (microbial degradation)
- 3.3.4 ระเหยจากดินสู่บรรยากาศ (volatilization)
- 3.3.5 เคลื่อนย้ายไปสู่แหล่งน้ำ (movement by runoff/leaching)
- 3.3.6 เข้าสู่สิ่งมีชีวิต (plant or organism uptake)

สารพิษทางการเกษตรบางชนิดอาจสลายตัวได้ง่ายเมื่ออยู่ในดิน โดยมีปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวช่วยย่อยสลาย จึงเป็นปัญหาและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในสภาพแวดล้อม ภิญญา และคณะ (2545)

เมื่อกล่าวถึงปัญหาสารพิษทางการเกษตรแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในลุ่มน้ำห้วยกะโปะ เรามักถึงสารอาทราซีนที่ใช้กำจัดวัชพืชในไร่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นสำคัญ เพราะอาทราซีนสามารถคงทนในดินสูง มีค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ย 60 วัน และอยู่ในดินได้ยาวนาน 6-12 เดือน (Ashton, 1991) หลังจากฉีดพ่นไปครั้งเดียว (Captriel and Haisch, 1984) จึงสามารถเคลื่อนย้ายในดินได้ปานกลางถึงมาก ทำให้เกิดการตกค้างในแหล่งน้ำใต้ดินสูง การเคลื่อนย้ายของสารจะมากขึ้นเมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุและอนุภาคดินเหนียวน้อย สารอาทราซีนมีลักษณะเป็นเบสอ่อน (weak base) จะเกิดปฏิกิริยาช้าเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกลาง แต่จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นในสภาพที่เป็นกรดเป็นค่า และสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน แต่ในสภาพที่แห้งแล้งและเย็นสามารถคงสภาพอยู่ในดินได้นานถึง 1 ปี (ทศพล, 2545)

#### 3.4 การเปลี่ยนรูปของอาทราซีน

อาทราซีนสามารถเปลี่ยนรูปเป็น desethylatrazine (DEA) และ desisopropylatrazine (DIA) ได้โดยการสลายตัวด้วยแสงและการสลายตัวด้วยจุลินทรีย์ และการสลายตัวของอาทราซีนขึ้นอยู่กับปริมาณของจุลินทรีย์ในดิน สารกลุ่มไตรอาซีน (triazines) จะสลายตัวช้าถ้าได้รับแสง (photodecomposition) สำหรับสารไตรอาซีนจะละลายน้ำได้ง่ายและแตกตัวง่ายเมื่อมีกิจกรรมของจุลินทรีย์ (มณฑณี, 2544)

### 3.5 ความเป็นพิษของอาหาราซีน

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency) ได้จัดให้อาหาราซีนอยู่ในกลุ่มสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง โดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาให้ความสำคัญในการประเมินถึงความเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อมวลมนุษย์และมีผลต่อระบบนิเวศน์โดยได้จัดตั้งโครงการค้นคว้าวิจัยที่มีชื่อว่า ซายเจนต้า (Syngenta) ขึ้น เพื่อพิสูจน์ข้อสมมุติฐานดังกล่าวก่อนที่คณะกรรมการของพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา จะประกาศพิจารณายกเลิกการใช้อาหาราซีนในการกำจัดวัชพืชมายังเป็นทางการต่อไป

อาหาราซีนเกิดพิษทางการหายใจ 1 ชั่วโมง มีค่ามากกว่า 0.71 มิลลิกรัมต่อลิตร/อากาศ 1 ลิตร พิษเรื้อรัง 2 ปี (no-effect level) มีค่า 100 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัมเป็นพิษต่อปลา (กรมวิชาการเกษตร, 2542; The Agrochemicals Handbook, 1991) ค่า LD<sub>50</sub> ทางปากหนูพุก (rat) 508 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในหนูเล็ก (mice) 945 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในกระต่าย 1,160 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับทางผิวหนังในหนูพุกมากกว่า 3,100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในกระต่าย 8,160 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เมื่อได้รับที่ความเข้มข้นสูง จะเกิดอาการคลื่นเหียน อาเจียน ท้องร่วง กล้ามเนื้อล้า และน้ำลายฟูมปาก ไอของอาหาราซีนทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตา ผิวหนัง ระบบอวัยวะ หายใจปานกลาง แต่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมเนื่องจากการย่อยสลายอาหาราซีนภายในร่างกายและขับออกจากร่างกายในรูปยูรีน (ทศพล, 2545)

### 3.6 การใช้อาหาราซีนในดิน

อัตราการใช้อหาราซีนในดิน มีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทำลายวัชพืชในไร่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะเนื่องจากอัตราการใช้สารกำจัดวัชพืชที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่จะเกินอัตราที่ฉลากแนะนำ อีกทั้งยังมีการชำระล้างภาชนะที่ใส่อาหาราซีนลงในแหล่งน้ำ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการกำจัด และอาจมีบางส่วนของอาหาราซีนที่หลุดตกค้างอยู่ในดินหรือบางส่วนถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายในดิน ทำให้ปริมาณสารที่คงเหลืออยู่ถูกดูดซับไว้โดยอนุภาคของดิน

การแพร่กระจายของสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชในน้ำและตะกอนดินนั้น มีสาเหตุหลายประการ เช่น การฉีดพ่นลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง การแพร่กระจายในบรรยากาศการชะล้างพังทลายของดินโดยฝน การพัดพาของน้ำไหลบ่าหน้าดิน การทิ้งหรือล้างภาชนะที่บรรจุสารเคมีทางการเกษตร เป็นต้น (นวลศรี, 2533) สาเหตุดังกล่าว ทำให้บริเวณพื้นที่เกษตรกรรมเป็นแหล่งใหญ่ที่ทำให้สารเคมีทางการเกษตรตกค้างในน้ำและตะกอนดิน โดยในช่วงที่มีการฉีดพ่นจะมีการตกค้างในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ทำการเกษตรมากที่สุด

การแพร่กระจายของสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชในน้ำท่าและตะกอนดินในลุ่มน้ำสายหลักของประเทศไทย ภิญญา และคณะ (2545) รายงานว่าในปี 2536-2542 พบสารกลุ่มไตรอาซีนในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งมีการปลูกพืชไร่ เช่น อ้อย ถั่ว ข้าวโพด และข้าวฟ่าง ในแม่น้ำแม่กลอง ปริมาณระหว่าง  $<0.01 - 6.63$  ไมโครกรัมต่อลิตร และในตะกอนดิน  $<0.01 - 0.02$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2540 พบสารกลุ่มไตรอาซีนในแม่น้ำป่าสัก ปริมาณระหว่าง  $<0.01 - 0.57$  ไมโครกรัมต่อลิตร และในตะกอนดิน  $<0.01 - 0.02$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2542 ตรวจพบสารกำจัดวัชพืชกลุ่มไตรอาซีน ได้แก่ สารอะทราซีนและสารอะมิทรินในแม่น้ำอูน ปริมาณระหว่าง  $<0.01 - 0.95$  ไมโครกรัมต่อลิตร และในตะกอนดิน  $<0.01 - 1.17$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

นิพนธ์ (2545) การชะล้างและการพัดพาตะกอนโดยน้ำฝนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแพร่กระจายสารเคมีทางการเกษตรจากพื้นที่เกษตรเข้าสู่ระบบนิเวศอื่นๆ เนื่องจากสารเคมีทางการเกษตรจะถูกชะล้างและพัดพาไปกับน้ำไหลบ่าหน้าดิน (surface runoff) ทำให้มีการสะสมสารเคมีทางการเกษตรทั้งในดินชั้นล่างและน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนย้ายสารลงในบริเวณผิวดินในบริเวณรอบนอกของพื้นที่เป้าหมาย

### 3.7 ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารอะทราซีน

ค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 เรื่อง มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมกำหนดให้มีสารอะทราซีนไม่เกิน 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

#### 4. คุณสมบัติของดิน

ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการผุพังของหินและแร่ กับอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน โดยประกอบด้วยส่วนของของแข็ง ของเหลว และอากาศ ซึ่งดินไม่ว่าอุ่มตัวหรือไม่อุ่มตัวจะไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติของดินที่สำคัญซึ่งเกี่ยวกับการจัดการของเสียอันตราย ได้แก่ องค์ประกอบของดิน (soil textural class) คอลลอยด์ของดิน รวมถึงแร่วิทยาของดิน (soil mineralogy) และปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon content) ด้วย

นิพนธ์ (2545) รายงานว่า สมบัติทางกายภาพของดินมีผลต่อความสามารถในการซึมน้ำ และขนาดอนุภาคของดินมีผลต่อการชะล้างและการพัดพา โดยการชะล้างพังทลายของดินจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคดิน และในทางกลับกันความสามารถในการพัดพาจะลดลงตามขนาดของอนุภาคดิน นั่นคือ อนุภาคของดินทราย แต่ดินเหนียวนั้นง่ายต่อการเกิดการชะล้างพังทลายของดินเมื่อเทียบกับอนุภาคของดินทราย แต่ดินเหนียวนั้นง่ายต่อการถูกพัดพาเคลื่อนย้ายไปได้มากกว่าดินทราย

##### 4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของดิน

###### 4.1.1 เนื้อดิน (soil texture)

เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความหยาบ ความละเอียดของดิน แบ่งคร่าว ๆ ได้ 3 ชนิด คือ ดินทราย ดินร่วน และดินเหนียว ดินที่เป็นทรายจะอุ่มน้ำได้ไม่ดี ดินจะแห้งง่าย และยังมีธาตุอาหารพืชอยู่น้อยกว่าดินชนิดอื่น ส่วนดินเหนียวนั้นจะอุ่มน้ำได้มาก และมีธาตุอาหารพืชอยู่มาก แต่มีข้อเสียที่การระบายน้ำไม่ดี คือ มักจะมีน้ำขังทำให้อากาศไม่เพียงพอสำหรับรากพืชใช้ในการหายใจ นอกจากนี้ยังทำการไถพรวนได้ลำบาก

###### 4.1.2 ขนาดเม็ดดิน

เม็ดดินหรือการเกิดโครงสร้างของดินเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นรวมของดินหรือความพรุนของดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการระบายน้ำและอากาศ เนื่องจากกระบวนการเกิดเม็ดดินเป็นการรวมเอาอนุภาคเดี่ยวของดินเข้าด้วยกันเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวของเม็ดดินขึ้นอยู่กับ

กับสัดส่วนอนุภาคเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น ขนาดของเม็ดดินจึงมีผลต่อการดูดซับไอออน หรือโมเลกุลของสารต่างๆ ในสารละลายดิน

ประภัสสร (2532) รายงานว่า อนุภาคของดินที่มีสารเคมีทางการเกษตรจะ แขนงลอยไหลบ่าไปกับกระแสน้ำและสามารถตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำได้เมื่อมีการรวมตัวของ อนุภาคดินใหญ่ขึ้น โดยจะตกตะกอนได้ดีเมื่อน้ำนิ่ง ดังนั้นสารเคมีทางการเกษตรส่วนใหญ่ที่ตกค้าง ในแหล่งน้ำจะสะสมอยู่ในตะกอนดินหรือโคลนในท้องน้ำ 10-100 เท่า หรืออาจมากกว่านั้น สารเคมีทางการเกษตรที่สะสมในตะกอนดินนี้ บางส่วนจะสลายตัวโดยจุลินทรีย์ย่อยสลายใน สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) บางส่วนจะสะสมในพืชและสัตว์ที่ดำรงชีวิตอยู่ในท้องน้ำ (benthoses) แต่ส่วนใหญ่มีการตกค้างในตะกอนท้องน้ำของแหล่งน้ำต่อไปเป็นเวลานานจนกว่า สารเคมีทางการเกษตรนั้นจะสลายตัวหมดไป โดยใช้เวลาดั้งแต่ 3 เดือน ถึง 30 ปี ขึ้นอยู่กับชนิดของ สารเคมีทางการเกษตรเป็นสำคัญ

#### 4.1.3 อินทรีย์วัตถุของดิน (organic material of soils)

อินทรีย์วัตถุนั้นเป็นสารประกอบในดินที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนได้จากการ สลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แล้วทับถมอยู่ในดิน รวมทั้งอินทรีย์สารที่พืช ปลดปล่อยพืชปลดปล่อยออกทางราก (root exudates) และที่จุลินทรีย์ในดินได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ดังนั้น อินทรีย์วัตถุในดิน ประกอบด้วยสารอินทรีย์จำนวนมากหลายชนิดด้วยกัน ดินที่มีวัตถุใน ปริมาณสูงนั้น โดยทั่วไปถือว่าเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงและมีคุณสมบัติอื่นเหมาะสมกับการ เจริญเติบโต ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินนั้น มีความสำคัญต่อสมบัติอื่นเหมาะสมกับการ เจริญเติบโต ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินนั้น มีความสำคัญต่อสมบัติของดินทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ดังนั้น สารอินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีอิทธิพลต่อสารประกอบอันตราย โดยสารอินทรีย์ คาร์บอนจะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นของเสียอันตราย ดังนั้น ดินควรมีสารอินทรีย์คาร์บอนประกอบอยู่ด้วย โดยปกติดินจะมีสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 2-3 อินทรีย์สารของดินสามารถจำแนกได้เป็น 2 พวก คือ วัสดุที่เป็นพวกฮิวมิกและที่ไม่เป็นฮิวมิก (humic and non humic material) วัสดุฮิวมิกจะเกิดการสร้างเป็นพอลิเมอร์สีเหลืองถึงน้ำตาลเข้ม โดยปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ เรียกว่า ฮิวมิก โดยทั่วไปฮิวมัสมีพอลิเมอร์ฟีนอลอยู่ซึ่ง ประกอบจากกรดคาร์บอกซิลิก, คาร์บอนิก, เอสเทอร์ และหมู่เมทอกซี ส่วนสารเคมีพวกที่ไม่เป็นฮิว มิกจัดอยู่ในกลุ่มชีวเคมี ได้แก่ กรดอะมิโน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมัน (Schnitzer, 1972)

#### 4.1.4 ความเป็นกรด-ด่างของดิน (soil pH)

ค่าพีเอชของดินเป็นตัวเลขที่ใช้แทนความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มีอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในดิน ซึ่งใช้เป็นดัชนีบอกความเป็นกรดหรือเป็นด่างของดินวัดได้จากความเข้มข้นของ  $H^+$  ในสารละลายดิน และ  $pH = -\log [H^+]$  ดินที่มีสมบัติเป็นกรดหรือดินกรดจะมี pH ต่ำกว่า 7 ดินที่มีสมบัติเป็นด่างหรือดินด่างจะมี pH มากกว่า 7 ดินที่มีสมบัติเป็นกลางจะมี pH เท่ากับ 7 ความเป็นกรดด่างของดินมีผลกระทบต่อกระบวนการต่างๆ ทางเคมีและชีวภาพในดิน

