

การเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม
ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์



นางสาวตุลญา มะสีพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSPORT OF COPPER (II) AND LEAD (II) THROUGH UNSATURATED ZONE
OF AGRICULTURAL AREA AT TUMBON HUA RUA, UBON RATCHATANI
PROVINCE USING COLUMN TECHNIQUE

Miss Tulaya Masipan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์
โดย	นางสาวตุลญา มะสีพันธ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ชูตินทรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จุฬาลักษณ์ ชาญกุล)

ตุลญา มะสีพันธ์ : การเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์ (TRANSPORT OF COPPER (II) AND LEAD (II) THROUGH UNSATURATED ZONE OF AGRICULTURAL AREA AT TUMBON HUA RUA, UBON RATCHANI PROVINCE USING COLUMN TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, 135 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม และประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเคลื่อนตัวของโลหะหนักดังกล่าว ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ในส่วนแรกเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาและนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ซึ่งพบว่าเป็นดินร่วนปนทรายมีค่าพีเอช 5.3 และค่า pzc 5.04 และจากการวิเคราะห์ปุ๋ยเคมีทั้ง 8 ชนิด พบว่าปุ๋ยสูตร 15-15-15 มีทองแดง มากที่สุดคือ 25 mg/kg ส่วนปุ๋ยสูตร 15-15-15 และปุ๋ยสูตร 16-8-8 มีตะกั่วมากที่สุด คือ 25 mg/kg เท่ากัน และในส่วนที่สองเป็นการทดลองคอลัมน์ศึกษาการเคลื่อนตัวของเทรเซอร์ ในคอลัมน์ถุตุฝน โบรไมด์เคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าคอลัมน์ถุตุร้อนในทุกระดับความลึก และค่าของ dispersivity ในคอลัมน์ถุตุร้อนสูงกว่าคอลัมน์ถุตุฝน และส่วนสุดท้ายการทดลองคอลัมน์เพื่ออธิบายการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว พบว่าตะกั่วในคอลัมน์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 (คอลัมน์ถุตุร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ถุตุฝน) จะเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าทองแดงในทุกระดับความลึก กล่าวได้ว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของทองแดง (54.69-130.68) มีค่าสูงกว่าตะกั่ว (51.32-105.78) จึงทำให้ดูดซับในดินได้มากกว่า และเคลื่อนตัวออกมาช้ากว่าตะกั่ว ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วงเป็นผลมาจากค่าพีเอช และค่าความชื้นของแต่ละความลึก เมื่อนำกราฟเบรคทรูที่ได้จากการทดลองมาประเมินค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Kd) โดยแบบจำลอง HYDRUS-1D ผลจากแบบจำลองพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง กราฟเบรคทรูการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9023 - 0.9768 จากผลการศึกษาในส่วนสุดท้ายพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางในการเคลื่อนตัวและความชื้นโดยปริมาตรในดินมีค่าสูงขึ้น

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5487136920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: COLUMN TECHNIQUE / DISPERSIVITY / HYDRUS-1D / RETARDATION FACTOR / UNSATURATED / AGRICULTURAL SOIL

TULAYA MASIPAN: TRANSPORT OF COPPER (II) AND LEAD (II) THROUGH UNSATURATED ZONE OF AGRICULTURAL AREA AT TUMBON HUA RUA, UBON RATCHATANI PROVINCE USING COLUMN TECHNIQUE. ADVISOR: ASST. PROF. SRILERT CHOTPANTARAT, Ph.D., 135 pp.

The objectives of this research are to assess the transport of Cu^{2+} and Pb^{2+} through the unsaturated zone of agricultural area and apply the mathematical model explain the mechanism their movements. The research was divided into 3 parts. In the first part, soil samples were collected from agricultural areas to analyze the physical and chemical characteristics of the soil. The results showed that their soil types were mostly sandy loam with pH of 5.3 and PZC of 5.04. The analysis of 8 types of chemical fertilizers found that fertilizer of 15-15-15 had the highest Cu about 25 mg/kg and both fertilizer of 15-15-15 and of 16-8-8 had the highest Pb about 25 mg/kg equally. In the second part, the rainy column found that bromide (Br^-) transported faster than in the summer column at every depths. The values of dispersivity in the summer column were higher than the rainy column. Finally, the column experiments were conducted to describe the transport of Cu and Pb at pH 3 and 5 of the summer columns and at pH 5 of the rainy column. The movement of Pb^{2+} is faster than Cu^{2+} in all depths. In other word, Cu^{2+} has higher retardation factor (R) than that of lead. The retardation factor was affected from pH and water content at each depth. Data from breakthrough curves (BTCs), which obtained from column tests, was used to assess the sorption distribution coefficient (Kd) using HYDRUS-1D. The fitted results derived from the model well described the observed data, BTCs of Pb^{2+} and Cu^{2+} , with R^2 ranged from 0.9023 to 0.9768. According to the final part, the finding is that the Kd value is decreased as increasing travelling distances and water contents.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2014

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในทำวิทยานิพนธ์โดยตลอด จนงานศึกษาวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐวิภาณ ปัญญาพลกุล และอาจารย์ ดร.จุฬาลักษณ์ ชาญกุล ที่ให้ความกรุณาเกี่ยวกับข้อคำแนะนำต่างๆ ต่อวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องที่คอยช่วยเหลือ แนะนำ สนับสนุน ส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

ขอขอบคุณ และนายศักดิ์ชัย จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และนางสาวปกเกศ วงศาสุลักษณ์ ที่ช่วยเหลือในการออกภาคสนามไปเก็บตัวอย่างเพื่อทำการศึกษาวิจัยนี้ และตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆทุกคนที่คอยให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ ซึ่งผู้ศึกษาต้องขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ที่ให้ความช่วยเหลือในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฌ
ตารางตัวย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวความคิด.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	4
2.1.1 ที่ตั้งและอาณาเขต.....	4
2.1.2 สภาพอุทกวิทยา	4
2.1.3 คุณภาพน้ำบาดาล	4
2.2 นิยามน้ำบาดาล	6
2.2.1 การกำเนิดของน้ำบาดาล	7
2.3 สมการการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturation Flow Equation).....	8

2.3.1 การเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำบาดาล	8
2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K).....	9
2.4.2 ความพรุน (Porosity).....	10
2.5 คำจำกัดความและความเป็นพิษของโลหะหนัก.....	13
2.5.1 ความเป็นพิษของโลหะหนัก.....	13
2.6 การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรม.....	17
2.7 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแบบจำลอง HYDRUS-1D.....	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.8.1 การศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักของพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทย	20
2.8.2 การศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักของพื้นที่เกษตรกรรมพื้นที่เกษตรกรรมใน ต่างประเทศ	20
2.8.3 การทดลองแบบแบตช์	21
2.8.4 การทดลองแบบคอลัมน์.....	22
2.8.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานศึกษา.....	27
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	27
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจภาคสนามและเก็บตัวอย่างดิน.....	27
3.3 การศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	28
3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของดิน	28
3.3.2 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge; PZC).....	30
3.3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยเคมี.....	30
3.4 การทดลองคอลัมน์.....	30
3.4.1 วัสดุอุปกรณ์การทดลองคอลัมน์.....	30

3.4.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง	32
3.4.3 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	32
3.4.4 การทดลองคอลัมน์เทรเซอร์.....	33
3.4.5 การเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้น เริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน).....	33
3.5 แบบจำลอง HYDRUS-1D.....	36
3.5.1 รูปแบบการเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ สารละลาย	37
3.5.2 รูปแบบที่อยู่ในสภาวะไม่สมดุล Non-equilibrium Two-site model (TSM)	38
3.5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์	39
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....	40
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน.....	40
4.1.1 เนื้อดิน (Soil texture).....	40
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	41
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของดิน.....	42
4.1.4 ค่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC).....	43
4.2 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมี	44
4.3 ผลการทดลองคอลัมน์และการสร้างแบบจำลอง	45
4.3.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมของเทรเซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้ความชื้นเริ่มต้นที่ ต่างกัน	45
4.3.2 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS -1D ในการอธิบายพฤติกรรม ของเทรเซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ต่างกัน	48

4.3.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะ ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤตุร้อน).....	55
4.3.4 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะ ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤตุร้อน).....	58
4.3.5 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะ อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤตุฝน).....	64
4.3.6 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS 1-D ในการอธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้ สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่า ความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤตุร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤตุฝน)	71
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน.....	89
5.2 สรุปผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมี	89
5.3 สรุปผลการทดลองคอลัมน์และการสร้างแบบจำลอง	89
5.4 สรุปผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะไม่ อิ่มตัวด้วยน้ำและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ	90
5.4.1 การเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 และพีเอชเท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤตุร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้น เริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤตุฝน).....	90

5.4.2 สรุปผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการอธิบาย พฤติกรรมเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ผ่านตัวกลางรูพรุน ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่า ความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)	90
5.5 ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94
ภาคผนวก ข.....	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	135



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3- 1 พารามิเตอร์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ศึกษาวิจัยและวิธีการวิเคราะห์	29
ตารางที่ 4 - 1 ปริมาณร้อยละของดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียวในดินพื้นที่เกษตรกรรม....	40
ตารางที่ 4 - 2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน	41
ตารางที่ 4 - 3 องค์ประกอบทางเคมีของดินในพื้นที่ศึกษาโดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	42
ตารางที่ 4 - 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของปุ๋ยเคมี.....	45
ตารางที่ 4 - 5 พารามิเตอร์นำเข้าของการเคลื่อนตัวโซเดียมโบรไมด์ที่ใช้ในแบบจำลอง HYDRUS-1D.....	48
ตารางที่ 4 - 6 ค่า Dispersivity ของคอลัมน์ที่ต่างกันได้จากแบบจำลอง HYDRUS-1D.....	51
ตารางที่ 4 - 7 ค่าตัวประกอบความหน่วงจากวิธี Area methods ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 3	57
ตารางที่ 4 - 8 ค่าตัวประกอบความหน่วงจากวิธี Area methods ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 5	58
ตารางที่ 4 - 9 ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 5 คอลัมน์ถูดุฝน...	66
ตารางที่ 4 - 10 การนำเข้าพารามิเตอร์การเคลื่อนของทองแดง และตะกั่วที่ใช้ในแบบจำลอง HYDRUS 1-D	71
ตารางที่ 4 - 11 ค่า Adsorption coefficient ของคอลัมน์ที่ต่างกันโดยเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (Eq) และ Nonequilibrium Two-site model (TSM) ที่ได้จากแบบจำลอง HYDRUS-1D	73

สารบัญรูป

รูปที่ 2- 1 การกำเนิดน้ำบาดาล.....	7
รูปที่ 2- 2 ความพรุนของดิน.....	7
รูปที่ 2- 3 Linear isotherm	11
รูปที่ 2- 4 Langmuir isotherm.....	12
รูปที่ 2- 5 Freundlich isotherm	12
รูปที่ 2- 6 แร่ตะกั่ว.....	15
รูปที่ 2- 7 แร่ทองแดง	16
รูปที่ 2- 8 แสดงการนำเข้าสู่สารเคมีการเกษตร	18
รูปที่ 2- 9 ข้อมูลปริมาณการใช้สารเคมีในประเทศไทยและผู้เจ็บป่วยจากการใช้สารเคมี	18
รูปที่ 3- 1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา บริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	27
รูปที่ 3- 2 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน.....	28
รูปที่ 3- 3 ตัวอย่างดินที่เก็บในพื้นที่ศึกษา.....	28
รูปที่ 3- 4 เครื่อง sieve analysis	29
รูปที่ 3- 5 แบบจำลองคอลัมน์ในชั้น Unsaturated zone และชั้น Saturated zone.....	30
รูปที่ 3- 6 คอลัมน์ถุคูร้อน	31
รูปที่ 3- 7 คอลัมน์ถุคูฝน	31
รูปที่ 3- 8 หลอดสูญญากาศ (vacuum tube).....	32
รูปที่ 3- 9 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).....	32
รูปที่ 3- 10 แบบจำลองคอลัมน์ถุคูร้อน	34
รูปที่ 3- 11 คอลัมน์ถุคูร้อนพีเอช เท่ากับ 3 และ 5	35
รูปที่ 3- 12 แบบจำลองคอลัมน์ถุคูฝน	35
รูปที่ 3- 13 แบบจำลองคอลัมน์ถุคูฝนพีเอช เท่ากับ 5.....	36
รูปที่ 3- 14 รูปแบบการเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย (Simunek et al., 2008).....	37
รูปที่ 3- 15 รูปแบบแนวคิดสภาวะไม่สมดุล Non-equilibrium Two-site model (TSM).....	38
รูปที่ 4 - 1 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมมาตรฐาน	41

รูปที่ 4 - 2 ผลเอกซ์เรย์ดิฟแฟลตชัน.....	43
รูปที่ 4 - 3 ค่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC) ของดินร่วนปนทราย.....	44
รูปที่ 4 - 4 Breakthrough curves ของโบรไมต์ในคอลัมน์ถุร้อน ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	46
รูปที่ 4 - 5 Breakthrough curves ของโบรไมต์ในคอลัมน์ถุฝน ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	46
รูปที่ 4 - 6 Breakthrough curves ของโบรไมต์ในคอลัมน์ถุร้อน และคอลัมน์ถุฝน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.	47
รูปที่ 4 - 7 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 6.25 ซม.....	49
รูปที่ 4 - 8 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 12.5 ซม.....	49
รูปที่ 4 - 9 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 18.75 ซม.	50
รูปที่ 4 - 10 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 25 ซม.....	50
รูปที่ 4 - 11 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ของคอลัมน์ถุฝนที่ระดับความลึก 6.25 ซม.....	51
รูปที่ 4 - 12 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ คอลัมน์ถุฝนที่ระดับความลึก 12.5 ซม.	52
รูปที่ 4 - 13 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ คอลัมน์ถุฝนที่ระดับความลึก 18.75 ซม.....	52
รูปที่ 4 - 14 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ คอลัมน์ถุฝนที่ระดับความลึก 25 ซม.	53
รูปที่ 4 - 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า dispersivity เมื่อเทียบกับระยะทางของคอลัมน์ถุร้อน และคอลัมน์ถุฝน	53
รูปที่ 4 - 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระหว่าง Volumetric water content กับค่า dispersivity.....	54
รูปที่ 4 - 17 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ถุร้อน ที่ระดับ ความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.....	55

รูปที่ 4 - 18 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	56
รูปที่ 4 - 19 Breakthrough curves ตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	56
รูปที่ 4 - 20 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูร้อน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.	59
รูปที่ 4 - 21 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	59
รูปที่ 4 - 22 Breakthrough curves ของตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	60
รูปที่ 4 - 23 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5	62
รูปที่ 4 - 24 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่มีพีเอช เท่ากับ 3 และ 5.....	62
รูปที่ 4 - 25 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของ คอลัมน์ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5.....	63
รูปที่ 4 - 26 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของ คอลัมน์ตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5.....	63
รูปที่ 4 - 27 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูฝน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.	64
รูปที่ 4 - 28 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	65
รูปที่ 4 - 29 Breakthrough curves ของตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.	65
รูปที่ 4 - 30 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และเปอร์เซนต์ความ แตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน).....	68
รูปที่ 4 - 31 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่ว และเปอร์เซนต์ความ แตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน).....	68

รูปที่ 4 - 60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อน ตัวของทองแดง และตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน).....	87
รูปที่ 4 - 61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อน ตัวของทองแดง และตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน).....	87
รูปที่ 4 - 62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อน ตัวของทองแดง และตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน).....	88



ตารางตัวย่อ

ตัวย่อ	คำเต็ม
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy
Br^-	bromide
BTCs	breakthrough curves
C	concentration
C_0	infulent concentration,
CEC	Cation Exchange Capacity
D_L	Longitudinal dispersivity
Disp	Longitudinal dispersivity, DL
EC	Electrical Conductivity
Eq.	Equilibrium
Fract.	fraction of adsorption sites
Kd	Adsorption coefficient
Kf	fraction of exchange sites
K(h)	Hydraulic Conductivity (LT^{-1})
K_s	Saturated hydraulic conductivity
OM	Organic matter
PV	Pore volume
PZC	Point of Zero Charge
R	Retardation factor
TSM	Non-equilibrium Two-site model
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-ray fluorescence
β	Adsorption isotherm exponent
ρ	bulk density
θ	Volumetric water content (m^3/m^3)
θ_r	Residual soil water content
θ_s	Saturated soil water content
α	soil water retention function

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งสิ่งมีชีวิตทุกชนิดสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ต้องอาศัยน้ำ การใช้น้ำบนโลกได้เพิ่มขึ้นทุกวัน เพราะจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้น้ำยังเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นการผลิตในภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม หรือภาคบริการ โดยเฉพาะการผลิตในภาคเกษตรกรรม (ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2005) ปัจจุบันทรัพยากรน้ำบาดาลถูกพัฒนามาใช้มากขึ้นทั้งใช้ประโยชน์ในการอุปโภค บริโภค อุตสาหกรรม ตลอดจนเกษตรกรรม และมีการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่การเกษตรที่อยู่ห่างไกลจากระบบชลประทาน (Manika G., Garg, Joshi, & Sharma, 2012) ซึ่งแหล่งน้ำบาดาลเป็นแหล่งกักเก็บน้ำตามธรรมชาติที่มีการสะสมมานาน เป็นแหล่งน้ำที่สามารถพัฒนามาใช้เสริม หรือทดแทนน้ำผิวดินได้ เพราะเชื่อว่าแหล่งน้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำที่มีความสะอาดกว่าแหล่งน้ำผิวดิน (Manish, Gurmeet, Tushara, Pham, & Keisuke, 2014) จากข้อมูลพื้นฐานการใช้น้ำบาดาลระดับหมู่บ้านในประเทศไทยพบว่าจำนวนบ่อน้ำบาดาลมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมหลายประการซึ่งในประเด็นที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการปนเปื้อนน้ำบาดาล (Thapinta & Hudak, 2003; กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2548) เนื่องจากการเกษตรสมัยใหม่ที่มีการใช้สารเคมีเข้ามาเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งเป็นส่วนประกอบในปุ๋ยเคมี สารกำจัดศัตรูพืช สู่ระบบน้ำบาดาลระดับตื้นมากขึ้น (Jabbar, Masud, Parveen, & Ali, 1993; P. Panuwet et al., 2012; Schreinemachers, Sringarm, & Sirijinda, 2011; Schreinemachers & Tipraqsa, 2012) ซึ่งชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีความสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของสารต่างๆ เนื่องจากการซึมผ่านของน้ำผิวดินลงสู่ใต้ดินนั้นต้องผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อน ดังนั้นหากบนชั้นผิวดินมีการปนเปื้อนสารเคมี ก็จะถูกชะล้างลงมาผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งการเคลื่อนตัวของสารลงสู่ใต้ดินมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic curve) ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ปัทมาโชติกีวิน, 2553)

โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการทางธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดินและถูกชะละลายลงสู่ชั้นน้ำบาดาล เมื่อน้ำบาดาลมีการปนเปื้อนของปุ๋ยเคมี จะส่งผลให้น้ำในบริเวณนั้นก็จะมีสภาพเป็นกรด ซึ่งความเป็นกรดเกิดจากปฏิกิริยาออกไซด์ของไนโตรเจนที่อยู่ในปุ๋ยเคมี โดยปุ๋ยเคมีจะมีส่วนผสมของธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือ โพแทสเซียม และปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อมีตัวกระตุ้นจำพวกโลหะ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2540) ซึ่งสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีของดินมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน ทั้งค่า pH ค่าสภาพพลศาสตร์การไหล ค่าความชื้นในดิน ซึ่งมีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักและการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Antanaitis & Antanaitis, 2012) โลหะหนักบางชนิดอาจเป็นพิษและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ องค์ประกอบบางอย่างมีสารก่อมะเร็งหรือเป็นพิษซึ่งมีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ไต ตับ ผิวหนังกระดูกหรือฟันได้ (Wongsasuluk, 2010)

โดยปัจจุบันมีวิธีการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโลหะหนักได้ ซึ่งได้แก่ เทคนิคคอลัมน์ เพราะสามารถอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโลหะหนักไปสู่หน้าบาดาลระดับตื้นได้คล้ายจริงในธรรมชาติมาก ซึ่งคอลัมน์ดินได้ใช้มานานกว่าสามศตวรรษในการศึกษาคุณสมบัติอุทกธรณี และใช้ในการประเมินแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก และสารปนเปื้อนในดิน (Chen et al., 2010; Dong, Zhao, Hua, Liu, & Gao, 2009; Sayyad, Afyuni, Farhad Mousavi, et al., 2010; Wong S.C., Li X.D., Zhang G., Qi, & Min, 2002) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในคอลัมน์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือความชื้นในดิน ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักสู่ชั้นน้ำบาดาลอย่างมาก สำหรับพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในบริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอมือง จังหวัดอุบลราชธานี เป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปลูกพริกเป็นจำนวนมาก และได้มีการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลงหลายชนิดบริเวณที่ปลูกพริกเกือบทุกที่จะมีบ่อน้ำบาดาลกระจายอยู่ทั่วบริเวณ ปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่สุดคือความลึกบ่อ ถ้าบ่อน้ำบาดาลมีระดับตื้นก็จะทำให้เกิดการปนเปื้อน และมีความเสี่ยงจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชมากที่สุด (Thapinta & Hudak, 2003) และมีการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลระดับตื้น และที่สำคัญเกษตรกรบางรายมีการอุปโภคน้ำจากบ่อน้ำบาดาลโดยตรงซึ่งทำให้เสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพอนามัยได้ (Wongsasuluk, 2010) ดังที่กล่าวมา การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการใช้เทคนิคคอลัมน์และการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโลหะหนักและวิเคราะห์ปริมาณการเคลื่อนตัวของโลหะหนักผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่มาจากปุ๋ยในพื้นที่เกษตรกรรมลงสู่หน้าบาดาลระดับตื้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโลหะหนักผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม
2. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการอธิบายการเคลื่อนตัวของโลหะหนักผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก สู่ระบบน้ำบาดาลระดับตื้นมากขึ้น

1.4 กรอบแนวความคิด

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone) ที่มีค่าพีเอชต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์ของโลหะหนักที่น่าสนใจได้แก่ ทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการใช้ปุ๋ยเคมี สารกำจัดศัตรูพืช ในพื้นที่เกษตรกรรม โดยมีการประยุกต์ใช้เทคนิคคอลัมน์ในการประเมินการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม และวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) จากนั้นจะประมวลผล และเปรียบเทียบข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง HYDRUS-1D ซึ่งเป็นแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหลของน้ำและสารละลายใน 1 มิติ เพื่อเป็นการคาดการณ์

ทางสภาพศาสตร์การไหล ค่าการสัมประสิทธิ์การดูดซับ ค่า dispersivity ค่าความชื้นในดิน ที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในอนาคตต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินและปุ๋ยบริเวณพื้นที่ทำการเกษตรตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
2. ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของ ทองแดง และตะกั่ว ผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้เทคนิคคอลัมน์
3. ประเมินการเคลื่อนตัวของโลหะหนักผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำบาดาลระดับตื้น
2. สามารถอธิบายการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินและชั้นน้ำบาดาลโดยใช้แบบจำลองคอลัมน์และแบบจำลอง HYDRUS-1D



บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์ จำเป็นต้องศึกษาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลในพื้นที่ที่ศึกษา การปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของสารละลาย การไหลของน้ำใต้ดิน ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรม รวมถึงความเป็นพิษของโลหะหนัก ดังนี้

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

2.1.1 ที่ตั้งและอาณาเขต

ตำบลหัวเรือ ตั้งอยู่ทางทิศเหนือ ของอำเภอเมืองอุบลราชธานี ระยะทาง ห่างจากจังหวัดอุบลราชธานี ประมาณ 17 กิโลเมตร ปัจจุบันตำบลหัวเรือมีหมู่บ้านทั้งหมด 16 หมู่บ้าน เนื้อที่ ตำบลหัวเรือ มีขนาดพื้นที่ 32.28 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 20,181 ไร่

ทิศเหนือ ติดต่อกับ ตำบลยางสักกระโปกหลุ่ม อำเภอม่วงสามสิบ

ทิศใต้ ติดต่อกับ เทศบาลตำบลขามใหญ่ อำเภอเมืองอุบลราชธานี

ทิศตะวันออก ติดต่อกับ ตำบลไร่น้อย อำเภอเมืองอุบลราชธานี

ทิศตะวันตก ติดต่อกับ ตำบลขี้เหล็ก อำเภอเมืองอุบลราชธานี

(องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ, 2554)

2.1.2 สภาพอุทกวิทยา

สภาพภูมิอากาศ ตำบลหัวเรือ มีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ภูมิอากาศแบ่งออกเป็น 3 ฤดู ได้แก่

ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่ประมาณเดือนพฤษภาคม จนถึงปลายเดือนตุลาคม และมักปรากฏเสมอว่าฝนทิ้งช่วง ในเดือนมิถุนายน ถึงเดือนกรกฎาคม แต่ระยะเวลาการทิ้งช่วงมักจะไม่เหมือนกันในแต่ละปี และในช่วงปลายฤดูฝนมักจะมีพายุดีเปรสชัน ฝนตกชุกบางปีอาจมีภาวะน้ำท่วม

ฤดูหนาว ได้รับอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ อุณหภูมิจะเริ่มลดต่ำลงตั้งแต่เดือนตุลาคมและจะสิ้นสุดปลายเดือนมกราคม

ฤดูร้อน ส่วนใหญ่แล้วอากาศจะเริ่มอบอ้าวและร้อนจัดในเดือนกุมภาพันธ์ไปจนถึงประมาณต้นเดือนพฤษภาคมซึ่งอาจจะมีฝนเริ่มตกอยู่บ้างในปลายเดือนเมษายน แต่ปริมาณน้ำฝนมักจะไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูก (กรมทรัพยากรธรณี, 2528)

2.1.3 คุณภาพน้ำบาดาล

คุณภาพน้ำบาดาล น้ำบาดาลที่อยู่ในหินร่วนซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ราบลุ่มคุณภาพน้ำบาดาลมักจะกร่อยหรือเค็ม ทั้งนี้เพราะพื้นที่จังหวัดบางส่วนของภาคอีสานมีหินเกลือสะสมอยู่

และเกลือเหล่านี้บางส่วนถูกน้ำฝนกัดเซาะและพัดพามาตกสะสมในพื้นที่ราบและไหลลงไปรวมกับน้ำบาดาลที่เคยจัด เป็นเหตุให้น้ำบาดาลมีคุณภาพน้ำกร่อย หรือเค็มเป็นบริเวณกว้าง (กรมทรัพยากรน้ำ, 2551)

ในส่วนของคุณภาพน้ำบาดาลในหินแข็งก็เช่นกันกับหินร่วน ในพื้นที่หลายแห่งน้ำบาดาลมีรสกร่อยหรือเค็ม ทั้งนี้เป็นเพราะใต้ชั้นน้ำบาดาลมีชั้นหินเกลือ หากกร่อยแต่กร่อยแยกที่เป็นชั้นน้ำบาดาลต่อเนื่องถึงชั้นเกลือ ก็จะเป็นเหตุให้น้ำเกลือเข้ามาในชั้นน้ำบาดาลได้ หรืออาจเกิดจากน้ำบาดาลที่ไหลจากที่สูงไปที่ต่ำ คือ จากผิวดินสู่ใต้ดินผ่านไปถึงชั้นเกลือที่จะไหลต่อไปยังพื้นที่อื่น ๆ หรือบางส่วนอาจจะมาจากน้ำเกลือที่ถูกพัดพามาจากที่อื่น ๆ

เมื่อกล่าวถึงคุณภาพน้ำบาดาลที่มีลักษณะจืด กร่อยหรือเค็มปกติจะใช้ค่าปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (TDS) ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ หมายถึงเกลือแร่ต่าง ๆ ทุกชนิดที่สามารถละลายได้ เมื่อมีค่าสูงแสดงว่ามีปริมาณเกลือแร่สูง

ดังนั้นการแสดงคุณภาพน้ำจึงใช้ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นหลักในการแบ่งส่วนคุณภาพน้ำบาดาลว่าดีหรือไม่ดี และกร่อยหรือเค็ม ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/ลิตร เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายเป็นตัวแบ่งคุณภาพน้ำมีดังนี้

- ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ น้อยกว่า 750 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีคุณภาพน้ำดีมาก
- ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ 750-1,500 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีคุณภาพน้ำดีปานกลาง อนุโลมใช้ได้
- ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ มากกว่า 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีคุณภาพน้ำไม่ดี (กรมทรัพยากรน้ำ, 2551)

2.1.4 สภาพน้ำบาดาล

ตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

พื้นที่ส่วนใหญ่ของอำเภอนี้ทั้งหมดรองรับด้วย หินทราย หินทรายแป้ง หินดินดานของชุดมหาสารคาม บางส่วนเป็น หิน ทราย ทรายแป้ง หินกรวดมนของชุดโคกกรวด และตะกอนตะพักกลุ่มน้ำ โดยหินร่วนนี้จะวางตัวพาดผ่านตัวอำเภอเมือง ในแนวตะวันตก-ตะวันออก น้ำบาดาลจะพบกักเก็บในแนวแตก แนวแยกของหินที่ปรากฏอยู่มากมายในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยที่มีโครงสร้างของแนวแตก จึงทำให้มีปริมาณน้ำมากในทิศทางดังกล่าวในปริมาณ 10 ถึงมากกว่า 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คุณภาพน้ำจืดได้แก่ ด้านทิศตะวันตกและทิศตะวันออกของ ตำบลขามใหญ่ และทิศใต้ของตำบลไร่น้อย ตำบลกระโสบ ส่วนใหญ่ของตำบลเหล่าเสือโก้ก และบริเวณด้านทิศตะวันออกของ ตำบลโพนเมือง ปริมาณน้ำน้อยกว่า 2 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง คุณภาพน้ำจืดจะได้แก่ ด้านทิศตะวันตกของ ตำบลโพนเมือง ด้านทิศใต้ของตำบลเหล่าแดง ต่อเนื่องเข้าไปในเขตของบ้านดินดำ บ้านนาเมือง ตำบลกระโสบ และบ้านผาง บ้านวังไฮ บ้านดงบังเหนือ บ้านดงบังใต้ ตำบลดอนมดแดง

ความลึกของชั้นน้ำบาดาล ในชั้นหินร่วน ประมาณ 5-25 เมตร และระดับน้ำบาดาลเฉลี่ย 1-3 เมตร ในหินแข็งความลึกของชั้นน้ำ 20-30 เมตร ระดับน้ำบาดาล 3-9 เมตร (องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ, 2554)

คุณภาพน้ำจืดคุณภาพดีเกือบทั้งอำเภอ ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำเข้าเกณฑ์มาตรฐานใช้อุปโภคได้ พบน้ำกร่อยเล็กน้อยเนื่องจากมีปริมาณมวลสารทั้งหมดสูงเกินมาตรฐานบริเวณบ้านปะอ่าว บ้านหนองซ้าง บ้านหนองไหล ตำบลหนองขอน บ้านดงบัง ตำบลดอนมดแดง บ้านหมากมี ตำบลกระโสบ พบการปนเปื้อนของสารไนเตรทที่บ้านกุดลาด ตำบลกุดลาด 87 มิลลิกรัม/ลิตร บ้านท่าลาด ตำบลเหล่าแดง 85 มิลลิกรัม/ลิตร บ้านท่าเมืองใหม่ ตำบลท่าเมืองใหม่ 101 มิลลิกรัม/ลิตร และที่สาธารณะบ้านหนองบ่อ หมู่ 2 ตำบลหนองบ่อ 99 มิลลิกรัม/ลิตร (องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ, 2554)

2.2 นิยามน้ำบาดาล

ความหมายของน้ำบาดาล คำนิยามของน้ำบาดาลตาม พ.ร.บ น้ำบาดาล พ.ศ.2520 หมายความว่า "น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศใน พระราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดความลึกน้อยกว่าสิบเมตรไม่ได้"

น้ำบาดาล หมายถึง ส่วนของน้ำใต้ผิวดินที่อยู่ในเขตอิมมูน้ำ รวมถึงธารน้ำใต้ดิน โดยทั่วไป หมายถึง น้ำใต้ผิวดินทั้งหมด ยกเว้นน้ำภายในโลก ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใต้ระดับเขตอิมมูน้ำ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2520)

ลักษณะทางกายภาพของชั้นดินที่เกิดน้ำบาดาลนั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 ชั้น คือ ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) และชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) โดยชั้นทั้งสองถูกแบ่งด้วยเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งเป็นระดับที่ความดันของน้ำใต้ดิน (hydrostatic pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) (แต่สมบัติ, 2528)

1) ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

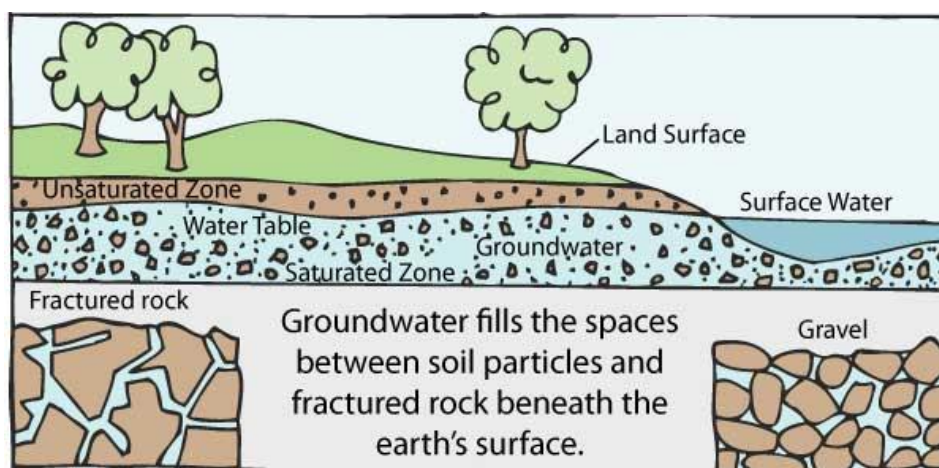
เนื่องจากชั้นดินนี้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินประกอบด้วยอากาศและน้ำ จึงนิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า aeration zone (วีระพล, 2528) หรือ vadose zone โดยน้ำในเขตนี้เป็นน้ำที่เกาะในช่องว่างของเม็ดดิน หรือน้ำที่กำลังอยู่ในระหว่างทางที่จะเคลื่อนลงไปสู่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำในชั้นนี้จะถูกกระทำด้วยแรงดึงดูดของโมเลกุลด้วยการต่อต้านกับแรงโน้มถ่วง ซึ่งแรงดึงดูดนี้มีผลในระยะทางที่น้อยมาก (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, 2542) ด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (adhesive force) น้ำที่อยู่ในชั้นดินนี้เรียกว่า vadose water หรือ soil moisture

2) ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้อยู่ต่อจากชั้นชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีความหนาแน่นแตกต่างกันไปหลายระดับ ในชั้นนี้จะเต็มไปด้วย น้ำภายใต้แรงดันที่เรียกว่า hydrostatic pressure เป็นชั้นกักเก็บน้ำใต้ดิน ผิวนของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้จะอยู่ภายใต้แรงกดดันของบรรยากาศ ซึ่งระดับน้ำสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่างอิสระ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ ซึ่งน้ำที่อยู่ใต้สภาวะนี้เรียกว่าชั้นน้ำอิสระ (unconfined ground water) (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2542)

2.2.1 การกำเนิดของน้ำบาดาล

น้ำบาดาล (รูปที่ 2-1) เกิดจากน้ำในบรรยากาศซึ่งตกลงมาในลักษณะของฝนไหลซึมลงไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือเม็ดหินผ่านส่วนสัมผัสอากาศ ไปยังที่ต่ำกว่าหรือมีแรงดันน้อยกว่าแล้วสะสมรวมกันจนกลายเป็นส่วนที่อึดตัวด้วยน้ำ



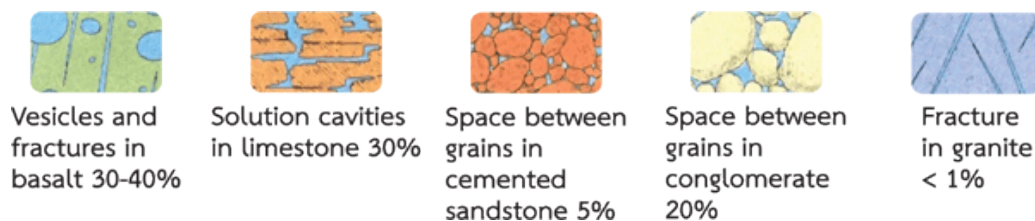
รูปที่ 2- 1 การกำเนิดน้ำบาดาล
(ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล, 2552)