ปกติในเขตที่ชุ่มชื้นนั้นดินจะเป็นกรดและในเขตที่แห้งแล้งดินจะเป็นด่าง ส่วนที่เป็นของเหลวของดินที่เป็นกรดนั้น (soil solution) จะมีความเข้มข้นของ  $H^+$  อยู่มากกว่า  $OH^-$  และส่วนที่เป็นของเหลวของดินที่เป็นด่างนั้นจะมีความเข้มข้นของ  $OH^-$  มากกว่า  $H^+$  สำหรับดินที่เป็นกลาง (neutral soils) นั้นส่วนที่เป็นของเหลวในดินจะมีความเข้มข้นของ  $H^+$  และ  $OH^-$  เท่ากัน

Talbert and Fletchall (1965) พบว่า เมื่อพีเอชของดินเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับของอาหารพืช โดยดินลดลง เนื่องจากอาหารพืชมีสมบัติเป็นเบสอ่อน จึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับดินที่มีสภาพเป็นกรด จึงทำให้ดินดูดซับอาหารพืชได้ดีกว่า ดินที่มีสภาพเป็นกลาง แต่ Turner, A.A. (1967) เสนอแนะว่า กลไกที่สำคัญเกี่ยวข้องกับการดูดซับสารกำจัดวัชพืชและอาหารพืชคือ พีเอชของดินและความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ขณะที่การดูดซับสารกำจัดวัชพืชกลุ่มยูเรีย ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังกล่าวเพียงปัจจัยหนึ่งปัจจัยใด

Weber, J.B. (1993) เสนอว่า อิทธิพลพีเอชของดินมีความสัมพันธ์กับการดูดซับสารกำจัดวัชพืชกลุ่มไตรอธาซีน ต่อคอลลอยด์ของดิน เพราะสารกำจัดวัชพืชกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นเบสอ่อนจะรับไฮโดรเจนไอออน ที่อยู่ในสารละลายดินที่เป็นกรด ทำให้ดินสามารถดูดซับสารกำจัดวัชพืชที่มีประจุบวกได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความเข้มข้นของสารกำจัดวัชพืชในสารละลายดินลดลง

#### 4.1.5 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดในดิน

ปฏิกริยาทางเคมีในดิน เช่น ออกซิเดชัน, รีดักชัน และ ไฮโดรไลซิส ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในดิน ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ

ดิน ความชื้น การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เหล่านี้ที่เกิดขึ้นในดินก็มีผลกระทบต่อกระบวนการอื่นๆ ในดินด้วยเช่นกัน เช่น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช ไอออนหรือโมเลกุลของสารต่างๆ ในสารละลายดิน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับการดูดซับและการเคลื่อนย้ายมวลสารในดินด้วย

#### 4.1.6 ความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchangeable Capacity; CEC) ของดิน

ความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเป็นปริมาณของประจุที่ดินอาจแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมด และดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะดูดซับไว้ได้ ซึ่งบอกเป็นหน่วยของจำนวนมิลลิกรัมสมมูล (milliequivalents, meq) ของประจุบวกที่อาจแลกเปลี่ยนได้ต่อดินแห้ง 100 กรัม ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของคอลลอยด์ ปริมาณของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เป็นต้น และสามารถคำนวณได้โดยทำให้ดินอิ่มตัวด้วยบัฟเฟอร์ที่มีไอออนบวก เช่น โซเดียมอะซิเตต แล้ววัดปริมาณโซเดียมที่เกิดการแลกเปลี่ยน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) เป็นลักษณะสมบัติของดิน ไม่ใช่ปริมาณของไอออนบวก เพราะวัดจากประจุบวกทั้งหมดต่อปริมาณดิน ซึ่งสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้ ดินที่มีดินเหนียวและสารอินทรีย์สูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงด้วย สำหรับดินจำพวกทราย (sandy soil) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะอยู่ในช่วง 2-7 meq/100 กรัม, ดิน Silt loam 9-27 meq/100 กรัม และ 5-60 meq/100 กรัม สำหรับดินเหนียว (Bradry, 1974)

#### 4.2 คอลลอยด์ของดิน (colloid)

ดินประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส มาผสมรวมกัน ส่วนที่เป็นของแข็งนั้นจะมีแร่ธาตุและอินทรีย์สาร ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคต่างๆ ที่มีขนาดเล็กมากมาย ตั้งแต่ขนาดที่มี 2.00 มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ถ้าหากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก (<0.001 มิลลิเมตร) นั้นถูกผสมและแขวนลอยได้อย่างสมบูรณ์ในสารชนิดอื่นก็ถือว่าเป็นสารนั้นเป็นสารคอลลอยด์

คอลลอยด์ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารแขวนลอยที่กระจาย ซึ่งหมายถึงอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่อย่างถาวร ในอีกส่วนหนึ่งซึ่งเรียกว่าตัวกลางแขวนลอย โดยที่ส่วนนี้อาจจะเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ดังนั้น ดินจึงถือว่าเป็นคอลลอยด์ระบบหนึ่ง เนื่องจากดินจะประกอบไปด้วยอนุภาคต่างๆ และอนุภาคเหล่านี้บางพวกก็สามารถแขวนลอยได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำหรือในอากาศในดิน แต่อนุภาคดินทุกชนิดไม่ได้ถือเป็นสารคอลลอยด์ทั้งหมด เพราะอนุภาคที่ถูกจัดเป็นสารคอลลอยด์ได้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 1 ไมครอน (0.001 มิลลิเมตร) เมื่อเป็นเช่นนั้นจะเห็นว่ามิอนุภาคดินเหนียวเพียงบางกลุ่มเท่านั้นที่ถูกจัดเป็นสารคอลลอยด์ได้ โดยเอาสารคอลลอยด์ในดินแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ อนินทรีย์คอลลอยด์และอินทรีย์คอลลอยด์

4.2.1 อนินทรีย์คอลลอยด์ (inorganic soil colloid) ซึ่งได้แก่ แร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก แบ่งออกเป็น 1 ประเภท คือ

1) แร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clays) เป็นแร่ดินเหนียวชนิดที่มีปริมาณสูงมากในดินที่อยู่ในเขตที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0-18 °C และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่ำกว่า 30 ตารางนิ้ว/ปี ซึ่งเป็นดินที่มีโครงสร้างของแร่ดินเหนียวซิลิเกต ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวพวกที่มีประจุลบเป็นจำนวนมากตามผิวของผลึก ทำให้สามารถดูดอนุภาคหรือไอออนที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี

2) แร่ดินเหนียวไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (hydrrous oxides of Fe and Al) เป็นแร่ดินเหนียวอีกกลุ่มหนึ่งที่พบมาก โดยเฉพาะในเขตร้อนและชุ่มชื้น ซึ่งเป็นพวกออกไซด์ที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล จะมีขนาดต่างกันตั้งแต่ขนาดที่เป็นสารคอลลอยด์ไปจนถึงขนาดใหญ่มาก แร่ดินเหนียวชนิดนี้จะมีการขยายตัวและหดตัวต่ำ มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย จึงทำให้มีการดูดซับน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นประจุบวกได้ต่ำมาก จึงไม่ค่อยมีการขยายตัว เมื่อเปียกหรือหดตัวเมื่อแห้ง และทั้งยังสามารถแห้งได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปียกน้ำ

4.2.2 อินทรีย์คอลลอยด์ (organic soil colloid) สารคอลลอยด์ในดินที่เป็นพวกอินทรีย์สารได้แก่ สารฮิวมัส ซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวขั้นสุดท้ายของสิ่งมีชีวิตทั้งทางเคมีและชีวเคมี พวกนี้จะอยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นผลึก

อิวมัสเป็นสารคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้มาก ร่วนซุยและไม่เหนียวเหมือนพวกแร่ดินเหนียวซิลิเกต ที่ผิวจะมีประจุลบอยู่สูงมาก ซึ่งประจุลบที่เกิดขึ้นที่ผิวนั้นเกิดจากการแตกตัวของ ไฮโดรเจนที่หมู่คาร์บอกซิล และฟิโนลิก โดยที่หมู่คาร์บอกซิลจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน ออกมาเมื่อระดับพีเอชสูงกว่า 7 พบว่าที่ผิวของอิวมัสจะมีหมู่คาร์บอกซิลและ ฟิโนลิกอยู่มากมาย ดังนี้ เมื่อระดับ pH สูงกว่า 3 จะทำให้อิวมัสมีประจุลบเกิดขึ้นที่ผิวได้มากมายเป็นผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับประจุบวก ได้สูงมาก คือ จะมีค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) ประมาณ 200 meq/100 กรัม แต่จะเห็นว่าการเกิดประจุลบขึ้นที่ผิวขึ้นอยู่กับระดับ pH

White, J.L (1971) รายงานว่า สารกำจัดวัชพืชกลุ่ม ไทราซีน จะดูดซับกับสารคอลลอยด์ของดิน ดังนั้นการดูดซับสารกำจัดวัชพืชขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณคอลลอยด์ในดิน ซึ่งสารคอลลอยด์ในดินนั้นมีสองชนิด คือ อนินทรีย์คอลลอยด์ เช่น ชนิดของดิน และ คอลลอยด์อินทรีย์ เช่น อินทรีย์วัตถุหรืออิวมัส

เกษม และนิพนธ์ (2517) ได้แบ่งตะกอนออกเป็น 2 ชนิด คือ ตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) ซึ่งเป็นตะกอนที่มีขนาดเล็กมีทั้งเป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแขวนลอยอยู่ในน้ำและสามารถพัดพาไปได้ไกล ส่วนตะกอนก้นลำธาร (bed load sediment) เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมากจะถูกพาไปตามท้องน้ำ เช่น กรวด ทราย และทรายแป้ง โดยพวกทรายจะตกตะกอนก่อน ตามด้วยทรายแป้งหยาบ ทรายแป้งละเอียดและดินเหนียว ตามลำดับ ตะกอนส่วนใหญ่มีต้นกำเนิดจากดิน ดังนั้นจึงเรียกตะกอนเหล่านี้ว่า ตะกอนดิน ความเร็วของกระแสน้ำจะมีผลต่อการตกตะกอนโดยความเร็วจะเป็นตัวกำหนดเวลาที่แตกต่างกันในการตกของตะกอนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

#### 4.3 การดูดซับและแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

ดินในเขตร้อนและชุ่มชื้นจะมีประจุบวกที่ถูกดูดซับอยู่ตามผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของดินในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ  $H^+ > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$  แต่อย่างไรก็ตามประจุบวกเหล่านี้จะถูกดูดซับไว้ด้วยแรงที่ไม่สูงนัก และสามารถที่จะถูกไล่ที่ออกไปหรือแลกเปลี่ยนที่กับประจุบวกชนิดอื่นๆ ได้

Wild (1993) อธิบายว่าชนิดและปริมาณของแร่องค์ประกอบดิน เป็นองค์ประกอบของดินที่ถือว่ามีความสำคัญต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืช เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับสัดส่วนพื้นที่ดูดซับและกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุของไอออน หรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายดินกับอนุภาคดิน ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับหรือการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในดินจึงให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านองค์ประกอบทางแร่ของดินเป็นอย่างมาก และได้ศึกษาลักษณะของการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดินและการจัดเรียงลำดับความสามารถในการดูดซับสารกำจัดวัชพืชของแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ smectite>illite>kaolinite ซึ่งเป็นลำดับที่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวดูดซับหรือความจุของการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของแร่ดินเหนียวเหล่านี้

## 5. กระบวนการดูดซับ (adsorption process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นผิวสัมผัส (interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซ ของแข็งและก๊าซ ของแข็งกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว สารที่พื้นผิวเกิดการดูดซับขึ้น เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับอาจเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือที่มีลักษณะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปพันธะเคมี

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้ คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิหรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (นิพนธ์, 2550)

### 5.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

#### 5.1.1 กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ (นิพนธ์, 2550)

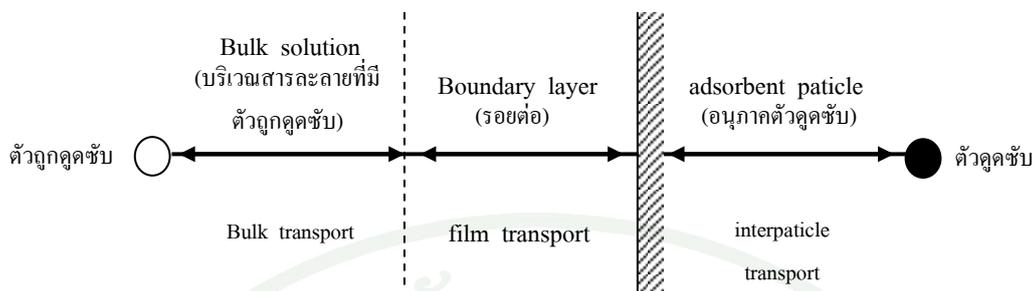
#### 5.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลาย

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้ (ภาพที่ 3)

ก) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

ข) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้น

ค) การขนส่งภายในอนุภาค (interpartical transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

## 5.2. รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

5.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของที่พื้นผิวหน้าของตัวถูกดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น (นิพนธ์, 2550)

5.2.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทาง

กายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ (นิพนธ์, 2550)

### 5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลต่อการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับสารที่ถูกดูดซับและสารที่ดูดซับ ซึ่งรูปแบบของการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ ขึ้นกับปัจจัย ดังนี้

#### 5.3.1 คุณสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก) ชนิดและโครงสร้างของสารที่ถูกดูดซับ สารที่ถูกดูดซับที่มีโครงสร้างประกอบ เช่น สารเคมีกลุ่ม:  $-OH$ ,  $-NH_2$ ,  $-NHR$ ,  $-CONH_2$ ,  $-COOR$ ,  $-NR_3^+$  ซึ่งกลุ่มเหล่านี้จะถูกดูดซับได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเคมีที่มีโมเลกุลใหญ่

ข) การละลายน้ำ (water solubility) สารที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออน จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย จะสามารถเกาะยึดบนตัวดูดซับได้ดี

ค) ค่าสัมประสิทธิ์ของสัดส่วนออกทานอลและน้ำ ( $K_{ow}$ ) สารที่มีโมเลกุลแบบที่มีขั้วต่ำหรือไม่มีขั้วจะมีค่า  $K_{ow}$  สูง คือ จะละลายในออกทานอลได้ดีกว่าในน้ำมากๆ และจะถูกดูดซับได้ง่ายมากโดยสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำ

ง) ปัจจัยของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับ คือ หากค่าความเข้มข้นของตัวดูดซับมาก อัตราการดูดซับจะมากขึ้นด้วย (Cheremisinoff, 1978)

และ นิพนธ์ (2550) ได้กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับลดลง

### 5.3.2 คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ก) ชนิดและโครงสร้างของตัวดูดซับที่มีโครงสร้างประกอบด้วยอะโรมาติก (aromatic) และคาร์บอกซิลิกคาร์บอน (carboxylic Carbon) สูงจะมีการจับกับสารที่ถูกดูดซับสูง ซึ่งโมเลกุลที่มีรูปร่างสม่ำเสมอจะง่ายต่อการดูดซับได้ดีมากกว่าที่รูปร่างไม่สม่ำเสมอ ในทางกลับกันโมเลกุลที่มีกลุ่มสาขาอาจมีพื้นที่ในการสัมผัสกับตัวดูดซับที่มากกว่า

ข) ปริมาณของตัวดูดซับ ถ้าในน้ำมีตัวดูดซับในปริมาณมากจะสามารถดูดซับได้มากด้วย

ค) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับในทางลบ คือ ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดซับเร็วกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดซับได้มากกว่าที่มีพื้นที่ผิวน้อย

ง) ความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity; CEC) ตัวดูดซับที่มีค่า CEC สูงจะมีประจุลบสูงจึงมีความสามารถในการดึงดูดแคทไอออนได้สูงเช่นกัน

จ) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตัวดูดซับที่มีค่าเป็นด่าง จะมีประจุลบเป็นจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดึงดูดประจุบวกได้สูง แต่หากตัวดูดซับมีค่าเป็นกรดจะมีประจุบวกสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับประจุลบได้เช่นกัน

อนุภาคดิน โดยเฉพาะอนุภาคดินเหนียวและสารอินทรีย์จะมีบทบาทสำคัญในการดูดซับสารเคมี ถ้าหากดินที่มีการดูดซับสารได้ดี โอกาสที่จะมาอยู่ในสารละลายและถูกไหลบ่าไปกับน้ำมีน้อย นอกจากนี้ความชื้นในดินก็มีบทบาทสำคัญในการดูดซับสารเคมีโดยอนุภาคดิน กล่าวคือ ถ้าดินมีความชื้นสูงหรือมีน้ำในดินมากๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีของอนุภาคดินจะต่ำลง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่หรือไปจับกับตำแหน่งของอนุภาคดินทำให้สารเคมีไม่สามารถจับได้ การดูดซับสารเคมีของอนุภาคดินมีความสัมพันธ์ผกผันกับขนาดของอนุภาคดินและความสามารถในการละลายน้ำของสารเคมี

จากการศึกษาพบว่า อนุภาคที่มีมากที่สุดในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียวนี้ก็คือ แร่ดินเหนียว (clay minerals) ซึ่งถือกันว่าเป็นส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ในดิน แร่ดินเหนียวมีประจุไฟฟ้าลบ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในดินซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกได้ ดังนั้นถ้าในดินมีแร่ดินเหนียวมากก็จะมีประจุลบมาก จึงสามารถดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้มากด้วย แร่ดินเหนียวจึงเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช ความรุนแรงของสภาพความเป็นกรด นอกจากนี้ยังมีส่วนควบคุมหรือด้านทานการเปลี่ยนแปลงของดินต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย (อัญชลี, 2534)

Alves *et al.* (2001) ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารกำจัดวัชพืชอะลาคลอร์ในปุ๋ยหมัก 2 ชนิด พบว่า ปุ๋ยหมักที่ใส่ลงไปทำให้การดูดซับสารอะลาคลอร์ในดินนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากปุ๋ยหมักช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน หรือเพิ่มพื้นที่ผิวดูดซับของดิน กลไกการดูดซับสารอะลาคลอร์เกิดจากสารประกอบพวกอะโรมาติกและอะลิฟาติกของสารอะลาคลอร์ สรรพพันธุ์กับกลุ่มหน้าที่หลักพวกฟีนอลิก คาร์บอกซิลิก (-COOH) และเอไมด์ (-CO-NH<sub>2</sub>, -CO-NH-, -CO-N-) บนพื้นผิวของอินทรีย์วัตถุ

Herwig *et al.* (2001) ศึกษาลักษณะการดูดซับและการปลดปล่อยสารกำจัดวัชพืชอาหาราซีนของแร่ดินเหนียวที่มีไอออนของ Na<sup>+</sup> เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Na<sup>+</sup>-kaolinite, Na<sup>+</sup>-illite และ Na<sup>+</sup>-montmorillonite พบว่ารูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเส้นตรงและอธิบายว่าค่าคงที่การดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวดูดซับของแร่ดินเหนียว ปริมาณการดูดซับสารกำจัดวัชพืชอาหาราซีนที่สูงสุดพบใน Na<sup>+</sup>-montmorillonite ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ที่มีความสามารถในการยึดดูดตัวได้สูง จึงมีพื้นที่ดูดซับสารอาหาราซีนได้สูงด้วย

DeSutter *et al.* (2003) ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยอาหาราซีนของตะกอนดินลมหอบ พบว่าเนื้อดินมีอิทธิพลต่อลักษณะการดูดซับและการปลดปล่อย ในดินร่วน ปริมาณการดูดซับสารอาหาราซีนขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ส่วนดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ปริมาณการดูดซับสารอาหาราซีนมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและปริมาณอนุภาคดินเหนียว และยังพบอีกว่าเม็ดดินที่มีขนาดเล็ก สามารถดูดซับได้ดีกว่าดินที่มีขนาดใหญ่ทั้งพื้นผิวภายนอกและภายใน

Peng and Arturo. (2009) ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยอาหาราซินและไดยูรอนจากการแพร่จากน้ำสู่ดิน พบว่าอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กและองค์ประกอบต่างๆ ของดินเหนียว สามารถดูดซับสารอาหาราซินได้มากกว่าร้อยละ 20 และมีอัตราการคายอาหาราซินสูงมาก ดังนั้นควรจะนำดินกลับมาใช้หมุนเวียนอยู่ภายในระบบ เพื่อป้องกันไม่ให้อาหาราซินแพร่กระจายออกไปได้อีกด้วย

#### 5.4 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

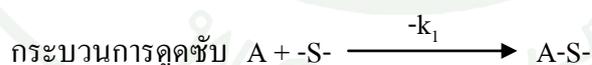
เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น  $C_0$  ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับผิวพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  mol/l ในการละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

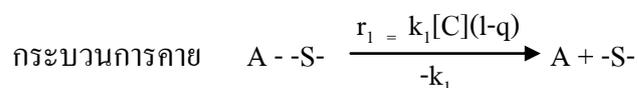
Q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในการละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรผลตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

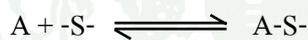
ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad (1)$$

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล  $K = \frac{q}{C} \quad (2)$

$q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

ต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ

เช่น mol/kg, mol/g, mg/kg

$W$  = มวลของตัวดูดซับที่ใช้หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg

$V$  = ปริมาณของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่

หน่วยเป็น ลบ.ซม. (cm<sup>3</sup>) หรือลิตร

$C$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

หน่วยเป็น ความเข้มข้น เช่น mol/l

$q$  อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (adsorption capacity)

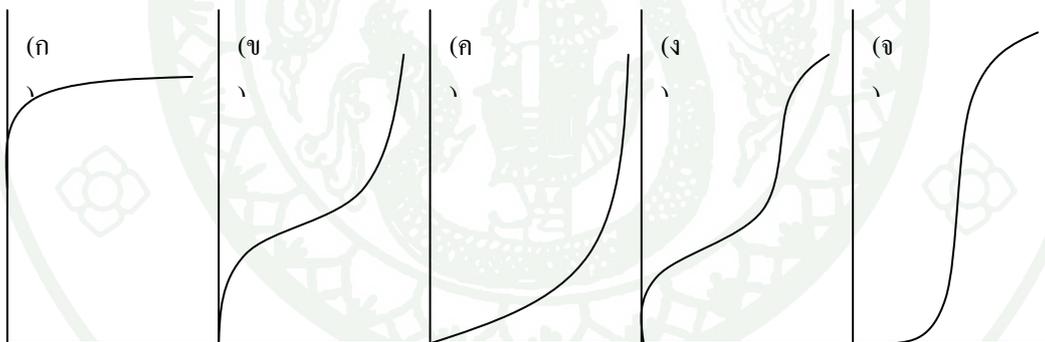
ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า  
 ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad (3)$$

### 5.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton. (1961)

จากภาพที่ 4 (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนภาพที่ 4 (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

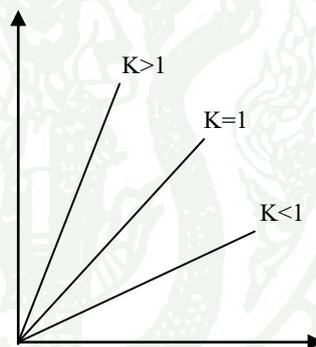
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

5.5.1 สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  ตามสมการที่ (2)

$$K = \frac{C}{q}$$

$$\text{จะได้ } q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสถานะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

$K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสถานะสมดุล

5.5.2 สมการการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้

สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

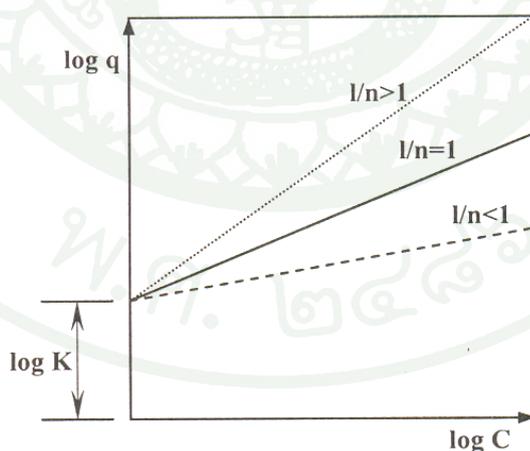
$$q = KC^{1/n} \quad (4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K$



ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิช

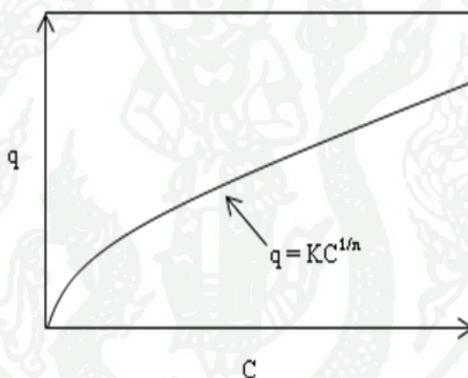
ที่มา: นิพนธ์ (2550)

ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า  $\frac{1}{n} < 1$  บอกลถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกลถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

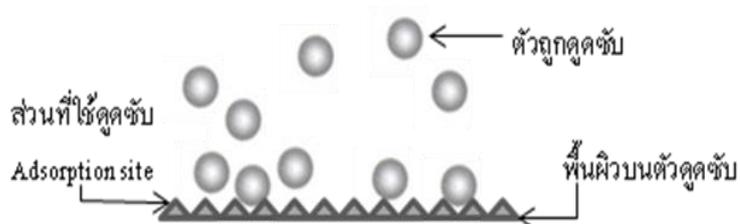
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ 7 จะไม่สามารถบอกลถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นตรงของฟรูดิช

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

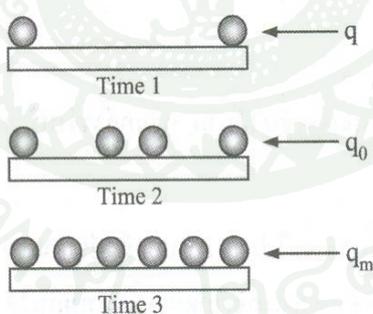
5.5.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



ภาพที่ 8 กลไกการดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้และจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 9



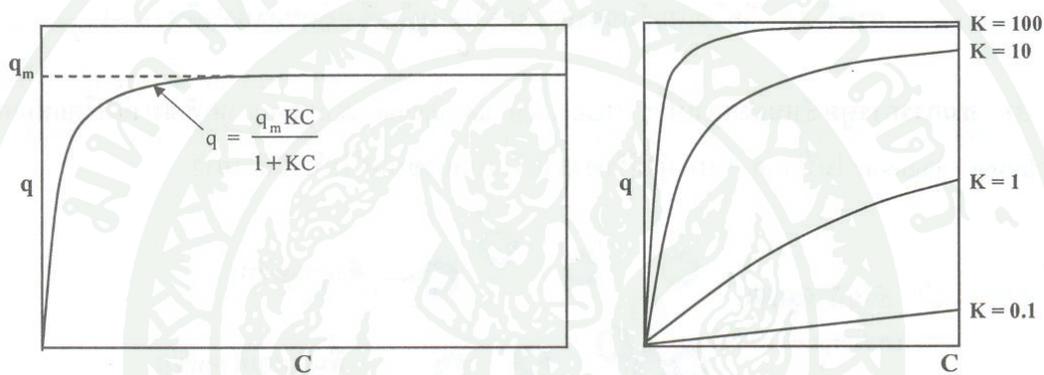
ภาพที่ 9 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวปริมาณตัวดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ  $q_m$

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

จากความรู้เรื่องสมการการดูดซับและจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่ง รูปแบบของสมการแลงเมียร์จะใช้สมการที่ (1) เพียงแต่ต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับแทนด้วย  $q_m$  ดังนั้น สมการที่ (1) จึงมีรูปแบบดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \quad (6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากการที่ (6) จะได้กราฟดังภาพที่ 10



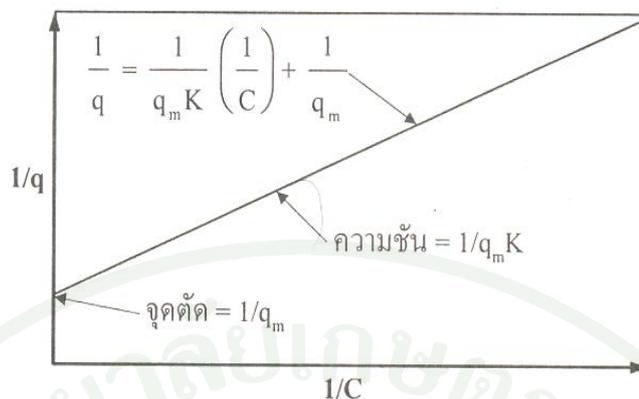
ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left( \frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (7)$$

เขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_m K}$  และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  ดังภาพที่ (11)



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ (2550)

จากที่กล่าวมาทั้งหมด พอสรุปได้ว่า สมดุลการดูดซับเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งจะบอกด้วยอัตราส่วนปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่นำมาใช้อธิบายนั้น ได้แก่ สมการการดูดซับของฟรุนดลิชและของแลงเมียร์ (นิพนธ์, 2550)

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

### 1. อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างดิน

- 1.1 ถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างดิน
- 1.2 อุปกรณ์สำหรับเก็บดินตะกอน ได้แก่ จอบ เสียม พลั่วสแตนเลส และ soil core
- 1.3 สายวัดและตลับเทป