1) การไหลของน้ำบาดาล

การไหลของน้ำใต้ดินจะเป็นไปอย่างช้ามาก วัดโดยใช้หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวัน หรือต่อปี ความเร็วในการไหลจะขึ้นอยู่กับ ปัจจัยหลัก คือ ความพรุน และความซึมได้

ความพรุน (Porosity) หมายถึง ช่องว่างในหิน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด ความพรุนจะขึ้นอยู่กับ รูปร่าง ลักษณะขนาด การคัดขนาด และการคลุกเคล้ากันของเศษหินเล็กๆ ซึ่งจะแตกต่างกันในหินแต่ละชนิด (รูปที่ 2-2)

ความซึมได้ (Permeability) หมายถึง ความสามารถในการที่จะดูดซึมหรือปล่อยน้ำออกมาของชั้นหิน การที่น้ำจะไหลผ่านวัตถุต่างๆ ได้นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างเท่านั้น ยังต้องพิจารณาถึงทางติดต่อระหว่างช่องว่างเหล่านั้นอีกด้วย



รูปที่ 2- 2 ความพรุนของดิน
(ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล, 2552)

2) คุณภาพของน้ำบาดาล

โดยทั่วไปน้ำบาดาลเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสารแขวนลอย สารอินทรีย์เคมี และเชื้อโรคต่างๆ ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ แต่ขณะที่ไหลผ่านไปตามชั้นดิน หรือชั้นหิน อาจละลายเอาแร่ธาตุเข้ามาปะปน รวมทั้งถูกปนเปื้อนด้วยน้ำที่มีคุณภาพด้อยกว่า ทำให้คุณภาพของน้ำบาดาลเปลี่ยนไป

2.3 สมการการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturation Flow Equation)

การเคลื่อนที่หนึ่งมิติของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวและเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น สมการการไหลนี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็นสมการริชาร์ด (Chotpantararat, Limpakanwech, Siriwong, Siripattanakul, & Sutthirat, 2011) ในสมการที่ 2-1

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + K(h) \quad [2-1]$$

เมื่อ $\theta(h)$	คือ suction head (cm^3/cm^3)
$K(h)$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านไม่อิ่มตัว (Unsaturated Hydraulic Conductivity) (cm/hr)
z	คือ ระยะทางในแนวตั้ง (cm)
t	คือ เวลา (hr)

การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ การไหลตามแนวตั้ง ซึ่งเป็นการไหลซึมลงดินตามแนวตั้ง อัตราการไหลจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชั้นดิน และหินว่ามีช่องว่างในเนื้อหินและความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน การไหลตามแนวระดับเป็นการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น การไหลจากระดับสูงลงไปสู่ระดับที่ต่ำกว่าอัตราการไหลจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศและเนื้อหิน เช่น หินเนื้อละเอียดมากอัตราการไหลของน้ำจะไหลได้ช้ามาก แต่ถ้าไหลผ่านโพรง เช่น ถ้าที่ติดต่อกันเป็นทางยาวน้ำใต้ดินจะไหลได้เร็วพอๆ กับการไหลของน้ำผิวดิน โดยสรุปอัตราการไหลจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความพรุนของเนื้อหิน (Porosity) และความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านชั้นหิน (Permeability) นอกจากนี้การยอมให้น้ำไหลซึมผ่านจะเป็นสัดส่วนกับความลึกเนื่องจากมีแรงกดดันสูง และความลาดชันของพื้นที่ด้วยเช่นกัน (เกรียงศักดิ์ 2550)

2.3.1 การเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำบาดาล

การเคลื่อนที่ของสารละลายในตัวกลางที่มีรูพรุนที่เป็นเนื้อเดียวกันภายใต้การไหลคงที่ของน้ำอย่างสม่ำเสมอและมีความเร็วคงที่ สามารถเขียนเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial c^*}{\partial t} \pm \left[\frac{\partial c}{\partial t} \right]_{rxn} \quad [2-2]$$

เมื่อ	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ (mg/l)
	t	คือ เวลา (hr)
	D_L	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามยาว (cm^2/hr)
	V_x	คือ ค่าความเร็วการไหลเฉลี่ยของน้ำบาดาล (cm/hr)
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นทั้งหมด (g/cm^3)
	θ	คือ ค่าความชื้นโดยปริมาตร (m^3/m^3)
	C^*	คือ ปริมาณการดูดซับของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลาง รูพรุน (mg/g)
	rxn	คือ ตัวห้อยที่แสดงให้เห็นปฏิกิริยาทางชีวภาพ หรือทางเคมีของตัวถูกละลาย (ที่นอกเหนือจากการดูดซับ)

โดยจะเป็นผลรวมของประสิทธิภาพการแพร่กระจายของโมเลกุลและการแพร่กระจายของโมเลกุล ในสมการที่ 2-3 อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไปยังความเร็วของน้ำที่ผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนได้มาจาก dispersivity, α ดังแสดงในสมการที่ 2-4

$$D = D_w \tau_w + D_h \quad [2-3]$$

$$\alpha = \frac{D}{v} \quad [2-4]$$

เมื่อ	D_w	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
	τ_w	คือ ปัจจัยคดเคี้ยว (-)
	α	คือ dispersivity (cm)

โดยทั่วไปการกำหนดลักษณะของตัวกลางที่ผ่านชั้นหินอุ้มน้ำธรรมชาติภายใต้สภาวะอิ่มตัว ปัจจัยที่คดเคี้ยวเป็นพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะของรูพรุนและค่าความชื้น (Nielsen, van Genuchten, & Biggar, 1986)

2.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุตัวกลางที่มีรูพรุน (porous media) และผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลของน้ำหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยใช้วิธี constant-head แสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$K = (0.30122 \log h_1/h_2)^* (\mu_r/t)^* 36000 \quad [\text{mm}/\text{hr}] \quad [2-5]$$

เมื่อ 0.30122 เป็นค่าคงตัว

h_1 = ค่าความสูงของน้ำที่ไหลจากจุดเริ่มต้นจนถึงด้านล่างของกระบอกโลหะหนัก [cm]

h_2 = ค่าความสูงของน้ำที่ไหลจากจุดสุดท้ายจนถึงด้านล่างของกระบอกโลหะหนัก [cm]

μ_t = ค่าความหนืดของน้ำตามอุณหภูมิของน้ำที่วัดไว้ (cP)

t = เวลาที่น้ำไหลผ่านดิน [s]

(ปัทมา โชติภักดิ์, 2553)

2.4.2 ความพรุน (Porosity)

ความพรุน เป็นสัดส่วนของช่องว่างต่อปริมาณทั้งหมดของวัตถุ ความพรุนจะแตกต่างกันไปในแต่ละวัตถุ ความพรุนในชั้นหินถูกควบคุมโดยขนาด รูปร่าง และการคัดขนาดของเม็ดตะกอน จะมีผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านดังสมการ 2-6

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad [2-6]$$

เมื่อ n คือ ความพรุน (g/cm^3)
 V_v คือ ปริมาตรของช่องว่างตัวกลางรูพรุน (m^3)
 V_T คือ ปริมาตรรวมของตัวกลางรูพรุน (m^3)

2.4.3 การดูดซับ และ การคายออก (Adsorption and Desorption)

กระบวนการดูดซับ ได้แก่ การดูดซับ การดูดซับทางเคมี และการแลกเปลี่ยนไอออนบวก กระบวนการเหล่านี้มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเคมี อัตราการไหลของน้ำบาดาลพื้นที่ผิวในการติดต่อกับดินและความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลปัจจุบัน (NGCLC, 2001)

แบบแนวคิดที่แตกต่างกันได้รับการพัฒนาเพื่อปริมาณดูดซับและการคายออก ส่วนรูปแบบการดูดซับจะถูกกำหนดโดยการดูดซับ isotherm ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายในน้ำบาดาลและความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เป็นของแข็ง เช่นอนุภาคของดิน

โดยกระบวนการดูดซับจะประกอบไปด้วย 3 โมเดลการดูดซับ ดังนี้

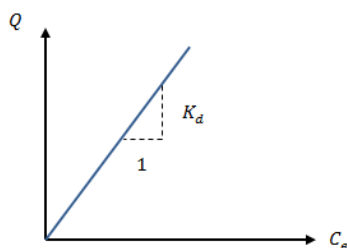
1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear isotherm)
2. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)
3. ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

1. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง (Linear isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง เป็นการอธิบายสมดุลของการดูดติดผิวที่ง่ายที่สุด โดยปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย สามารถแสดงได้โดยสมการ ดังนี้

$$Q = K_d C_e \quad [2-7]$$

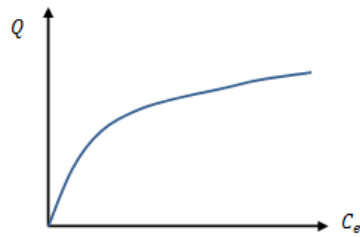
- Q คือ S คือ $\frac{X}{m}$ คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหนึ่งหน่วย น้ำหนักของสารดูดติดผิว (mg/kg)
- K_d คือ ค่าคงที่ของการกระจาย (L/kg)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mg/L)



รูปที่ 2- 3 Linear isotherm
(ธนัชพร อยู่ยั้งยืน, 2547)

$$Q = \frac{abC_e}{(1+bC_e)} \quad [2-8]$$

- Q คือ S คือ $\frac{X}{m}$ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหนึ่งหน่วย น้ำหนักของสารดูดติดผิว (mg/kg)
- C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
- a คือ Q^0 คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหนึ่งหน่วย น้ำหนักของสารดูดติดผิวที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer (mg/kg)
- b คือ ค่าคงที่ของระบบ
โดยสามารถแสดงการเขียนกราฟได้ดังรูป



รูปที่ 2- 4 Langmuir isotherm
(ธนัชพร อยู่ยั้งยืน, 2547)

3. ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

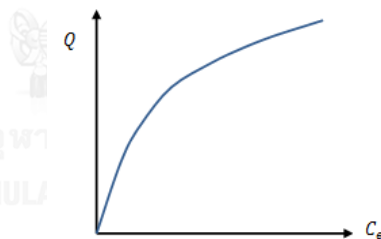
สมการของไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช เป็นสมการการดูดซับทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นไม่เท่ากันตลอดผิวหน้า และพลังงานการดูดซับมีค่าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการและเขียนกราฟได้ดังรูป

$$Q = K_F C_e^{1/n} \quad [2-9]$$

Q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (mg/kg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

$K_F, 1/n$ คือ ค่าคงที่ของระบบ



รูปที่ 2- 5 Freundlich isotherm
(ธนัชพร อยู่ยั้งยืน, 2547)

2.4.4 ค่าตัวประกอบความหน่วง (Retardation factor, R)

ค่าตัวประกอบความหน่วง (retardation factor, R) คือการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่ถูกกำหนดที่คำนวณโดยวิธีการหาพื้นที่เหนือกราฟด้านหน้าของ BTCs ที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza, Rao, & Hornsby A G., 1987) แสดงในสมการ 2-10 ดังต่อไปนี้

$$R_{area} = PV_i - \sum_{i=0}^{PV_i} \left(\frac{C}{C_0} \right) \Delta PV \quad [2-10]$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของทองแดง และ ตะกั่ว ในน้ำที่ออกมา
จากคอลัมน์ (mg/l)

C_0 คือ ความเข้มข้นของทองแดงและ ตะกั่ว (mg/l)

PV คือ ปริมาณค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของทองแดงและ
ตะกั่วที่มีค่าเท่ากับ 1.0

ค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$R = 1 + \rho \times \frac{Kd}{\theta} \quad [2-11]$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (g/cm^3)

Kd คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (mg/kg)

θ คือ ค่าความชื้นโดยปริมาตร (m^3/m^3)

2.5 คำจำกัดความและความเป็นพิษของโลหะหนัก

โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป ส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนและสะสมอยู่ในดิน สะสมในดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ (พรพรรณ, 2549)

โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน สำหรับทางด้านการเกษตรโลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย และถูกจัดให้ขึ้นบัญชีดำ (black list) เนื่องจากมีพิษร้ายแรงมากต่อมนุษย์ (Sawyer et al. 2003)

2.5.1 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

เกิดจากโลหะหนักที่ร่างกายได้รับทางระบบต่าง ๆ ของร่างกายไปรบกวนการทำงานของระบบเอ็นไซม์ของเซลล์ และจับยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การควบคุมการลำเลียงของสารต่างๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป โลหะหนักบางชนิดมีผลต่อสมบัติทางด้านโครงสร้าง หรือเคมีไฟฟ้าของเซลล์ความเป็นพิษของโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิด และเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง ผลของความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตเกิดจากกลไกระดับเซลล์ 5 แบบ (สุทธิณี มีสุข, 2554) คือ

1. ทำให้เซลล์ตาย
2. เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์
3. เป็นตัวการชักนำให้เกิดมะเร็ง
4. เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม
5. ทำความเสียหายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรม

1. ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่ว (รูปที่ 2-6) เป็นโลหะหนักมีสีเทาเงิน เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ปัจจุบันอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก เมื่อมีการออกซิไดซ์จะได้ PbO ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ได้โลหะตะกั่วออกสู่สภาวะแวดล้อม ตะกั่วยังใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยตะกั่วและสารประกอบของตะกั่วในรูปของสารมลพิษออกสู่สภาวะแวดล้อม ทำให้มีการปนเปื้อนของตะกั่วทั้งในดิน น้ำ และอากาศ

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางอาหาร ทางการหายใจ และทางผิวหนัง เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย ส่วนใหญ่จะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงจะไปลดการสร้างฮีโมโกลบิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเม็ดเลือดแดงโดยไปยับยั้งเอ็นไซม์ที่เกี่ยวกับการสร้างฮีโมโกลบิน นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อดับ หัวใจ และเส้นเลือด ภาวะเจริญพันธุ์ โครโมโซม และเป็นก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และความพิการแต่กำเนิดอีกด้วย

1.1) การเป็นพิษของตะกั่วต่อระบบเลือด

ตะกั่วทำให้เกิดความผิดปกติของระบบเลือด โดยทำให้เกิดอาการซีด (Anemia) เหนื่อย อ่อนเพลีย ปวดศีรษะมึนงง และตัวเหลือง สาเหตุคือเม็ดเลือดแดงมีอายุสั้นและแตกง่ายตะกั่วทำให้มีความผิดปกติของการสร้างฮีโมโกลบิน และพอร์พัยรินเกิด basophilic stippling ของเม็ดเลือดแดง (Sayyad, Afyuni, Mousavi, et al., 2010)

1.2) การเป็นพิษของตะกั่วต่อไต

ตะกั่วจะไปสะสมที่ไตทำให้เกิดความผิดปกติของ tubular marker หลายชนิดมากกว่าที่จะเกิดกับ Glomerular marker และแบ่งออกได้ทั้งแบบเฉียบพลัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงกลับสู่ปกติได้ (reversible) และแบบเรื้อรัง ซึ่งถ้ามากอาจเปลี่ยนแปลงกลับสู่ปกติไม่ได้ (กระทรวงสาธารณสุข, 2532)

1.3) การเป็นพิษของตะกั่วต่อระบบประสาท

ตะกั่วมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (central nervous system, CNS) และส่วนปลาย (central and peripheral nervous systems, PNS) จะมีการตั้งแต่มารุนแรงมาก เช่น ซึม ปวดศีรษะ กระวนกระวาย เชื่องช้า ตื่นเต้นง่าย น้ำหนักลด อาเจียน จนถึงอาการรุนแรงได้แก่ชัก หมดสติ อัมพาต (encephalopathy) ตะกั่วยังมีผลต่อระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อทำให้เกิดประสาทส่วนปลายอักเสบ (peripheral neuropathy) แต่พบในผู้ใหญ่มากกว่าเด็กระบบอื่นๆ (กระทรวงสาธารณสุข, 2532)

1.4) ระบบทางเดินอาหาร

จะมีอาการปวดท้องมากปวดแบบบิดตัว (lead colic) เนื่องจากมีการหดเกร็งของลำไส้ โดยเฉพาะพิษของตะกั่วเฉียบพลันจะพบมาก และมีอาการท้องผูกท้องเสีย นำ คลื่นไส้ อาเจียน เบื่ออาหาร ซีดและเหงื่อออกมาก มีความต้องการถ่ายแต่ไม่ถ่าย ระบบกระดูกจะมีตะกั่วสะสมในกระดูกที่กำลังเจริญ (growing long bone) ตะกั่วจัดเป็น carcinogen class 2B สามารถทำให้เกิดเนื้องอกทั้งชนิดธรรมดา และร้ายแรงได้ (กระทรวงสาธารณสุข, 2532)

1.5) ผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

มีผลต่อ ทั้งคน สัตว์ และปลา ที่ได้รับตะกั่วเข้าไปโดยการสูดดมและการกินอาหาร หรือน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยตะกั่วจะไปสะสมที่เลือด กระดูก กล้ามเนื้อ และไขมัน โดยกลุ่มทารกและเด็กเล็กเป็นกลุ่มเสี่ยงแม้จะได้รับตะกั่วในปริมาณเล็กน้อยก็ตาม ผลของตะกั่วต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมสรุปได้ดังนี้

1.5.1 การทำลายอวัยวะต่างของร่างกาย ตะกั่วสามารถทำลายไต ตับ และสมอง รวมถึงระบบประสาท และอวัยวะอื่นๆ การสัมผัสตะกั่วจะทำให้เกิดโรคกระดูกพรุน และความผิดปกติของระบบเจริญพันธุ์

1.5.2 มีผลต่อสมองถ้าได้รับสารตะกั่วในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดอาการชัก ปัญญาอ่อน ความผิดปกติทางพฤติกรรม มีปัญหาในเรื่องการจดจำ และอารมณ์แปรปรวน ตะกั่วในปริมาณที่ต่ำยังสามารถมีผลต่อระบบประสาทและสมองของทารกในครรภ์หรือเด็กเล็กทำให้การมีปัญหในเรื่องการเรียนรู้และ IQ ต่ำ

1.5.3 ผลต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด โดยตะกั่วจะทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้น ทำให้เกิดโรคหัวใจโดยเฉพาะในผู้ชายทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

1.5.4 ผลต่อพืชและสัตว์ สัตว์สามารถรับสารตะกั่วได้จากการกินหญ้า และพืชที่ได้รับสารตะกั่วจากการพื้นดินที่มีสารตะกั่ว โดยเฉพาะพืชและสัตว์ที่อยู่ใกล้เขตอุตสาหกรรม พืชหรือสัตว์ที่ได้รับสารตะกั่วเข้าไปในปริมาณที่ต่ำจะทำให้การเจริญเติบโตช้า

ผลกระทบต่อสัตว์น้ำและปลา แหล่งน้ำอาจจะปนเปื้อนสารตะกั่วจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่สารตะกั่ว หรือจากน้ำจากขยะที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนอยู่ แหล่งน้ำที่มีปริมาณสารตะกั่วอยู่ในระดับสูงจะทำให้มีผลต่อระบบการเจริญพันธุ์ของสัตว์น้ำและปลา และมีผลต่อระบบโลหิต และระบบประสาทของสัตว์น้ำและปลาที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้น (กระทรวงสาธารณสุข, 2532)



รูปที่ 2- 6 แร่ตะกั่ว
(กรมทรัพยากรธรณี, 2528)

2. ทองแดง (Cu)

ทองแดง (รูปที่ 2-7) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศอาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น Cu_2O , Cu_2S , CuF , CuSO_4 , CuFeS_2 เป็นต้น ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่างๆ ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การน้ำดื่ม การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อ

กลไกการเกิดพิษ การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548) เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความ เป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสันเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2548)



รูปที่ 2- 7 แร่ทองแดง
(กระทรวงสาธารณสุข, 2532)

2.6 การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรม

ดินเป็นแหล่งรองรับมลสารต่างๆ ทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ ดินเป็นแหล่งรองรับและปกปิดสิ่งของต่างๆ ทั้งสารเคมี สารพิษ พลาสติก กระดาษ โฟม เศษอาหาร ซากพืช ซากสัตว์ โดยสิ่งของต่างๆ เหล่านี้มีทั้งสิ่งของที่สามารถเน่าเปื่อย ย่อยสลายผุพังไปตามกาลเวลา และไม่สามารถเน่าเปื่อยย่อยสลายผุพัง ดินมีสมบัติที่มีประจุทำให้สามารถดูดซับสารเคมีหรือสารพิษที่มีประจุได้ ดินมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารต่างๆ ในดิน ทำให้เกิดสารประกอบที่ลดความเป็นพิษหรือเกิดสภาวะ หรือเกิดสารใหม่ ที่มีสภาพไม่ก่อให้เกิดพิษ นอกจากนี้แล้ว สารเคมีและสารพิษบางชนิด เป็นธาตุอาหารพืช หรือมีส่วนทำให้ธาตุอาหารในดินเพิ่มมากขึ้น หรือลดลงในปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย

ดินสามารถที่จะรองรับโลหะหนักและสารพิษต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้ จากการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ดินมีสมบัติที่สามารถรองรับสารต่างๆ ได้เนื่องจากดินมีอนุภาคของสารคอลลอยด์ ทั้งชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์ ประกอบกับดินมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ดินมีองค์ประกอบของอนุภาคทั้งบวกและลบ จึงทำให้ดินสามารถที่จะดูดซับ ยึดเกาะโลหะหนัก สารเคมีอินทรีย์ สารเคมีอนินทรีย์ต่างๆ ไว้ได้ ทั้งนี้ความสามารถของดินในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพของพีเอช (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดิน รูปทางเคมีของโลหะหนักและของสารเคมีอินทรีย์ สารเคมีอนินทรีย์ อุณหภูมิ สภาพการระบายน้ำ และลักษณะของเนื้อดิน

1) การปนเปื้อนในดินเนื่องจากการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชต่อเนื่องเป็นเวลานาน ในปีพ.ศ. 2545-2552 พบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าสารเคมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)

1.1) การใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกโนคลอรีน

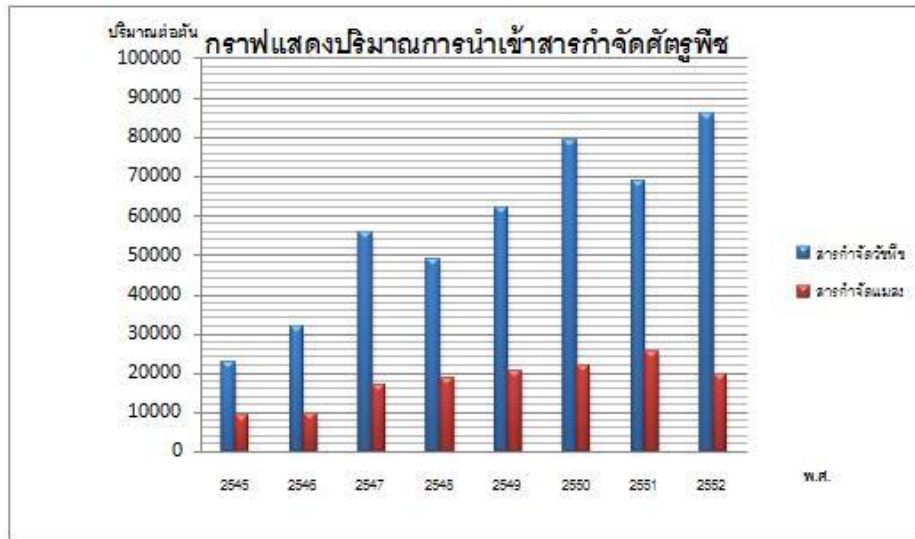
(organochlorine, OC) และกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต (organophosphate, OP) ต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจเป็นสาเหตุให้มีการปนเปื้อนสารพิษตกค้างในดิน

1.2) การปนเปื้อนของสารพิษในพื้นที่ปลูกก่อให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตผลได้

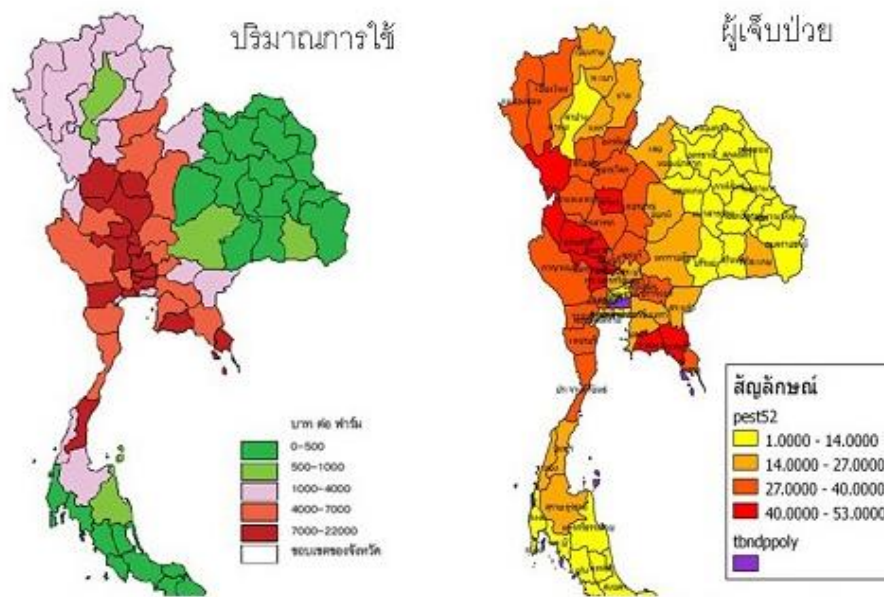
1.3) พืชหัวและพืชที่เจริญเติบโตติดกับพื้นดินอาจมีสารพิษที่ตกค้างในดินติดไปกับผิวของผลิตผลที่รับประทาน

1.4) พืชที่เจริญเติบโตพื้นดิน และห่างจากผิวดินมีความเสี่ยงต่ำในการปนเปื้อน แต่ต้องเก็บเกี่ยวอย่างระมัดระวังมิให้ผลิตผลตกลงพื้นดิน

1.5) ต้องไม่ปลูกพืชในพื้นที่ปลูกที่มีการตรวจพบปริมาณของสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกโนคลอรีน และกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเกินค่าความปลอดภัย (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)



รูปที่ 2- 8 แสดงการนำเข้าสารเคมีการเกษตร (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2555)



รูปที่ 2- 9 ข้อมูลปริมาณการใช้สารเคมีในประเทศไทยและผู้เจ็บป่วยจากการใช้สารเคมี (กรมควบคุมโรค, 2554)

2) การปนเปื้อนในดินเนื่องจากโลหะหนัก

2.1) โลหะหนักเป็นธาตุที่มีอยู่ในดินโดยธรรมชาติ แต่อาจเกิดการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจากขยะและของเสียที่มาจากภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งการทำเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยและการผลิตทั้งปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในดินและผลิตผล

2.2) การปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว ในผลิตผลเกินมาตรฐาน ทำให้มีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคคือทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ซึ่งการปนเปื้อนของผลิตผลจะมากหรือน้อย ขึ้นกับปริมาณและรูปของสารประกอบของแคดเมียมและตะกั่ว ปฏิกริยาของดินและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

2.3) ผักที่รับประทานราก หัว และใบ และถั่วลิสง เป็นผลิตผลที่มีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนแคดเมียม หากปลูกในพื้นที่ที่มีความเสี่ยง และถ้าตรวจพบแคดเมียมปนเปื้อน ต้องมีการติดตามตรวจสอบดังนี้

- ค่าการปนเปื้อนน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าความปลอดภัยมาตรฐาน ต้องตรวจสอบและวิเคราะห์ผลิตผลทุก 3 ปี
- ค่าการปนเปื้อนมากกว่าครึ่งหนึ่งของค่าความปลอดภัยมาตรฐาน ต้องตรวจสอบและวิเคราะห์ผลิตผลทุกปี
- ค่าการปนเปื้อนเกินค่าความปลอดภัยมาตรฐาน ควรเปลี่ยนพื้นที่ปลูก หรือหาวิธีการปรับปรุงแก้ไขดิน เพื่อให้พืชดูดซึมได้น้อยลง

2.4) ปุ๋ยและสารเสริมประสิทธิภาพปุ๋ยที่เลือกมาใช้ในสวน ไม่ควรมีแคดเมียมปนเปื้อน หรือหากมีก็ไม่ควรเกินค่ากำหนดไว้ตามมาตรฐาน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547)

2.7 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแบบจำลอง HYDRUS-1D

เป็นแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำ และสารละลายใน 1 มิติ หรืออาจใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในชั้นดินที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Simunek, Sejna, Saito, Sakai, & van Genuchten, 2008) ประกอบไปด้วย

1. สมการการไหลรวมสำหรับการดูน้ำจากรากพืช
2. สมการการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยพิจารณาการพาความร้อน
3. สมการการเคลื่อนที่สารละลายโดยพิจารณาการเคลื่อนที่แบบ advective-dispersive ของของเหลว และการแพร่กระจายก๊าซ
4. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในชั้นดินที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับการเคลื่อนที่ของตัวละลายที่กำหนดความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องและแตกต่างกัน และที่กำหนดความเข้มข้นของฟลักซ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวรวมถึงการสะท้อนทำให้เห็นถึงผลกระทบของการแพร่กระจายโมเลกุล

แบบจำลอง HYDRUS-1D ยังดำเนินการตามขั้นตอนการปรับให้ใกล้เคียงกับความแปรปรวนของค่าไฮดรอลิกในรายละเอียดของดินที่กำหนดโดยวิธีการชุดของการเปลี่ยนแปลงการปรับเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของดิน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักของพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทย

ภาริณี วนาพรรณ (2553) ได้ศึกษาผลของปุ๋ยเคมีต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยการปลูกอ้อย ในดินที่มีการปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยปลูกอ้อยในเรือนทดลองเก็บตัวอย่างดินและอ้อย ในเดือนที่ 2 4 6 และ 8 ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน พบว่าอัตราการใส่ปุ๋ยเคมีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินสูงขึ้น ส่วนการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ส่วนได้แก่ท่อนพันธุ์เดิม รากอ้อย ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย พบว่ารากอ้อยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดตามด้วยท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย

สุธาสิณี ชื่อสัจย์ (2553) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักเนื่องจากมีการใช้เคมีเกษตรในการทำเกษตรกรรม ที่ตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี เป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปลูกพริกเป็นจำนวนมาก และได้มีการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลงหลายชนิด และพบบ่อน้ำบาดาลกระจายอยู่ทั่วบริเวณโดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษานี้มีสภาพเป็นกรด ซึ่งอาจเป็นปัจจัยเสริมให้เกิดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของโลหะหนักจากสารเคมีเกษตรสู่ดินและน้ำบาดาลระดับตื้นในที่สุด โดยได้ออกภาคสนามทั้งสิ้น 4 ครั้ง เพื่อวัดระดับของน้ำบาดาล เก็บตัวอย่างดินบริเวณรอบบ่อและดินตามความลึก เก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำบาดาลจำนวน 12 บ่อ ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรดต่างในน้ำ ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 และจากการวัดปริมาณความเข้มข้นของ โลหะหนักในดินของ ทองแดง นิกเกิล และตะกั่ว พบว่าค่าของนิกเกิล และตะกั่วมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการวัดของเครื่อง ส่วนทองแดง ส่วนใหญ่จะพบในสัดส่วนรูปแบบ (Fraction) ที่ 1 และ 2 มากกว่า 50 % ซึ่งสามารถถูกชะละลายได้ง่ายในธรรมชาติและลงสู่แหล่งน้ำบาดาลในที่สุดซึ่งเป็น Fraction ที่เกิดจากกิจกรรมมนุษย์เป็นส่วนใหญ่

Thapinta and Hudak (2003) ได้ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เทคโนโลยี (GIS) เพื่อประเมินความเสี่ยงของน้ำบาดาลจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชในประเทศไทย พื้นที่ที่ศึกษา 3 จังหวัดคือจังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดราชบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรีตั้งอยู่ในทิศตะวันตกของประเทศไทย ปัจจัยที่นำมาใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงคือ เนื้อดิน ความชื้น รวมถึงการใช้ที่ดินและปริมาณฝน และได้ศึกษาความเข้มข้นสารกำจัดศัตรูพืชในบ่อน้ำบาดาล 90 บ่อ จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่สุดคือความลึกบ่อ ถ้าบ่อน้ำบาดาลมีระดับตื้นก็จะทำให้เกิดการปนเปื้อนและมีความเสี่ยงจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชมากที่สุด

2.8.2 การศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักของพื้นที่เกษตรกรรมพื้นที่เกษตรกรรมในต่างประเทศ

Nouri J. (2006) ศึกษาปริมาณความเข้มข้นและการกระจายตัวของโลหะหนัก ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) ในชั้นน้ำบาดาล ในแถบจังหวัด Shush และจังหวัด Andimeshk บริเวณตอนใต้ของประเทศอิหร่านซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการทำการเกษตรค่อนข้างสูง โดยพื้นที่ศึกษามีขนาดประมาณ 1,100 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างแม่น้ำ Dez และ Karkhe โดยได้

แบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 บริเวณ เก็บตัวอย่าง 168 ตัวอย่าง จาก 42 บ่อ ในระหว่างเดือนเมษายน พฤษภาคม สิงหาคม และเดือน กันยายน ปี ค.ศ.2004 และนำมาหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำตัวอย่างโดยใช้ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่าความเข้มข้นของ ทองแดง สังกะสี และ นิกเกิล ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน และพบว่า แคดเมียม (Cd) 4.8% จากตัวอย่างทั้งหมดมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่ามาตรฐาน (Cd 0.005 mg/l) จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักบริเวณตอนใต้มีค่ามากกว่าบริเวณตอนเหนือของพื้นที่ศึกษา เนื่องจากทางตอนใต้มีพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่อุตสาหกรรมมากกว่า และทิศทางการไหลของน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยปกติจะไหลจากทิศเหนือไปยังทางทิศใต้ของจังหวัด Shush จึงทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่ปริมาณสูง

Wong S.C., Li X.D. et al. (2002) ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ปลูกข้าว บริเวณปากแม่น้ำ Pearl ซึ่งเป็นภูมิภาคที่มีการพัฒนามากที่สุดของประเทศจีน โดยได้เก็บดิน 3 บริเวณดังนี้ คือ บริเวณที่มีการทำการเกษตรในพื้นที่ศึกษา 38 ตัวอย่าง ดินบริเวณที่มีการเพาะปลูกข้าว 16 ตัวอย่าง และดินตามธรรมชาติ 18 ตัวอย่าง จากนั้นได้ทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในดินด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ปลูกข้าว และดินตามธรรมชาติมีการปนเปื้อนของแคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมยังพบโลหะหนักมากที่สุด ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าน่าจะมาจากการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลง

Yu L., Xin G., et al. (2008) ศึกษาความเข้มข้นของทองแดง ตะกั่ว โครเมียม โปรอท และ สารหนู ซึ่งตรวจวัดในภาคเกษตรกรรมที่มีความแห้งแล้ง และดินในพื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทาน ในหมู่บ้าน Daba หมู่บ้าน Shajiwuan หมู่บ้าน Gangou และหมู่บ้าน Sifangwu ซึ่งตั้งอยู่ในใจกลางจังหวัดกานซู ประเทศจีน โดยดินในพื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทานมีความเข้มข้นของตะกั่วเกินเกณฑ์มาตรฐานของดินทางการเกษตรในประเทศจีนประมาณ 72.46% จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตะกั่วมีปัญหามลพิษรุนแรงส่วนโลหะหนักอื่น ๆ มีปัญหามลพิษเล็กน้อยและดินในพื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทานที่หมู่บ้าน Daba นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) มาใช้ในการประเมินข้อมูลดิน ผลการศึกษาพบว่าดินในพื้นที่เกษตรที่มีความแห้งแล้งจะมีการสะสมของทองแดง ตะกั่ว โครเมียม โปรอท และสารหนู ซึ่งมาจากปัจจัยชลประทาน ปัจจัยทางการเกษตร ปัจจัยทางธรณีวิทยา และปัจจัยของมนุษย์เป็นหลัก

2.8.3 การทดลองแบบแบดซ์

เกษรา จิตนิยม, อัญชลี สุทธิประการ และคณะ (2553) ศึกษาการดูดซับของ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดงและแคดเมียม ในสเมกไทต์ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวในชั้นดินบนและล่างของชุดดินชัยบาดาล และชุดดินวังชมพู ซึ่งมีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ปริมาณการดูดซับโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณสเมกไทต์ (Smectite) ที่มีอยู่ในกลุ่มอนุภาคดินเหนียว โดยการเพิ่มค่าพีเอชสามารถเพิ่มการดูดซับโลหะหนักให้สูงขึ้น ชนิดและ

ปริมาณโลหะหนักในสารละลายจะเป็นปัจจัยจำกัดความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสเมกไทต์ ค่าวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปริมาณการดูดซับของโลหะหนักแต่ละชนิด และสภาพทางเคมีของสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะค่าพีเอชของดิน และความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณของสเมกไทต์ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว สามารถใช้ประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักในสภาพแวดล้อมของดินได้

ปัทมา โชติกวิน (2553) ได้วิเคราะห์ค่าโลหะหนักในน้ำจากบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่การเกษตร และในปุ๋ย พบว่ามีปริมาณของตะกั่วและทองแดงค่อนข้างสูง โดยได้ทำการทดลองแบบแบตช์ เพื่อดูคุณสมบัติในการดูดซับของโลหะหนัก โดยใช้สมการของ Van Genuchten (VG) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ และการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Kd) แบบ Linear Isotherm ของดินตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย โดยมีการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองไปใช้ในแบบจำลอง HYDRUS-1D พบว่าหากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่ามากจะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้า และจะพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่าน้อย โลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็วและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่สูง

2.8.4 การทดลองแบบคอลัมน์

Dişli (2010) ได้ทำการทดลองแบบแบตช์และคอลัมน์ในดินลุ่มน้ำที่ต่างกันที่ทะเลสาบ Mogan ประเทศตุรกี โดยมีความยาวคอลัมน์ 9 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.7 ซม. พบว่า Cu, Zn และ Mn ค่า Kd สูงสุดในดินเหนียว และต่ำสุดในดินร่วนปนทราย และทำการปรับเทียบแบบจำลองโดยใช้ CXTFIT ในการกำหนดพารามิเตอร์การเคลื่อนตัวโดยใช้ curve-fitting ผลการทดลองคอลัมน์แสดงให้เห็นว่าค่า dispersivity ในดินเพิ่มขึ้นจาก 0.024 ซม. เป็น 1.13 ซม.

Sayyad, Afyuni et al. (2010) ได้ศึกษาการประเมินการเคลื่อนที่ของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในพืชทั่วไป 2 ชนิดที่มีระบบรากที่แตกต่างกัน โดยข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) จะเป็นระบบรากฝอย และดอกคำฝอย (*Carthamus tinctorious*) จะเป็นระบบรากแก้ว ในดินที่เป็นดินทรายแป้งปนดินเหนียว และดินเหนียวปนดินร่วน ได้ศึกษาโดยการตัดคอลัมน์ของดิน 50 ซม. ในดินที่ไม่ปนเปื้อน ที่ได้จากการสกัดจากข้าวสาลี และดอกคำฝอยในพื้นที่เดียวกัน โดยนำดินด้านบนของคอลัมน์ดินมา 10 ซม. ซึ่งดินในคอลัมน์ครึ่งหนึ่งเป็นดินที่ปนเปื้อนอีกครั้งหนึ่งเป็นดินที่ไม่มีการปนเปื้อน นำมาปลูกข้าวสาลี และปลูกดอกคำฝอย และปล่อยให้มีการสะสมอย่างต่อเนื่อง และหลังจากนั้นเริ่มเก็บตัวอย่างของดินในระยะ 10 ซม. และนำมาวิเคราะห์โลหะหนักโดยการสกัดด้วย HNO_3 และ DTPA การเพิ่มขึ้นของพืชจะส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักไปสู่ดินชั้นล่างโดยผลการวิเคราะห์ดอกคำฝอยจะมีความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในดินระดับลึกกว่าข้าวสาลีโดยมีความเข้มข้นของโลหะหนักที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของดินระบบรากพืช และสมบัติทางเคมีของดินด้วย

Chen, Zeng G. et al. (2010) ได้ออกแบบระบบคอลัมน์ดินและนำมาใช้เพื่ออธิบายการชะล้างกากของโลหะหนัก เมื่อได้เพิ่มปุ๋ยหมักลงไปดินสีแดงพบว่า ทองแดง น้อยกว่า 4% และสังกะสีมากกว่า 58.3% เคลื่อนตัวไปสู่หน้าใต้ดิน ความเข้มข้นสูงสุดของทองแดงและสังกะสีในน้ำ ชะขะเย เป็น 22 และ 246 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ค่า pH ในน้ำชะขะเยลดลงในช่วง 11.25 -6.75 การนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักปนเปื้อนทั้งทองแดง และสังกะสี ปนเปื้อนสูงโดยเฉพาะทองแดง กว่า 75.3% และสังกะสี 78.2% ส่วนที่เหลือยังคงสะสมอยู่ ค่าพารามิเตอร์สูงสุดในการดูดซึมดินสำหรับทองแดงคือ 0.099 และสังกะสี 0.160 การทดลองภาคสนามกับการประยุกต์ใช้ Cycling ที่มีความจำเป็นเพื่อศึกษาผล Cycling เมื่อโลหะหนักตกค้างในดินหรือการชะล้างลงสู่หน้าบาดาลในอนาคต

Shahram et al. (2012) ได้ประมาณค่าพารามิเตอร์จากการเคลื่อนตัวของตะกั่วและทองแดงในคอลัมน์ดินเหนียวที่ไม่อิ่มตัว โดยคาดการณ์ความถูกต้องของการใช้สมการการกระจายหนึ่งมิติเพื่อประเมินการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายในคอลัมน์ดินซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเคลื่อนที่คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) และปัจจัยการชะลอ (R) โดยจะต้องมีการวัดค่าก่อนที่จะนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการคาดการณ์ที่เกิดขึ้นจริง การประมาณค่าสำหรับทั้งสองพารามิเตอร์วิเคราะห์จาก BTC ที่ได้จากการทดลองของทั้งสองคอลัมน์ และวิธีการ ผลการศึกษาพบว่า BTC และวิธีการ ERFC ทั้งสองมีความสามารถในการคำนวณค่า Retardation (R) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) และความเข้มข้นจำลอง โดยวิธี ERFC เข้ากันกับข้อมูลที่วัดอัตราของการขนเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินเหนียวคือ: $Cu > Pb$ Retardation (R) ของตะกั่วและทองแดงสำหรับดินเหนียวที่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้นกับระยะทาง ความสัมพันธ์ระหว่าง Retardation (R) และระยะทาง

2.8.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D

HYDRUS-1D เป็นแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหลของน้ำและสารละลายใน 1 มิติ หรืออาจจะใช้ในการวิเคราะห์น้ำและการเคลื่อนไหวของตัวถูกละลายในชั้นไม่อิ่มตัว ดินไม่สม่ำเสมอ หรือมีรูพรุนได้ การไหลและการเคลื่อนตัวสามารถใช้ในแนวตั้งแนวนอนหรือแนวเอียงได้

วิชญ์ คุณจักร (2548) ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำไม่อิ่มตัวมีความสำคัญในการวางแผนการเพาะปลูกและประเมินอัตราการเติมลงสู่หน้าใต้ดิน ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D จำลองลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำไม่อิ่มตัวและพัฒนาการทดลองโดยใช้แบบจำลองกายภาพ และทำการทดลองหาคุนสมบัติทางชลศาสตร์ของดินแต่ละชนิดจากการทดลองมาตรฐาน เพื่อนำมาใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณการไหล การศึกษายังได้ประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณความชื้นในชั้นน้ำไม่อิ่มตัวกับข้อมูลภาคสนาม ในการทดลองจากแบบจำลองกายภาพ ค่าความชื้นเริ่มต้นของดินแต่ละประเภท ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าความจุเก็บกักของดิน (field capacity) และมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดินตกค้าง (residual water content) ที่ได้จากการทดลองมาตรฐานที่ใช้การอัดความดัน ส่วนปริมาณน้ำในดินอิ่มตัว ผลการทดลองมาตรฐานมีปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลองกายภาพ ผลการศึกษายังพบว่า

รูปแบบความชื้นจะเริ่มจากความชื้นเริ่มต้นและแพร่สู่ความชื้นอ้อมตัว เวลาที่ใช้ในการอ้อมตัวจากการเติมน้ำแบบมีระดับน้ำใต้ดิน เร็วกว่าการเติมน้ำแบบระดับน้ำคงที่ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการที่ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการอ้อมตัวของดินแต่ละชนิดพบว่า ดินทรายใช้เวลาเร็วกว่าดินตะกอนประมาณ 115 เท่า และมากกว่าดินเหนียวประมาณ 275 เท่า เมื่อนำค่าจากค่าความจุเก็บกักของดินเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณในการจำลองสภาพการไหลในพื้นที่สนาม พบว่าแบบจำลอง HYDRUS-1D สามารถจำลองสภาพความชื้นในดินได้ดีพอสมควร เวลาที่ใช้ในการอ้อมตัวของดินจากการจำลองโดย HYDRUS-1D มีค่าน้อยกว่าข้อมูลวัดจริงภาคสนามประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และการจำลองให้ค่าปริมาณน้ำในดินเฉลี่ยน้อยกว่าค่าที่วัดจากในพื้นที่สนามประมาณ 12-14 เปอร์เซ็นต์

Carles M. Rubio and Rafael (2012) ประเมินความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของแบบจำลอง Hydrus-1D เพื่อจำลองพลวัตวัฏจักรไหลของน้ำในตะกอนดินของดินที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เพาะปลูกที่ทิ้งร้างรกรไปด้วยพุ่มหญ้า รวมถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินและลักษณะสมบัติทางชลศาสตร์ เทคนิคหลายเทคนิคและอุปกรณ์ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาในการทดลองทั้งภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ ส่วนสุดท้ายของการศึกษาคือการจำลอง HYDRUS-1D โดยใช้เหตุการณ์ฝนจริงและอัตราการระเหย โดยสรุปสามารถประเมินชลศาสตร์น้ำได้อย่างถูกต้องจากสถานการณ์ธรรมชาติ

Minh, Stefan et al. (2009) ได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีในดินนาข้าวของสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเดลต้า ประเทศเวียดนาม พื้นที่นี้ปลูกข้าวเป็นจำนวนมาก และมีโรงงานขนาดเล็กตั้งอยู่ ทำให้พบความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรอบหมู่บ้านและระบบชลประทาน การเคลื่อนตัวของ Cu, Pb และ Zn ในดินนาข้าว ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขแล้วนำมาเปรียบเทียบแบบจำลอง Hydrus-1D สำหรับการจำลองชั้นน้ำในการประเมินการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในนาข้าว ภายใต้เงื่อนไขที่มีน้ำท่วมขัง โดยจำลองที่ความลึก 20 ซม. จากผิวดิน โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่ได้มาจากการทดลองได้นำมาใช้เป็นข้อมูลการนำเข้าแบบจำลอง Hydrus-1D การจำลองแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของ Cu, Pb และ Zn ใช้เวลา 370, 470 และ 495 วัน ตามลำดับ และพบว่า Hydrus-1D เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินนาข้าว

Manika G., Garg et al. (2012) ได้ดำเนินการตรวจสอบความคงอยู่และการเคลื่อนตัวของ 2,4-Dichlorophenoxy ในเขตดินที่ไม่อ้อมตัวสำหรับการเพาะปลูกข้าวสาาลีในรัฐคิกี ประเทศอินเดีย โดยมีพื้นที่ศึกษา 3 พื้นที่ศึกษา การเคลื่อนตัวความคงทนของสารกำจัดวัชพืชของ 2,4-Dichlorophenoxy ถูกตรวจสอบในระบบการชลประทานที่แตกต่างกัน โดยพบสารกำจัดวัชพืชพร้อมกับปริมาณน้ำในดินที่กำหนดไว้ในดินที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน การเคลื่อนไหวของสารกำจัดวัชพืชเป็นจำลองตัวเลขโดยใช้ HYDRUS-1D วัดแนวโน้มความเข้มข้นของ 2,4-Dichlorophenoxy จากการศึกษาพบความสอดคล้องกันกับผลการจำลองเชิงตัวเลข สารกำจัดวัชพืช

เป็นส่วนใหญ่ คงอยู่ในดินได้ลึกถึง 15 เซนติเมตร ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชจะขึ้นอยู่กับพื้นที่การชลประทาน

Reimann et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-2D และชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลอง MODFLOW ในพื้นที่เกษตรกรรมทางตอนเหนือของประเทศเยอรมัน โดยเน้นศึกษาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น พบว่าการเคลื่อนตัวของสารบริเวณเหนือระดับน้ำบาดาลเป็นแบบ 3 มิติ ทำให้ความเข้มข้นของสารที่จะเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นน้ำบาดาลลดลง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงคาปิลลารี (Capillary force) ระหว่างน้ำและเม็ดตะกอน ส่งผลให้ค่าอัตราการไหลซึมของน้ำ (Hydraulic conductivity) มีค่าลดลง

Bas Van Der Grift (2007) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในพื้นที่รับน้ำ 3 แห่งที่ดินปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงถลุงแร่สังกะสี ซึ่งอยู่ในเขตการปกครอง Kempen ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำข้อมูลจากแบบจำลองการเคลื่อนตัวของแคดเมียมและสังกะสีในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลมาใช้ควบคู่กัน ซึ่งการไหลของน้ำในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นส่วนใหญ่เป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ส่วนการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำจะเป็นการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ทำให้เมื่อมีการนำความเข้มข้นของโลหะหนักของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำตรงบริเวณระดับน้ำบาดาลจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำกับชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำมาใช้เสมือนเป็นความเข้มข้นที่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำได้รับ สำหรับการจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลต่อไป โดยการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนั้นใช้แบบจำลอง MODFLOW และ MT3DMS จากการศึกษาพบว่าแคดเมียมและสังกะสีมีการกระจายตัวบริเวณระดับน้ำบาดาลมากกว่าบริเวณดินชั้นบนสุด พบว่าแคดเมียมและสังกะสีเคลื่อนตัวลงมาได้ลึกสุดประมาณ 70-100 m. เท่านั้น โดยปกติแล้วแคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้เข้าในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากที่พีเอชเป็นกลางแคดเมียมจะถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้คาดการณ์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในช่วงปี ค.ศ.1950-2050 โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามปัจจัยสำคัญคือคุณสมบัติทางเคมีของดิน ดังนั้นแบบจำลองก็สามารถปรับแก้ตัวแปรให้เข้ากับสถานการณ์ของแต่ละพื้นที่รับน้ำได้ จึงเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์การเคลื่อนตัวและผลกระทบจากการปนเปื้อนของโลหะในชั้นน้ำบาดาลในอนาคตได้

Chotpantararat, Limpakanwech et al. (2011) ได้ศึกษาผลกระทบจากสภาพความเป็นกรดต่างในการดูดซับและการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Pb^{2+} Mn^{2+} Zn^{2+} และ Ni^{2+}) ผ่านทางดินลูกรังโดยใช้การทดลองคอลัมน์และ Hydrus-1D สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ตัวอย่างดินที่เก็บจากเหมืองอัคราในประเทศไทยที่ความลึกระหว่าง 0 และ 2 เมตรจากผิวดิน โดยคอลัมน์ทำจากท่ออะคริลิกมีความยาว 10 เซนติเมตรและเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.5 ซม. ดินลูกรังถูกบรรจุลงในคอลัมน์โดยใช้เทคนิคการบรรจุเปียก ไหลเข้าคอลัมน์ดิน 8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงโดยใช้ปั๊ม ผลการศึกษาจาก BTCs ซึ่งโลหะหนักได้รับการประเมินภายใต้เงื่อนไขที่ค่า pH ที่แตกต่างกันสองค่าการเคลื่อนที่ของโลหะที่ได้รับการจำลองแบบ CXTFIT และแบบจำลอง HYDRUS-1D ถูกใช้ในการประเมินผล

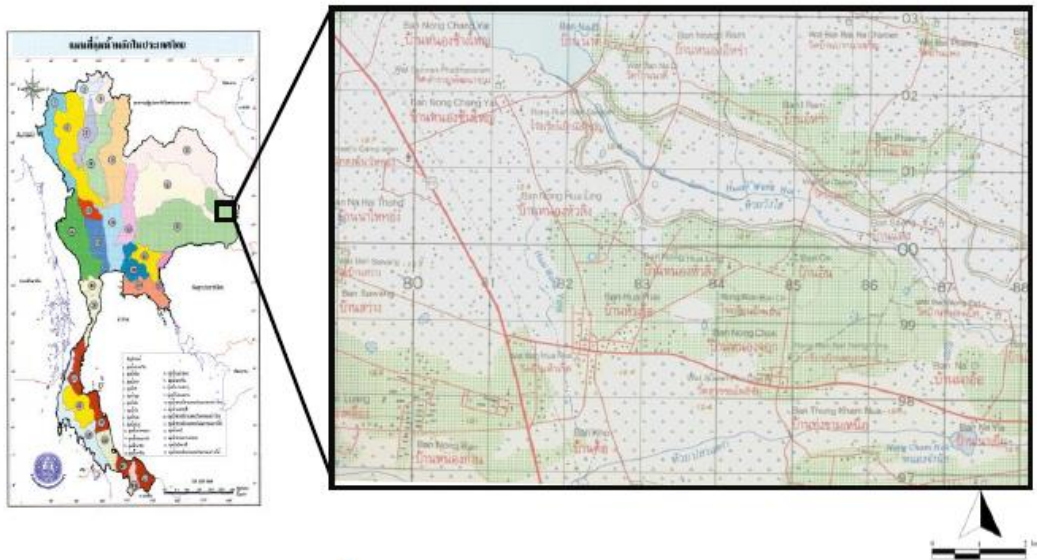
เชิงเส้น/สมดุลงเชิงเคมีและกระบวนการที่ไม่สมดุลของการดูดซับไอออนโลหะหนักและการเคลื่อนตัวในคอลัมน์ การทดลองแสดงให้เห็นว่า Pb^{2+} มีการดูดซับสูงสุด และโลหะทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นประมาณ 30% -44% ทั้งการดูดซับไอโซเทอม Langmuir จากการศึกษาชุดที่มี HYDRUS-1D ไม่ได้ทำนาย BTCs ดี อย่างไรก็ตามรูปแบบ two-site model (TSM) อธิบาย BTCs โลหะหนักได้ดีกว่าสมดุลงเชิงเส้น/ไม่เชิงเส้นแบบ Langmuir



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานศึกษา

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ครอบคลุมแผนที่
ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1: 50,000 ระวาง 59391 ครอบคลุมพื้นที่ 32.28 ตารางกิโลเมตร (รูปที่ 3-1)



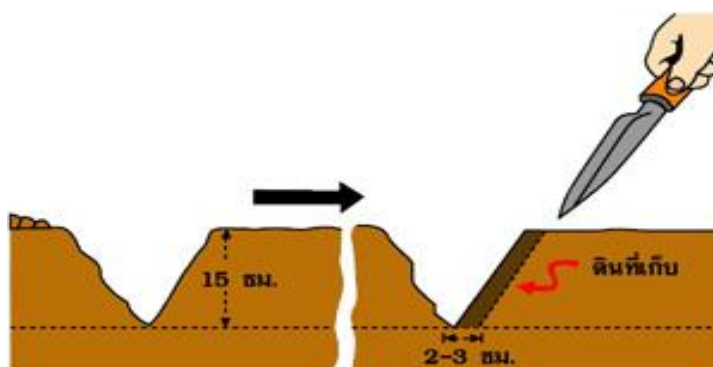
รูปที่ 3- 1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษา บริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจภาคสนามและเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรม ต.หัวเรือ จ.อุบลราชธานี ซึ่งพื้นที่นี้ปลูกพริกเป็นจำนวนมาก และยังใช้ปุ๋ยเคมี สารกำจัดศัตรูพืชหลายชนิด

โดยเก็บดินแต่ละจุดให้ใช้พลั่วขุดดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมประมาณ 15 เซนติเมตร หลังจากนั้นเก็บดิน โดยใช้พลั่วแซะดินข้างหลุม (ด้านเรียบ) ให้ได้ดินเป็นแผ่นหนาประมาณ 2-3 เซนติเมตร จนถึงก้นหลุม ดินที่ได้เก็บรวบรวมใส่ถุงพลาสติก (รูปที่ 3-2) โดยมีวัสดุและอุปกรณ์ ดังนี้

- 1) จอบ
- 2) พลั่วตักดิน
- 3) ถุงซีปล็อก และถุงดำ
- 4) ปากกา และสมุดบันทึกข้อมูล
- 5) ปากกาสีไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 3- 2 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน
(กรมพัฒนาที่ดิน, 2555)



รูปที่ 3- 3 ตัวอย่างดินที่เก็บในพื้นที่ศึกษา

3.3 การศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของดิน

วิเคราะห์เนื้อดินโดยใช้การวิเคราะห์ตะแกรง (sieve analysis) ที่แสดงในรูปที่ 3-4 ตัวอย่างดินถูกอากาศแห้งบดและตะแกรงโดยเครื่องบดกลั่นในคอลัมน์โดยใช้ตะแกรง 6 ขนาด คือ 5, 10, 35, 60, 120 และ 200 มิลลิเมตร ตาม ASTM D 421-85, ASTM D 422-63 และ Pipette analysis องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดินที่กำหนดโดยใช้ X-ray Fluorescence Spectrophotometer และองค์ประกอบแร่ของส่วนประกอบวัตถุดิบกำหนดโดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction Spectrophotometer สำหรับทั้งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณการวิเคราะห์ตัวอย่างได้รับการดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการธรณีเคมี ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณสมบัติทางเคมีของดิน เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) (ตารางที่ 3-1) วิเคราะห์ที่สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร



รูปที่ 3- 4 เครื่อง sieve analysis

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
เนื้อดิน (Soil texture)	Pipette analysis	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
โครงสร้างดิน (Soil structure)	Hydrometer method	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
ความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density)	Cold method	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
ค่าพีเอช (pH)	ดิน:น้ำ เท่ากับ 1:1 (V/V)	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
ค่าการนำไฟฟ้าของดิน	ดิน:น้ำ เท่ากับ 1:5 (V/V)	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
อินทรีย์วัตถุของดิน	Walkley Black modified acid-dichromate digestion, FeSO ₄ titration method	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	Ammonium acetate pH 7.0 method-centrifuge modification	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)
ทองแดง (Cu), ตะกั่ว (Pb)	Atomic Absorption Spectrophotometer	กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

3.3.2 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge; PZC)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้เป็นไปตาม Van Raij และ Peech (1972) โดยใช้ตัวอย่างดิน 2 กรัม ใส่ลงในขวด vial ขนาด 20 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.01 M ที่ปรับพีเอช เป็น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ด้วย NaOH 0.1 หรือ HCl 0.1 M ขวดละ 15 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดค่าพีเอชหลังจากการเขย่า จากนั้นนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้น (pHi) และสุดท้าย (pHf) เทียบกับเส้นอ้างอิงและหาจุดตัดของกราฟ (ลลิตา, 2554)

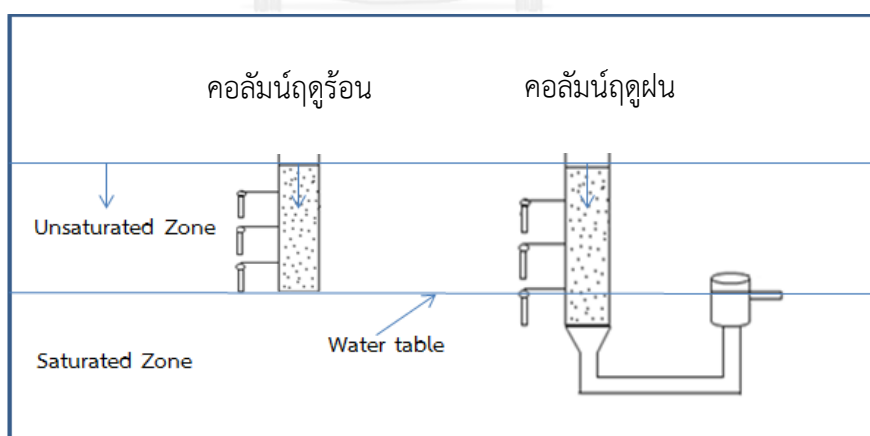
3.3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยเคมี

นำตัวอย่างปุ๋ยเคมีที่ใช้ในพื้นที่เพาะปลูกทั้ง 8 ชนิด มา 0.3-0.5 กรัม แล้วนำมาย่อยด้วยกรดผสมบนเตาให้ความร้อน ที่อุณหภูมิไม่เกิน 220 องศาเซลเซียสจนสารละลายใส ปรับปริมาตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (กรมวิชาการเกษตร, 2551)

3.4 การทดลองคอลัมน์

3.4.1 วัสดุอุปกรณ์การทดลองคอลัมน์

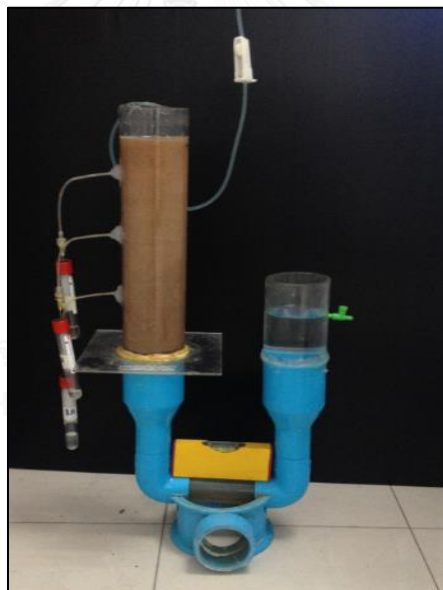
ชุดแบบจำลองคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์ และโลหะหนักทำจากท่ออะคริลิกที่มีความยาว 30 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร โดยแบ่งคอลัมน์ออกเป็น 2 คอลัมน์คือคอลัมน์ฤดูร้อน (รูปที่ 3-6) และคอลัมน์ฤดูฝน (รูปที่ 3-7) เมื่อประกอบชุดคอลัมน์เข้าด้วยกันจะมีลักษณะคือคอลัมน์ฤดูร้อน (รูปที่ 3-10) และคอลัมน์ฤดูฝน (รูปที่ 3-11)



รูปที่ 3- 5 แบบจำลองคอลัมน์ในชั้น Unsaturated zone และชั้น Saturated zone



รูปที่ 3- 6 คอลัมน์ฤดูร้อน



รูปที่ 3- 7 คอลัมน์ฤดูฝน

3.4.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างสารที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์โดยใช้หลอดสูญญากาศ (vacuum tube) (รูปที่ 3-8)



รูปที่ 3- 8 หลอดสูญญากาศ (vacuum tube)

3.4.3 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (metal element) ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy โดยที่ใช้เปลวไฟเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ ซึ่งจะเกิดการดูดกลืนแสงจาก Light source ที่ความยาวคลื่นหนึ่งโดยเฉพาะ การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นระดับหนึ่งโดยเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน ลักษณะของสารตัวอย่างอาจเป็นของเหลว หรือ สารละลายที่มีปริมาณของแข็งละลายอยู่ไม่เกิน 5 % และมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงเหมาะสม (ศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555) โดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ที่ใช้ยี่ห้อ Varian รุ่น AA240FS (รูปที่ 3-9)



รูปที่ 3- 9 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.4.4 การทดลองคอลัมน์เทอร์เซอร์

นำตัวอย่างดินที่แห้งมาร้อนผ่านตระแกรงร่อนเบอร์ 10 และเตรียมสารละลาย โซเดียมโบรไมด์ (NaBr) ที่ความเข้มข้น 12.86 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรที่ 1,000 มิลลิลิตร

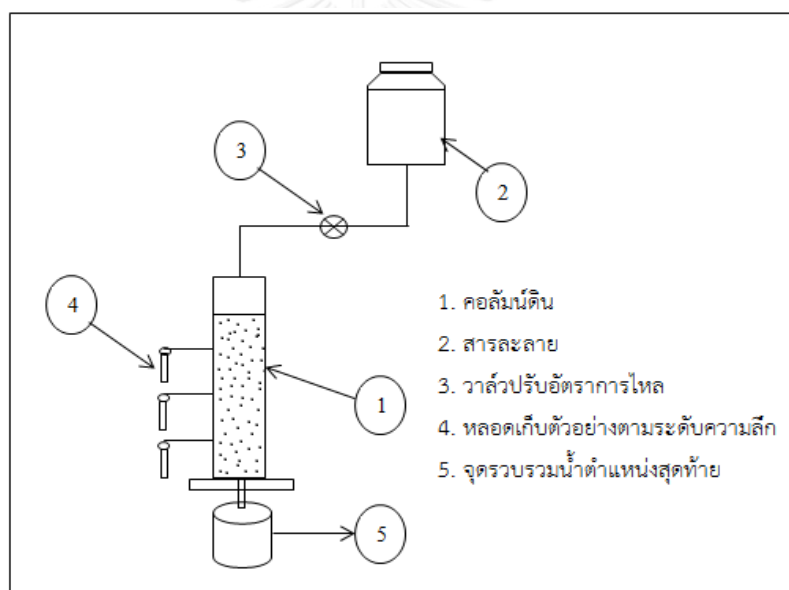
คอลัมน์ทำจากท่ออะคริลิกที่มีความยาว 30 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร โดยแบ่งคอลัมน์ออกเป็น 2 คอลัมน์คือคอลัมน์ฤดูร้อน (รูปที่ 3-10) และคอลัมน์ฤดูฝน (รูปที่ 3-11) โดยการบรรจุดินลงในคอลัมน์ใช้เทคนิคการบรรจุแบบเปียก บรรจุดินทั้งหมด 25 เซนติเมตร โดยดินมีความหนาแน่นประมาณ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. อันดับแรกให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนอย่างน้อย 2-3 pore volumes ควบคุมความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วง จากนั้นให้สารละลายโซเดียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้น 12.86 กรัม/ลิตร ไหลลงมาที่คอลัมน์ตามแรงโน้มถ่วง รวบรวมและเก็บตัวอย่างโดยใช้หลอดสุญญากาศตามระดับความลึกที่ 6.25, 18.75, 12.5 และ 25 เซนติเมตร วิเคราะห์โดยใช้ค่าการนำไฟฟ้า และนำค่าที่ได้จะแสดงเป็น breakthrough curves (BTCs) โดยคิดค่าเป็นความเข้มข้นที่ (C/C_0) เทียบกับ pore volume (PV) โดย C คือ ค่าความเข้มข้นของ โซเดียมโบรไมด์ที่วัดได้จากค่าการนำไฟฟ้า ส่วน C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมโบรไมด์ และใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการปรับเทียบ Breakthrough Curves (BTCs)

3.4.5 การเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)

นำตัวอย่างดินที่แห้งมาร้อนผ่านตระแกรงร่อนเบอร์ 10 ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารละลาย background solutions สำหรับทั้ง 3 คอลัมน์คือ คอลัมน์ฤดูร้อนค่าพีเอช เท่ากับ 3 โดยใช้สารละลายซिटริกแอซิดโมโนไฮเดรต ($HOC(COOH)(CH_2COOH)_2 \cdot H_2O$) 4.2028 กรัม ปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยขวดปรับปริมาตร และปรับให้มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 และใช้ ตะกั่ว ($Pb(NO_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร และทองแดง ($Cu(NO_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับปริมาตรที่ 1,000 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายซिटริกแอซิดโมโนไฮเดรต ($HOC(COOH)(CH_2COOH)_2 \cdot H_2O$) คอลัมน์ฤดูร้อนและคอลัมน์ฤดูฝนค่าพีเอช เท่ากับ 5 โดยใช้สารละลายโซเดียมอะซิเตด ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$) 2.7214 กรัม ปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยขวดปรับปริมาตร และปรับให้มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 และใช้ ตะกั่ว ($Pb(NO_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร และทองแดง ($Cu(NO_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับปริมาตรที่ 1,000 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายโซเดียมอะซิเตด โดยมีค่า IS เท่ากับ 0.02 โมลาร์ เนื่องจากเป็นค่าที่สูงที่สุดของน้ำบาดาลในพื้นที่

คอลัมน์ทำจากท่ออะคริลิกที่มีความยาว 30 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร โดยแบ่งคอลัมน์ออกเป็น 3 คอลัมน์คือคอลัมน์ฤดูร้อนที่ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 (รูปที่ 3-11) และคอลัมน์ฤดูฝนควบคุมค่าพีเอช เท่ากับ 5 (รูปที่ 3-13) โดยการบรรจุดินลงในคอลัมน์ใช้เทคนิค

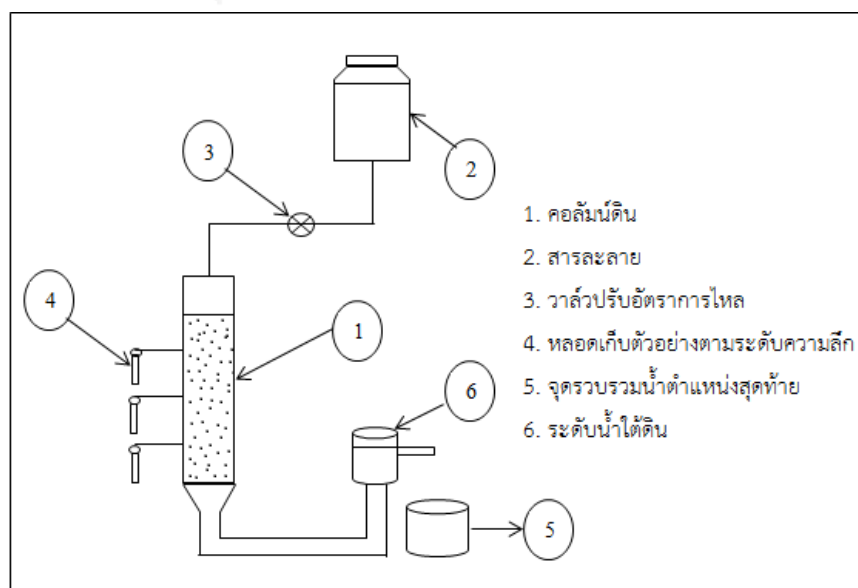
การบรรจุแบบเปียก บรรจุดินทั้งหมด 25 เซนติเมตร โดยดินมีความหนาแน่นประมาณ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. คอลัมน์ฤดูร้อนที่ pH เท่ากับ 3 ให้ดินอิ่มตัวด้วยสารละลายซิเตรดแอซิดโมโนไฮเดรต ($\text{HOC}(\text{COOH})(\text{CH}_2\text{COOH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 2-3 pore volumes เพื่อสร้างเงื่อนไขของการเคลื่อนตัวของตะกั่วและทองแดง ส่วนคอลัมน์ฤดูร้อนและคอลัมน์ฤดูฝน pH เท่ากับ 5 ให้ดินอิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมอะซิเตรด ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 2-3 pore volumes เพื่อสร้างเงื่อนไขของการเคลื่อนตัวของตะกั่วและทองแดง ทั้ง 3 คอลัมน์ควบคุมความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม โดยไหลตามแรงโน้มถ่วง จากนั้นเมื่อค่าพีเอชของที่แล้วตะกั่วและทองแดงจะถูกฉีดลงมาให้ไหลตามแรงโน้มถ่วง รวบรวมและเก็บตัวอย่างตามระดับความลึกโดยใช้หลอดสูญญากาศที่ 6.25, 18.75, 12.5 และ 25 เซนติเมตร โดยเก็บทุกๆ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตะกั่วและทองแดงที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และนำค่าที่ได้จะแสดงเป็น Breakthrough Curves (BTCs) โดยคิดค่าเป็นความเข้มข้นที่ (C/C_0) เทียบกับ Pore Volume (PV) และใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการเปรียบเทียบ Breakthrough Curves (BTCs)