### 2. อุปกรณ์และสารเคมี

#### 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- (1) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น SP-1105 บริษัท Ningbo Hinotek Technology ประเทศจีน
- (2) เครื่องเขย่า (shaker) Model VRN-480 GEMMY Orbit Shaker
- (3) เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง ของบริษัท Metler Toledo รุ่น AB 104-S/FACT
- (4) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 315
- (5) เครื่องเหวี่ยง (centrifuge)
- (6) เครื่องอั่งน้ำอุ่น
- (7) ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร
- (8) กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- (9) เครื่องแก้ว

## 2.2 สารเคมี

- (1) สารมาตรฐานอะทราซีน (atrazine,  $C_8H_{14}ClN_5$ ) บริษัท Supelco บริษัทที่ร้อยละ 99.99
- (2) ไพริดีน (pyridine,  $C_5H_5N$ ) AR Grade บริษัท Merck
- (3) พารา-อะมิโนอะซิโตฟีโนน (p-Aminoacetophenone,  $H_2NCH_6COCH_3$ ) AR Grade บริษัท Ferak Berlin
- (4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) AR Grade บริษัท Ajax Finechem
- (5) ไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) AR Grade บริษัท UNI-CHEM
- (6) แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride,  $CaCl_2$ ) AR Grade บริษัท Merck
- (7) โซเดียม เอไซด์ (sodium acide,  $NaN_3$ ) AR Grade บริษัท Merck
- (8) เมทานอล (methanol,  $CH_3OH$ ) AR Grade บริษัท J.T. Baker
- (9) กรดฮิวมิก (humic acid) AR Grade บริษัท SIGMA-ALDRICH
- (10) น้ำปราศจากไอออน (distilled water, DW)

## 3. ตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินจากแปลงข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และส่วนผิวหน้าของตะกอนในลำน้ำ จากพื้นที่ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ จำนวน 3 ตัวอย่าง ดังนี้

- ตัวอย่างที่ 1 ดินร่วนชั้นบน เก็บที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร
- ตัวอย่างที่ 2 ดินร่วนชั้นล่าง เก็บที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร
- ตัวอย่างที่ 3 ดินตะกอน

## วิธีการ

### 1. การเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตร

1.1 เก็บดินตัวอย่างดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน ที่ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยเก็บตัวอย่างดินด้วยพลั่วสแตนเลส บุคดินในลักษณะที่เป็นตัววี (v-shape) เก็บตัวอย่างดินร่วนชั้นบนที่ระดับ 0-15 เซนติเมตร ดินร่วนชั้นล่างที่ระดับ 15-30 เซนติเมตร สำหรับดินตะกอน เก็บตัวอย่างดินส่วนผิวหน้าของตะกอนในลำน้ำที่รองรับน้ำจากพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเกิดจากการตกค้างสะสมของตะกอนในแหล่งน้ำบริเวณใกล้แปลงข้าวโพด เก็บรักษาตัวอย่างดินในถุงพลาสติก สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สารอาหารไนโตรเจน ใช้ถุงพลาสติกสีดำเพื่อป้องกันแสงและเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำมาวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ นำมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ตลอดจนหาปริมาณอาหารไนโตรเจนตกค้างในดิน



ภาพที่ 12 การเก็บตัวอย่างดินตะกอนและลักษณะของดินตะกอน

### 2. การเตรียมสารละลาย

2.1 สารละลายมาตรฐานอาหารไนโตรเจนเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งอาหารไนโตรเจน 0.0100 กรัม ละลายในเมทานอลและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 10.0 มิลลิลิตร

2.2 สารละลายมาตรฐานอาหาราซีนเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายมาตรฐานอาหาราซีนในข้อ 2.1 มา 5.00 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50.0 มิลลิลิตร

2.3 สารละลายมาตรฐานอาหาราซีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายมาตรฐานอาหาราซีนในข้อ 2.2 มา 5.00 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50.0 มิลลิลิตร

2.4 สารละลายไพรีดีน

ปีเปตสารละลายละลายไพรีดีน มา 18.0 มิลลิลิตร, ปีเปตน้ำกลั่น มา 12.0 มิลลิลิตร และปีเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น มา 3 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันและเก็บในขวดสีชา

2.5 สารละลายพารา-อะมิโนอะซิโตฟีโนนเข้มข้น 1% W/V

ชั่งสารพารา-อะมิโนอะซิโตฟีโนน 1 กรัม ละลายด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (1:4) และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

2.6 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์

ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ มา 11.1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

2.7 สารละลายโซเดียมเฮไซค์เข้มข้น 0.02 %

ชั่งโซเดียมเฮไซค์ 0.02 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

2.8 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และ 0.1 โมลาร์

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40.0 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500.0 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์

ปีเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ มา 25.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500.0 มิลลิลิตร

2.9 สารละลายไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรคลอริก 1.0 โมลาร์ มา 5.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500.0 มิลลิลิตร

2.10 สารละลายกรดซิวมิก เข้มข้น 20 ppm

ชั่งซิวมิก 0.1075 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

สารละลายกรดซิวมิกเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายกรดซิวมิก เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 10.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

สารละลายกรดซิวมิกเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายกรดซิวมิก เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 10.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

สารละลายกรดซิวมิกเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายกรดซิวมิก เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 20.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100.0 มิลลิลิตร

**3. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน**

นำตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่าง มาผึ่งลมให้แห้ง บดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร คลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ดังนี้

3.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (soil pH) โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4972

3.2 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) โดยวิธี Walkley and Black Method ตามมาตรฐาน ASTM D 2974-87

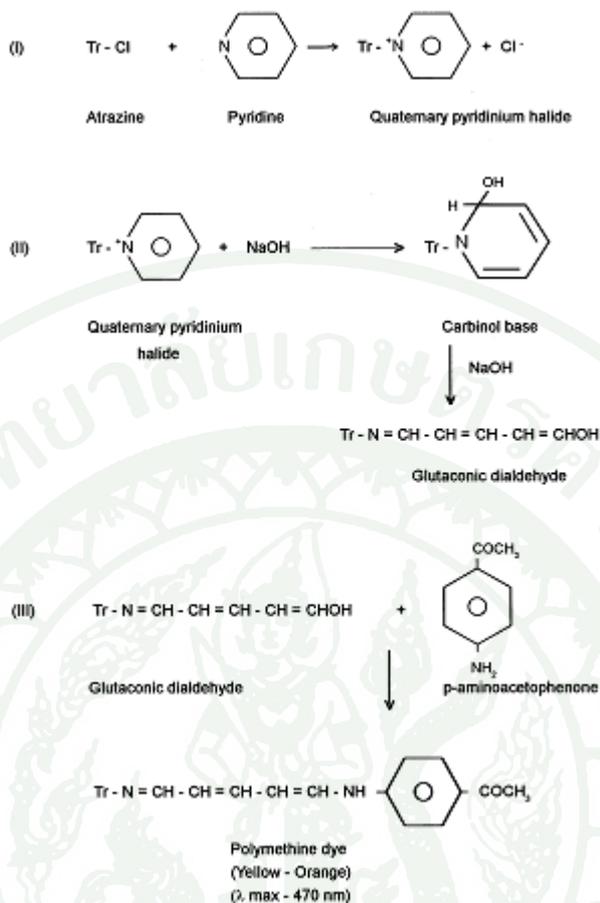
3.3 ความจุแลกเปลี่ยนประจุแคทไอออน (cation exchange capacity) (Chapman, H.D., 1965)

3.4 ร้อยละของอนุภาคดินเหนียว อนุภาคดินทรายและอนุภาคทรายแป้ง

#### 4. การเตรียมกราฟมาตรฐานอาหาราซีน

4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานอาหาราซีน เข้มข้น 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปิเปตสารละลายมาตรฐานอาหาราซีน เข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

4.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานอาหาราซีน เข้มข้น 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มาความเข้มข้นละ 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้วเติมสารละลายไพริดีน 0.2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปต้มให้เดือดในเครื่องอังน้ำอุ่นเป็นเวลา 15 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายพาราอะมิโนอะซิโตน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 13 แล้วปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ตามวิธีการของ Kesari and Gupta (1998) แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงในแกน y และความเข้มข้นของอาหาราซีนในแกน x



ภาพที่ 13 ปฏิกิริยาของสารพารา-อะมิโนอะซิโตฟีโนนกับอตราซีน

ที่มา: Kesari and Gupta (1998)

## 5. การวิเคราะห์ปริมาณอตราซีนในดิน

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารอตราซีนที่ตกค้างในตัวอย่างดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน วิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Kesari and Gupta (1998) และ Peng and Atruro (2009) โดยชั่งดินตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ปริมาณ 2.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำ 10.0 มิลลิลิตรนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ Whatman No.42 เก็บสารละลายที่ได้ในขวดปริมาตรขนาด 25.0 มิลลิลิตร ด้วยเมทานอล และทำซ้ำ ปิเปตสารละลาย 20.0 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณอตราซีนตามวิธีในข้อ 4.2 แต่ละตัวอย่างดินทำการทดลอง 3 ซ้ำ

## 6. การเตรียมตัวอย่างดินปฐมภูมิ

ซั่งตัวอย่างดินที่เตรียมได้จากข้อ 3 ตัวอย่างละ 20.0 กรัม ลงในขวดรูปกรวยชมพู เดิม สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมเฮไซค์ เข้มข้น 0.02 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดจุกขวดรูปกรวยชมพูด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ แล้วนำไปเขย่าด้วย เครื่องเขย่าความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ Whatman No.42 และนำตัวอย่างดินที่ผ่านการกรองมาอบแห้งและร่อน ซั่งตัวอย่างดิน 2.0 กรัม นำไปวิเคราะห์หาอาหารธาซินตามวิธีในข้อ 4.2 แต่ละตัวอย่างดินทำซ้ำ 3 ครั้ง และทำซ้ำจนปริมาณ อาหารธาซินในดินแต่ละชนิดคงที่

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ มีคุณสมบัติคือเป็นสารดูดความชื้น จะช่วยให้ดินสามารถดูด น้ำได้เร็วขึ้นและง่ายต่อการกรอง และสารละลายโซเดียมเฮไซค์ มีคุณสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรีย และลดการรบกวนของสารอินทรีย์ในดิน เนื่องจากดินที่นำมาทดลองไม่ได้ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ออกไป



ภาพที่ 14 ดินปฐมภูมิ

## 7. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

### 7.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับอาหาราซีน

นำสารละลายมาตรฐานอาหาราซีนเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปรับให้มีพีเอชต่างๆ กันคือ 5, 6, 6.5, 7 และ 8 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล เพื่อปรับสารละลายให้อยู่ในสภาพกรดและปรับด้วยสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล เพื่อปรับสารละลายให้อยู่ในสภาพด่าง เติมสารละลายมาตรฐานอาหาราซีนที่พีเอชต่างๆ ปริมาตร 10 มิลลิตร ลงในขวดรูปกรวยที่มีตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ ปริมาณ 2.0 กรัม บรรจุอยู่ ปิดจุกด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ เขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามวิธีการของ OECD (2002) ตั้งทิ้งไว้เวลานาน 30 นาที เหย็งแยกด้วยเครื่องเหย็งแยกความเร็ว 3,000 รอบ นาน 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ Whatman No.42 นำสารละลายที่กรองได้มาปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 10.0 มิลลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปวิเคราะห์หาปริมาณอาหาราซีนตามวิธีในข้อ 4.2 ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลองที่ได้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

นำตัวอย่างดินร่วนชั้นล่างปฐมภูมิและดินตะกอนปฐมภูมิ ที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ

### 7.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดิน

ชั่งตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิที่เตรียมได้จากข้อที่ 6 มา 2.0 กรัม ใส่ในขวดรูปกรวย เติมสารละลายมาตรฐานอาหาราซีนเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.0 มิลลิตร ปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ แล้วเขย่าตามวิธีในข้อที่ 7.1 และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอาหาราซีนตามวิธีในข้อ 4.2 และบันทึกผลการทดลองที่ได้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

นำตัวอย่างดินร่วนชั้นล่างปฐมภูมิและดินตะกอนปฐมภูมิ ที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ

### 7.3 ศึกษาอิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับ

นำสารละลายกรดฮิวมิกเข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาตร 20 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 ลงในขวดรูปกรวยที่มีดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ 2.0 กรัม บรรจุอยู่ ปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามวิธีการของ Abate *et all* (2006) กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 เติมสารละลายอาหารซีนที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยชมพูที่มีตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ ปริมาตร 2.0 กรัม บรรจุอยู่ ปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ แล้วเขย่าตามวิธีในข้อที่ 7.1 และนำไปสกัดหาอาหารซีนตามวิธีในข้อ 4.2 ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลองที่ได้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

นำตัวอย่างดินร่วนชั้นล่างปฐมภูมิและดินตะกอนปฐมภูมิ ที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ

### 7.4 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ชั่งตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิที่เตรียมได้จากข้อที่ 6 มา 2.0 กรัม เติมสารละลายมาตรฐานอาหารซีน พีเอช 6.5 เข้มข้น 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยที่มีตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ ปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ แล้วเขย่าตามวิธีในข้อที่ 7.1 และนำไปสกัดหาอาหารซีนตามวิธีในข้อ 4.2 ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลองที่ได้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงในแกน y และความเข้มข้นของอาหารซีนในแกน x เพื่อวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์จากสมการ Freundlich และสมการ Langmuir

นำตัวอย่างดินร่วนชั้นล่างปฐมภูมิและดินตะกอนปฐมภูมิ ที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่างดินร่วนชั้นบนปฐมภูมิ

## 8. การปลดปล่อยอาหารซีนในดิน

นำตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ผ่านการทดลองดูดซับจากข้อที่ 7.1 มาเติม 0.01 โมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟลอยด์ เขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2,4 และ 6 ชั่วโมง ตามวิธีการของ OECD (2002) แล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านกรองได้มาปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาอาหาราซีนตามวิธีในข้อ 4.2 ตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ



## ผลและวิจารณ์

### 1. การเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตร

ประชากรในพื้นที่ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมและมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีการใช้สารอาหารอินทรีย์เป็นสารกำจัดวัชพืชประเภทไบอากซ์และไบแคบในไร่ข้าวโพด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของสารอาหารอินทรีย์ในดิน ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง คือ ดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง เก็บตัวอย่างจากแปลงปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ลักษณะดินที่พิจารณาจากสายตา พบว่า เนื้อดินละเอียดมีสีดำ และเก็บตัวอย่างดินตะกอน จากส่วนผิวหน้าของตะกอนในลำน้ำ ซึ่งรองรับน้ำจากพื้นที่เกษตรกรรม ลักษณะดินที่พิจารณาจากสายตา พบว่า เนื้อดินหยาบมีสีน้ำตาล