รูปที่ 3- 10 แบบจำลองคอลัมน์ฤดูร้อน



รูปที่ 3- 11 คอลัมน์ถุร้อนพีเอช เท่ากับ 3 และ 5



รูปที่ 3- 12 แบบจำลองคอลัมน์ถุฝน



รูปที่ 3- 13 แบบจำลองคอลัมน์ฤดูฝนพีเอช เท่ากับ 5

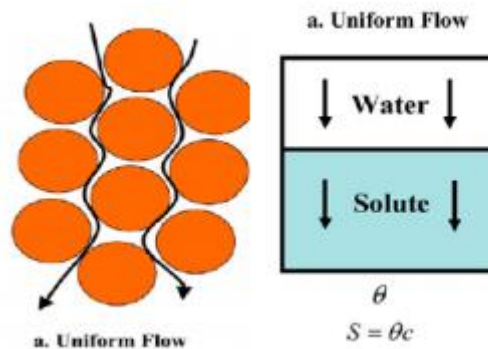
3.5 แบบจำลอง HYDRUS-1D

แบบจำลอง HYDRUS-1D สามารถใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักที่ไม่ว่าจะเป็นชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ หรือความพรุนของตัวกลางที่แตกต่างกัน (Simunek et al., 2008) โดยแบบจำลองสามารถนำมาใช้อธิบายจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่อยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) และในสภาวะไม่สมดุล Non-equilibrium (Chotpantararat & Sutthirat, 2011)

การสร้างแบบจำลองเป็นการรวบรวมข้อมูลต่างๆไม่ว่าจะเป็นด้านอุทกธรณีวิทยาร่วมกับข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของชั้นหินอุ้มน้ำ ลักษณะการใช้ที่ดิน ปริมาณน้ำฝน ค่าการระเหย และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในดินที่ถูกรวบรวม โดยใช้ข้อมูลเหล่านี้สร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (น่านนที ทองปัญญา, 2555)

3.5.1 รูปแบบการเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย

แนวความคิดของรูปแบบการเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย โดยการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่ของสารละลายเกิดขึ้นผ่านทางรูพรุน หรือระหว่างอนุภาคของดิน (รูปที่ 3-14) การเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายที่ผ่านรูพรุนจะถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับทันที



รูปที่ 3- 14 รูปแบบการเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย (Simunek et al., 2008)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย สามารถอธิบายโดยใช้สมการ การพาการกระจาย (advection-dispersion equation) ในสมการที่ 3-1

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \rho \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \Phi \quad [3-1]$$

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย [mg/l]

s คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับ [mg/l]

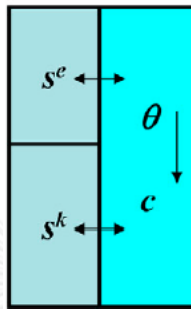
D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายคิดเป็นทั้งการแพร่กระจายโมเลกุลและการกระจายอุทกพลศาสตร์ [m^2/s]

q คือ ความหนาแน่นของปริมาตรของของเหลว [g/m^3] ประเมินโดยใช้ Darcy-Buckingham law²⁹

Φ เป็นแหล่งที่มาต่างๆ หรือปฏิกิริยาอื่น ๆ

3.5.2 รูปแบบที่อยู่ในสถานะไม่สมดุล Non-equilibrium Two-site model (TSM)

เป็นการอธิบายจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่อยู่ในสถานะไม่สมดุล พิจารณาในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และการคายการดูดซับ แบบไม่สมดุล (การดูดซับไม่เท่ากับการคายการดูดซับ) ดังนั้น TSM แบ่งออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วยส่วนแรกจะเกิดการดูดซับแบบสมดุล เรียกว่า Equilibrium site ส่วนที่สองจะเกิดการดูดซับแบบไม่สมดุล ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือ kinetic sorption จะแสดงในรูปที่ 3-15



รูปที่ 3- 15 รูปแบบแนวคิดสถานะไม่สมดุล Non-equilibrium Two-site model (TSM)

แบบจำลองสถานะไม่สมดุล Non-equilibrium Two-site model (TSM) ถือเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ และคายการดูดซับแบบไม่สมดุลสามารถ (Van Genuchten, 1989) แสดงได้ในสมการที่ [3-2], [3-3], [3-4] และ [3-5]

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^e}{\partial t} + \rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \Phi \quad [3-2]$$

$$S^e = f_e K_d c \quad [3-3]$$

$$\rho \frac{\partial s^k}{\partial t} = \alpha_k \rho (S_e^k - S^k) - \Phi_k \quad [3-4]$$

$$S_e^k = (1 - f_e) K_d c \quad [3-5]$$

f_e คือ ส่วนแรกของการดูดซับแบบสมดุล

α_k คือ ลำดับที่อัตราที่พลังงานจลน์คงที่ [s]

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย [mg/l]

สมการที่ [3-3] เกิดภาวะสมดุลของการดูดซับบน site ซึ่งเกิดการดูดซับแบบทันทีสมการที่ [3-4] เกิดความสมดุลมวลของ site การดูดซับพลังงานจลน์ (Van Genuchten, 1989) ในขณะที่สมการที่ [3-5] แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของดูดซับบน site ที่พลังงานจลน์เมื่อสมดุลจะต้องมีความเข้มข้นถึงเฟสของเหลว

3.5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์

แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการทดลองนี้เป็นการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน), พีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และ พีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) และชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) เพื่อประเมินความเข้มข้น และค่าการดูดซับ (Adsorption coefficient, K_d) ตามระดับความลึกที่ 6.25, 18.75, 12.5 และ 25 เซนติเมตร

พารามิเตอร์สำหรับการใส่ลงในแบบจำลอง HYDRUS-1D เป็นคุณสมบัติของแต่ละคอลัมน์ (ดินร่วนปนทราย) ที่มีค่าพีเอช 3 และค่าพีเอช 5 ประกอบด้วย ค่าความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม). ความเร็วของการไหล คือ 0.41 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น จนถึงเวลาสุดท้าย ส่วนรูปแบบการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ (D), $D = \alpha V$, ของคอลัมน์ดินร่วนปนทราย คอลัมน์ถูกประเมินโดยการปรับเส้นโค้งโบริมด์ (Breakthrough Curves, BTCs) การกระจายตัวค่าสัมประสิทธิ์ (D) ถูกนำมาใช้สำหรับการคำนวณในรูปของสมการการพา-กระจายในแบบจำลอง HYDRUS-1D สำหรับพารามิเตอร์การดูดซับประมาณการโดยทองแดง และตะกั่วเคลื่อนที่ไปยังคอลัมน์ดินร่วนปนทรายในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) ภายใต้เงื่อนไขของค่าพีเอชที่แตกต่างกันโดยประเมินการดูดซับและพารามิเตอร์ K_d และ β จากแบบจำลองการดูดซับ พารามิเตอร์ K_d และ β แทน K_f และ $1/n$ จากสมการดูดซับของ Linear

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

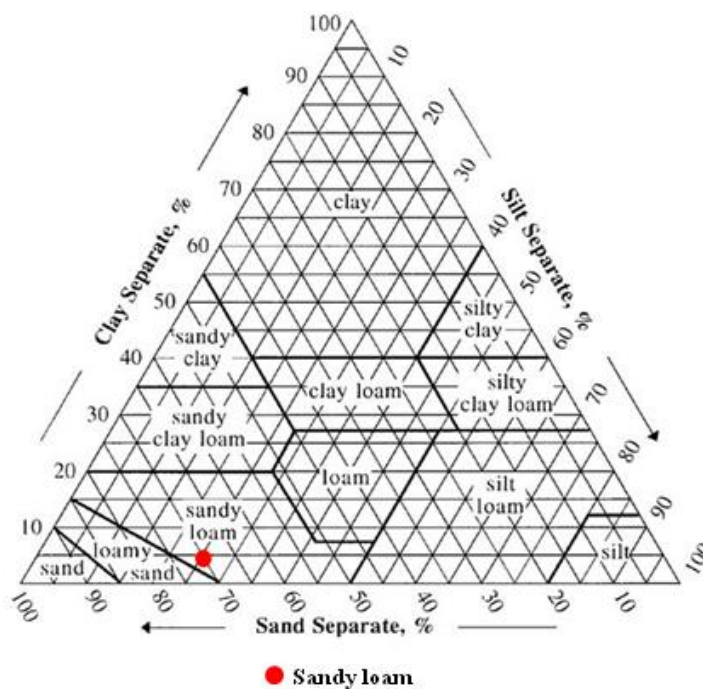
4.1.1 เนื้อดิน (Soil texture)

การทดสอบหาเนื้อดิน สามารถทดสอบหาปริมาณได้โดยการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงกรอง (Sieve Analysis) ซึ่งตะแกรงนี้ทำด้วยโลหะที่สานเป็นรูถี่ ๆ โดยขนาดของรูเปิด (Mesh Opening) เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงกรอง จะใช้ในการแยกขนาดอนุภาค โดยกำหนดปริมาณมวลของอนุภาคในแต่ละช่วง ผลของการวิเคราะห์มีค่าเป็นร้อยละของน้ำหนักรวมของดินที่ผ่านตะแกรงกรองที่มีขนาดต่างกัน และนำมาคำนวณเป็นร้อยละของดินทรายแป้ง และดินเหนียวต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 4-1 แล้วนำตะกอนดินที่อยู่บนสภาพปริมาณของดินทรายแป้ง และดินเหนียวโดยวิธี Pipette analysis เป็นการหาความหนาแน่นของสารแขวนลอย อนุกรมความลึกใดๆ เทียบกับเวลา

ไดอะแกรมสามเหลี่ยมมาตรฐาน ใช้สำหรับการวิเคราะห์ชนิดเนื้อดินในห้องปฏิบัติการเป็นการหาปริมาณของเนื้อดิน ได้แก่ ดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียว (Gradiner and Miller, 2001) สัดส่วนระหว่างอนุภาคทั้งสามขนาดที่วิเคราะห์ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาลากเส้นจากแต่ละด้านของสามเหลี่ยมนี้ แต่ละด้านเป็นตัวแทนของเปอร์เซ็นต์ดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียวตามลำดับ จุดตัดพร้อมกันทั้งสามเส้น เกิดขึ้นภายในกรอบเนื้อดินของพื้นสามเหลี่ยมนี้ก็คือชนิดเนื้อดินของดินนั้นดังแสดงในรูปที่ 4-1

ตารางที่ 4 - 1 ปริมาณร้อยละของดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียวในดินพื้นที่เกษตรกรรม

กลุ่มดิน	% ดินทราย	% ดินทรายแป้ง	% ดินเหนียว
ดินในพื้นที่ศึกษา	70.8	25.2	4.0



รูปที่ 4 - 1 ไตอะแกรมสามเหลี่ยมมาตรฐาน

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

คุณสมบัติทางเคมีของดินรวมทั้งค่าพีเอช (pH) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) การนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) โดยส่งวิเคราะห์ที่กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี สำนักวิจัยพัฒนา ปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกแสดงถึงความสามารถของดินในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนบวก ถ้าดินมีค่า CEC สูงจะสามารถดูดซับธาตุอาหารไว้ได้มาก ซึ่งปกติดินส่วนใหญ่จะมีประจุเป็นลบทำให้ดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ สมบัติทางเคมีของดินจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4 - 2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าการวิเคราะห์
ค่าพีเอช (pH)		5.3
ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	cmol/kg	2.6
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	dS/m	0.082
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	%	0.87

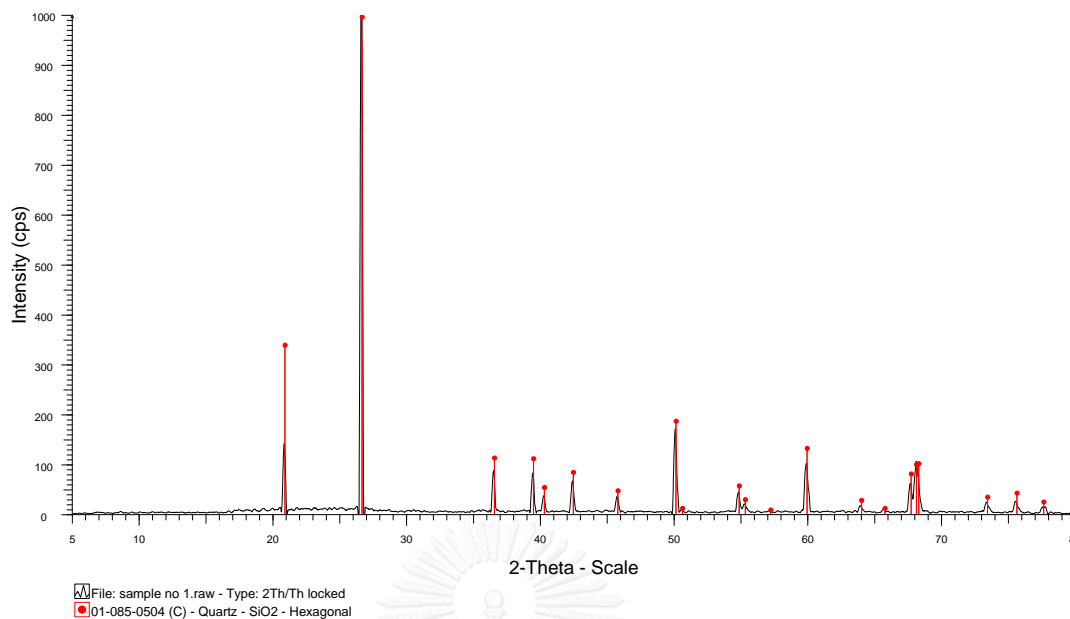
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของดิน

จากการนำตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรมมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณธาตุในตัวอย่างดิน โดยเครื่องมือเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence: XRF) โดยส่งวิเคราะห์ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุ ผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4-1 ที่พบว่าตัวอย่างดินมีดินทรายถึง 70.8%

จากการนำตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรมมาวิเคราะห์หาแร่องค์ประกอบในดินโดยเครื่องมือเอกซเรย์ดิฟแฟกชัน (X-Ray Diffraction : XRD) โดยส่งวิเคราะห์ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Nayak, 2007) พบว่าแร่ที่เป็นองค์ประกอบในดินในพื้นที่ศึกษานั้นส่วนใหญ่แล้วเป็นแร่ควอตซ์ (SiO_2) ผลวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4-2 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีปริมาณควอตซ์เป็นแร่องค์ประกอบหลักและสอดคล้องกับปริมาณทรายที่มีสัดส่วนมาก เนื่องจากแร่ควอตซ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำให้ดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้น้อย จะมีการระบายน้ำได้ดี ซึ่งแร่ประเภทนี้ไม่มีความสามารถในการดูดซับไอออนใดๆ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) จึงส่งผลให้โลหะหนักมีการดูดซับอยู่กับผิวดินได้น้อย และมีโอกาสในการซึมของน้ำลงดินพร้อมชะละลายผ่านชั้นดินที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำลงสู่น้ำบาดาลในที่สุด

ตารางที่ 4 - 3 องค์ประกอบทางเคมีของดินในพื้นที่ศึกษาโดยเครื่องมือเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

องค์ประกอบ	% น้ำหนัก
	ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)
SiO_2	92.40%
Al_2O_3	4.95%
P_2O_5	0.81%
Fe_2O_3	0.62%
TiO_2	0.50%
CaO	0.31%
ZrO_2	0.10%

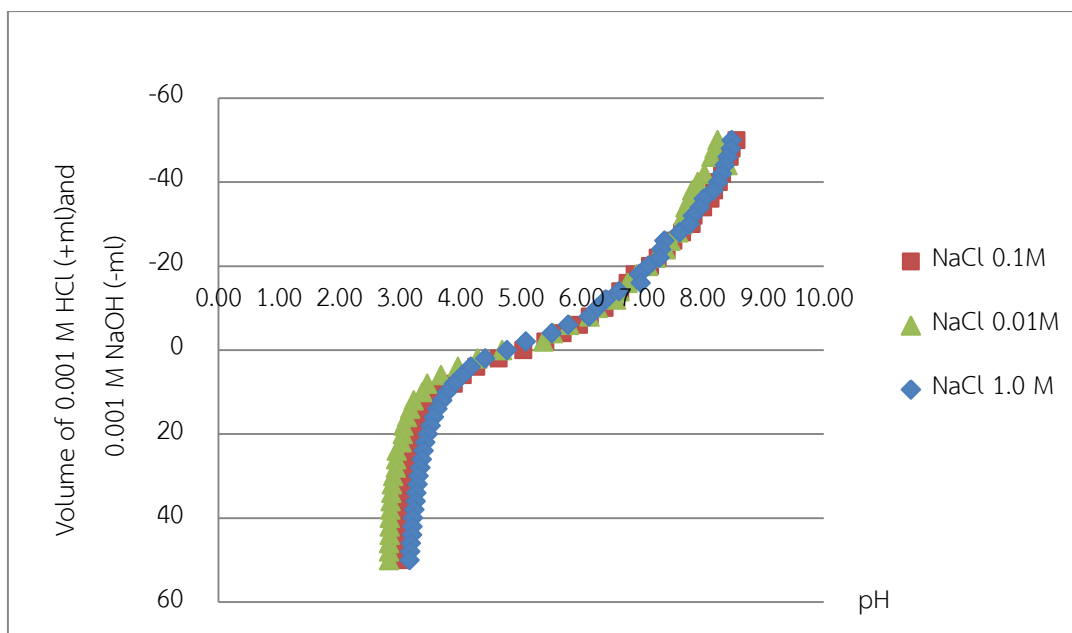


รูปที่ 4 - 2 ผลเอกซ์เรย์ดิฟแฟลตชัน

4.1.4 ค่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC)

โดยพีเอช ที่ทำให้จุดรวมประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC) เป็นค่าพีเอช ที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ โดยถ้าพีเอชของดินสูงกว่า PZC ของดินชนิดนั้น แสดงว่าดินจะมีประจุโดยรวมเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามกัน ถ้าพีเอชของดินต่ำกว่า PZC ของดินชนิดนั้น แสดงว่ามีประจุโดยรวมเป็นบวก (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา, 2555) ซึ่งจากการทดลองของดินร่วนปนทรายเพื่อหาค่า PZC โดยวิธี mass titration (กนกวรรณ สมคิด, 2554) ดินในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าพีเอช เท่ากับ 5.3 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่าพีเอชของดินสูงกว่า PZC คือ 5.04 ดังแสดงในรูปที่ 4-3 แสดงว่าดินจากพื้นที่ศึกษามีประจุโดยรวมเป็นลบ ซึ่งประจุของดินจะมีผลต่อการดึงดูดสารเคมี (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

จากงานวิจัยของ (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา, 2555) ซึ่งวัดค่า PZC ของเรซินไคโตซาน พบว่ามีค่า PZC เท่ากับ 6.2 และ 6.4 ตามลำดับ อธิบายว่าเมื่อค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของเรซินไคโตซานจะมีค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามกันเมื่อค่าพีเอชที่มีค่ามากกว่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ แสดงว่าประจุที่ผิวของเรซินไคโตซานมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 4 - 3 ค่าจุดรวมประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PZC) ของดินร่วนปนทราย

4.2 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมี

จากการนำตัวอย่างปุ๋ยที่ใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมมาทั้งหมด 8 ชนิดคือ ปุ๋ยสูตร (27-6-6) ปุ๋ยสูตร (16-8-8) ปุ๋ยสูตร (46-0-0) ปุ๋ยสูตร (21-0-0) ปุ๋ยสูตร (13-13-21) ปุ๋ยสูตร (25-7-7) ปุ๋ยสูตร1 (15-15-15) ปุ๋ยสูตร2 (15-15-15) มาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตารางที่ 4-4 ได้แก่ Cu, Pb, Ni, Fe และ Cd โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ซึ่งพบว่าปุ๋ยสูตร1 (15-15-15) มีทองแดง มากที่สุดคือ 25 มก./กก. ส่วนปุ๋ยสูตร2 (15-15-15) และ ปุ๋ยสูตร (16-8-8) มี ตะกั่ว มากที่สุดคือ 25 มก./กก. ดังตารางที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องในทางเดียวกันกับ (สุธาสินี, 2553) พบว่าจากการวิเคราะห์โลหะหนักในปุ๋ยมีความเข้มข้นของ Cu, Pb, Ni และ Zn ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า โลหะหนักมีโอกาสนปนเปื้อนในน้ำบาดาล และงานวิจัย (Atafar et al., 2010) โดยได้เก็บตัวอย่างดิน 40 ตัวอย่างจากพื้นที่เพาะปลูกข้าวสาเลี 40 จุดที่เพาะปลูกในช่วงปี 2006-2007 ผลการศึกษาพบว่า แคดเมียมตะกั่วเพิ่มขึ้นในดินที่ปลูกจากการใช้ปุ๋ย โดยการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าโลหะหนัก เหล่านี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า $P < 0.05$) และจากงานวิจัยของสุจิตรา และคณะ (2554) ได้ศึกษา การตกค้างของสารเคมีจากการทำนาโดยวิเคราะห์โลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี ในตัวอย่างดินหลังการทำนา ในปุ๋ยเคมี และยากำจัดวัชพืช ด้วยเครื่อง AAS ผลการทดลอง พบว่า หลังจากการทำนามีตะกั่วสะสมสูงสุด (924.80 ± 0.05 มก./กก.) รองลงมาได้แก่ สังกะสี (34.00 ± 0.00 มก./กก.) และทองแดง (9.6 ± 0.05 มก./กก.) ซึ่งเป็นผลกระทบต่อสุขภาพของชาวนาและระบบนิเวศในระยะยาว

ตารางที่ 4 - 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของปุ๋ยเคมี

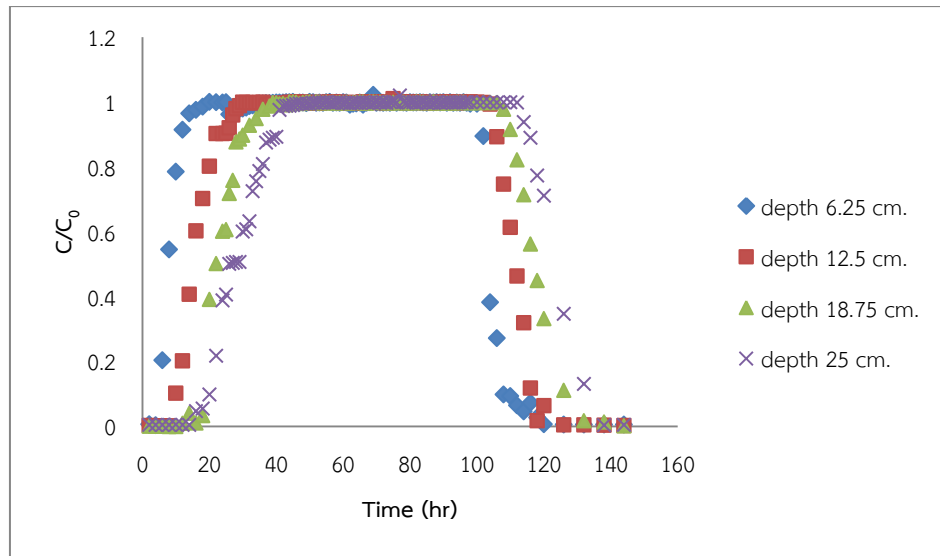
ปุ๋ยเคมี	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)				
	Cu	Pb	Ni	Fe	Cd
ปุ๋ยสูตร (27-6- 6)	10	15	5.5	702.5	0.02
ปุ๋ยสูตร (16-8-8)	9	25	1.54	1057	0.05
ปุ๋ยสูตร (46-0-0)	4.5	10	0.00	119.5	0.04
ปุ๋ยสูตร (21-0-0)	4.5	10	1.2	135	0.01
ปุ๋ยสูตร (13-13-21)	15.5	10	5.05	2563	0.06
ปุ๋ยสูตร (25-7-7)	10.5	15	2.34	646	0.07
ปุ๋ยสูตร1 (15-15-15)	25	5	0.01	1601.5	0.07
ปุ๋ยสูตร2 (15-15-15)	23	25	5.38	2830.5	0.05

4.3 ผลการทดลองคอลลิมน์และการสร้างแบบจำลอง

4.3.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้ความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกัน

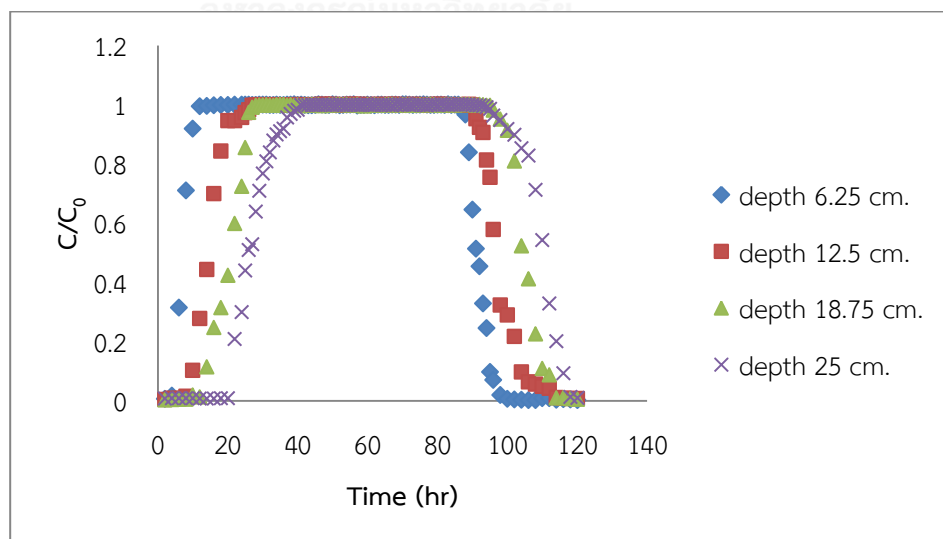
โซเดียมโบรไมด์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นสารละลายที่ไม่เป็นพิษและนำไปใช้ในการทดสอบลักษณะอุทกพลศาสตร์ของคอลลิมน์ดินร่วนปนทรายในพื้นที่เกษตรกรรม ในการศึกษาจะพิจารณาผลของค่าความชื้นเริ่มต้นต่อการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์ซึ่งจะมีคอลลิมน์ดินที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ ซึ่งเป็นตัวแทนคอลลิมน์ดินที่เกิดในฤดูร้อน เรียกว่าคอลลิมน์ฤดูร้อน และคอลลิมน์ที่มีความชื้นสูงกว่าซึ่งเป็นตัวแทนคอลลิมน์ดินที่เกิดในฤดูฝนที่มีค่าระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น เรียกว่าคอลลิมน์ฤดูฝน

Breakthrough curves (BTCs) ของคอลลิมน์ฤดูร้อนแสดงในรูปที่ 4-4 ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วง จากผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความลึก 6.25 ซม. โซเดียมโบรไมด์ ตรวจพบค่าความเข้มข้นสูงสุดของโบรไมด์ไอออนออกมาเร็วกว่าที่ระดับความลึก 12.5, 18.75, และ 25 ซม. ตามลำดับ ที่เวลา 25, 31, 39, และ 45 ชม ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4-4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่ระดับความลึกและความชื้นเปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อเคลื่อนตัวของโบรไมด์ไอออนในตัวกลางรูพรุน (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553)



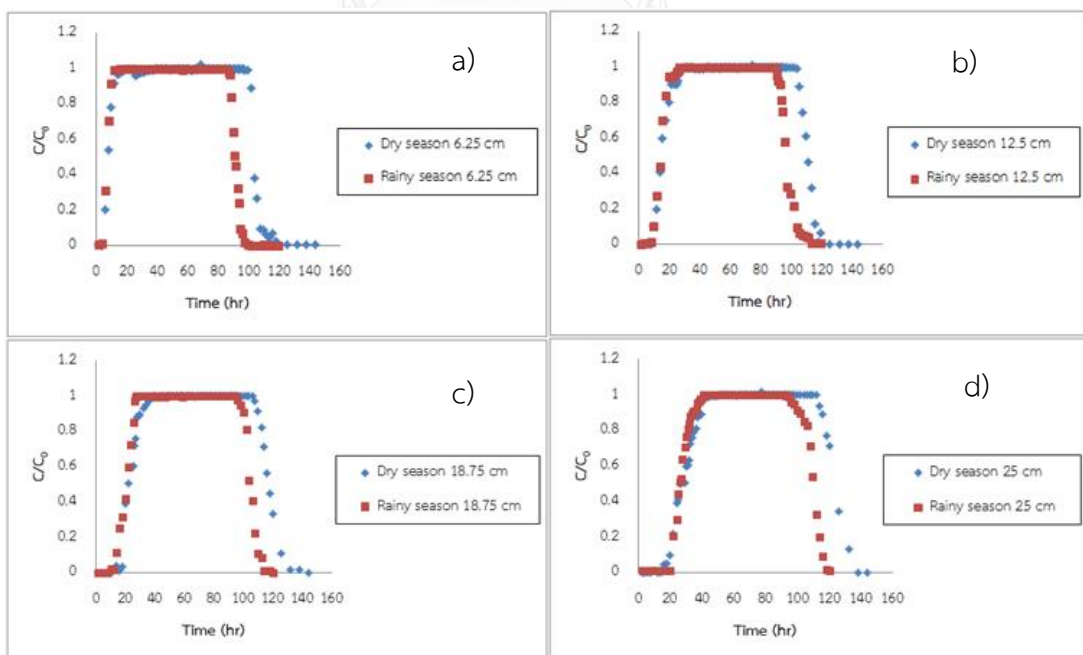
รูปที่ 4 - 4 Breakthrough curves ของโบรไมต์ในคอกลิมน้ทุรื้อน
ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.

ผลของการศึกษาการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอกลิมน้ทุรื้อน) จะแสดงในรูปที่ 4-5 ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วง จากผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความลึก 6.25 ซม. โซเดียมโบรไมด์ ตรวจพบค่าความเข้มข้นสูงสุดของโบรไมต์ไอออนออกมาเร็วกว่าที่ระดับความลึก 12.5, 18.75, และ 25 ซม. ตามลำดับ ที่เวลา 22, 29, 33, และ 42 ซม. ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ระดับความลึกและความชื้นเปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของโบรไมต์ไอออนในตัวกลางรูพรุน (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553)



รูปที่ 4 - 5 Breakthrough curves ของโบรไมต์ในคอกลิมน้ทุรื้อน
ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.

เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนระหว่างคอลัมน์ที่เป็นตัวแทนในฤดูร้อนกับฤดูฝนจะแสดงเป็น breakthrough curves (BTCs) แสดงในรูปที่ 4-6 ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วง กราฟ (BTCs) ของโซเดียมโบรไมด์ ในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวที่มีความสมดุล โดยคอลัมน์แบ่งออกเป็น 4 ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ตามลำดับ สำหรับการเก็บตัวอย่างในคอลัมน์ฤดูร้อนที่ระดับความลึก 6.25 ซม. โซเดียมโบรไมด์ ออกมาเร็วกว่าที่ระดับความลึก 12.5, 18.75, และ 25 ซม. ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของกราฟ (BTCs) คล้ายคลึงกัน คอลัมน์ฤดูฝนที่ระดับความลึก 6.25 ซม. โซเดียมโบรไมด์ เคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าที่ระดับความลึก 12.5, 18.75, และ 25 ซม. ตามลำดับ แต่จะสังเกตเห็นว่าในคอลัมน์ฤดูฝนโซเดียมโบรไมด์ เคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าคอลัมน์ฤดูร้อนในทุกระดับความลึก โดยเวลาที่ตรวจพบค่าความเข้มข้นสูงสุดของโบรไมด์ไอออนในแต่ละระดับความลึกของคอลัมน์ฤดูฝนมีแนวโน้มสูงชันกว่าคอลัมน์ฤดูร้อน เนื่องจากที่ระดับความลึกและความชันเปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโบรไมด์ไอออนในตัวกลางรูพรุน โดยคอลัมน์ที่มีความชันสูงจะส่งผลต่อการเดินทางผ่านตัวกลางรูพรุนได้เร็วขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวคือการแพร่ (hydrodynamic dispersion) ซึ่งเกิดจากขนาดของตัวกลางที่มีรูพรุนเวลาสารละลายเคลื่อนไหลผ่านในจุดต่างๆมีความเร็วแตกต่างกัน (กิจการ พรหมมา, 2555) ซึ่งสอดคล้องกับ (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553) ได้ทดลองการเคลื่อนตัวของเทอร์เซอร์กับตัวอย่างชุดดินสามชุดดินที่มีความชันต่างกัน พบว่าดินที่มีความชันสูงค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ตรวจพบสามารถเดินทางได้เร็วกว่าส่งผลให้เวลาเฉลี่ยในการเดินทางของเทอร์เซอร์สูงขึ้น 31.8%, 37.7% และ 37.1% ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 6 Breakthrough curves ของโบรไมด์ในคอลัมน์ฤดูร้อน และคอลัมน์ฤดูฝน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.