#### 1.1 คุณสมบัติของดินในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยกะโปะ

เก็บตัวอย่างดินในพื้นที่แปลงปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ บริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยเก็บตัวอย่างดินใน 3 ตัวอย่าง คือ ดินร่วนชั้นบน (ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร) ดินร่วนชั้นล่าง (ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร) และดินตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 2

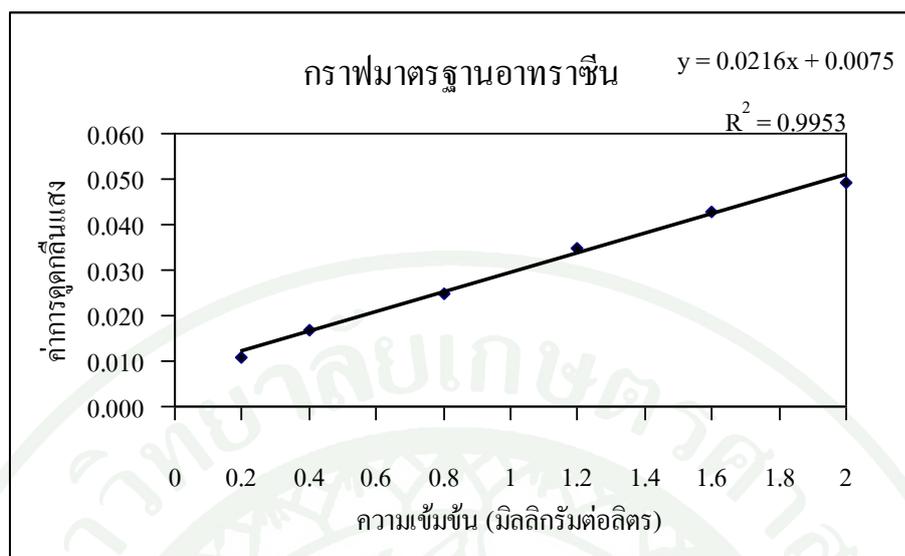
**ตารางที่ 2** คุณภาพดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ บริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ พ.ศ. 2551

คุณภาพดินที่ตรวจวิเคราะห์	ผลการตรวจวิเคราะห์		
	ดินร่วนชั้นบน	ดินร่วนชั้นล่าง	ดินตะกอน
1. อินทรีย์วัตถุ (%)	1.55	1.28	0.28
2. pH	5.0	5.1	6.7
3. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cmol/kg)	11.20	11.20	4.40
4. อนุภาคดินเหนียว(%)	19.50	20.00	2.00
5. อนุภาคดินทราย (%)	50.00	45.00	91.00
6. อนุภาคทรายแป้ง(%)	30.50	35.00	7.00

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด พบว่าดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) และพีเอช มีค่าใกล้เคียงกัน และในดินตะกอนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) อยู่ในระดับต่ำ พีเอชสูงกว่าในดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) น้อยมาก และมีอนุภาคดินทราย (sand) มากกว่าดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง

## 2. เตรียมกราฟมาตรฐานอาหาราซีน

กราฟมาตรฐานอาหาราซีนที่เตรียมได้จากสารละลายมาตรฐานอาหาราซีน ที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้กราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 15 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์คือ  $y = 0.021 x + 0.0075$  และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) = 0.9953 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอาหาราซีนเป็นแบบเส้นตรง



ภาพที่ 15 กราฟมาตรฐานอาหาราซีน

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณอาหาราซีนในดิน

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารอาหาราซีนที่ตกค้างในตัวอย่างดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน วิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Kesari and Gupta (1998) และ Peng and Atruro (2009) พบว่ามีปริมาณอาหาราซีนตกค้างในดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอนเท่ากับ 1.26, 2.00 และ 1.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

การวิเคราะห์อาหาราซีนในดินปฐมภูมิที่เตรียมได้จากตัวอย่างดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน จำนวนตัวอย่างละ 20 ครั้ง พบว่ามีปริมาณอาหาราซีนคงที่เท่ากับ 0.36, 0.35 และ 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 4. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

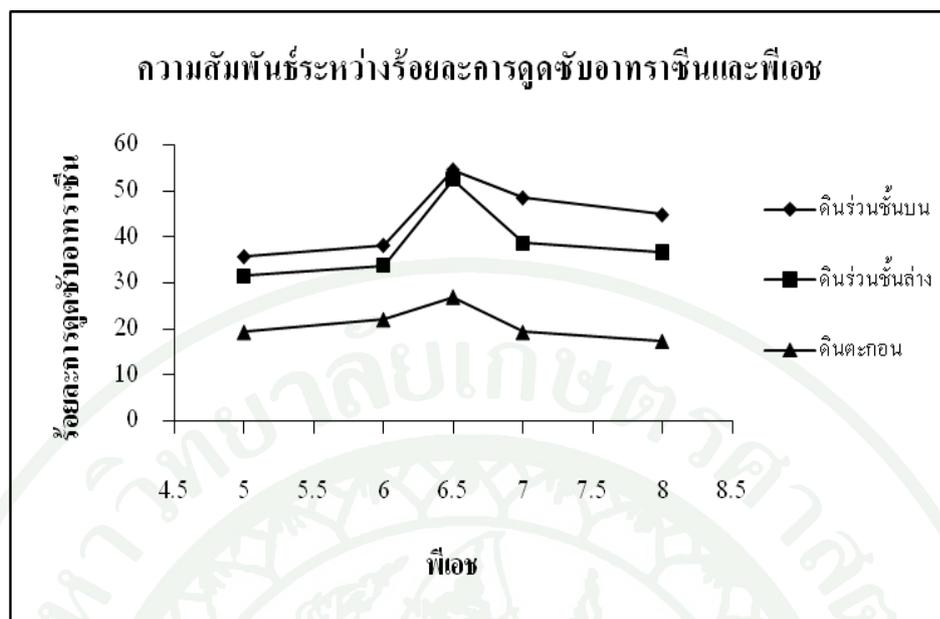
การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับอาหาราซีนของดินทั้ง 3 ชนิด โดยทำการทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม อิทธิพลของกรดฮิวมิก และไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 24 ชั่วโมงตามวิธีการดูดซับอาหาราซีนของ OECD (2002) ดังนี้

#### 4.1 อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับอาหารสีน

การศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับอาหารสีน เข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชต่างๆ พบว่า พีเอช 6.5 ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอนสามารถดูดซับอาหารสีนได้สูงสุด ร้อยละ 54.55, 52.51 และ 26.98 ตามลำดับ เมื่อพีเอชสูงขึ้น การดูดซับอาหารสีนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอาหารสีนมีสมบัติเป็นเบสอ่อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะเกิดการแตกตัวให้  $H^+$  ไปโปรโตเนตหมู่ amine group เกิดเป็นหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ทำให้มีค่าพีเอชใกล้ 6.5 มากที่สุด

ตารางที่ 3 อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับอาหารสีนในดินทั้ง 3 ชนิด

พีเอช	ร้อยละการดูดซับอาหารสีน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)		
	ดินร่วนชั้นบน	ดินร่วนชั้นล่าง	ดินตะกอน
5.0	38.83(±0.02)	31.56(±0.02)	19.38(±0.03)
6.0	38.27(±0.02)	33.79(±0.01)	22.09(±0.01)
6.5	54.55(±0.03)	52.51(±0.01)	26.98(±0.01)
7.0	48.52(±0.02)	38.67(±0.01)	19.38(±0.01)
8.0	44.84(±0.01)	36.71(±0.02)	17.44(±0.01)



ภาพที่ 16 กราฟแสดงการดูดซับอาหารจีนที่พีเอชต่างๆ ในดิน 3 ชนิด

#### 4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับของดิน

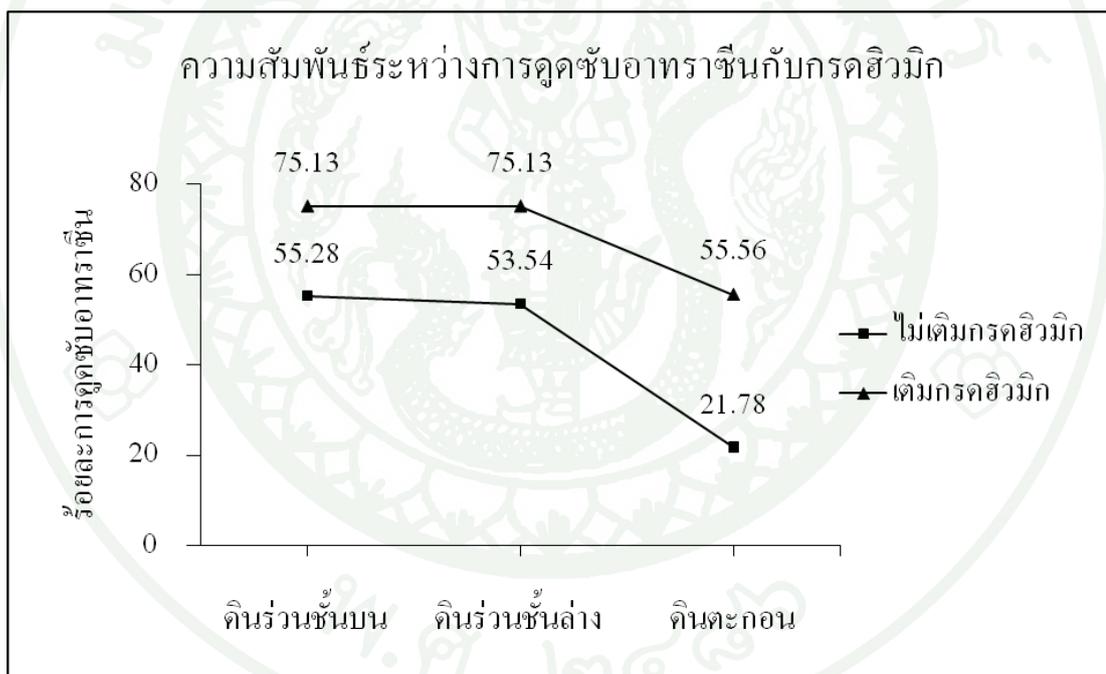
จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหารจีนของคณุพงษ์ (2548) พบว่าอาหารจีนมีระยะเวลาสมดุลของเวลาสัมผัส (contact time) เท่ากับ 24 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุล ดังนั้นการทดลองนี้จึงทดลองหาการดูดซับอาหารจีน โดยกำหนดให้มีระยะเวลาสมดุลของเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง และพีเอช เท่ากับ 6.5 (จากผลการทดลองที่ 4.1) ผลการทดลองพบว่า ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน สามารถดูดซับสารละลายอาหารจีนร้อยละ 55.28, 53.54 และ 21.78 ตามลำดับ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้ดินสามารถอุ้มน้ำได้ดี ในดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่างมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงกว่าดินตะกอน จึงสามารถดูดซับอาหารจีนได้ดีกว่าดินตะกอน อีกทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ในดินตะกอนยังมีค่าน้อยกว่าดินทั้งสองชนิดอีกด้วย

พีเอชของดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง มีสมบัติเป็นกรดแต่อาหารจีน มีหมู่อะมิโนซึ่งแสดงสมบัติเป็นเบส ดังนั้นดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่างจึงสามารถดูดซับอาหารจีนได้ในดินได้ดีกว่าดินตะกอนที่มีความเป็นกรดเป็นด่างเฉลี่ย 6.7

#### 4.3 อิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับ

ผลการศึกษาอิทธิพลของกรดฮิวมิกที่มีผลต่อการดูดซับอาหารสีน โดยเติมสารละลายกรดฮิวมิก เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิตร พบว่าดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่าง และดินตะกอน สามารถดูดซับอาหารสีน ร้อยละ 75.13, 75.13 และ 55.56 ตามลำดับ ดังภาพที่ 17 แสดงให้เห็นว่าดินทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับสารอาหารสีนสูงขึ้น เนื่องจากฮิวมิกเป็นสารคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งสมบัติทางกายภาพของกรดฮิวมิกจะเป็นตัวเชื่อมอนุภาคของดินให้เกาะกันเป็นก้อน ทำให้ดินเนื้อหยาบมีช่องว่างขนาดเล็ก (micropore) เพิ่มขึ้น สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้มากขึ้น และสมบัติทางเคมีของกรดฮิวมิก เมื่อระดับพีเอชสูงกว่า 3 จะทำให้ฮิวมิกมีประจุลบเกิดขึ้นที่ผิวได้มาก เป็นผลทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูงมาก



ภาพที่ 17 กราฟแสดงอิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับอาหารสีนในดิน 3 ชนิด

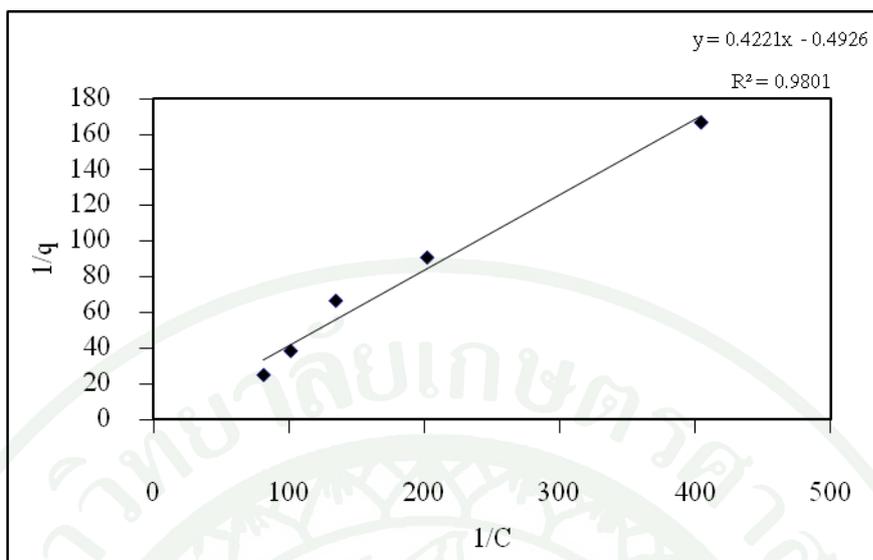
#### 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ตารางที่ 4 การดูดซับสารละลายอาหาราซีนในดิน 3 ชนิด