4.3.2 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS -1D ในการอธิบายพฤติกรรมของเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ต่างกัน

แบบจำลอง HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008) สามารถใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวของไอออนในดิน และสามารถนำมาใช้สำหรับการไหลที่ไม่สมดุล และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทั้งทางตรงและทางผกผันกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายจาก Breakthrough curves ของ โบรไมด์ถูกนำมาใช้เพื่อประเมิน dispersivity ในดิน

Breakthrough curves (BTCs) โบรไมด์ถูกนำมาใช้ในการประเมินการกระจายโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008) ในการประเมินการดูดซับของไอออนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แตกต่างกัน

การนำเข้าข้อมูลต่างๆที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง HYDRUS-1D คือ Hydraulic conductivity (K_s), θ_s , θ_r , Genuchten (α และ n) ค่าความหนาแน่น (B_d) และค่าความเข้มข้น (C) เพื่อใช้ให้เหมาะสมกับการเคลื่อนตัวโซเดียมโบรไมด์ในคอลัมน์ดิน ดังแสดงในตารางที่ 4-5

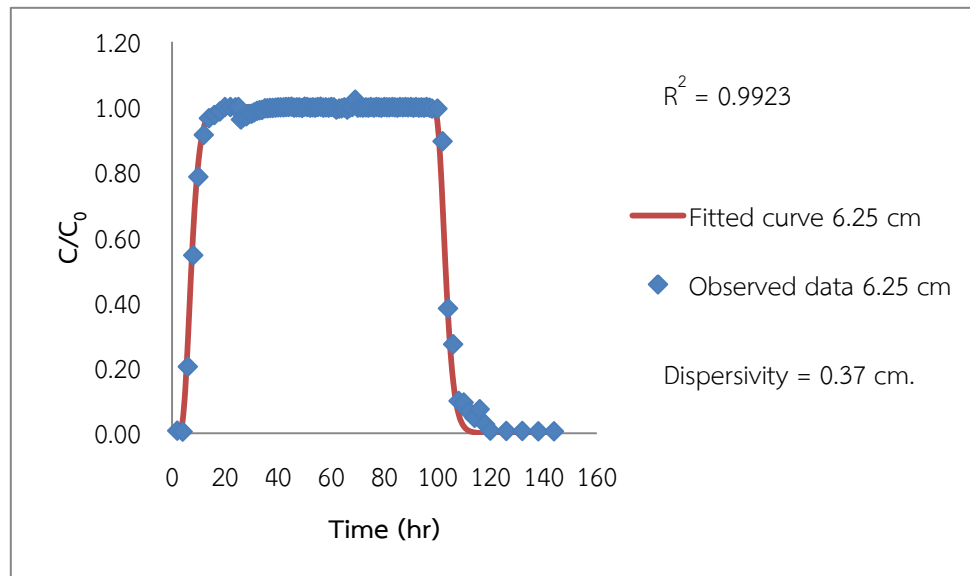
ตารางที่ 4 - 5 พารามิเตอร์นำเข้าของการเคลื่อนตัวโซเดียมโบรไมด์ที่ใช้ในแบบจำลอง HYDRUS-1D

พารามิเตอร์	ค่า	แหล่งที่มา
Saturated hydraulic conductivity, K_s (cm/hr)	0.41	การศึกษานี้
Residual soil water content, θ_r (-)	0.16	ปัทมา โชติกวิน (2553)
Saturated soil water content, θ_s (-)	0.36	ปัทมา โชติกวิน (2553)
Parameter α in the soil water retention function (-)	0.007	ปัทมา โชติกวิน (2553)
Parameter n in the soil water retention function (-)	2.19	ปัทมา โชติกวิน (2553)
Bulk density, B_d (g/cm ³)	1.64	ปัทมา โชติกวิน (2553)
Solution of bromide (Br ⁻), C (mg/L)	12.86	ได้จากการศึกษา

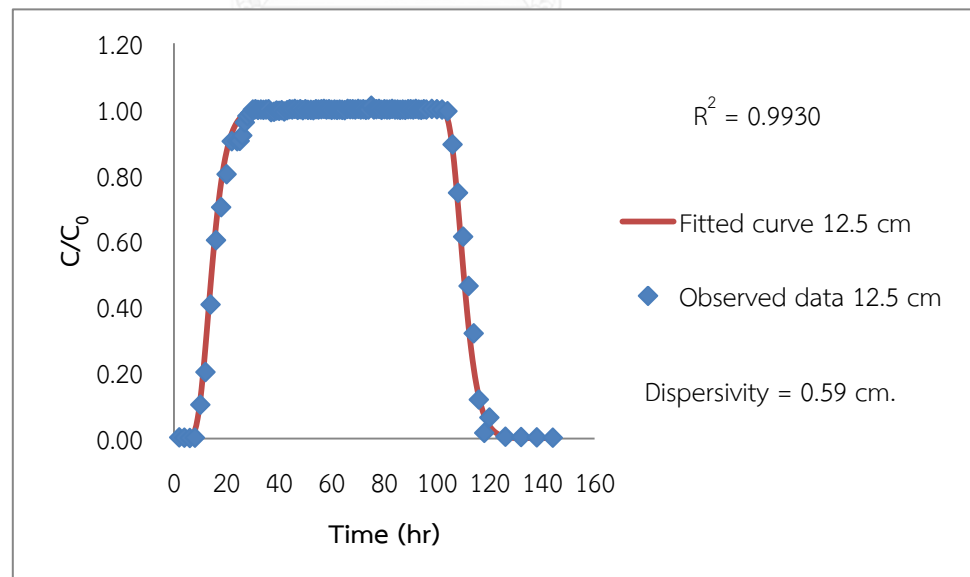
ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D เพื่ออธิบายการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโบรไมด์ในคอลัมน์ฤดูร้อน และคอลัมน์ฤดูฝน Breakthrough curves ของโบรไมด์ทั้งหมดมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำแบบสมมาตร แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวที่สมดุลที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ (Chotpantararat & Sutthirat, 2011) รูปแบบนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลโบรไมด์ได้ (Pang et al., 2002)

การเคลื่อนตัวของโบรไมด์ในคอลัมน์ฤดูร้อนในรูปที่ 4-7 ถึงรูปที่ 4-10 และคอลัมน์ฤดูฝนในรูปที่ 4-11 ถึง รูปที่ 4-14 แสดงข้อมูล Breakthrough curves ของสารละลายโบรไมด์ โดยใช้ HYDRUS-1D ค่า dispersivity ได้แสดงในตารางที่ 4-6 จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D คอลัมน์ฤดูร้อน ในรูปที่ 4-7 ถึงรูปที่ 4-10 ค่า dispersivity ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D (รูปที่ 4-15) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 0.37, 0.59, 0.78 และ 0.98 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9922-0.9952 สำหรับคอลัมน์ฤดูฝน

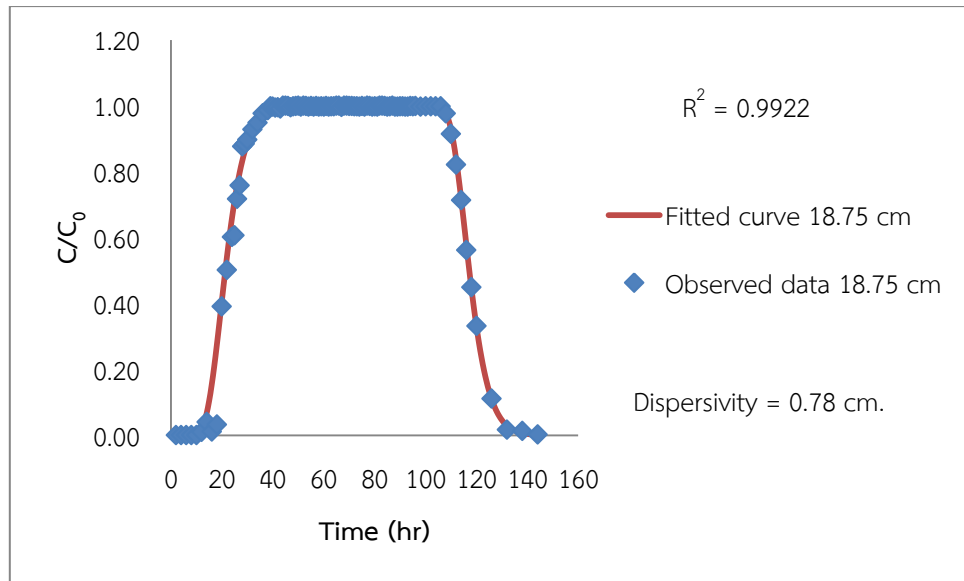
ในรูปที่ 4-11 ถึง รูปที่ 4-14 ค่า dispersivity ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 0.25, 0.39, 0.43 และ 0.59 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9930-0.9951



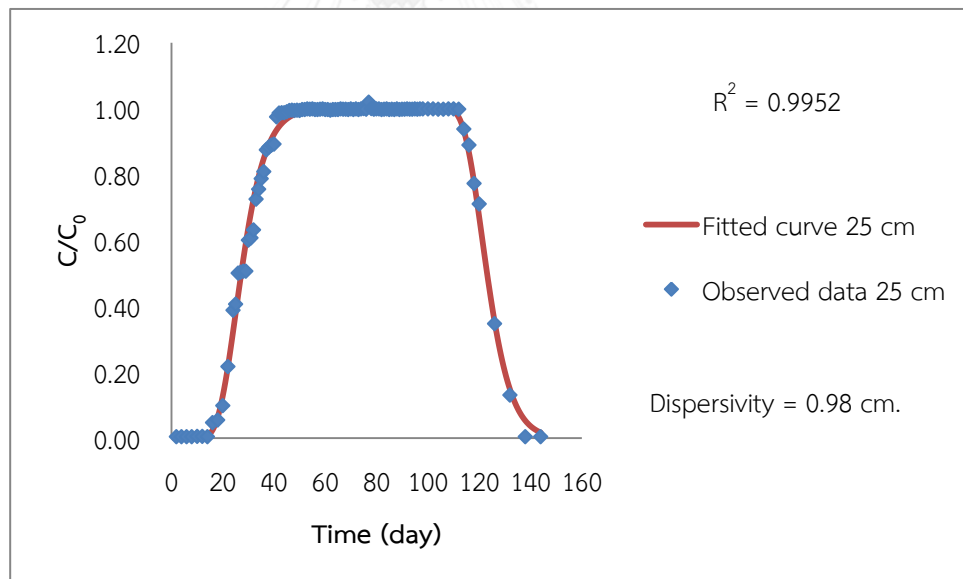
รูปที่ 4 - 7 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



รูปที่ 4 - 8 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 12.5 ซม.



รูปที่ 4 - 9 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 18.75 ซม.

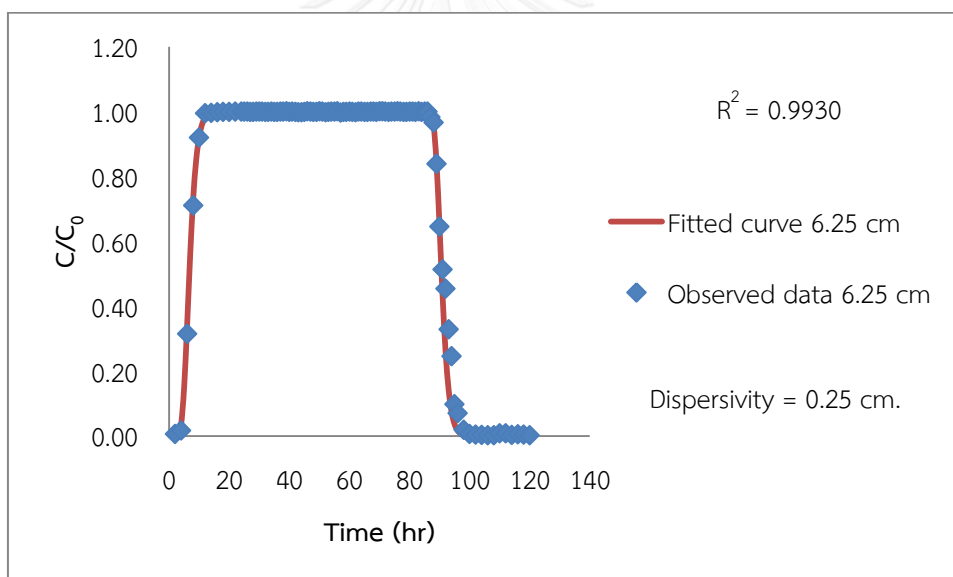


รูปที่ 4 - 10 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถุร้อนที่ระดับความลึก 25 ซม

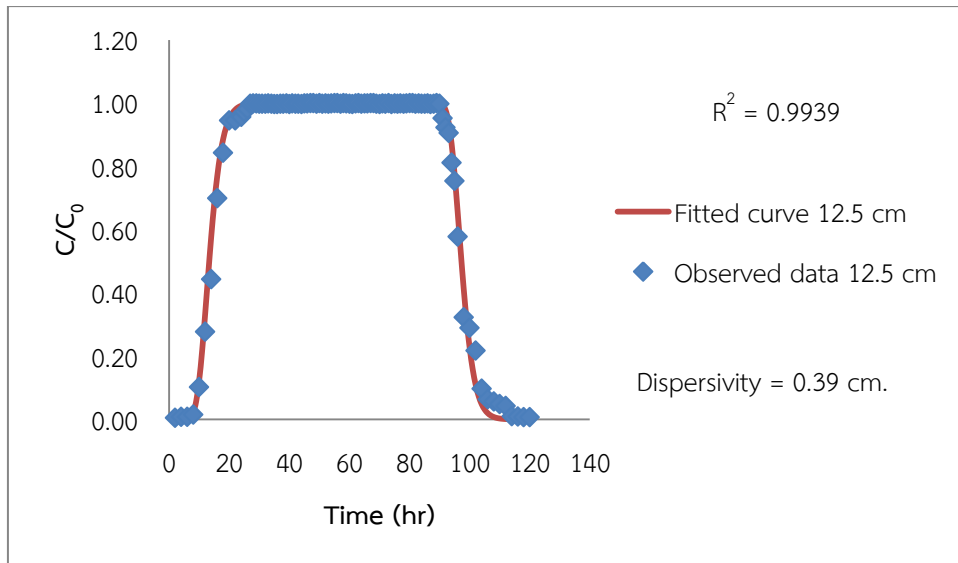
ตารางที่ 4 - 6 ค่า Dispersivity ของคอลัมน์ที่ต่างกันที่ได้จากแบบจำลอง HYDRUS-1D

คอลัมน์	ความลึก (ซม.)	ความเร็วของการไหล (ซม./ชม.)	Dispersivity* (ซม.)	R ²
ฤดูร้อน	6.25	0.41	0.37	0.9923
	12.50	0.41	0.59	0.9930
	18.75	0.41	0.78	0.9922
	25.00	0.41	0.98	0.9952
ฤดูฝน	6.25	0.41	0.25	0.9930
	12.50	0.41	0.39	0.9939
	18.75	0.41	0.43	0.9935
	25.00	0.41	0.59	0.9951

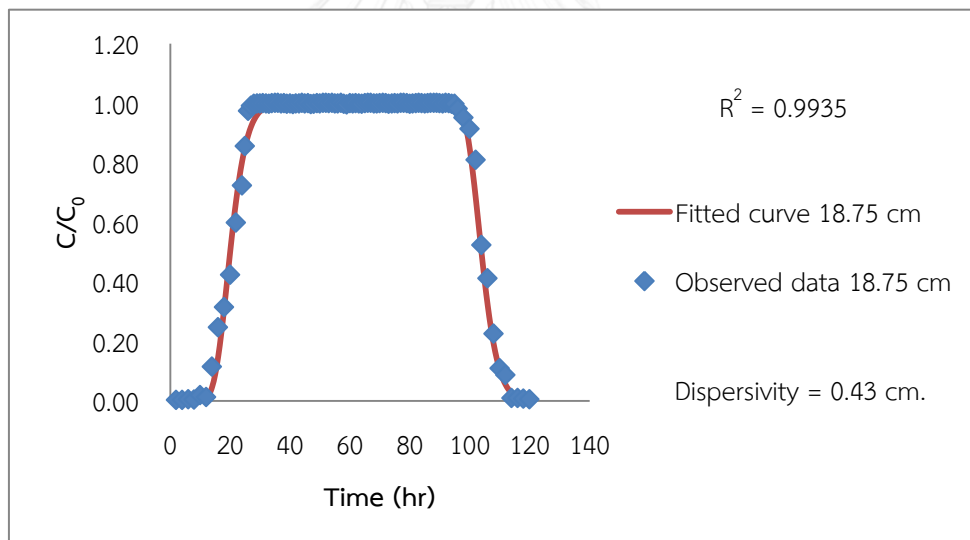
หมายเหตุ * คือค่า Dispersivity ที่ได้จากการปรับเทียบในแบบจำลอง HYDRUS-1D



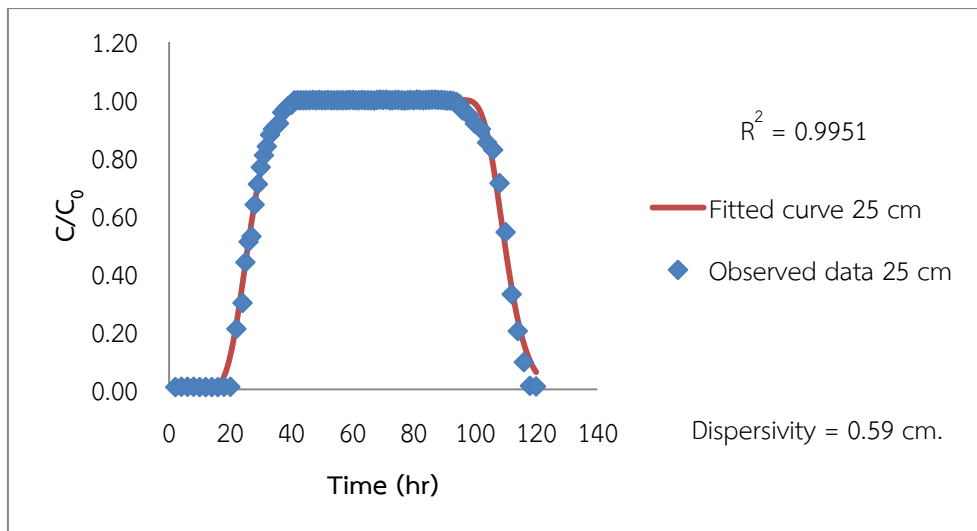
รูปที่ 4 - 11 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ฤดูฝนที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



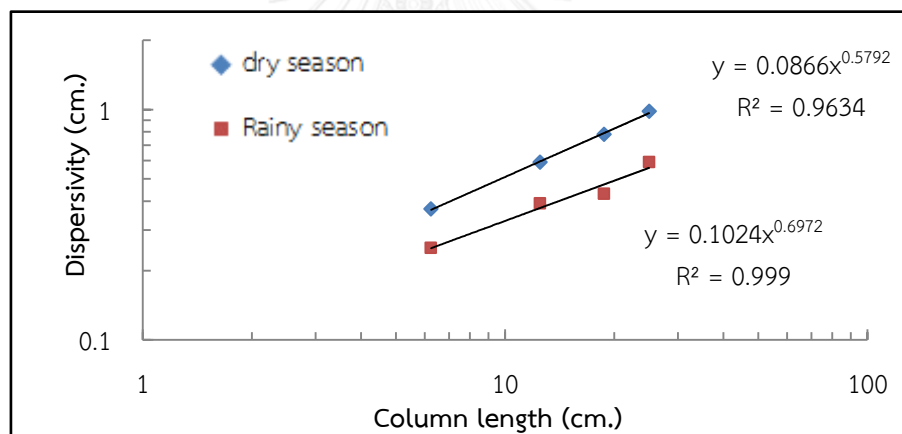
รูปที่ 4 - 12 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถาดูฝนที่ระดับความลึก 12.5 ซม.



รูปที่ 4 - 13 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์ถาดูฝนที่ระดับความลึก 18.75 ซม.



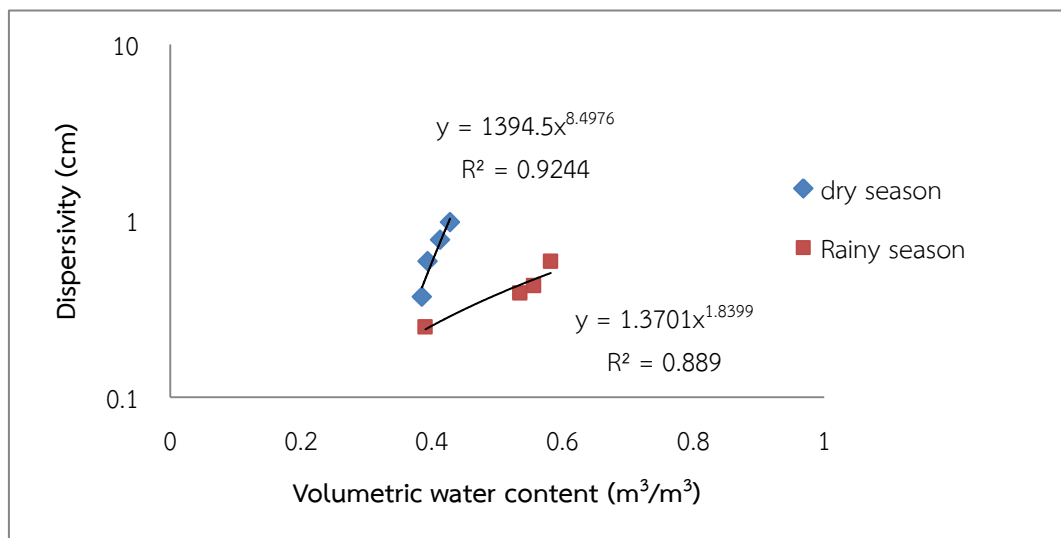
รูปที่ 4 - 14 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของคอลัมน์กตุฎุฝนที่ระดับความลึก 25 ซม.



รูปที่ 4 - 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า dispersivity เมื่อเทียบกับระยะทางของคอลัมน์กตุฎุร้อน และคอลัมน์กตุฎุฝน

จากการศึกษาของ (Porro, Weirenga, & Hills, 1993) พบว่าค่า dispersivity ในคอลัมน์ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เป็นดินเนื้อเดียวกันมีค่า dispersivity เพิ่มขึ้นจาก 2.2 ซม. เป็น 7.8 เมตร ที่มีระยะห่าง 82 และ 400 ซม. ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันการศึกษาของ Huang et al (1995) ได้ทดลองคอลัมน์ทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่เป็นดินเนื้อเดียวกันที่มีความยาวคอลัมน์ 12.5 เมตรพบว่าค่า dispersivity เมื่อเทียบกับระยะเวลาในคอลัมน์ค่า dispersivity เพิ่มขึ้น 0.1-5.0 ซม. จากตารางที่ 4-6 และรูปที่ 4-15 แสดงให้เห็นว่ามีค่า dispersivity ที่สูงเมื่อมีค่าความชื้นลดลง (คอลัมน์กตุฎุร้อน) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของคอลัมน์กตุฎุร้อนและคอลัมน์กตุฎุฝนดังนี้ $\text{dispersivity} = 0.086 (L)^{0.579}$ ($R^2 = 0.963$) และ $\text{dispersivity} = 0.102 (L)^{0.697}$ ($R^2 = 0.999$) ตามลำดับ ผลการศึกษาเหล่านี้สอดคล้องกับการศึกษา (Neuman, 1990) ที่พบว่าค่า dispersivity สำหรับระยะทางการไหล

ที่น้อยกว่า 3,500 เมตรสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ $\text{dispersivity} \sim 0.0175 (L)^{1.46}$ และจากการศึกษา (Chou & Wyseure, 2009) พบว่าค่า dispersivity ลดลงตามปริมาณน้ำปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบค่า dispersivity ระหว่างสองคอลัมน์ที่ค่าของ dispersivity ในคอลัมน์ฤดูร้อนสูงกว่าคอลัมน์ฤดูฝน แสดงให้เห็นว่าดินส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยช่องว่างในดินและเป็นผลทำให้มีปัจจัยที่คดเคี้ยวในดินสูง (tortuosity) ดังนั้นระยะทางในการเคลื่อนที่มีมากขึ้นและทำให้มีค่า dispersivity มากขึ้น



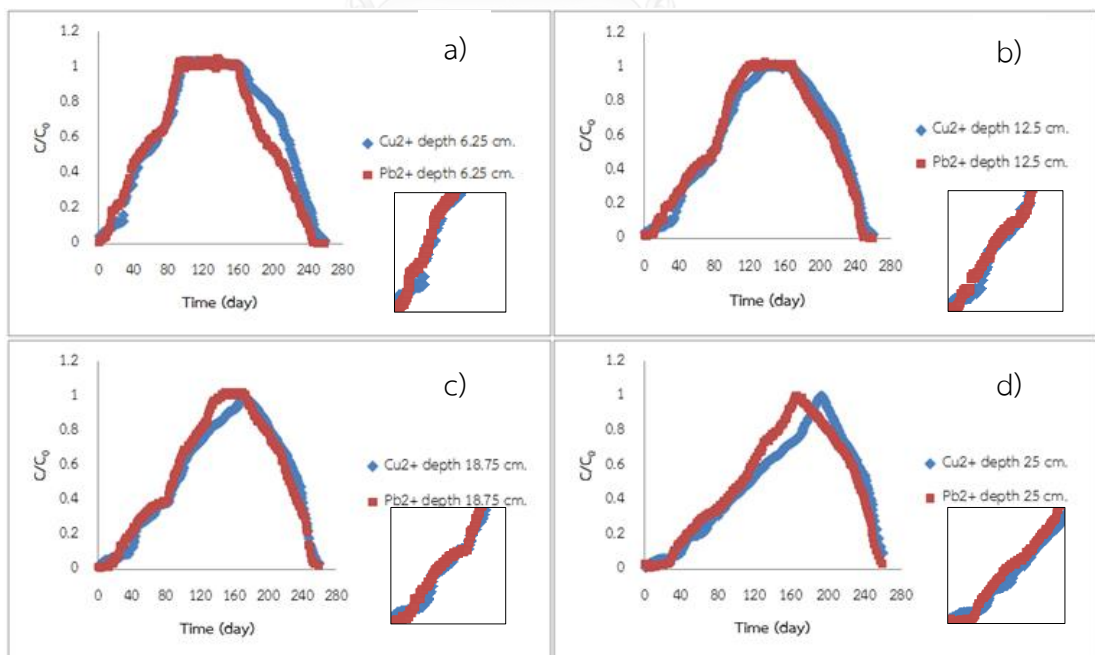
รูปที่ 4 - 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระหว่าง Volumetric water content กับค่า dispersivity

ความสัมพันธ์ระหว่าง water content กับค่า dispersivity ในรูปที่ 4-16 พบว่าในคอลัมน์ที่เป็นตัวแทนของฤดูฝน และคอลัมน์ที่เป็นตัวแทนของฤดูร้อนจะพบว่าค่า Volumetric water content กับค่า dispersivity จะต่างกัน กล่าวคือค่า dispersivity ในคอลัมน์ฤดูร้อนสูงกว่าคอลัมน์ฤดูฝน แสดงให้เห็นว่าดินส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยช่องว่างในดินและเป็นผลทำให้มีปัจจัยคดเคี้ยวในดินสูง (tortuosity) ดังนั้นระยะทางในการเคลื่อนที่มีมากขึ้นทำให้มีค่า dispersivity สูง ซึ่งจากงานวิจัยของ (Wierenga & van Genuchten, 1989) ได้ทดลองคอลัมน์ยาว 30 และ 60 ซม.ที่เต็มไปด้วยดินร่วนปนทรายและพบว่ามีค่าเฉลี่ยของ dispersivity ของคลอไรด์ในคอลัมน์เท่ากับ 0.80 และ 0.87 ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Disli E. (2010) ได้ทดลองคอลัมน์ในดินลุ่มน้ำที่ต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า dispersivity อยู่ระหว่าง 0.024 - 1.13 ซม. ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา (Chou & Wyseure, 2009) ซึ่งพบว่าค่า dispersivity ลดลงตามปริมาณน้ำปริมาตรเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ รัชพล พิพิธสมบัติ (2553) พบว่าในคอลัมน์เมื่อมีค่าความชื้น และค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่า dispersivity เพิ่มขึ้น

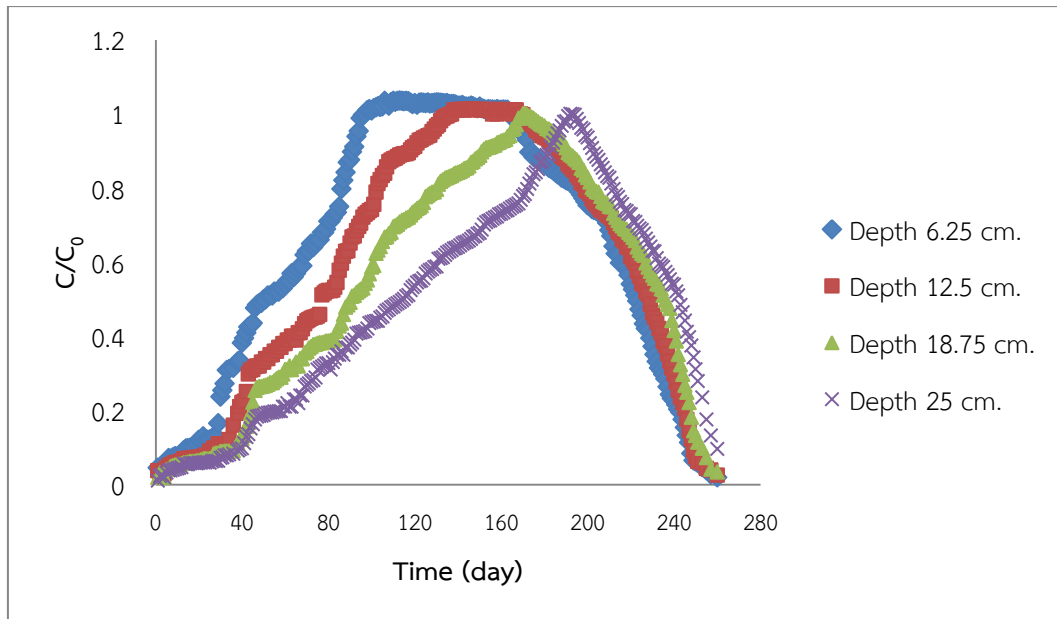
4.3.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน)

สารละลายทองแดง และตะกั่ว ได้นำไปใช้ในการทดลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายจากพื้นที่เกษตรกรรม ผลของการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ด้วยแบบจำลองคอลัมน์ (คอลัมน์ฤดูร้อน) แสดงได้ในรูปที่ 4-18 ถึง รูปที่ 4-19 พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วงกราฟ (BTCs) ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นสูงสุด (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวออกมาจากคอลัมน์ โดยคอลัมน์แบ่งออกเป็น 4 ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ตามลำดับ

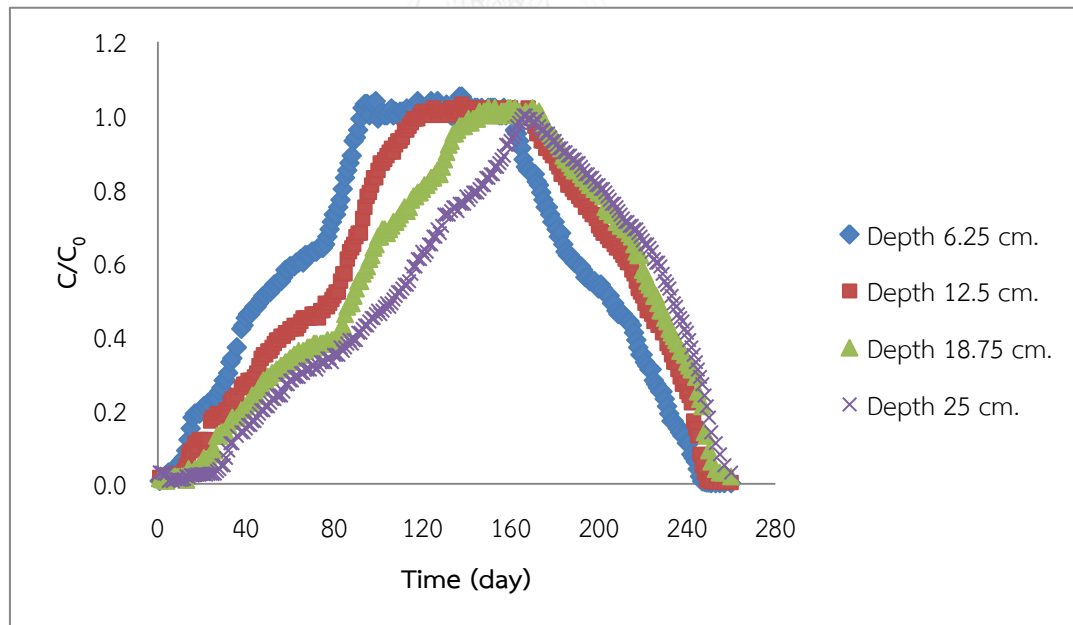
อย่างไรก็ตามช่วงเวลาสำหรับการที่สารละลายเคลื่อนตัวไปถึงความเข้มข้นสูงสุด คือเท่ากับ ความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่วในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติในการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักดังกล่าว สำหรับตัวอย่างในคอลัมน์ฤดูร้อนที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 ทองแดงที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 97, 137, 170 และ 192 วัน (รูปที่ 4-17 ถึง รูปที่ 4-18) ส่วนตะกั่วที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 93, 119, 146 และ 166 วัน (รูปที่ 4-17 และ รูปที่ 4-19) และทั้งทองแดง และตะกั่ว จะเคลื่อนตัวลงมาที่ C เท่ากับ 0 ใช้เวลาถึง 260 วัน และจะสังเกตเห็นว่าในคอลัมน์ฤดูร้อนตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วทองแดงในทุกๆระดับความลึก



รูปที่ 4 - 17 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูร้อน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.



รูปที่ 4 - 18 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.



รูปที่ 4 - 19 Breakthrough curves ตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.

เมื่อนำเวลาในการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วมาคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วง โดยการคำนวณหาพื้นที่เหนือกราฟด้านหน้าของ BTCs ที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza et al., 1987) ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วง คือค่าที่บอกถึงการหน่วงการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนอันเป็นผลมาจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุน (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553)

จากตารางที่ 4-7 แสดงค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดินร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 พบว่าทองแดงที่ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีค่าตัวประกอบความหน่วง คือ 54.69, 72.19, 88.65 และ 108.17 ตามลำดับ ส่วนตะกั่วที่ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีค่าตัวประกอบความหน่วงคือ 51.32, 66.77, 81.01 และ 87.08 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทองแดงจะมีค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าตะกั่วจึงทำให้ดูดซับในดินได้มากกว่า จึงเคลื่อนตัวออกมาช้ากว่าตะกั่ว โดยทองแดง และตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับ 367 และ 362.12 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และจากการทดลองพบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวของทองแดงและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ โดยหากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมากจะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้าและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่าน้อยโลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็ว และจะปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก

ตารางที่ 4 - 7 ค่าตัวประกอบความหน่วงจากวิธี Area methods ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 3

ค่าพีเอช	ระดับความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น		ค่าตัวประกอบความหน่วง	
		(มก./ล.)			
		ทองแดง	ตะกั่ว	ทองแดง	ตะกั่ว
3 (คอลัมน์ฤดูร้อน)	6.25	10	10	54.69	51.32
	12.5	10	10	72.19	66.77
	18.75	10	10	88.75	81.01
	25	10	10	110.92	87.08

การดูดซับมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักซึ่ง ปริมาณการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอชเป็นการลดความเข้มข้นของ H^+ และ เพิ่ม OH^- ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยเป็นการเพิ่มประจุลบบนผิวหน้าทำให้เกิดการดูดซับโลหะหนักที่เป็นแคตไอออนบริเวณผิวหน้า (เกษรา จิตนิยม, อัญชลี สุทธิประการ., & เอิบ เขียวรีนรมณ์., 2553) และจากการศึกษาของ (Matos, Fontes, Costa, & Martinez, 2001) พบว่าพีเอชของดินเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่าตัวประกอบความหน่วง คือการเพิ่มพีเอชมีผลทำให้มีค่าตัวประกอบความหน่วงลดทั้งความคล่องตัวทำให้โลหะหนักเคลื่อนตัวได้ช้า

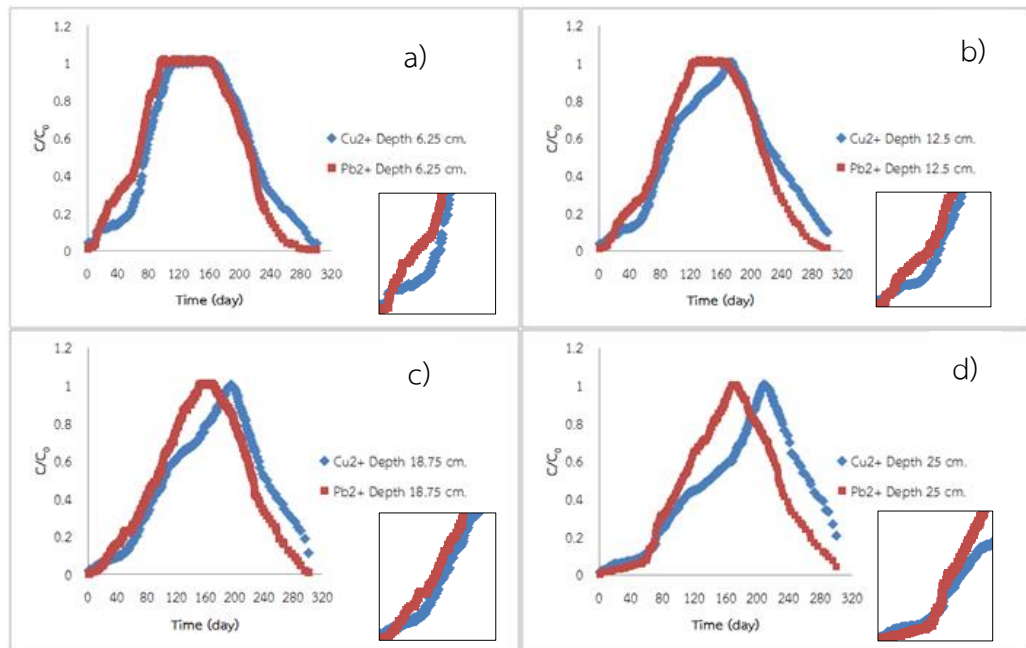
4.3.4 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน)

สารละลายทองแดง และตะกั่ว ได้นำไปใช้ในการทดลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายจากพื้นที่เกษตรกรรม ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ด้วยแบบจำลองคอลัมน์ (คอลัมน์ฤดูร้อน) แสดงได้ในรูปที่ 4-21 ถึง รูปที่ 4-22 พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วงกราฟ (BTCs) ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นสูงสุด (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่ว ที่เคลื่อนตัวออกมาจากคอลัมน์ โดยคอลัมน์แบ่งออกเป็น 4 ระดับความลึกคือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ตามลำดับ

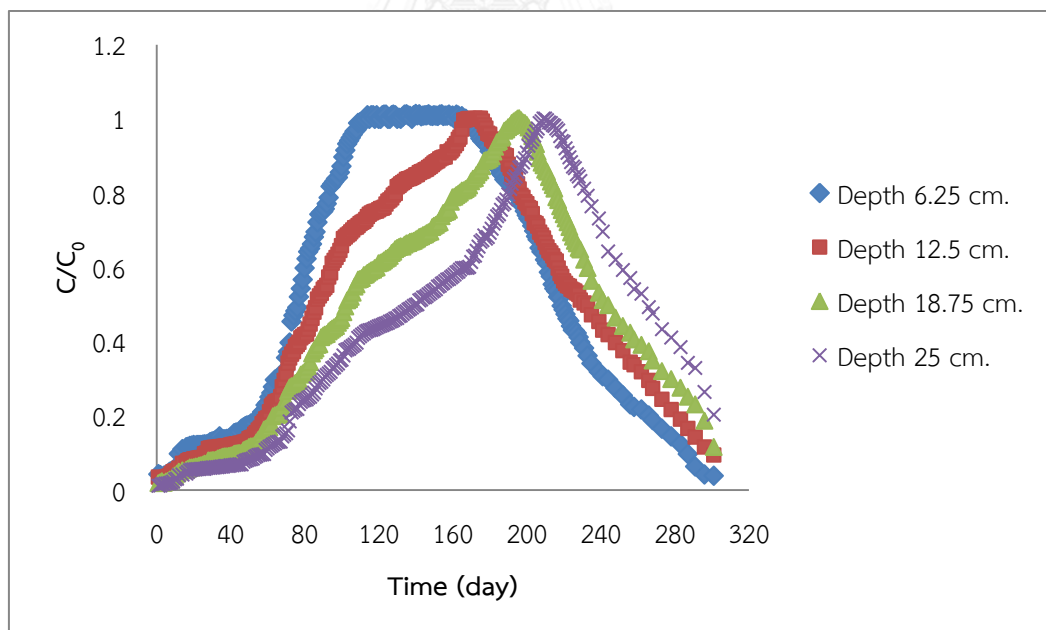
อย่างไรก็ตามช่วงเวลาสำหรับการที่สารละลายเคลื่อนตัวไปถึงความเข้มข้นสูงสุด คือเท่ากับ ความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่วในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติในการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักดังกล่าว สำหรับตัวอย่างในคอลัมน์ฤดูร้อนที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 114, 167, 196 และ 209 วัน (รูปที่ 4-20 ถึง รูปที่ 4-21) ส่วนตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 96, 123, 152 และ 168 วัน (รูปที่ 4-20 และรูปที่ 4-22) และทั้งทองแดง และตะกั่ว จะเคลื่อนตัวลงมาที่ C เท่ากับ 0 ใช้เวลา 301 วัน และจะสังเกตเห็นว่าในคอลัมน์ฤดูร้อนตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วทองแดงในทุกๆระดับความลึก

ตารางที่ 4 - 8 ค่าตัวประกอบความหน่วงจากวิธี Area methods ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 5

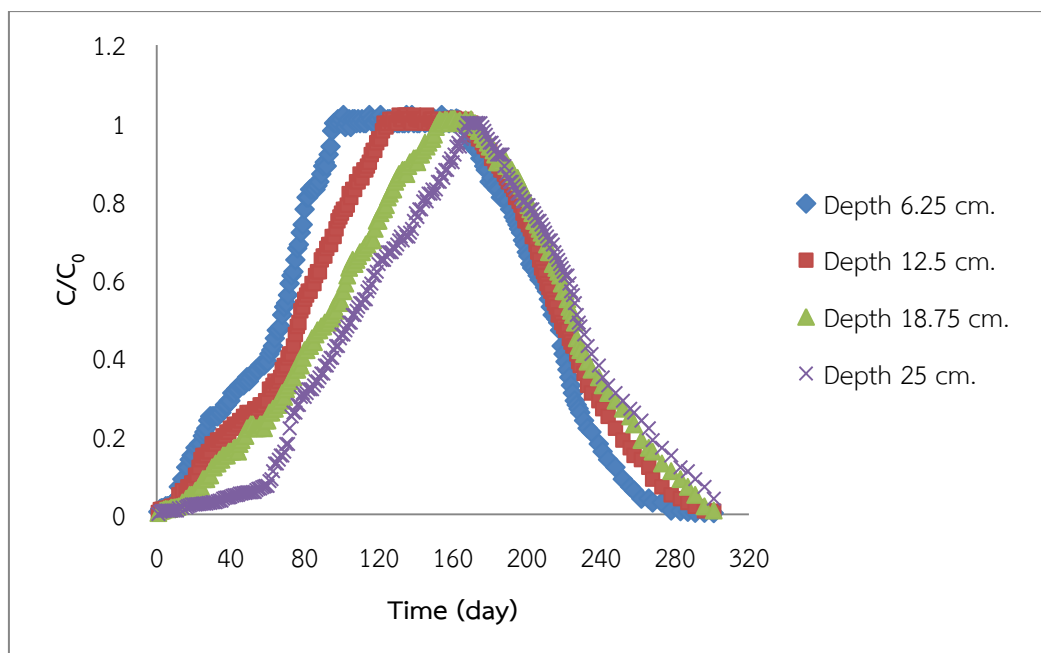
ค่าพีเอช	ระดับความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)		ค่าตัวประกอบ ความหน่วง	
		ทองแดง	ตะกั่ว	ทองแดง	ตะกั่ว
5 (คอลัมน์ฤดูร้อน)	6.25	10	10	70.22	58.11
	12.5	10	10	89.07	72.63
	18.75	10	10	107.84	87.57
	25	10	10	130.68	105.78



รูปที่ 4 - 20 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ถั่วรื้อน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.