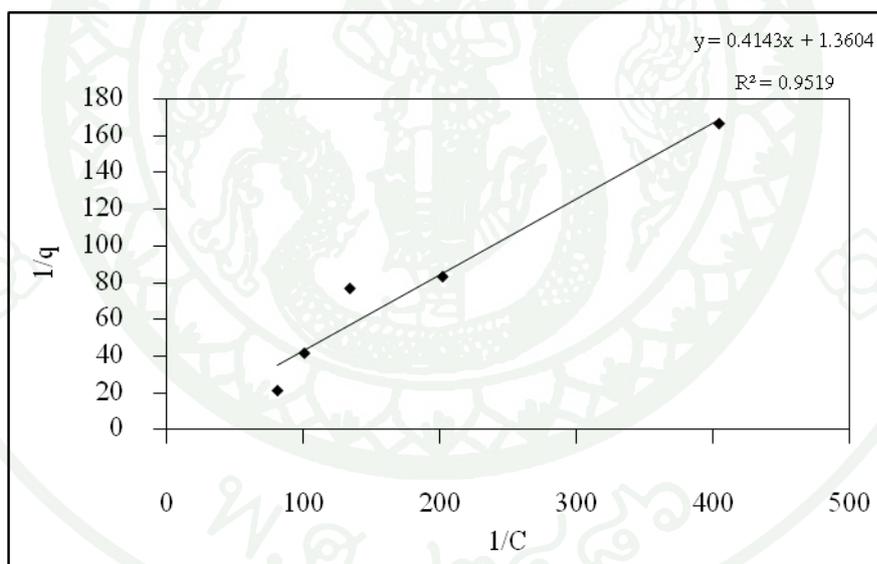
ความเข้มข้นอาหาราซีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับอาหาราซีน		
	ดินร่วนชั้นบน	ดินร่วนชั้นล่าง	ดินตะกอน
0.5	75.00	73.61	42.67
1.0	65.66	66.67	40.00
1.5	62.39	65.79	23.32
2.0	55.37	50.69	20.74
2.5	35.48	11.95	14.37

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับอาหาราซีนของดินทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ดังภาพที่ 18-23 ตามลำดับ

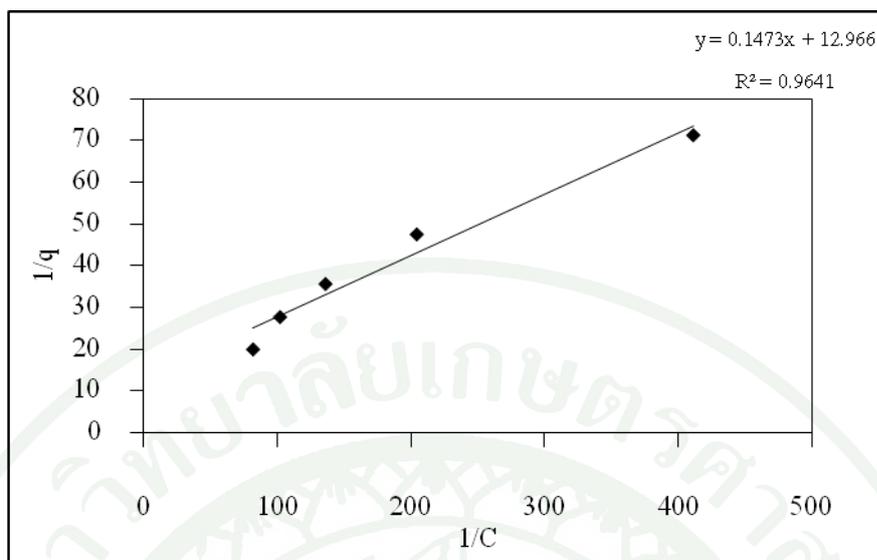
พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับอาหาราซีนในดินร่วนทั้ง 2 ชนิด สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ และมีค่า K เท่ากับ -1.167, 3.284 อธิบายได้ว่าสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวดูดซับ แต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับ เกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียว แต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน ตัวดูดซับมีพลังงานในการดูดซับเหมือนกันและโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ สำหรับการดูดซับอาหาราซีนในดินตะกอน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) สอดคล้องกับสมการของฟรุนดิช มีค่า K เท่ากับ 88.024 อธิบายได้ว่าสมการฟรุนดิช มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) หรืออาจเกิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มาซ้อนทับกัน เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ การดูดซับในดินตะกอนมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบหลายชั้นจริง



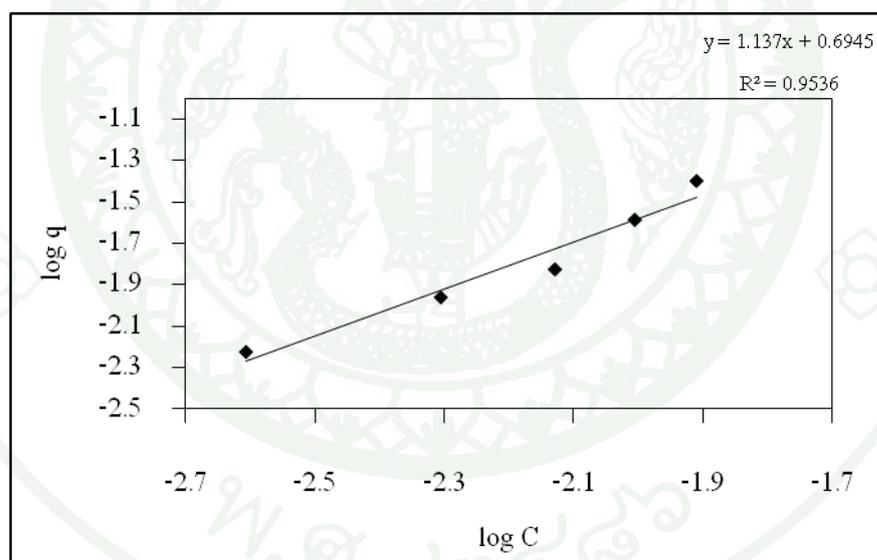
ภาพที่ 18 แล่งเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาทราซีนด้วยดินร่วนชั้นบน



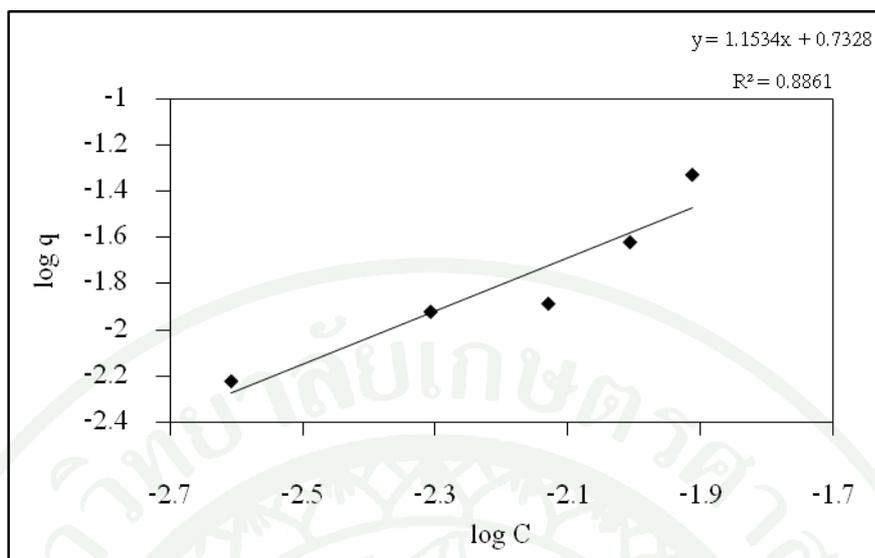
ภาพที่ 19 แล่งเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาทราซีนด้วยดินร่วนชั้นล่าง



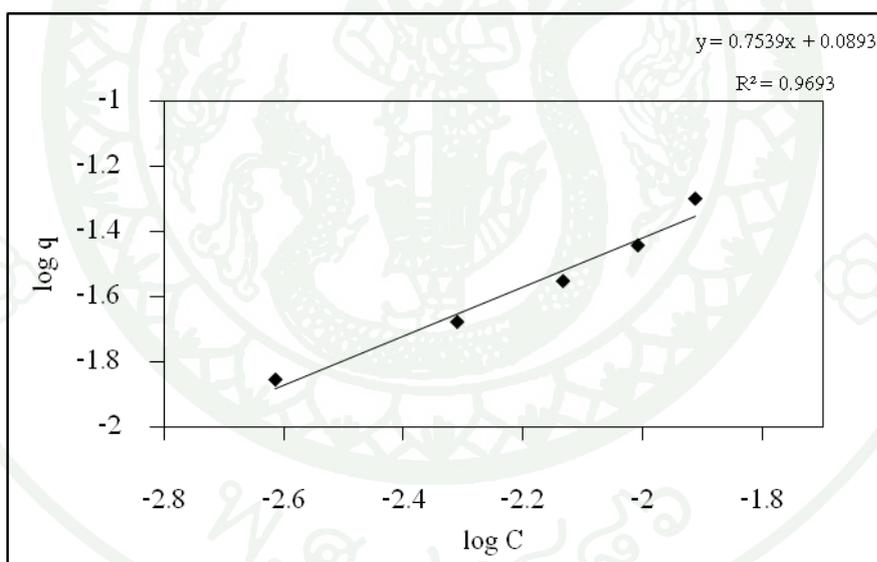
ภาพที่ 20 แล่งเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหารจีนด้วยดินตะกอน



ภาพที่ 21 ฟรอนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหารจีนด้วยดินร่วนชั้นบน



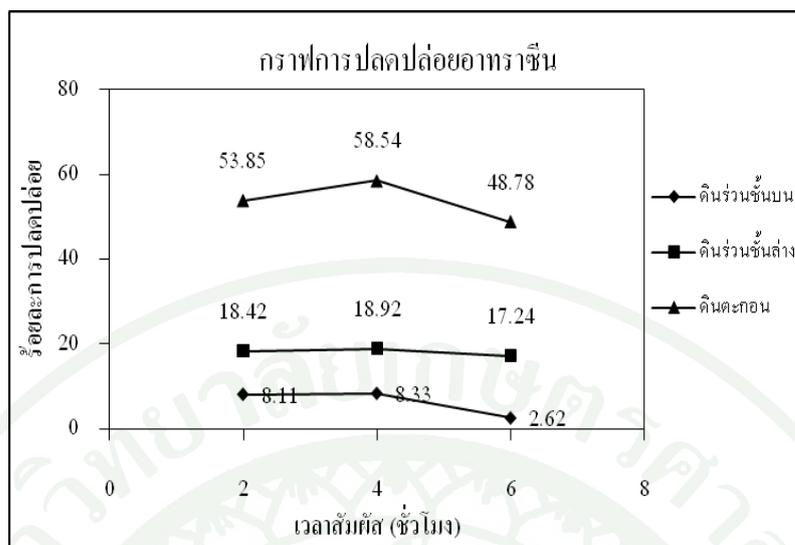
ภาพที่ 22 ฟรอนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหารจีนด้วยดินร่วนชั้นล่าง



ภาพที่ 23 ฟรอนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับอาหารจีนด้วยดินตะกอน

## 5. ประสิทธิภาพการปลดปล่อยอาหารจีนจากดิน

ผลการวิเคราะห์หาร้อยละการปลดปล่อยอาหารจีน พบว่าดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่าง และดินตะกอนสามารถปลดปล่อยอาหารจีน ที่เวลา 4 ชั่วโมง เท่ากับ 8.33, 18.92 และ 58.54 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 กราฟแสดงการปลดปล่อยอาหารจีนในดิน 3 ชนิด

ดินตะกอนสามารถปลดปล่อยอาหารจีนได้สูงสุด เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและอนุภาคดินเหนียวอยู่ในระดับต่ำมาก ทำให้เม็ดดินเกาะตัวกันไม่ดี สามารถอุ้มน้ำได้น้อย มีสมบัติเป็นกรดอ่อน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ต่ำมาก และอาหารจีนแสดงสมบัติเป็นเบส จึงสามารถดูดซับอาหารจีนได้น้อยกว่าดินร่วนทั้งสองชนิด

เมื่อพิจารณาอาหารจีนที่ถูกดูดซับไว้ในดินทั้ง 3 ชนิด สามารถส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกครั้ง โดยการคายหรือปลดปล่อย (desorption) ภายในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ปริมาณและระยะเวลาตกค้างของอาหารจีนในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาหารจีนยังกระจายตัวสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดพิษต่อสัตว์หน้าดินและมีผลระยะยาวต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำนั่นเอง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารซินของดิน 3 ชนิด คือ ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอนในพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.55, 1.28 และ 0.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีความเป็นกรดต่างเฉลี่ย 5.0, 5.0 และ 6.7 ตามลำดับ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) เฉลี่ย 11.20, 11.20 และ 4.40 ตามลำดับ มีอนุภาคดินเหนียวเฉลี่ย 19.50, 20.00 และ 2.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2. ดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน มีปริมาณอาหารซินตกค้างเท่ากับ 1.26, 2.00 และ 1.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำดินทั้ง 3 ชนิด ไปเตรียมเป็นดินปลูกภูมิ โดยการล้างด้วยน้ำกลั่นที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ และ โซเดียมเฮไซด 0.02 % พบว่า ปริมาณอาหารซินที่เหลือตกค้างในดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอนในปริมาณคงที่ที่ 0.36, 0.35 และ 0.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

3. พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอาหารซินของดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่าง และดินตะกอน คือ 6.5 สามารถดูดซับอาหารซินได้สูงสุด ร้อยละ 54.55, 52.51 และ 26.98 ตามลำดับ

4. การดูดซับปริมาณอาหารซินในดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่าง และดินตะกอน พบว่า สามารถดูดซับอาหารซินได้สูงสุด ร้อยละ 55.28, 53.54 และ 21.78 ตามลำดับ และเมื่อนำไปเติมด้วยสารละลายกรดฮิวมิก เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง พบว่าดินทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับอาหารซินได้เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 75.13, 75.13 และ 55.56 ตามลำดับ

5. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่าดินทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะการดูดซับเป็นแบบกายภาพทั่วไป ดินร่วนชั้นบนและดินร่วนชั้นล่าง สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ เนื่องจากดิน

ทั้ง 2 ชนิด มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบชั้นเดียว และดินตะกอน สอดคล้องกับสมการของฟรอนดิซ โดยที่โมเลกุลของดินตะกอนมีลักษณะที่ซ้อนเป็นหลายชั้น

6. การปลดปล่อยอาหารซินในดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน พบว่า ที่เวลา 4 ชั่วโมง มีการปลดปล่อยอาหารซินได้ดีที่สุดร้อยละ 8.33, 18.92 และ 53.54 ตามลำดับ

#### ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมาครั้งนี้ ทำให้ทราบข้อมูลการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารซินของดินร่วนชั้นบน ดินร่วนชั้นล่างและดินตะกอน ในพื้นที่ปลูกข้าวโพด ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษาความเป็นพิษของอาหารซินต่อพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่มีการฉีดพ่นอาหารซินอยู่เป็นประจำ และผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของเกษตรกร
2. ควรศึกษาการปนเปื้อนของอาหารซินในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไปยังผู้บริโภคลำดับต่างๆ
3. ควรศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของดิน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. คำมาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 เรื่องมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม.

กรมวิชาการเกษตร. 2542. สถิติการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของประเทศไทยในปี 2542. กองควบคุมโรคพืชและวัสดุการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2550. สรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร. ข้อมูลวัตถุอันตราย ปี 2548-2550. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, สำนักควบคุมพืชและวัตถุอันตรายทางการเกษตร. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th>, 15 สิงหาคม 2550.

เกษม จันทร์แก้ว. 2545. การจัดการสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน. วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. และ นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2517. หลักการปฏิบัติในการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา, คณะวนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โครงการฟื้นฟูพัฒนาคุณภาพชีวิตและพื้นที่ดินน้ำน่านาจังหวัดเพชรบูรณ์ (นาร่อง) พ.ศ. 2549-2552. เถลิงพระเกียรติพระชนมพรรษาสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเนื่องในวโรกาสการจัดงานฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี, เพชรบูรณ์.

คุณพงษ์ อภิวัฒน์การุญ. 2548. ไอโซเทอร์มการดูดซับของอาทราซีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ดวงพร สุวรรณกุล. 2543. การกำจัดวัชพืช. ในสี่ปศุสัตว์ สานธิรัตน์, บรรณาธิการ, การจัดการศัตรูพืช. คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทศพล พรพรหม. 2545. สารกำจัดวัชพืช: หลักการและกลไกการทำลาย.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นวลศรี ทยาพัชร. 2533. ปัญหาสารพิษทางการเกษตรในประเทศไทย. สำนักงานคณะกรรมการ  
ระบาคติวิทยาแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุกรณ์ และคณิดา ตั้งคณานุกรณ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2532. ทฤษฎีการจัดการต้นน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและแนวทางการ  
ศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนา. น. 332-353. ใน รายงานการสัมมนาเชิงปฏิบัติการ เรื่อง แนวทางการ  
วิจัยและพัฒนาการอนุรักษ์ดินและน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ระหว่างวันที่ 13-16  
กันยายน 2532. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2545. แบบจำลองคณิตศาสตร์การชะล้างพังทลายของดินและมลพิษตะกอนในพื้นที่ลุ่ม  
น้ำ. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประภัสสรา พิมพ์พันธ์. 2532. สารพิษในแหล่งน้ำและแนวทางแก้ไข. ข่าวสารวัตตุมิพิษ.

16(3): 130-137. กรมวิชาการเกษตร.

ภิญญา จุลินทร, วิภา ตั้งนิพนธ์ และศิวาภรณ์ สกุศลเที่ยงตรง. 2545. การแพร่กระจายของวัตตุมิพิษ  
จากแหล่งเกษตรกรรมลงสู่แม่น้ำสายหลักในประเทศไทย. น. 55-63. ใน รายงานการ  
ประชุมวิชาการกองวัตตุมิพิษการเกษตร ครั้งที่ 4. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

มณฑณีย์ เศรษฐภูภักดี. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, กรุงเทพฯ.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุพัตรา แสนพันธ์. 2548. ผลของการใช้ที่ดินปริมาณสารอาหารอินทรีย์ในน้ำท่าและตะกอนดินบริเวณ  
ลุ่มน้ำคลองอีเต่า อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุมิตร พุกกะเวส. 2510. การศึกษาความคงทนของพืชยาปราบศัตรูพืชอาหารอินทรีย์และดอลาพอนใน  
ดินแถบสถานีกลีกรรมพระพุทธรบาท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัญชลี สุทธิประการ. 2534. แร่ดินเล่มที่ 1, 2. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Abate, Gilberto., L.B.O. dos Santos., S.M. Colombo and J.C. Masini. 2006. Removal of fulvic  
acid from aqueous media by adsorption onto modified vermiculite. **Applied Clay  
Science** 32: 261–270.

Alves, M.R., M.D. Landgraf and M.O. Rezende. 2001. Sorption and desorption of the herbicide  
alachlor on humic acid fractions from two vermicompost. **Journal of Environmental  
Science and Health. Part B, Pesticide, Food Contaminants, and Agricultural  
Wastes.** 36: 797-808.

Ashton, F.M. and T.J. Monaco. 1991. **Weed Science: Principles and Practices.** 3<sup>rd</sup> ed. John  
Wiley and Sons, Inc. New York.

ASTM D 4927 (90). 2003. Standard Test Method for pH of Soil Philadelphia, PA. American  
Society for Testing and Materials.

ASTM D 2974-87. 2003. Standard Test Method for Moisture, Ash and Organic Matter of Peat  
and Organic Soils, American Society for Testing and Materials.

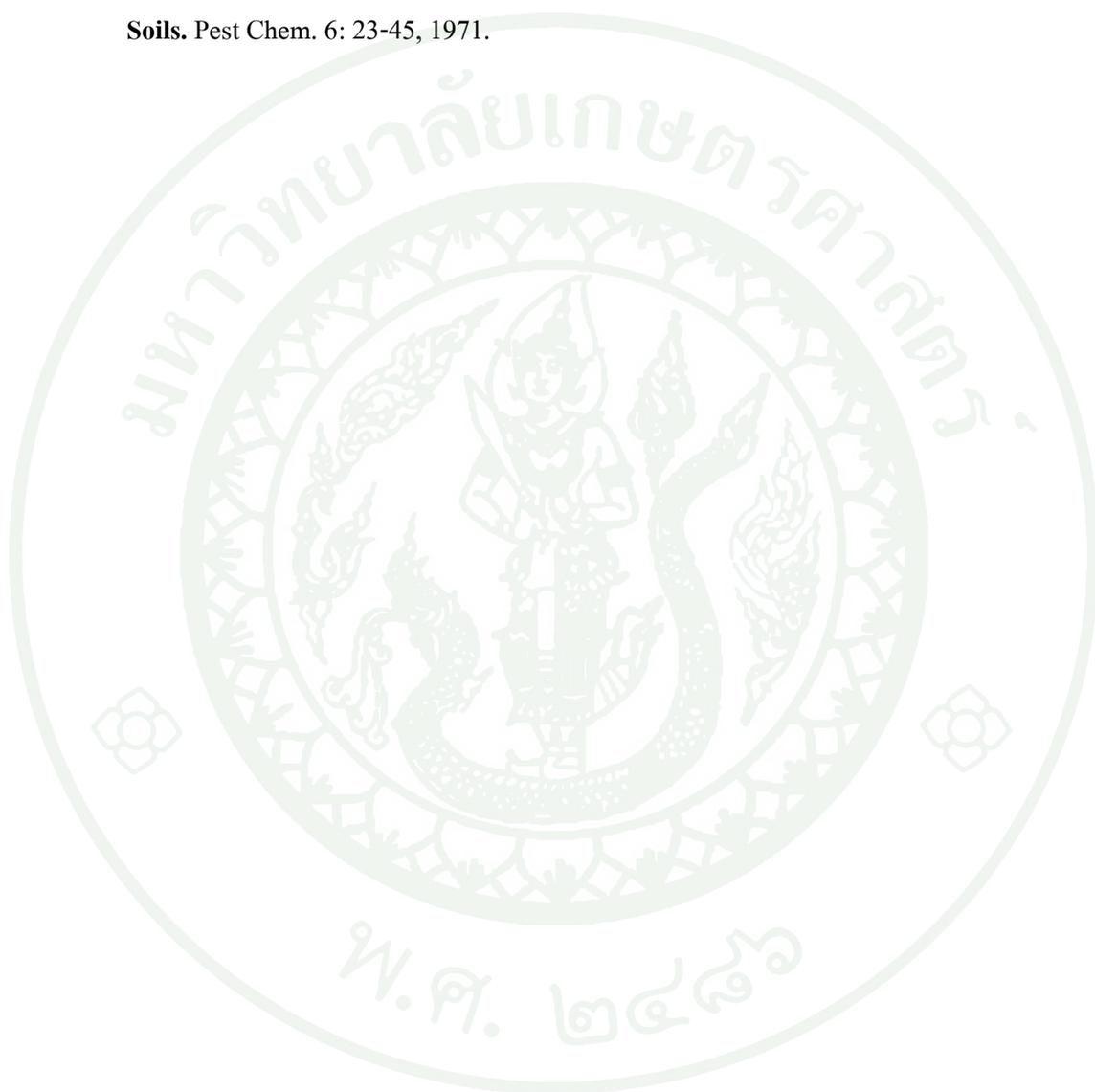
Beste, C.E. 1983. **Herbicide Handbook of the Weed Science Society of America.** 5th ed.  
**Weed Science Society of America, USA.**

- Brandry, N.C. 1974. **The Nature and Properties of Soil**. Macmillan, New York.
- Chapman, H.D. 1965. **Cation-Exchange capacity**. In: C. A. Black (ed.) *Methods of Soil Analysis-Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy 9: 891-901.
- Cheremisinoff, P.N. and Ellerbusch, F. “**Carbon Adsorption Handbook. Michigan.**” :  
Ann Arbor Science Publishers. Inc., 1978.
- Das, J.V. and Gupta, V.K. 1995. **J. Indian Chem. Soc.** 72: 765.
- DeSutter, T.M., S.A. Clay and D.E. Clay. 2003. Atrazine Sorption and Desorption as Affected by Aggregate Size, Particle Size, and Soil Type. **Weed Sci.** 51: 456-462.
- Hase Y., M. Tatsuno, T. Nishi, K. Kataoka, Y. Kabe, Y. Yamaguchi, N. Ozawa, M. Natori, H. Handa and H. Watanabe. 2008. **Atrazine binds to F1F0-ATP Synthase and Inhibits mitochondrial Function in Sperm. J. BBRC.** 366: 66-72.
- Hayes, T., K. Haston, M. Tsui, A. Hoang, C. Haeffele and A. Vonk. 2003. Atrazine-Induced Hermaphroditism at 0.1 ppb in American Leopard Frogs (*Rana pipiens*): Laboratory and Field Evidence. **Environ Health Perspect.** 111: 568-575.
- Herwig, U., E. Klumpp, H.D. Narres and M.J. Schwuger. 2001. Physiochemical Interactions between Atrazine and Clay Minerals. **Applied Clay Science.** 18: 211-222.
- Kesari, R and Gupta, V.K. 1998. A simple method for the spectrophotometric determination of atrazine using *p*-aminoacetophenone and its application in environmental and biological samples **Talanta** 47: 1085–1092.

- Lilian Z., A. Gilberto., B.O. dos Santos. Luciana and C. Masini. Jorge. 2006. Montmorillonite as an adsorbent for extraction and concentration of atrazine, propazine, deethylatrazine, deisopropylatrazine and hydroxyatrazine. **Analytica Chimica Acta**. 57: 81–87.
- OECD. 2002. **OECD Guideline for the Testing of Chemicals: Adsorption-Desorption Using a Batch Equilibrium Method**. OECD/OCDE, Japan.
- Peng, W. and A. Keller Arturo. 2009. Sorption and Desorption of Atrazine and Diuron onto Water Dispersible Soil Primary Size Fractions. **Water Research** 43: 1448–1456.
- Schnitzer, M. and S.U.Kahn. 1972. **Humic Substances in the Environment**. Marcel Dekker, New York. 450p.
- Talbert, R.E. and Fletchall. 1965. The Adsorption of S-triazines in Soils. **Weeds**. 13: 46-52.
- The Royal Society of Chemistry. 1991. **The Agrochemicals Handbook**. Third Edition. Volume 2.
- Turner, M.A. and R.S. Adams. The Adsorption of Atrazine and Atraton. By Anion and Cation Exchange Resins. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 32: 62-63. 1967.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. **Soil Sci.** 37:29-37.
- Weber, J.B. 1993.**Properties and Behavior of Pesticide in Soil**. Pp. 256-257. In R.J. Watt (ad.). Hazardard Waste. John Wiley&Sons, Inc., New York.
- Weed Science Society of America. 1979. **Herbicide Handbook of the Weed Science Society of America**. 4th ed. WSSA, Illinois.

Wild, A. 1993. **Soils and the Environment: An Introduction**. Cambridge University, New York.

White, J.L. and M. Cruz. **The Role of Soil Colloids in the Behavior and Fate of Pesticides in Soils**. *Pest Chem.* 6: 23-45, 1971.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
การคำนวณ

## ภาคผนวก ก

ก1 การคำนวณไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

ตัวอย่างสมการ เช่น ค่า  $y = 0.4221 X - 0.4926$

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารชั้นของแลงเมียร์ โดยทั่วไปคือ  $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left( \frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 0.4221 \left( \frac{1}{C} \right) - 0.4926$$

จากสมการที่ 8 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0849 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ -15.989 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 0.4221$$

$$\frac{1}{q_m} = -0.4926$$

ดังนั้น  $K = -1.167$

## ก2 การคำนวณไอโซเทอร์มของฟรอนด์ซ

ตัวอย่างสมการ เช่น ค่า  $y = 0.7539 X + 0.0893$

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับอาหาราซินของฟรอนด์ซ โดยทั่วไปคือ  $q = KC^{1/n}$  สามารถนำมา

เขียนใหม่ในรูปของล็อกการิทึม ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

$$\log q = 0.0893 + 0.7539 \log C$$

จากสมการที่ 9 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.3402 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ -0.7375 นั่นคือ

$$\text{Log } K = 0.0893$$

$$1/n = 0.7539$$

$$n = 1.326$$



ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์อาหารจีนและไอโซเทอร์มการดูดซับ

## ภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณอาหาราซินเริ่มต้นที่ตกค้างในดิน

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ดินร่วนชั้นบน	1.27	1.27	1.24	1.26	0.017
ดินร่วนชั้นล่าง	1.97	2.05	1.98	2.00	0.044
ดินตะกอน	1.35	1.35	1.28	1.33	0.040

ตารางผนวกที่ ข2 ปริมาณอาหาราซินหลังการเตรียมดินปฐมภูมิ

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
<u>ล้างดินครั้งที่ 1</u>					
ดินร่วนชั้นบน	0.096	0.087	0.102	0.095	0.008
ดินร่วนชั้นล่าง	0.162	0.186	0.193	0.180	0.016
ดินตะกอน	0.055	0.055	0.055	0.055	0.000
<u>ล้างดินครั้งที่ 5</u>					
ดินร่วนชั้นบน	0.046	0.040	0.047	0.044	0.004
ดินร่วนชั้นล่าง	0.125	0.127	0.144	0.132	0.010
ดินตะกอน	0.024	0.020	0.022	0.022	0.002
<u>ล้างดินครั้งที่ 10</u>					
ดินร่วนชั้นบน	0.046	0.044	0.047	0.046	0.002
ดินร่วนชั้นล่าง	0.048	0.048	0.051	0.049	0.002
ดินตะกอน	0.059	0.061	0.061	0.060	0.001