รูปที่ 4 - 21 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.



รูปที่ 4 - 22 Breakthrough curves ของตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.

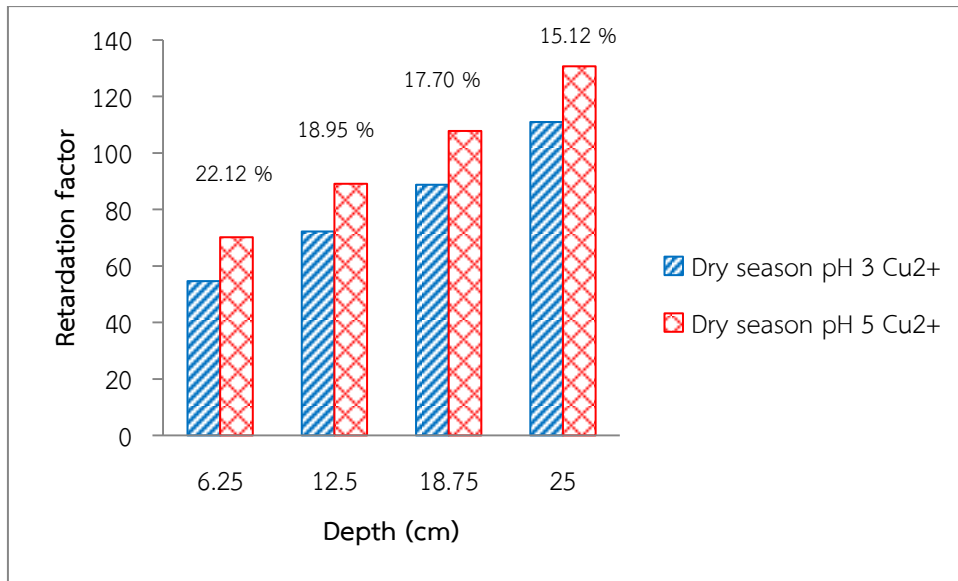
เมื่อนำเวลาในการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว มาคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วง โดยการคำนวณหาพื้นที่เหนือกราฟด้านหน้าของ BTCs ที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza et al., 1987) ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วง คือค่าที่บอกลถึงการหน่วงการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนอันเป็นผลมาจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการดูดซับติดผิว (Adsorption) ระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุน (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553)

จากตารางที่ 4-8 แสดงค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดินร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. พบว่าทองแดง มีค่าตัวประกอบความหน่วง คือ 70.22, 89.07, 107.84 และ 130.68 ตามลำดับ ส่วนตะกั่วมีค่าตัวประกอบความหน่วง คือ 58.11, 72.63, 87.57 และ 105.78 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทองแดงจะมีค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าตะกั่ว จึงทำให้ดูดซับในดินได้มากกว่า และเคลื่อนตัวออกมาช้ากว่าตะกั่ว โดยทองแดงและตะกั่วมีค่าความสามารถในการการดูดซับ 461.79 และ 457.93 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และจากการทดลองพบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวของทองแดงและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ โดยหากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมาก จะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้าและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่าน้อยโลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็ว และจะปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก

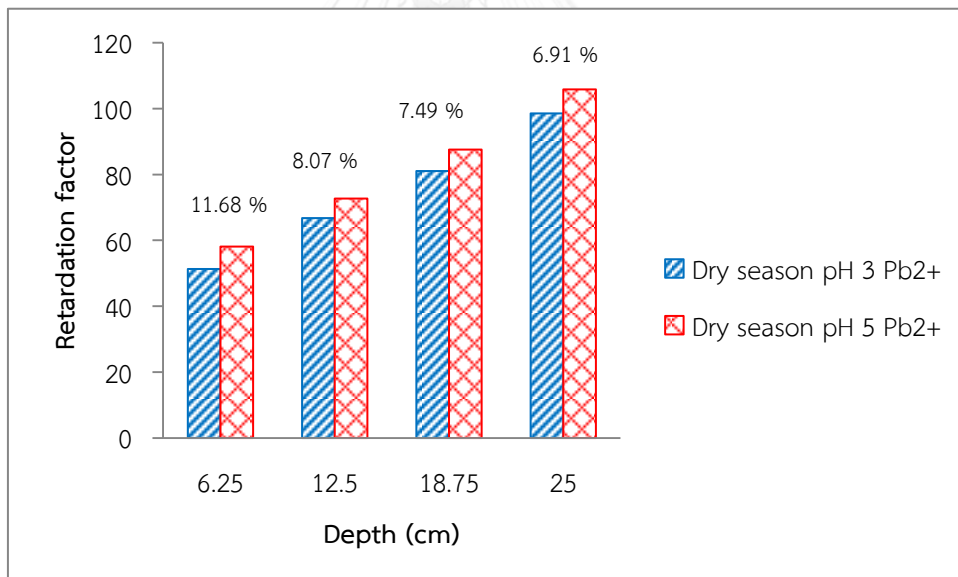
การดูดซับมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโลหะหนักซึ่ง ปริมาณการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า พีเอช เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอชเป็นการลดความเข้มข้นของ H^+ และ เพิ่ม OH^- ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยเป็นการเพิ่มประจุลบบนผิวหน้าทำให้เกิดการดูดซับโลหะหนักที่เป็นแคตไอออนบริเวณผิวหน้า (เกษรา จิตนิยม et al., 2553) และจากการศึกษาของ (Matos et al., 2001) พบว่าพีเอชของดินเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่าตัวประกอบความหน่วง คือการเพิ่มพีเอชมีผลทำให้มีค่าตัวประกอบความหน่วงลดทั้งความคล่องตัวทำให้โลหะหนักเคลื่อนตัวได้ช้า

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วง ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดินร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 3 คือ 22.12%, 18.95%, 17.70% และ 15.12% ตามลำดับ (รูปที่ 4-23) ส่วนค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอชเท่ากับ 3 คือ 11.68%, 8.07%, 7.49% และ 6.91% ตามลำดับ (รูปที่ 4-24) จากการศึกษาของ (Harter, 1992) ได้วิเคราะห์การดูดซับโลหะหนักในดินแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของค่าพีเอชในการดูดซับ Pb, Ni, Zn และ Cu ในดินที่ปรับพีเอชต่างๆที่ 4.3-8.3 โดยโลหะหนักที่เป็นประจุบวกเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วยจะพบว่า Cu มีค่าดูดซับสูงสุด $Cu > Pb > Zn > Ni$ ค่าพีเอชจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับโลหะหนักที่เป็นประจุบวก เนื่องจากเกิดจากไฮโดรไลซ์ของโลหะหนักชนิดนั้น โดยสัดส่วนของโลหะหนักที่เป็นไฮโดรไลซ์จะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช และไฮโดรไลซ์มีบทบาทสำคัญในการชะละลายโดยมีค่าพีเอชเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย (Jenne, 1968)

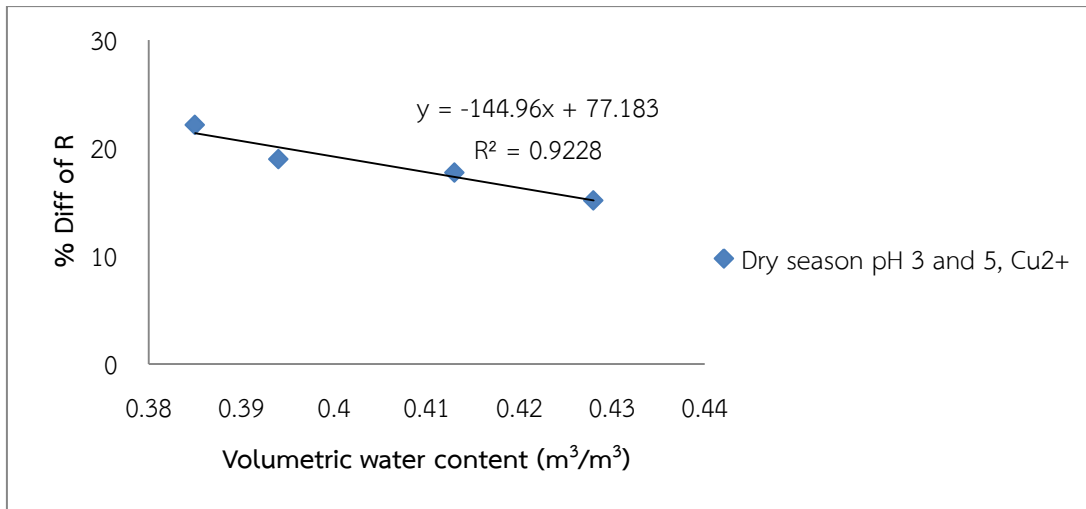
จากรูปที่ 4-25 ถึง รูปที่ 4-26 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 พบว่าเมื่อถ้าค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ทำในครั้งนี้



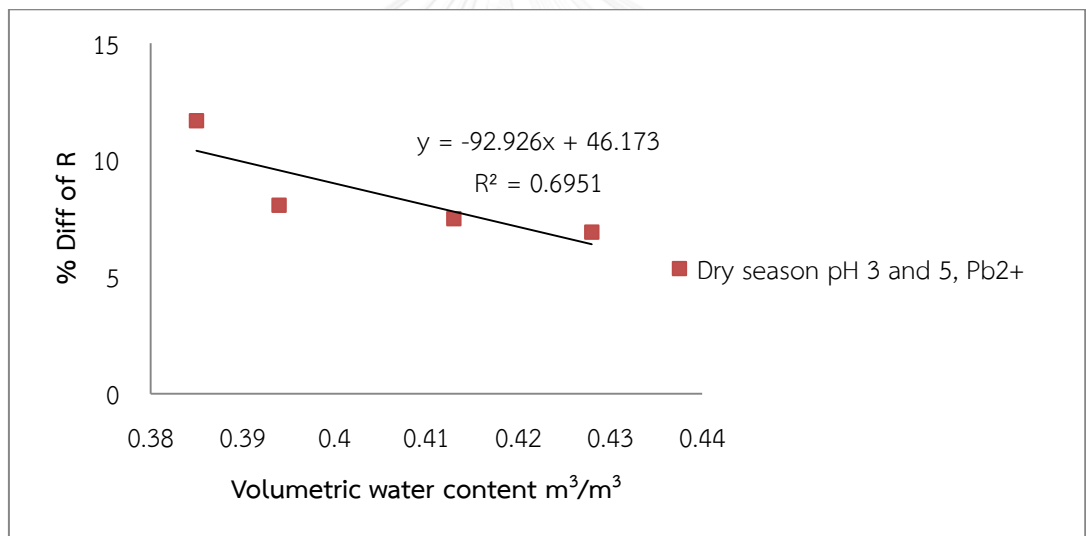
รูปที่ 4 - 23 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5



รูปที่ 4 - 24 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่มีพีเอชเท่ากับ 3 และ 5



รูปที่ 4 - 25 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5

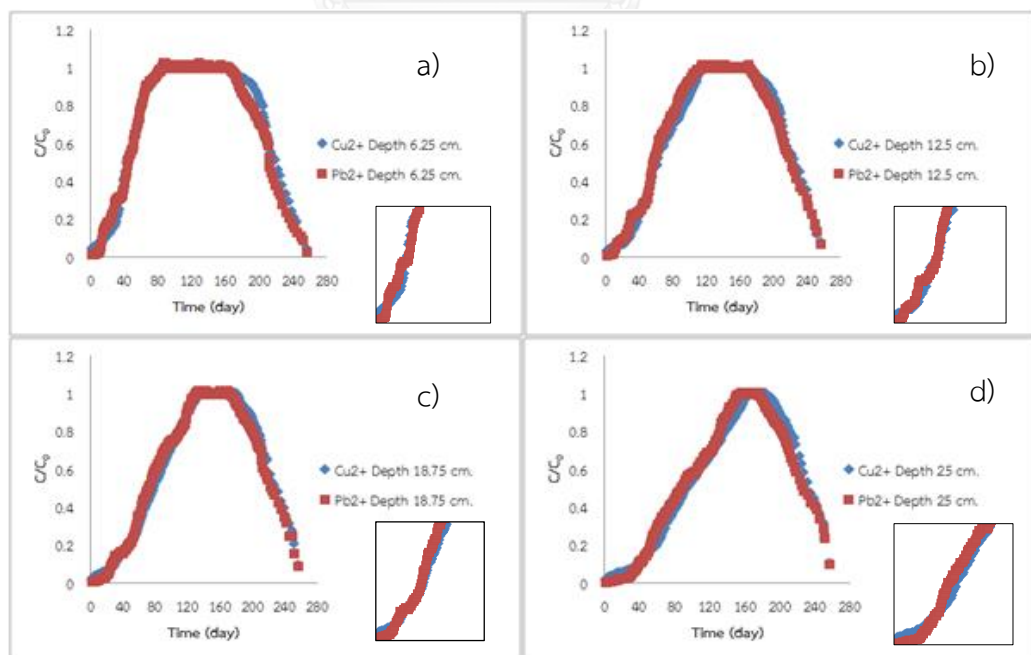


รูปที่ 4 - 26 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5

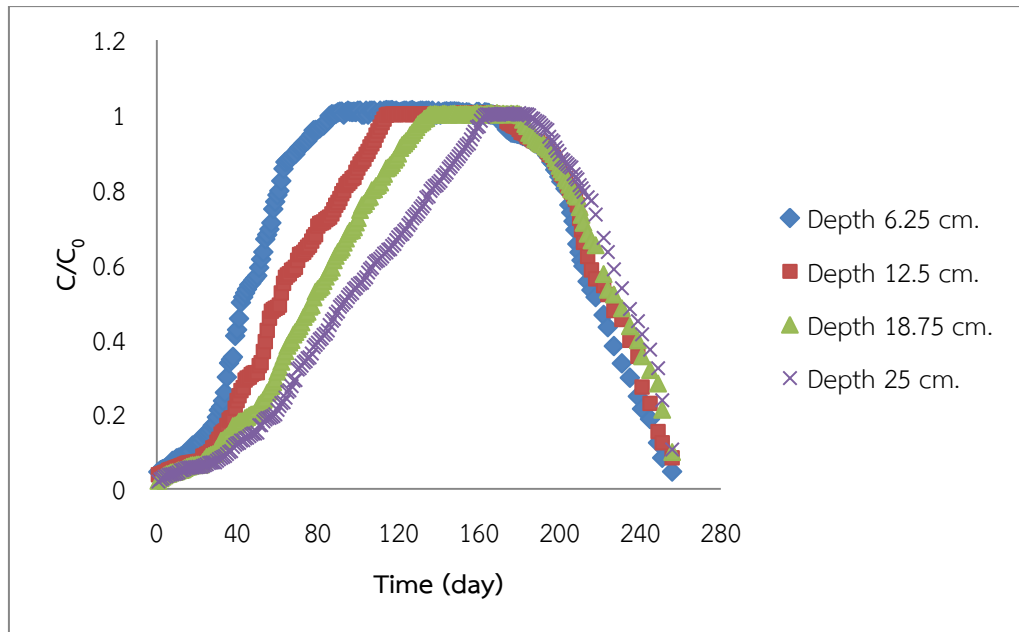
4.3.5 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)

สารละลายทองแดง และตะกั่วได้นำไปใช้ในการทดลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายจากพื้นที่เกษตรกรรม ผลของการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ด้วยแบบจำลองคอลัมน์ (คอลัมน์ฤดูฝน) แสดงได้ในรูปที่ 4-27 ถึง รูปที่ 4-29 พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีความเร็วของการไหล คือ 0.41 ซม./ชม. โดยสารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วงกราฟ (BTCs) ของทองแดง และตะกั่วในคอลัมน์ดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นสูงสุด (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่วที่ไหลออกมาจากคอลัมน์ โดยคอลัมน์แบ่งออกเป็น 4 ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ตามลำดับ

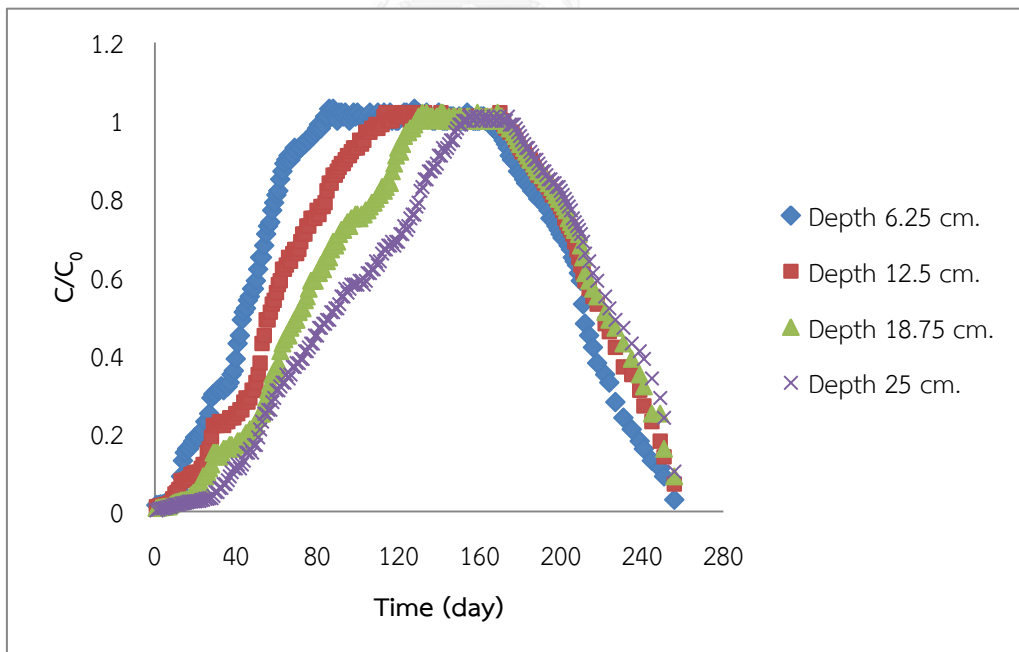
อย่างไรก็ตามช่วงเวลาสำหรับการที่สารละลายเคลื่อนตัวไปถึงความเข้มข้นสูงสุด คือเท่ากับ ความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของทองแดง และตะกั่วในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติในการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักดังกล่าว สำหรับตัวอย่างในคอลัมน์ฤดูฝนที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ทองแดงที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 87, 115, 136 และ 164 วัน (รูปที่ 4-27 ถึง รูปที่ 4-28) ส่วนตะกั่วที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. ใช้เวลา 84, 113, 129 และ 152 วัน (รูปที่ 4-27 และรูปที่ 4-29) และทั้งทองแดง และตะกั่ว จะเคลื่อนตัวลงมาที่ C เท่ากับ 0 ใช้เวลาถึง 256 วัน และจะสังเกตเห็นว่าในคอลัมน์ฤดูร้อนตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วทองแดงในทุกๆระดับความลึก



รูปที่ 4 - 27 Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูฝน ที่ระดับความลึก a) 6.25 ซม. b) 12.5 ซม c) 18.75 ซม และ d) 25 ซม.



รูปที่ 4 - 28 Breakthrough curves ของทองแดง ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.



รูปที่ 4 - 29 Breakthrough curves ของตะกั่ว ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม.

เมื่อนำเวลาในการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว มาคำนวณหาค่าตัวประกอบความหน่วง โดยการคำนวณหาพื้นที่เหนือกราฟด้านหน้าของ BTCs ที่สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 (Nkedi-Kizza et al., 1987) ซึ่งค่าตัวประกอบความหน่วง คือค่าที่บอกถึงการหน่วงการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนอันเป็นผลมาจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการดูดซับติดผิว (Adsorption) ระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนกับตัวกลางรูพรุน (รัชพล พิพิธสมบัติ, 2553)

จากตารางที่ 4-9 แสดงค่าตัวประกอบความหน่วง ของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดินร่วนปนทรายภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) พบว่าที่ระดับความลึก คือ 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. พบว่าทองแดงมีค่าตัวประกอบความหน่วง คือ 44.17, 62.83, 75.68 และ 94.03 ตามลำดับ ส่วนตะกั่วมีค่าตัวประกอบความหน่วง คือ 42.49, 57.55, 72.39 และ 88.50 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทองแดงจะมีค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าตะกั่ว จึงทำให้ดูดซับในดินได้มากกว่าและเคลื่อนตัวออกมาช้ากว่าตะกั่ว โดยทองแดง และตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับ 295.35 และ 291.44 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และจากการทดลองพบว่า ปริมาณการเคลื่อนตัวของทองแดงและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ โดยหากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมากจะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้าและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่าน้อยโลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็วและจะปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก

ตารางที่ 4 - 9 ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่ว พีเอช 5 คอลัมน์ฤดูฝน

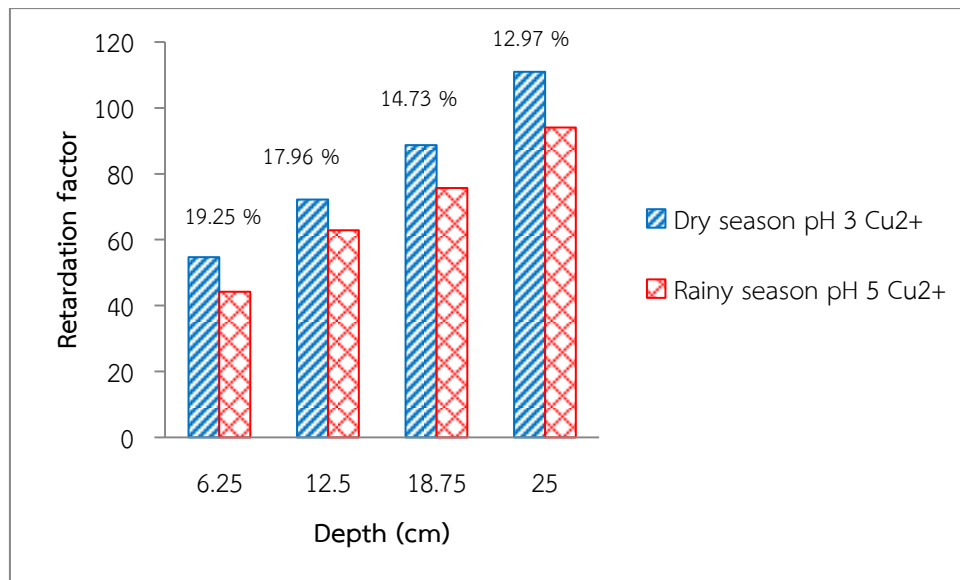
ค่าพีเอช	ระดับความลึก (ซม.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น		ค่าตัวประกอบความหน่วง	
		(มก./ล.)		ความหน่วง	
		ทองแดง	ตะกั่ว	ทองแดง	ตะกั่ว
5 (คอลัมน์ฤดูฝน)	6.25	10	10	44.1	42.49
	12.5	10	10	62.83	57.55
	18.75	10	10	75.68	72.39
	25	10	10	94.03	88.50

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดินร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) คือ 19.25%, 17.96%, 14.73% และ 12.97% ตามลำดับ (รูปที่ 4-30) ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) คือ 17.21%, 13.76%, 10.64% และ 10.13% ตามลำดับ (รูปที่ 4-31)

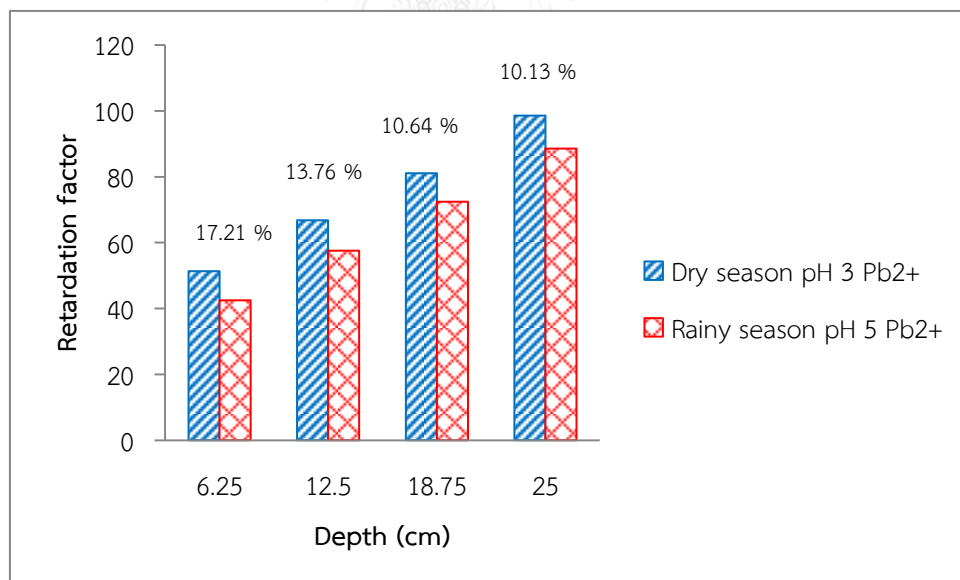
เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดิน ร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะ อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มี เปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ทองแดงที่พีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) คือ 37.11%, 29.46%, 29.82% และ 28.05% ตามลำดับ (รูปที่ 4-32) ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบ ความหน่วงของคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.75 และ 25 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าคอลัมน์ตะกั่วที่พีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดู ฝน) คือ 26.88%, 20.78%, 17.33% และ 16.34% ตามลำดับ (รูปที่ 4-33)

ค่าพีเอชที่แตกต่างกันทำให้การเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของดินโดยเฉพาะถ้าค่าพีเอชเป็นกรด จะส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนักและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักได้เร็วขึ้น (Antanaitis & Antanaitis, 2012) ซึ่งจากงานวิจัยของ (Chen et al., 2010) ได้ออกแบบคอลัมน์ดินเพื่อนำมาใช้ใน การอธิบายการชะละลายของ Cu และ Zn พบว่า Cu และ Zn ที่พีเอชเท่ากับ 11.25 Cu และ Zn ชะละลายได้ 4% และ 58.3% แต่เมื่อพีเอชลดลงเหลือ 6.75 Cu และ Zn สามารถชะละลายได้ 75.3% และ 78.2% สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่า คอลัมน์ฤดูร้อนมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ทองแดง และตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ในทุกระดับความลึก

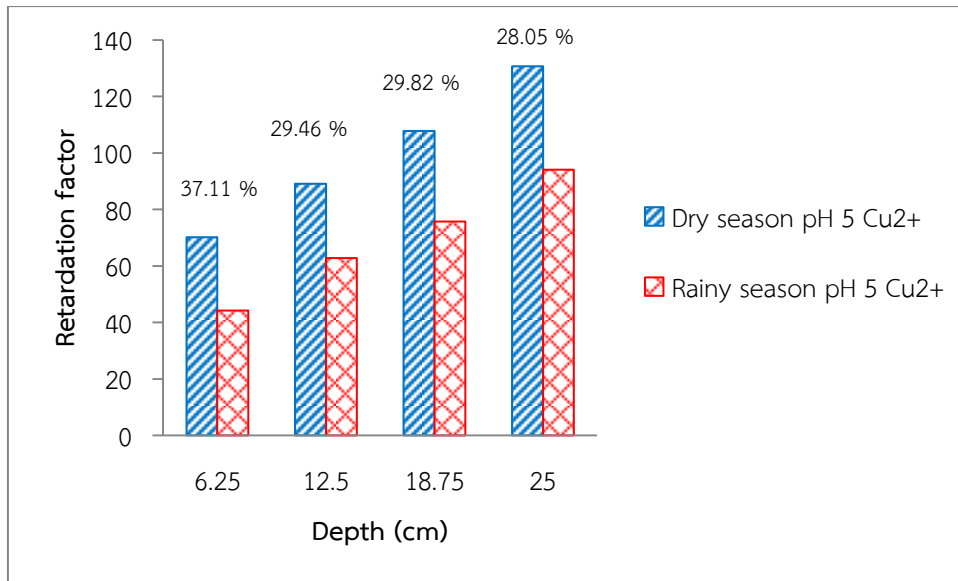
จะสังเกตเห็นว่าในคอลัมน์ฤดูฝนมีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าทองแดง ในคอลัมน์ฤดูร้อนที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ในทุกระดับความลึก และคอลัมน์ฤดูฝนที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ตะกั่วเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าทองแดงที่คอลัมน์ฤดูร้อนที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ในทุกระดับความ ลึกเช่นเดียวกัน เนื่องจากว่าค่าความชื้นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการเคลื่อนตัว และน้ำเป็นตัวกลางที่ ดีในการเคลื่อนย้ายไอออนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง (บุญแสน เตียนกุลธรรม, 2005) อีกทั้งฤดูกาลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการละลายและการเคลื่อนตัวของมลสารในดิน (ภาควิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2004) และค่าตัวประกอบความหน่วงที่พบว่า ทองแดงจะมีค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าตะกั่ว ซึ่งจากการศึกษาของ Pagnanelli และคณะ (2003) ได้วิเคราะห์ผลการทดลองของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ที่สมดุลของการดูดซับที่ ค่าพีเอชเดียวกันโดยพบว่า hydrolysis constant คงที่สำหรับทองแดง คือ $\log K_{Cu}$ เท่ากับ $\log -8.00$ ส่วนตะกั่ว $\log K_{Pb}$ เท่ากับ -7.71 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่าค่า hydrolysis constant เป็นผลทำให้ค่าตัวประกอบความหน่วงของทองแดงมากกว่าตะกั่ว



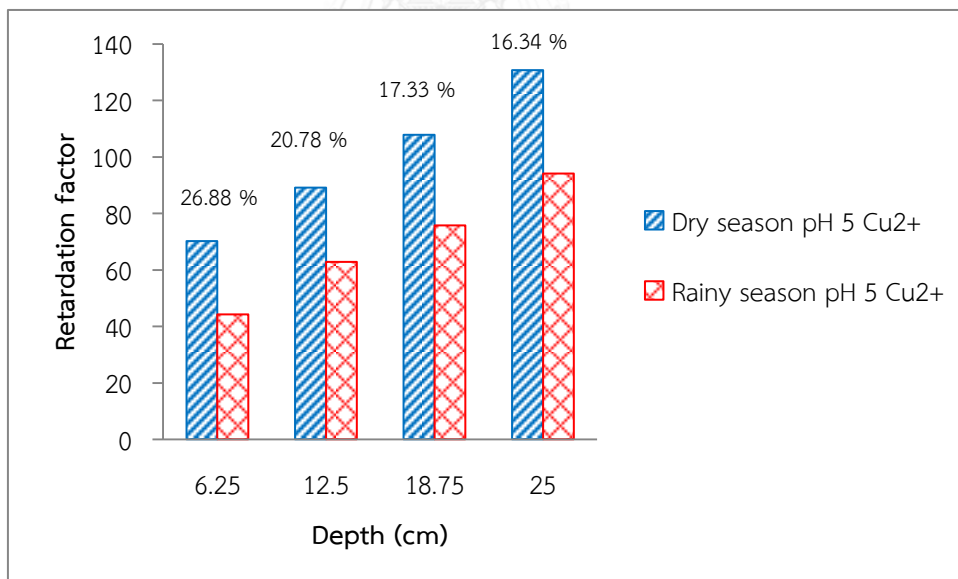
รูปที่ 4 - 30 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลลิมน์ทองแดง และเปอร์เซนต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลลิมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูฝน)



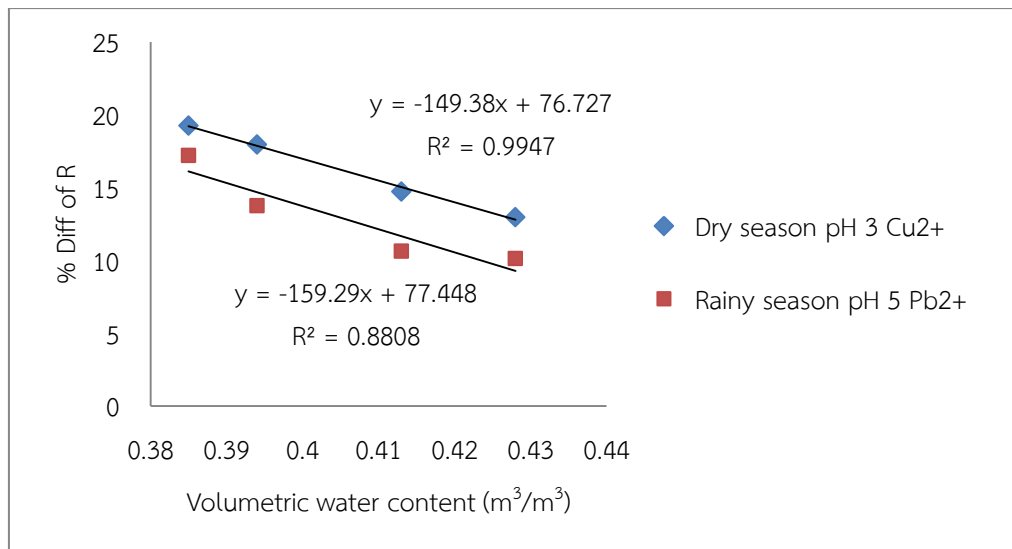
รูปที่ 4 - 31 เปอร์เซนต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลลิมน์ตะกั่ว และเปอร์เซนต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลลิมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูฝน)