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
<u>ล้างดินครั้งที่ 15</u>					
ดินร่วนชั้นบน	0.024	0.024	0.036	0.028	0.007
ดินร่วนชั้นล่าง	0.058	0.058	0.074	0.063	0.009
ดินตะกอน	0.004	0.004	0.009	0.006	0.003
<u>ล้างดินครั้งที่ 20</u>					
ดินร่วนชั้นบน	0.030	0.028	0.029	0.029	0.001
ดินร่วนชั้นล่าง	0.029	0.027	0.027	0.028	0.001
ดินตะกอน	0.026	0.025	0.022	0.024	0.002

ตารางผนวกที่ ข3 การดูดซับอาหาราซินในดินร่วนชั้นบนและพีเอช

พีเอช	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
5	35.80	35.85	35.84	35.83	0.026
6	45.26	45.25	45.29	45.27	0.021
6.5	47.22	47.20	47.16	47.19	0.031
7	48.53	48.49	48.53	48.52	0.023
8	44.85	44.82	44.85	44.84	0.017

**ตารางผนวกที่ ข4** การดูดซับอาหารโปรตีนในดินร่วนชั้นล่างและพีเอช

พีเอช	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
5	35.57	35.58	35.54	35.56	0.021
6	33.80	33.77	33.79	33.79	0.015
6.5	52.51	52.50	52.53	52.51	0.015
7	38.65	38.68	38.67	38.67	0.015
8	36.69	36.73	36.71	36.71	0.020

**ตารางผนวกที่ ข5** การดูดซับอาหารโปรตีนในดินตะกอนและพีเอช

พีเอช	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
5	19.35	19.41	19.36	19.37	0.032
6	21.09	21.08	21.10	21.09	0.010
6.5	26.96	26.98	26.99	26.98	0.015
7	18.98	19.01	18.98	18.99	0.017
8	17.44	17.43	17.46	17.44	0.015

**ตารางผนวกที่ ข6** การดูดซับอาหารโปรตีนในดินชั้นบนที่เวลา 24 ชั่วโมง และพีเอช 6.5

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	55.16	55.12	55.14	55.14	0.020
2	53.89	53.90	53.93	53.91	0.021
3	56.80	56.76	56.82	56.79	0.031

ตารางผนวกที่ ข7 การดูดซับอาหารสีนในดินชั้นล่างที่เวลา 24 ชั่วโมงและพีเอช 6.5

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	54.08	54.12	54.13	54.11	0.026
2	53.24	53.25	53.26	53.25	0.010
3	53.27	53.25	53.29	53.27	0.020

ตารางผนวกที่ ข8 การดูดซับอาหารสีนในดินตะกอนที่เวลา 24 ชั่วโมง และพีเอช 6.5

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	19.51	19.52	19.51	19.51	0.006
2	23.13	23.10	23.11	23.11	0.015
3	22.66	22.69	22.66	22.67	0.017

ตารางผนวกที่ ข9 การดูดซับอาหารสีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินร่วนชั้นบนที่เวลา 24 ชั่วโมงและพีเอช 6.5

ความเข้มข้นอาหารสีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0.5	0.006	0.005	0.007	0.006	0.001	75.00
1.0	0.012	0.01	0.012	0.011	0.001	65.66
1.5	0.015	0.014	0.015	0.015	0.001	62.39
2.0	0.027	0.026	0.026	0.026	0.001	55.37
2.5	0.041	0.050	0.029	0.040	0.011	35.48

**ตารางผนวกที่ ข10** การดูดซับอาหารสีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินร่วนชั้นล่าง  
ที่เวลา 24 ชั่วโมงและพีเอช 6.5

ความ เข้มข้น อาหารสีน (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0.5	0.003	0.005	0.011	0.006	0.004	73.61
1.0	0.012	0.010	0.013	0.012	0.002	66.67
1.5	0.015	0.011	0.013	0.013	0.002	65.79
2.0	0.024	0.02	0.027	0.024	0.004	50.69
2.5	0.046	0.048	0.046	0.047	0.001	11.95

**ตารางผนวกที่ ข11** การดูดซับอาหารสีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อดินตะกอน  
ที่เวลา 24 ชั่วโมงและพีเอช 6.5

ความ เข้มข้น อาหารสีน (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง				S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0.5	0.012	0.012	0.019	0.014	0.004	42.67
1.0	0.018	0.024	0.021	0.021	0.003	40.00
1.5	0.029	0.025	0.031	0.028	0.003	23.42
2.0	0.034	0.038	0.035	0.036	0.002	20.74
2.5	0.042	0.056	0.051	0.050	0.007	14.37

ตารางผนวกที่ ข12 ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารจีนของดินร่วนชั้นบน

W	Co	C	q	1/q	1/C	log q	log C
2	0.5	0.069	0.002	404.8583	166.6667	-2.6073	-2.22185
2	1.0	0.162	0.005	202.2245	90.90909	-2.30583	-1.95861
2	1.5	0.347	0.007	134.6801	66.66667	-2.1293	-1.82391
2	2.0	0.856	0.010	101.3171	38.46154	-2.00568	-1.58503
2	2.5	1.505	0.012	81.30081	25	-1.91009	-1.39794

ตารางผนวกที่ ข13 ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารจีนของดินร่วนชั้นล่าง

W	Co	C	q	1/q	1/C	log q	log C
2	0.5	0.069	0.002	404.8583	166.6667	-2.6073	-2.22185
2	1.0	0.208	0.005	202.4291	83.33333	-2.30627	-1.92082
2	1.5	0.255	0.007	134.499	76.92308	-2.12872	-1.88606
2	2.0	0.764	0.010	101.2146	41.66667	-2.00524	-1.61979
2	2.5	1.829	0.012	81.53282	21.2766	-1.91133	-1.3279

ตารางผนวกที่ ข14 ไอโซเทอร์มการดูดซับอาหารจีนของดินตะกอน

W	Co	C	q	1/q	1/C	log q	log C
2	0.5	0.301	0.002	411.5226	71.42857	-2.61439	-1.85387
2	1.0	0.625	0.005	204.2901	47.61905	-2.31025	-1.67778
2	1.5	0.949	0.007	135.8696	35.71429	-2.13312	-1.55284
2	2.0	1.319	0.010	101.833	27.77778	-2.00789	-1.4437
2	2.5	1.968	0.012	81.63265	20	-1.91186	-1.30103

ตารางผนวกที่ ข15 อิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อการดูดซับอาหารซีนในดินทั้ง 3 ชนิด

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ดินร่วนชั้นบน	75.13	75.15	75.12	75.13	0.015
ดินร่วนชั้นล่าง	75.13	75.11	75.16	75.13	0.025
ดินตะกอน	55.60	55.52	55.55	55.56	0.040

ตารางผนวกที่ ข16 การปลดปล่อยอาหารซีนของดินร่วนชั้นบน

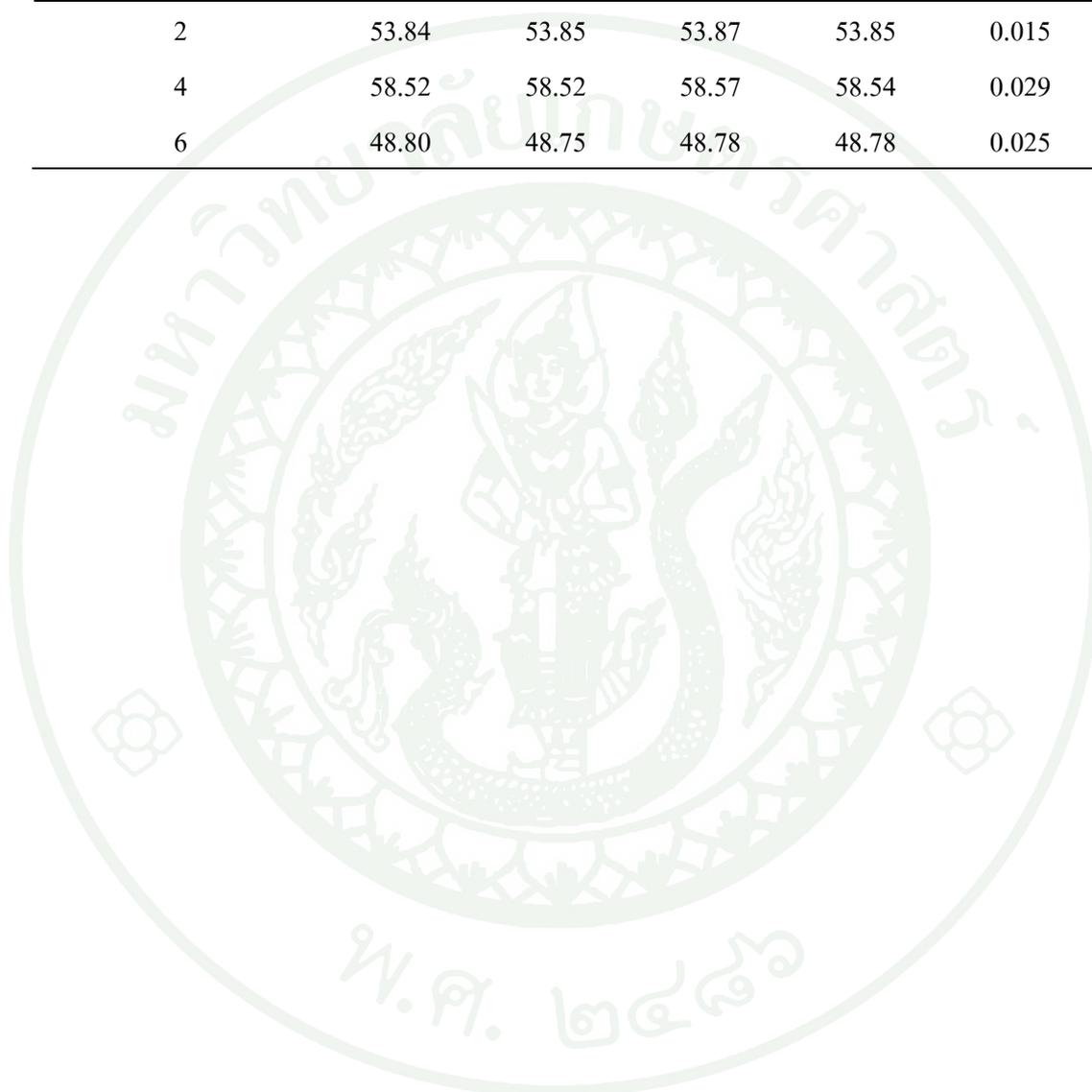
การปลดปล่อย (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
2	8.13	8.10	8.11	8.11	0.015
4	8.09	8.12	8.13	8.11	0.021
6	2.65	2.61	2.62	2.63	0.021

ตารางผนวกที่ ข17 การปลดปล่อยอาหารซีนของดินร่วนชั้นล่าง

การปลดปล่อย (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
2	18.43	18.39	18.45	18.42	0.031
4	18.94	18.91	18.92	18.92	0.015
6	17.23	17.22	17.26	17.24	0.021

ตารางผนวกที่ ข18 การปลดปล่อยอาหารจีนของดินตะกอน

การปลดปล่อย (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับ				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
2	53.84	53.85	53.87	53.85	0.015
4	58.52	58.52	58.57	58.54	0.029
6	48.80	48.75	48.78	48.78	0.025





ภาคผนวก ค  
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน

## ภาคผนวก ก

### ก1 การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของดิน

ใช้มาตรฐาน ASTM D 4972 โดยชั่งดิน 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที หรือใช้เตาไฟฟ้าพร้อมระบบแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการกวน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วนำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

### ก2 อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุในดิน

ใช้วิธี Walkley and Black Method ตามมาตรฐาน ASTM D 2974-87 หลักการของวิธีนี้คือ ใช้  $K_2Cr_2O_7$  ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรงทำปฏิกิริยากับอินทรีย์คาร์บอนในกรดซัลฟูริกเข้มข้น จากนั้นไทเทรต  $K_2Cr_2O_7$  ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วย  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$

#### **น้ำยาเคมีและวิธีเตรียม**

##### 1. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.0 N

ละลาย  $K_2Cr_2O_7$  (อบที่ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง) 49.04 กรัม ด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร

##### 2. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 N

ละลาย  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  196.1 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

##### 3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น

##### 4. เฟอโรอิน อินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ( $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) 1.48 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.5 N ปริมาตร 14 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

### ขั้นตอนวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างตะกอนดิน (ที่ร่อนผ่านตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร) 0.5-2.00 กรัม (ทั้งนี้แล้วแต่ตัวอย่างจะมีอินทรีย์วัตถุมากหรือน้อย) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 100 มิลลิลิตร และหยดเฟอโรซีน อินดิเคเตอร์ลงไป 4-5 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล จนกระทั่งสีของสารแขวนลอยเปลี่ยนจากเขียวเป็นน้ำตาลแดง บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไปถ้าไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเกินจุดยุติ ให้เติมน้ำกลั่นลงไปอีก 0.5-1 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตอีกครั้งหนึ่ง จุดยุติคือ จุดที่อินดิเคเตอร์ เริ่มเปลี่ยนจากเขียวเป็นน้ำตาลแดง
3. วิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (วิเคราะห์แบบลค์) โดยทำเฉพาะข้อ 2 และข้อ 3 บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้
4. กำหนดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเป็นร้อยละ โดยใช้สูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์อินทรีย์คาร์บอน} = \frac{(B-S) \times N \times 0.336}{W}$$

W

$$\text{เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ} = \text{เปอร์เซ็นต์อินทรีย์คาร์บอน} \times 1.72$$

- เมื่อ B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทแบบลค์ (มิลลิลิตร)  
 S = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)  
 N = นอร์มอลลิตีของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต  
 W = น้ำหนักของตัวอย่างตะกอนดิน (กรัม)

### ค3 การแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

การแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินโดยเลือกใช้ Ammonium Acetate ในการชะดิน ตามวิธีของ Chapman, H.D., 1965 ที่ชะดินด้วยน้ำยา 1 N  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7 เพื่อให้  $\text{NH}_4^+$  เข้าแทนที่ประจุบวกต่างๆ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  และ  $\text{Na}^+$  ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินให้ออกมาใน Leachate แล้วล้างดินด้วย ethyl alcohol จากนั้นแทนที่ด้วย Adsorbed  $\text{NH}_4^+$  ด้วย 10% Acidified NaCl Solution จากนั้นวิเคราะห์  $\text{NH}_4^+$  ที่ถูกแทนที่ออกมาใน Leachate จำนวน ปริมาณ ค่า CEC โดยใช้สูตร

$$\text{CEC (meq/100 g)} = N \times (T-B) \times \frac{\text{Total Volume}}{\text{mL of aliquot}} \times \frac{100}{\text{wt of sample}}$$

เมื่อ N = Normality ของ standard  $\text{H}_2\text{SO}_4$

T = ปริมาณของ standard  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = ปริมาณของ standard  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกนกวรรณ พาลูกา
เกิดวันที่	16 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีสิ่งแวดลอม) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-