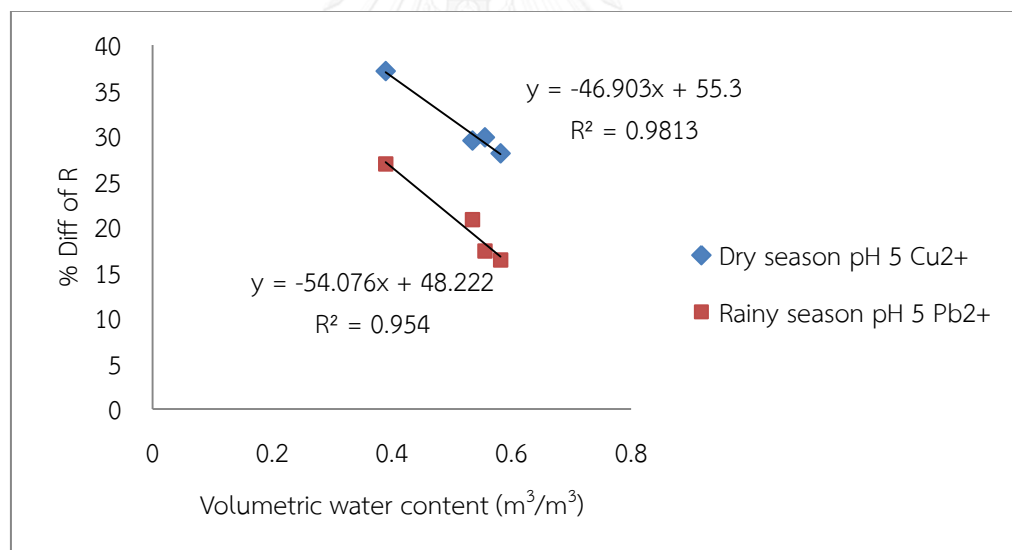
รูปที่ 4 - 32 เปรอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลลิมน์ทองแดง และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูฝน)



รูปที่ 4 - 33 เปรอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลลิมน์ตะกั่ว และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลลิมน์ฤดูฝน)



รูปที่ 4 - 34 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้น กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าตัวประกอบ ความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)



รูปที่ 4 - 35 ความแตกต่างระหว่างค่าความชื้น กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่าตัวประกอบ ความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)

จากรูปที่ 4-34 ถึง รูปที่ 4-35 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นกับเปอร์เซ็นต์ค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) และของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และพีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) พบว่าค่าตัวประกอบความหน่วงกับค่าความชื้น

มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นทำให้ค่าตัวประกอบความหน่วงลดลง โดยจากสมการค่าตัวประกอบความหน่วง (สมการที่ 11) สามารถอธิบายได้ว่าค่าตัวประกอบความหน่วงที่ลดลงนั้นเป็นผลมาจากค่าพีเอช และค่าความชื้นของแต่ละระดับความลึก

4.3.6 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS 1-D ในการอธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)

แบบจำลอง HYDRUS 1-D (Simunek et al., 2008) ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการไหลของน้ำ และการขนส่งของโลหะหนักผ่านโปรไฟล์ของดิน BTCs ของทองแดง และตะกั่ว ถูกนำมาใช้ในการประเมินการดูดซับ (Adsorption coefficient, kd) โดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008) ในการประเมินการดูดซับของไอออนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่แตกต่างกัน

การนำเข้าข้อมูลต่างๆที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง HYDRUS 1-D คือ hydraulic conductivity (K_s), θ_r , θ_s , Genuchten (α และ n) ค่าความหนาแน่น (B_d) และค่าความเข้มข้น (C) เพื่อใช้ให้เหมาะสมกับการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วในคอลัมน์ดิน ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4 - 10 การนำเข้าพารามิเตอร์การเคลื่อนของทองแดง และตะกั่วที่ใช้ในแบบจำลอง HYDRUS 1-D

พารามิเตอร์	ค่า	แหล่งที่มา
Saturated hydraulic conductivity, K_s (cm/hr)	0.41	การศึกษานี้
Residual soil water content, θ_r (-)	0.16	ปีทมา โซติกวิน (2553)
Saturated soil water content, θ_s (-)	0.36	ปีทมา โซติกวิน (2553)
Parameter α in the soil water retention function (-)	0.007	ปีทมา โซติกวิน (2553)
Parameter n in the soil water retention function (-)	2.19	ปีทมา โซติกวิน (2553)
Bulk density, B_d (g/cm^3)	1.64	ปีทมา โซติกวิน (2553)
Concentration of Cu^{2+} , Pb^{2+} , C (mg/L)	10	ได้จากการศึกษา

การทดลองที่สำคัญสำหรับการประเมินการดูดซับ (Adsorption coefficient, kd) ในระบบที่เป็นของแข็งของเหลวการดูดซับโลหะหนักดินมักจะอธิบายโดยใช้วิธีการ linear (Hooda and Alloway, 1998)

ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D เพื่ออธิบายการไหลของน้ำและการดูดซับในดิน ทดลองโดยการนำเข้าข้อมูล Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่วพบว่าไอโซเทอม linear ถูกใช้ในการอธิบายอย่างดีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับในดิน (รูปที่ 4-36 ถึง ที่ 4-47) ที่มีค่า พีเอช เท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน), (รูปที่ 4-48 ถึง รูปที่ 4-55) ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และ

(รูปที่ 4-56 ถึง รูปที่ 4-63) ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) โดยจะเป็นเปรียบเทียบสองแบบจำลองการดูดซับคือ Equilibrium model (Eq) และ Non-equilibrium Two-site model (TSM) ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 4-11

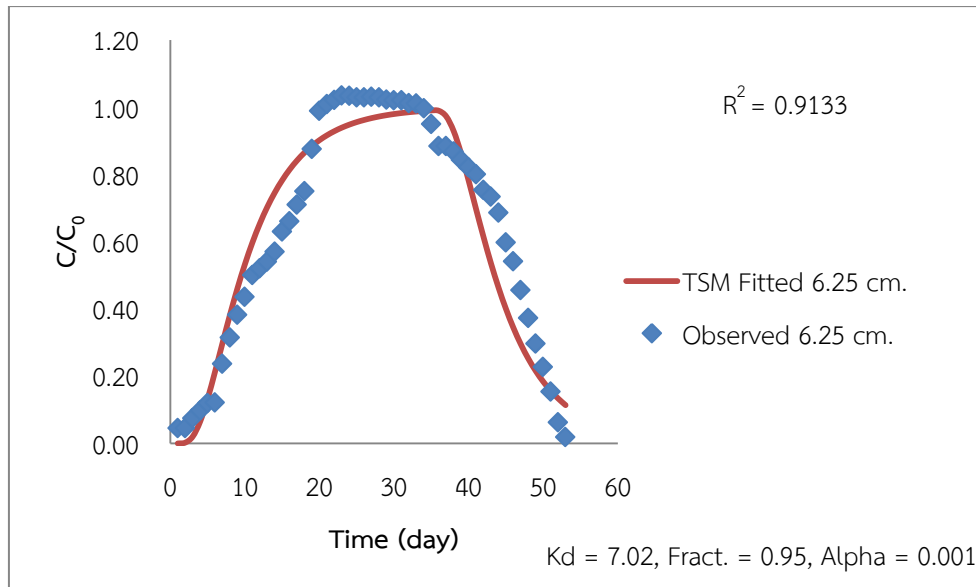
การเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูร้อนในที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 รูปที่ 4-36 ถึงรูปที่ 4-39 และ ในรูปที่ 4-40 ถึง รูปที่ 4-43 แสดงข้อมูล Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่วโดยใช้ HYDRUS-1D ได้แสดงในตารางที่ 4-11 จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ในรูปที่ 4-36 ถึง รูปที่ 4-39 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 7.02, 5.69, 5.23 และ 4.51 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9106-0.9478 สำหรับตะกั่วมีค่าพีเอช เท่ากับ 3 ในรูปที่ 4-40 ถึง รูปที่ 4-43 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 6.71, 3.98, 3.45 และ 3.18 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9023-0.9254



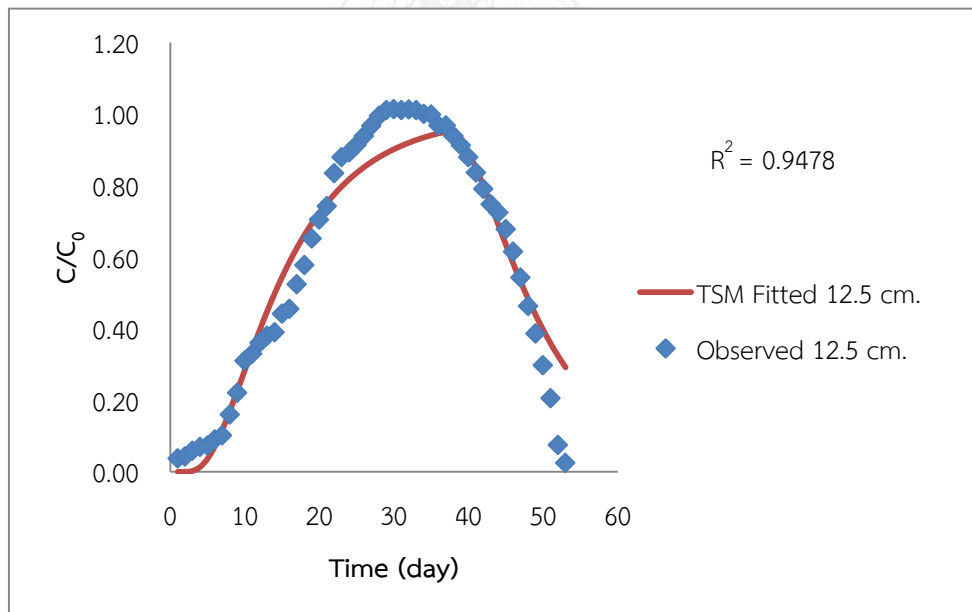
ตารางที่ 4 - 11 ค่า Adsorption coefficient ของคอลัมน์ที่ต่างกันโดยเปรียบเทียบระหว่าง Equilibrium model (Eq) และ Nonequilibrium Two-site model (TSM) ที่ได้จากระบบจำลอง HYDRUS-1D

คอลัมน์	θ_v (m^3/m^3)	ความลึก (cm)	ความเร็วของ การไหล (cm/day)	Two-site model (TSM)						Equilibrium model (Eq)					
				Kd* (mg/g)	Fract.*	Alpha*	R ²	Kd* (mg/g)	R ²	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Pb ²⁺		
พีเอช 3 (คอลัมน์ตุรกี)	0.385	6.25	9.84	7.02	0.95	0.93	0.001	0.002	0.9133	0.9254	5.93	6.77	0.9099	0.9156	
	0.394	12.50	9.84	5.69	0.85	0.95	0.002	0.001	0.9478	0.9186	3.93	4.89	0.9462	0.9022	
	0.413	18.75	9.84	5.23	0.78	0.95	0.001	0.003	0.9179	0.9167	3.85	4.31	0.8894	0.8429	
	0.428	25.00	9.84	4.51	0.88	0.97	0.002	0.005	0.9106	0.9023	3.79	4.29	0.8829	0.8054	
พีเอช 5 (คอลัมน์ตุรกี)	0.385	6.25	9.84	9.41	0.86	0.85	0.005	0.001	0.9024	0.9341	7.45	6.18	0.8705	0.9269	
	0.394	12.50	9.84	5.98	0.89	0.86	0.001	0.001	0.9542	0.9497	5.38	4.47	0.9452	0.9485	
	0.413	18.75	9.84	5.12	0.89	0.88	0.002	0.001	0.9622	0.9222	4.79	4.18	0.9452	0.8577	
	0.428	25.00	9.84	4.97	0.95	0.97	0.003	0.001	0.9321	0.9238	4.43	3.97	0.9292	0.8347	
พีเอช 5 (คอลัมน์ญี่ปุ่น)	0.390	6.25	9.84	6.92	0.97	0.97	0.001	0.001	0.9509	0.9608	6.15	5.56	0.9497	0.9501	
	0.535	12.50	9.84	4.51	0.99	0.99	0.001	0.001	0.9689	0.9768	4.51	3.86	0.9665	0.9757	
	0.556	18.75	9.84	3.58	0.98	0.98	0.001	0.003	0.9439	0.9586	3.63	3.34	0.9294	0.9332	
	0.582	25.00	9.84	3.21	0.99	0.99	0.002	0.001	0.9298	0.9231	3.56	3.13	0.8929	0.9119	

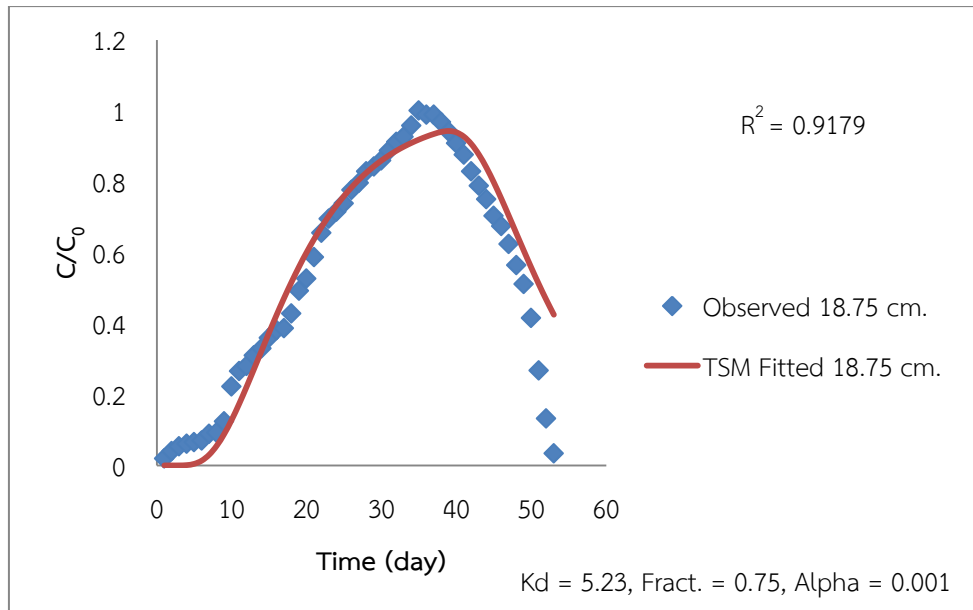
* คีอค่าที่ได้จากการปรับเทียบในแบบจำลอง HYDRUS-1D



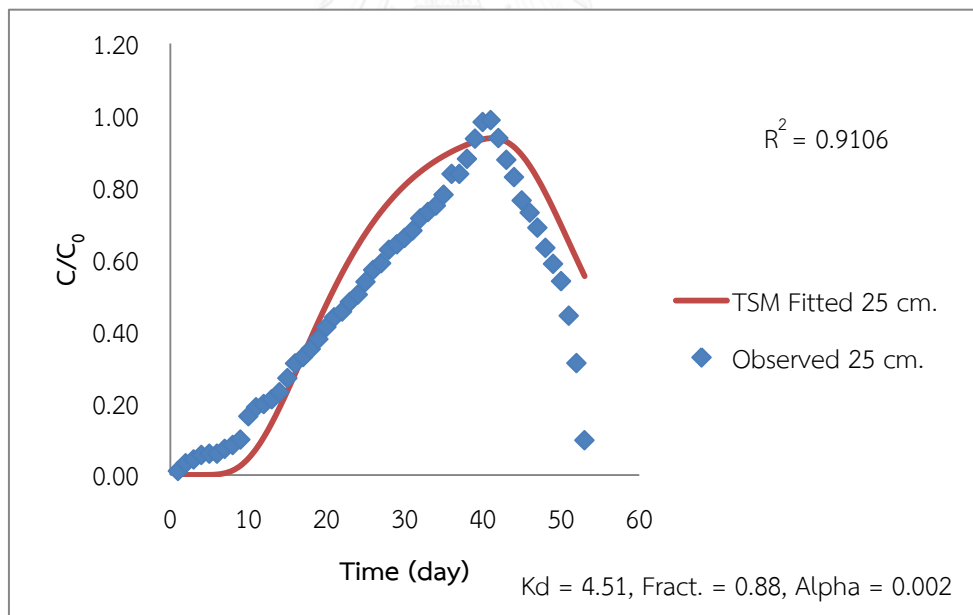
รูปที่ 4 - 37 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดง มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



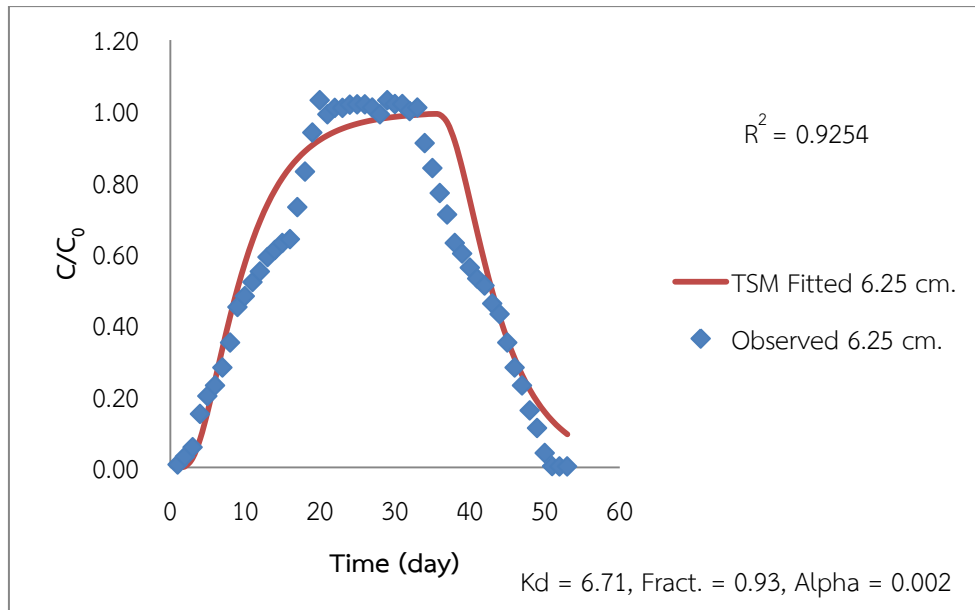
รูปที่ 4 - 38 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดง มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.



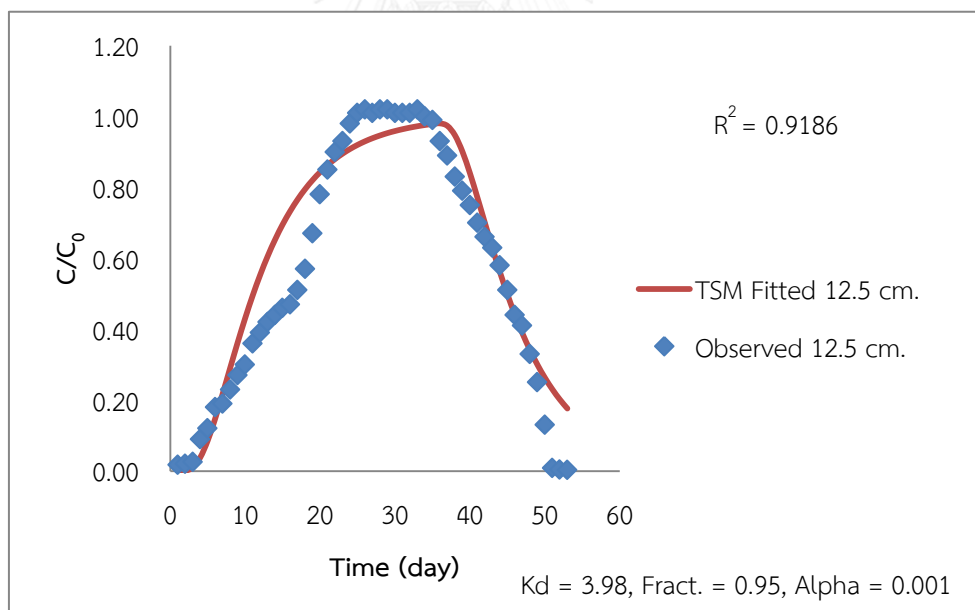
รูปที่ 4 - 39 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.



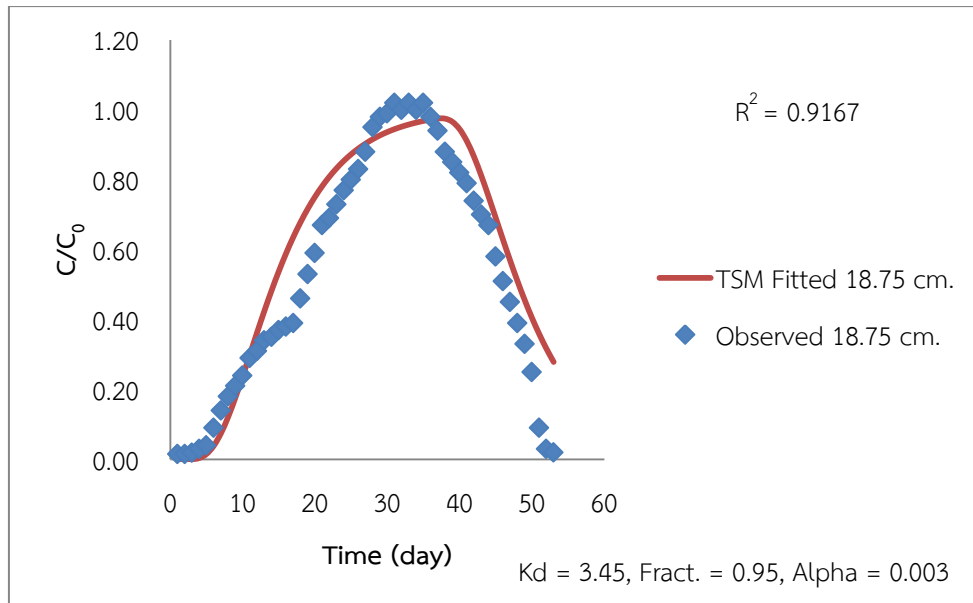
รูปที่ 4 - 40 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 25 ซม.



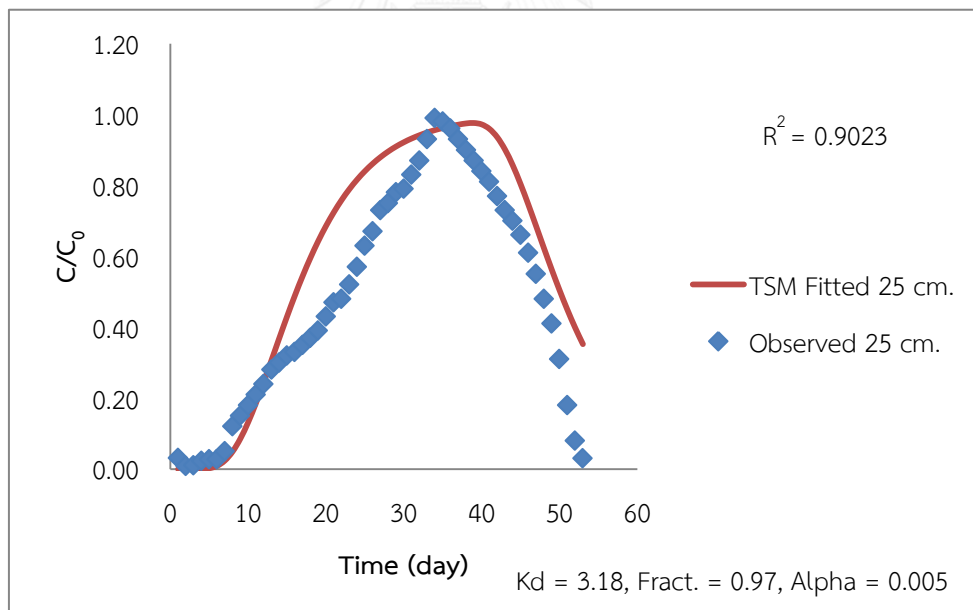
รูปที่ 4 - 41 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



รูปที่ 4 - 42 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.

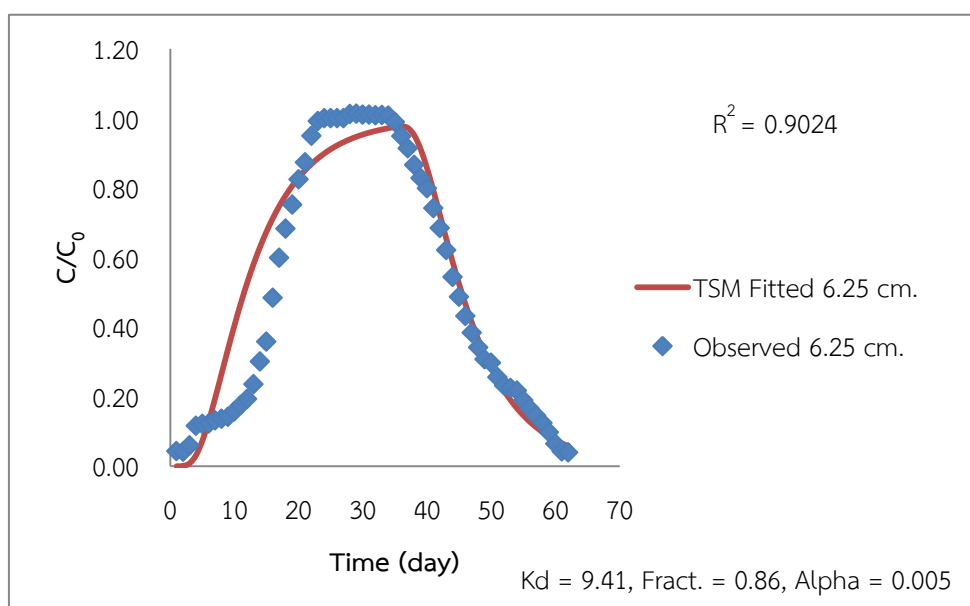


รูปที่ 4 - 43 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.

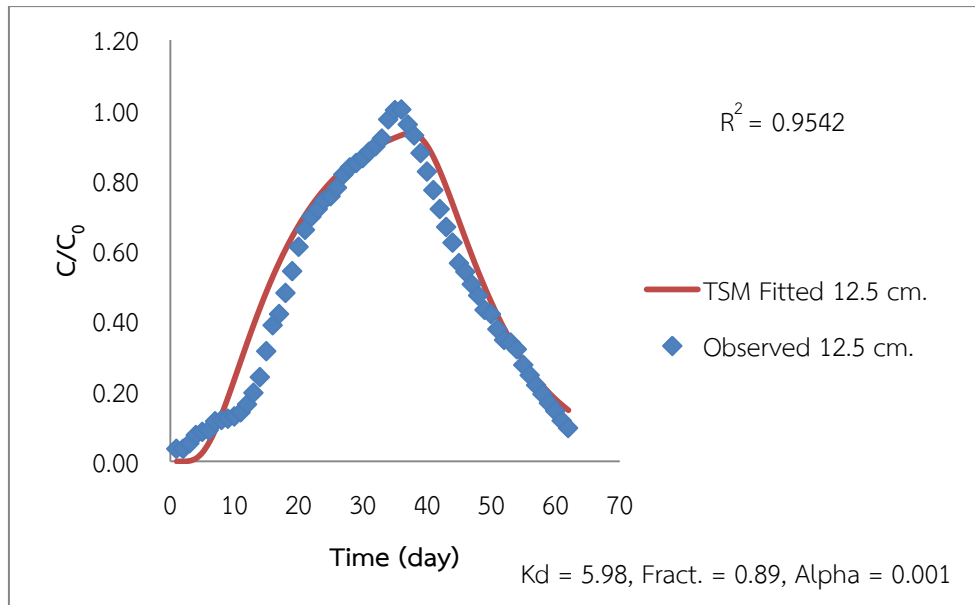


รูปที่ 4 - 44 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่ระดับความลึก 25 ซม.

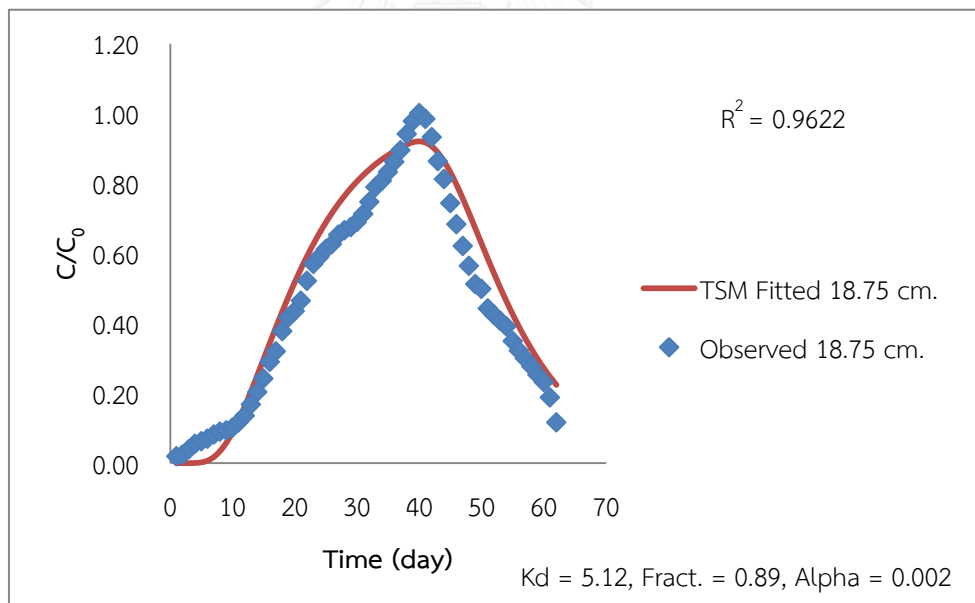
การเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูร้อนในที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 รูปที่ 4-44 ถึง รูปที่ 4-47 และ ในรูปที่ 4-48 ถึง รูปที่ 4-51 แสดงข้อมูล Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว โดยใช้ HYDRUS-1D ค่า Adsorption coefficient ได้แสดงในตารางที่ 4-11 จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดง ที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ใน รูปที่ 4-44 ถึง รูปที่ 4-47 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 9.41, 5.98, 5.12 และ 4.97 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9024-0.9622



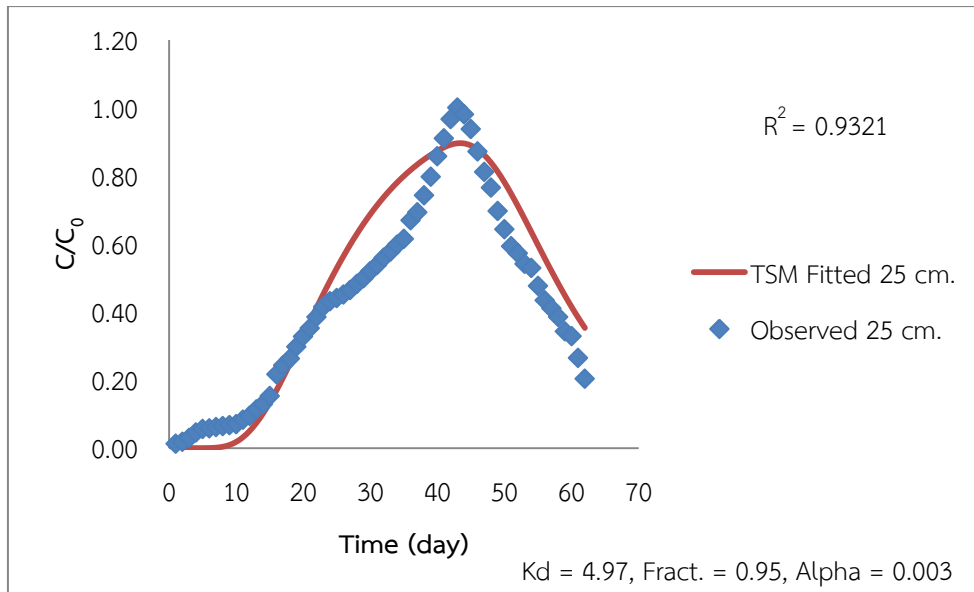
รูปที่ 4 - 45 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



รูปที่ 4 - 46 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.

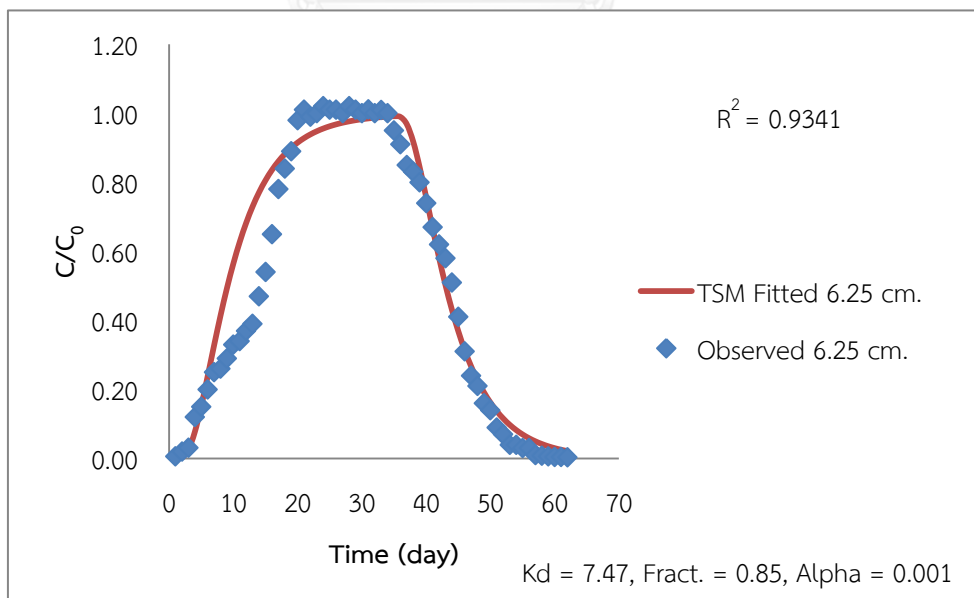


รูปที่ 4 - 47 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.

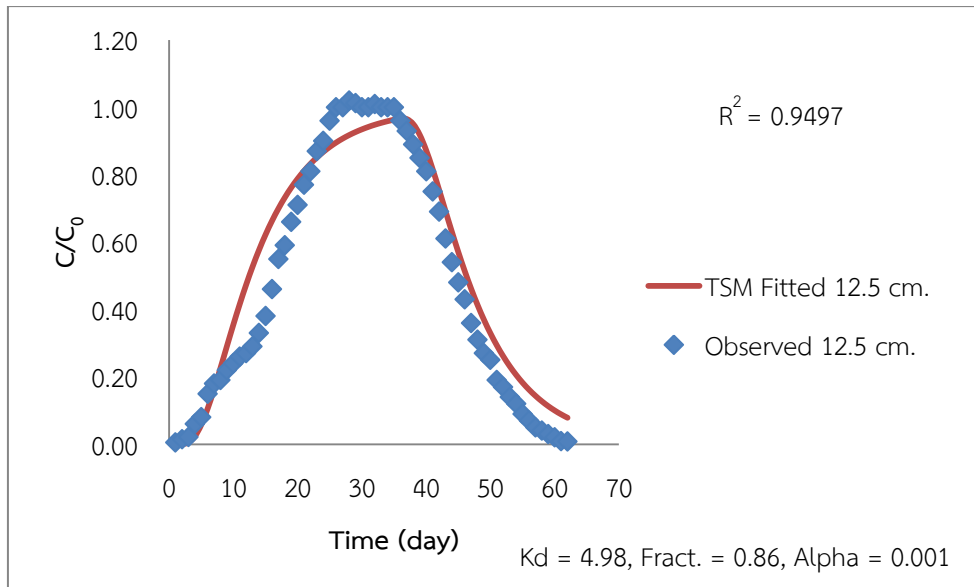


รูปที่ 4 - 48 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 25 ซม.

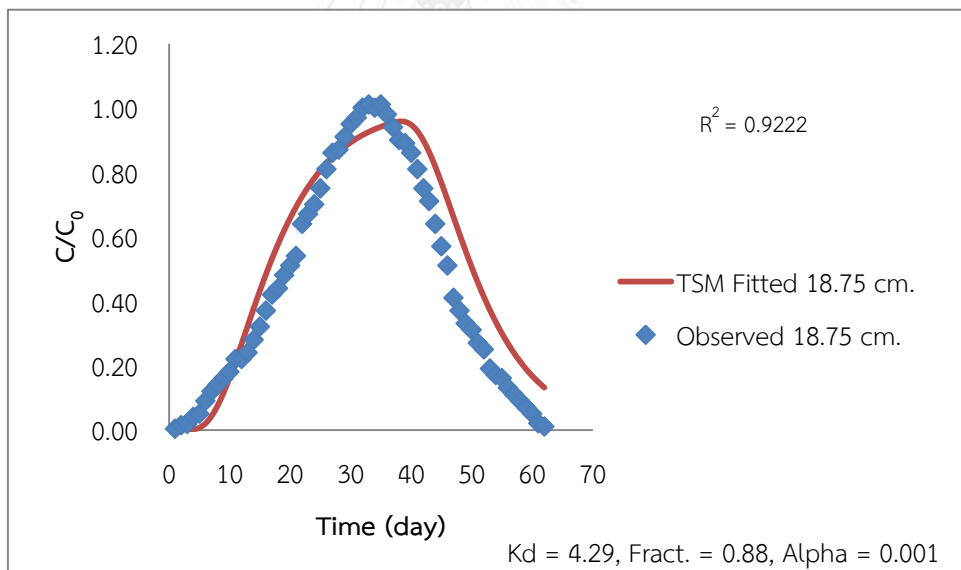
สำหรับตะกั่ว มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ในรูปที่ 4-48 ถึง รูปที่ 4-51 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 7.47, 4.98, 4.29 และ 3.56 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9238-0.9497



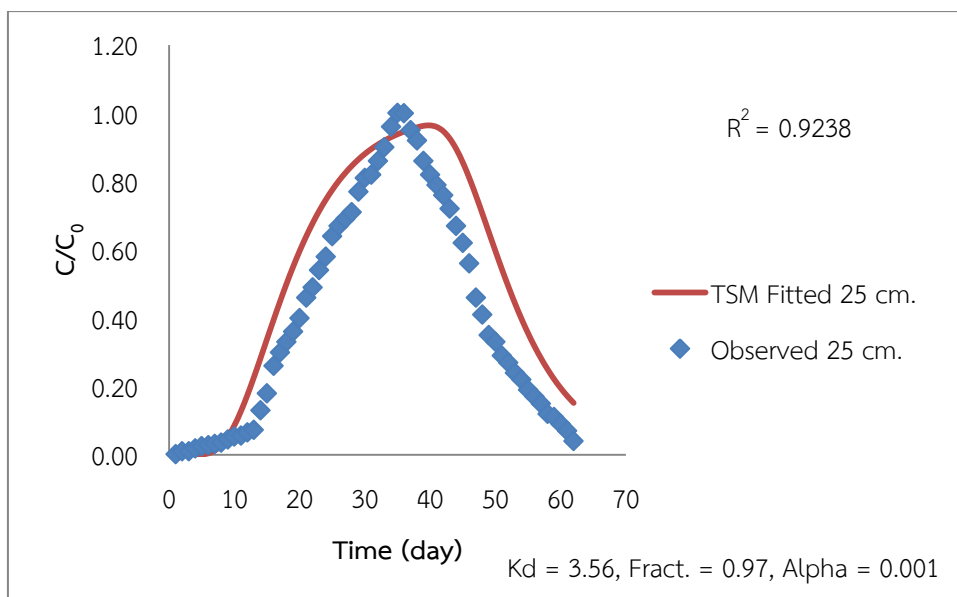
รูปที่ 4 - 49 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



รูปที่ 4 - 50 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.



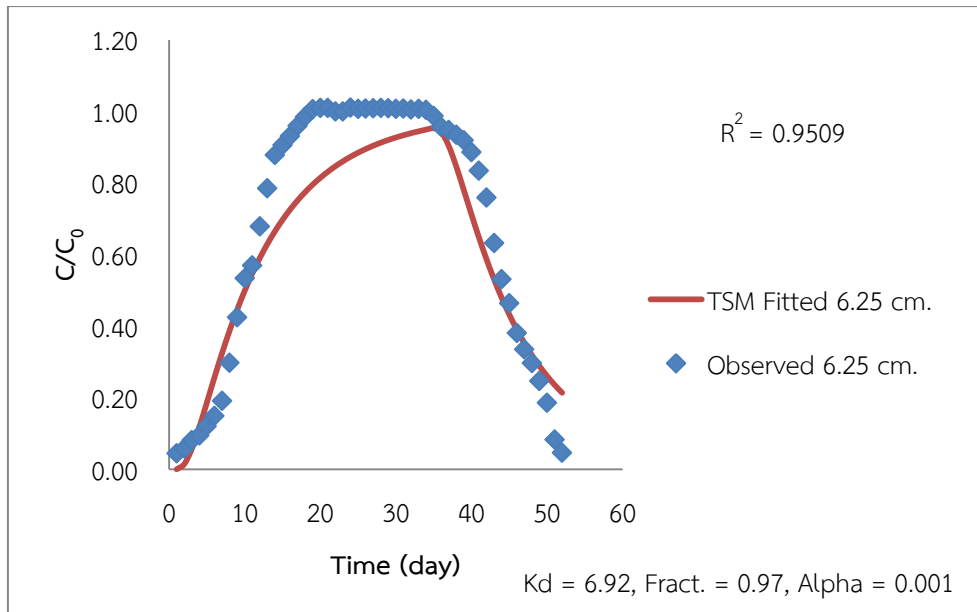
รูปที่ 4 - 51 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.



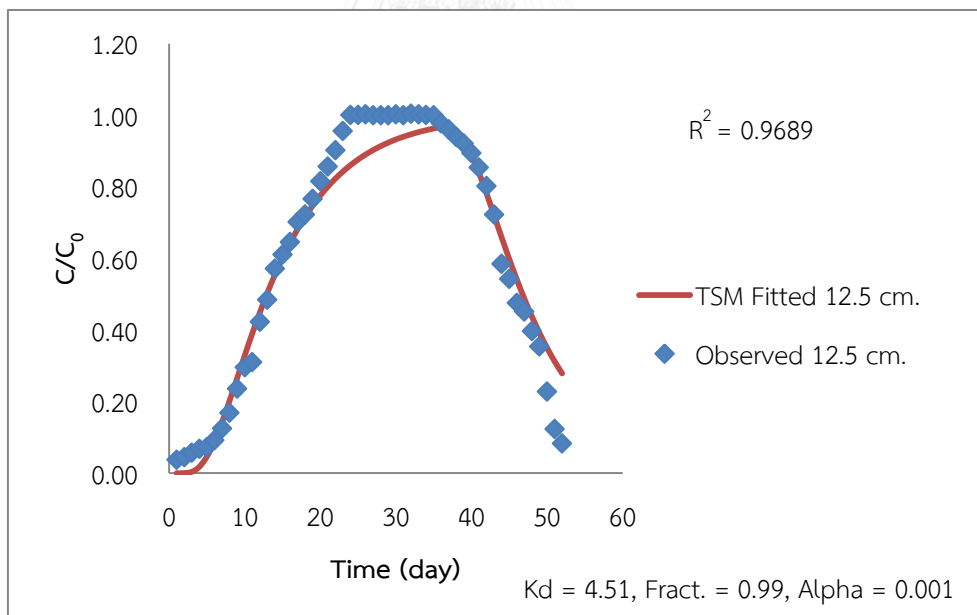
รูปที่ 4 - 52 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่ระดับความลึก 25 ซม.

การเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูฝนในที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 รูปที่ 4-52 ถึง รูปที่ 4-55 และ ในรูปที่ 4-56 ถึง รูปที่ 4-59 แสดงข้อมูล Breakthrough curves ของทองแดง และตะกั่ว โดยใช้ HYDRUS-1D ค่า Adsorption coefficient ได้แสดงในตารางที่ 4-11 จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดงที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ใน รูปที่ 4-52 ถึง รูปที่ 4-55 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 6.92, 4.51, 3.58 และ 3.21 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9298-0.9689

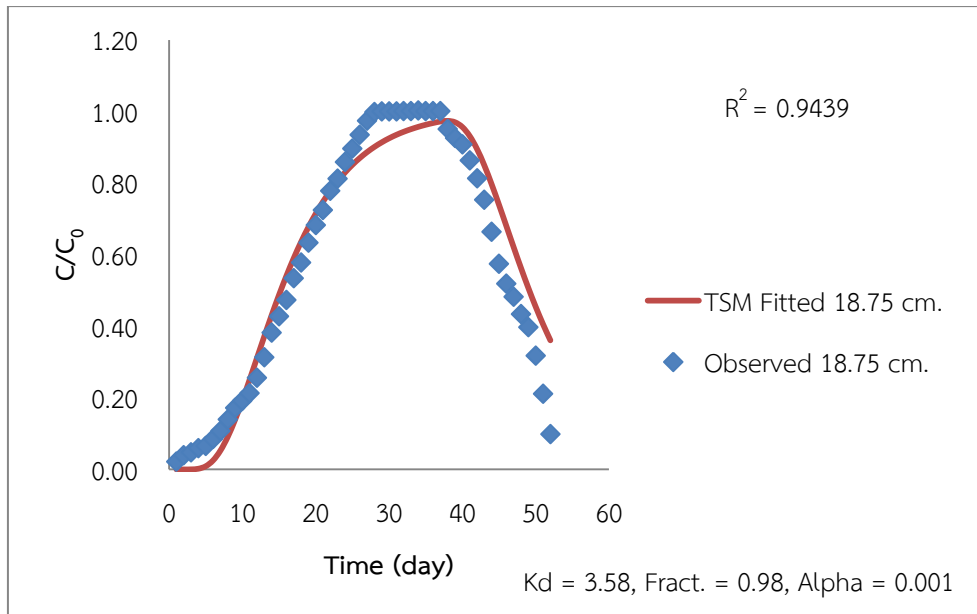
จากกราฟทั้งหมดจะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองข้อมูล Breakthrough curves และผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D นั้นใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง HYDRUS-1D มีความน่าเชื่อถือในการประเมินการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Chotpantararat et al., 2011) ได้ศึกษาผลกระทบจากสภาพความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกัน คือ พีเอช 4 และ 5 ในการดูดซับและการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Pb^{2+} Mn^{2+} Zn^{2+} และ Ni^{2+}) โดยใช้การทดลองคอลัมน์และแบบจำลอง HYDRUS-1D สำหรับการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวความลึกระหว่าง 0 และ 2 เมตรจากผิวดิน การทดลองแสดงให้เห็นว่า Pb^{2+} มีการดูดซับสูงสุด และโลหะทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นประมาณ 30% - 44% HYDRUS-1D ตามรูปแบบ two-site model (TSM) อธิบาย BTCs โลหะหนักได้ดี



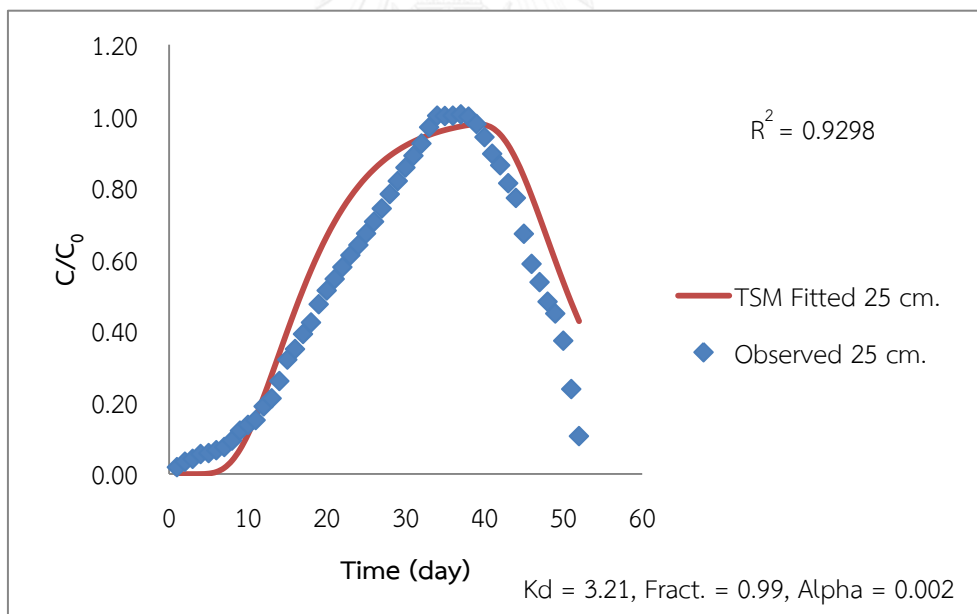
รูปที่ 4 - 53 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ถั่วฝู้น) ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



รูปที่ 4 - 54 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ถั่วฝู้น) ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.

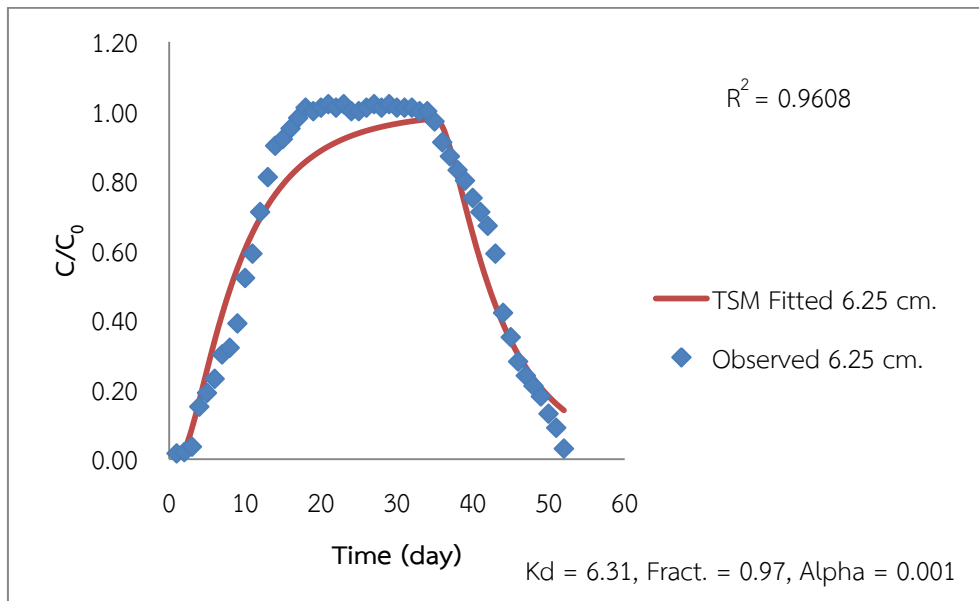


รูปที่ 4 - 55 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ถั่วฝู้น) ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.

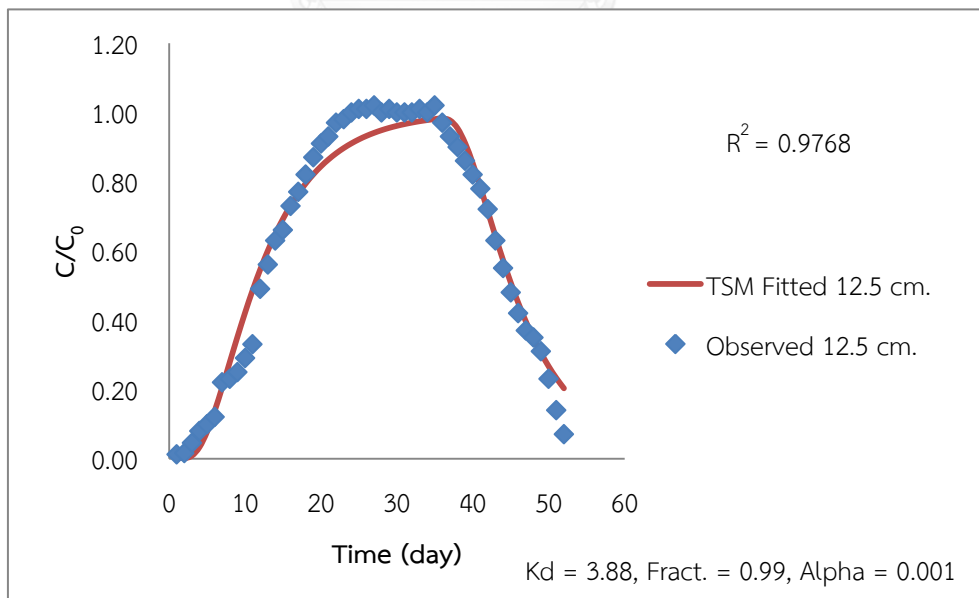


รูปที่ 4 - 56 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของทองแดงมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ถั่วฝู้น) ที่ระดับความลึก 25 ซม.

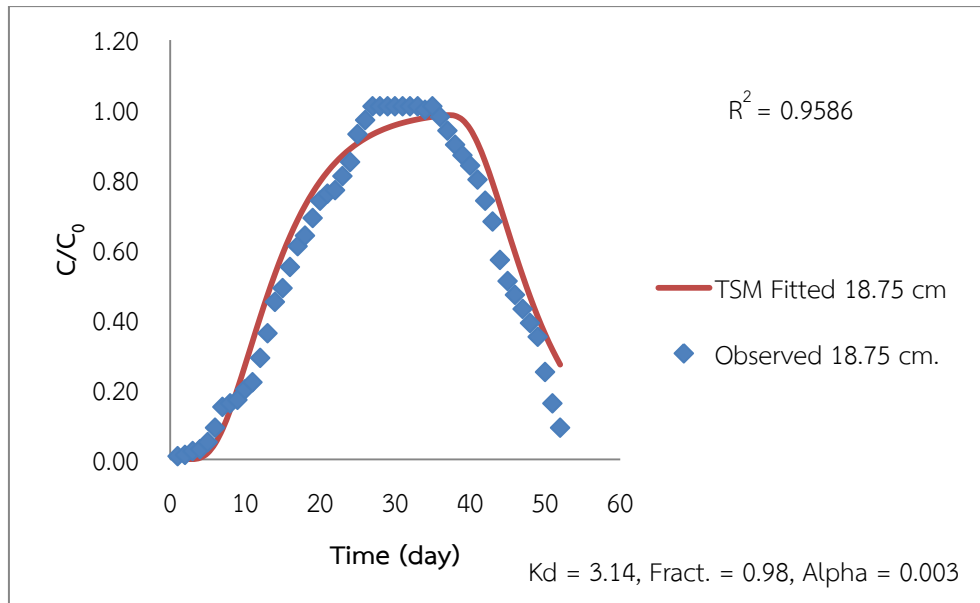
สำหรับตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ในรูปที่ 4-56 ถึง รูปที่ 4-59 ค่า Adsorption coefficient ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีค่า 6.31, 3.88, 3.14 และ 3.07 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9231-0.9768



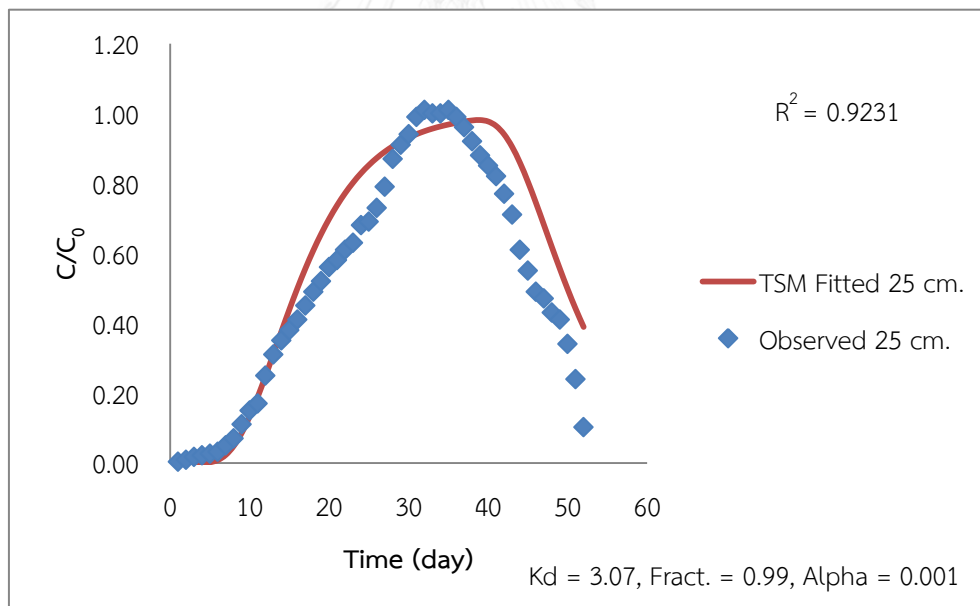
รูปที่ 4 - 57 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ที่ระดับความลึก 6.25 ซม.



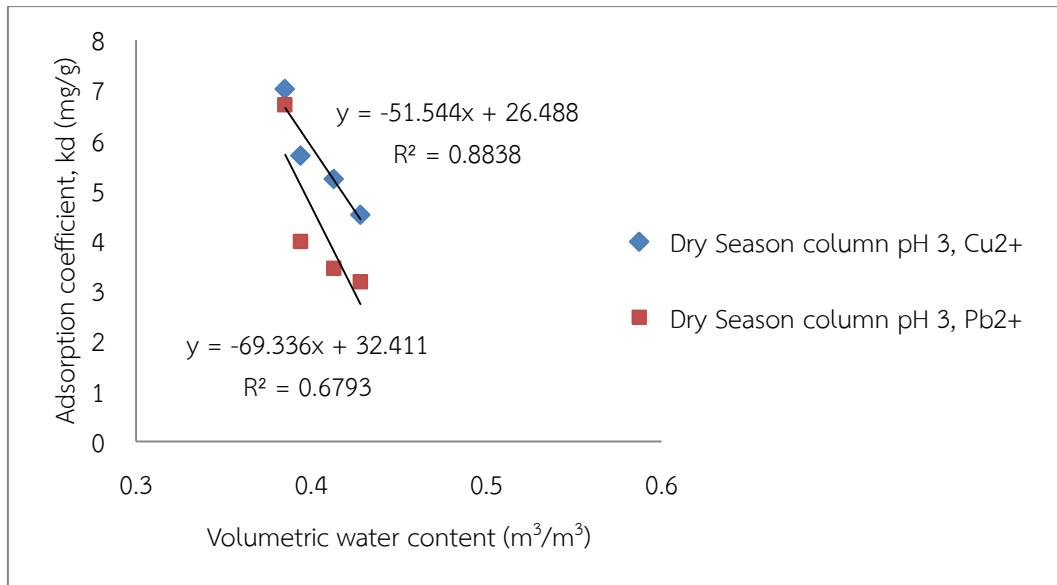
รูปที่ 4 - 58 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ที่ระดับความลึก 12.5 ซม.



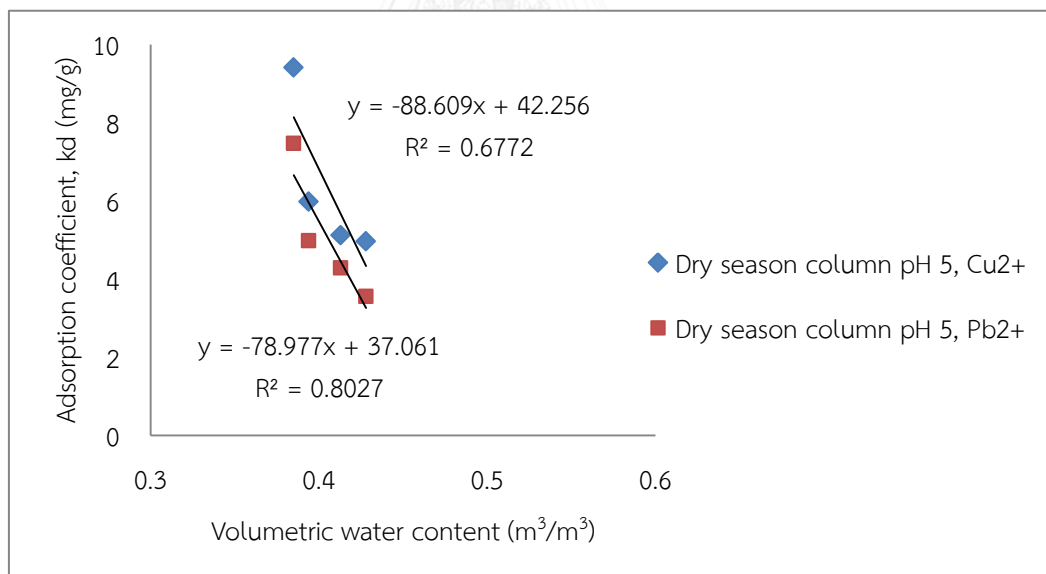
รูปที่ 4 - 59 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ที่ระดับความลึก 18.75 ซม.



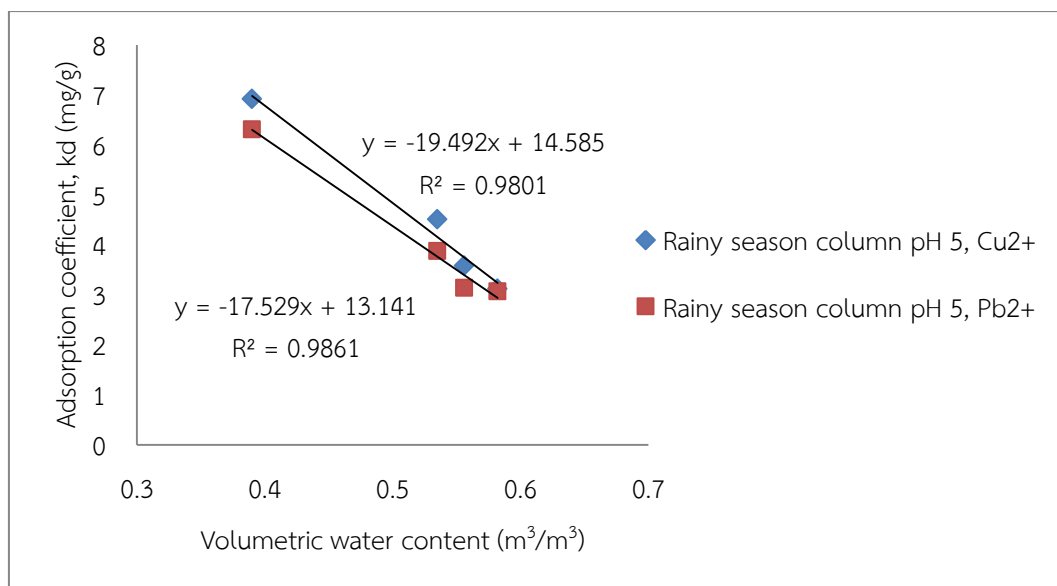
รูปที่ 4 - 60 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D อธิบายค่าที่ได้จากการทดลองของ ตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ที่ระดับความลึก 25 ซม.



รูปที่ 4 - 61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน)



รูปที่ 4 - 62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน)



รูปที่ 4 - 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adsorption coefficient กับค่าความชื้นของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่วที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)

จากตารางที่ 4-11 และจากรูปที่ 4-60 ถึง รูปที่ 4-62 พบว่าค่า Adsorption coefficient (kd) กับค่าความชื้นของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และค่าพีเอช เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) ที่ระดับความลึก 6.25, 12.5, 18.25 และ 25 ซม. มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ และค่าความชื้นในดิน พบว่าค่า Kd จะลดลงตามค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Chia M. Chang, 2001) ที่ได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง และแคดเมียมในคอลัมน์ดินลูกรังที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 ที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40 และ 50 ซม. พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (kd) ของทองแดง และแคดเมียมจะลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น คือทองแดงค่าการดูดซับลดลง 9.63, 8.10, 6.61, 6.31 และ 5.33 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ส่วนแคดเมียม ค่าการดูดซับลดลง 5.04, 4.11, 3.09, 2.92 และ 2.71 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นปัจจัยมาจากความชื้นในดินที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในดิน

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (II) และตะกั่ว (II) ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

ดินในพื้นที่เกษตรกรรมพบว่าส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ประกอบด้วยดินทราย 70.8% ดินทรายแป้ง 25.2% ดินเหนียว 4% มีค่าพีเอชมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.3

5.2 สรุปผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมี

พบว่าปุ๋ยสูตร 1 (15-15-15) มีทองแดงมากที่สุดคือ 25 มก./กก. ส่วนปุ๋ยสูตร 2 (15-15-15) และ ปุ๋ยสูตร (16-8-8) มีตะกั่วมากที่สุดคือ 25 มก./กก. ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าโลหะหนักมีโอกาสปนเปื้อนในน้ำบาดาล

5.3 สรุปผลการทดลองคอลัมน์และการสร้างแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUD-1D เพื่ออธิบายการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโบรไมด์ในคอลัมน์ฤดูร้อน และคอลัมน์ฤดูฝน Breakthrough curves ของโบรไมด์ทั้งหมดมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำแบบสมมาตร แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวที่สมดุลที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ คอลัมน์ฤดูร้อน ค่า dispersivity มีค่า R^2 0.9922-0.9952 สำหรับคอลัมน์ฤดูฝนค่า dispersivity มีค่า R^2 0.9930-0.9951

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับค่า dispersivity พบว่าค่า dispersivity ในคอลัมน์ฤดูร้อนสูงกว่าคอลัมน์ฤดูฝน แสดงให้เห็นว่าดินส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยช่องว่างในดินและเป็นผลทำให้มีปัจจัยคดเคี้ยวในดินสูง (tortuosity) ดังนั้นระยะทางในการเคลื่อนที่มีมากขึ้นทำให้มีค่า dispersivity สูง และค่า dispersivity ลดลงตามปริมาณน้ำปริมาตรเพิ่มขึ้น

5.4 สรุปผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

5.4.1 การเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และพีเอชเท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)

ที่พีเอช 3 และ 5 ในคอลัมน์ฤดูร้อน ตะกั่วจะเคลื่อนตัวได้เร็วกว่าทองแดงในทุกๆระดับความลึก สำหรับตัวอย่างในคอลัมน์ฤดูฝนที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ตะกั่วจะเคลื่อนตัวได้เร็วกว่าทองแดงในทุกๆระดับความลึกเช่นเดียวกัน และเมื่อนำเวลาในการเดินทางของทองแดง และตะกั่ว มาคำนวณหา ค่าตัวประกอบความหน่วง พบว่าทองแดงมีค่าตัวประกอบความหน่วงสูงกว่าตะกั่วจึงทำให้ดูดซับในดินได้มากกว่าและเคลื่อนตัวออกมาช้ากว่าตะกั่ว

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วงของคอลัมน์ทองแดง และตะกั่วที่เคลื่อนตัวผ่านดิน ร่วนปนทรายภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3, 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน) พบว่าค่าความชื้นมีผลทำให้ค่าตัวประกอบความหน่วงลดลง และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีบทบาทสำคัญในการชะละลายของโลหะหนัก โดยมีค่าพีเอชเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นค่าตัวประกอบความหน่วงเป็นผลมาจากค่าพีเอช และค่าความชื้นของแต่ละความลึก และปริมาณการเคลื่อนตัวของทองแดงและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ โดยหากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมากจะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้าและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การดูดซับมีค่าน้อยโลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็ว และจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก

5.4.2 สรุปผลการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D ในการอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนตัวของทองแดง (Cu^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ผ่านตัวกลางร่วนภายใต้สภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 3 และ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ (คอลัมน์ฤดูร้อน) และภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ในคอลัมน์ที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูง (คอลัมน์ฤดูฝน)

จากผลการปรับเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดง และตะกั่ว แบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

1) ผลการปรับเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดง และตะกั่ว ที่มีค่า pH เท่ากับ 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

พบว่าค่า Adsorption coefficient ของทองแดง ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D มีค่า 7.02, 45.69, 5.23 และ 4.51 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9106-0.9478 ส่วนตะกั่ว มีค่า 6.71, 3.98, 3.45 และ 3.18 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9023-0.9254

2) ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดง และตะกั่วที่มีค่า pH เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

พบว่าค่า Adsorption coefficient ของทองแดง ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D มีค่า 9.41, 5.98, 5.12 และ 4.97 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9024-0.9622 ส่วน ตะกั่ว มีค่า 7.47, 4.98, 4.29 และ 3.56 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9238-0.9497

3) ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D ทองแดง และตะกั่วที่มีค่า pH เท่ากับ 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)

พบว่าค่า Adsorption coefficient ของทองแดง ได้มาจากแบบจำลอง HYDRUS-1D มีค่า 6.92, 4.51, 3.58 และ 3.21 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9298-0.9689 ส่วน ตะกั่ว มีค่า 6.31, 3.88, 3.14 และ 3.07 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9231-0.9768

จากกราฟจะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองข้อมูล Breakthrough curves และผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง HYDRUS-1D นั้นใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง HYDRUS-1D มีความน่าเชื่อถือในการประเมินการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (K_d) กับค่าความชื้นของการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ในคอลัมน์ฤดูร้อน ที่มีค่า pH เท่ากับ 3 และ 5 และ ในคอลัมน์ฤดูฝน ที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 5 จะพบว่าการเคลื่อนตัวของทองแดง และตะกั่ว ในดินที่ระดับความลึกต่างๆมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ และค่าความชื้นในดิน กล่าวคือเมื่อดินมีระดับความลึกเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นในดินจะสูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับในดินจะลดลง

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำในห้องปฏิบัติการ หากมีการตรวจวัดจริงในภาคสนามก็เป็นเรื่องที่มีความสำคัญ และต้องมีการศึกษากันต่อไปในอนาคต เพื่อนำมาช่วยในการอธิบายการทดลองให้ดีขึ้น เช่นการนำปัจจัยการปลูกพืชมาศึกษาในคอลัมน์เพิ่มเติมในอนาคตได้

2. หากนำข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลความชื้น ข้อมูลการตกของฝน ข้อมูลการระเหยในพื้นที่จริงมาใช้ในแบบจำลองอื่นเพิ่มเติมก็น่าจะช่วยในการป้องกัน และคาดการณ์ไม่ให้มลสารลงสู่ น้ำบาดาลได้ในอนาคต ซึ่งอาจจะทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

รายการอ้างอิง





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองคอลลิชันเทอร์เซอร์ คอลลิชันฤดูร้อน และคอลลิชันฤดูฝน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการทดลองเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูปทรงระหว่างคอลัมน์ที่เป็นตัวแทนในฤดูร้อน

ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	2	0.0065	0.003	0.0003	0.0043
2	4	0.0036	0.002	0.0002	0.0044
3	6	0.2035	0.0019	0.001	0.0046
4	8	0.5449	0.0021	0.0001	0.0049
5	10	0.7852	0.1021	0.0001	0.0055
6	12	0.9141	0.202	0.01	0.005
7	14	0.9644	0.4069	0.04	0.0049
8	16	0.9748	0.602	0.011	0.0471
9	18	0.9855	0.7021	0.033	0.0552
10	20	0.9996	0.8019	0.3914	0.0982
11	22	0.999	0.9019	0.5017	0.2173
12	24	0.998	0.9021	0.6015	0.3882
13	25	0.999	0.903	0.6065	0.4062
14	26	0.961	0.92	0.7175	0.5004
15	27	0.969	0.959	0.758	0.5035
16	28	0.971	0.979	0.877	0.5066
17	29	0.978	0.988	0.885	0.507
18	30	0.979	0.999	0.897	0.6009
19	31	0.982	0.998	0.899	0.6077
20	32	0.987	0.997	0.928	0.6316
21	33	0.989	0.998	0.921	0.725
22	34	0.99	0.997	0.949	0.755
23	35	0.995	0.998	0.937	0.787
24	36	0.995	0.999	0.977	0.809
25	37	0.996	0.99	0.982	0.875
26	38	0.996	0.991	0.987	0.884
27	39	0.997	0.995	0.998	0.889
28	40	0.998	0.994	0.997	0.892
29	41	0.998	0.996	0.994	0.975
30	42	0.998	0.992	0.995	0.987
31	43	0.999	0.996	0.991	0.988
32	44	0.999	0.999	1	0.988

ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	45	1	0.998	1	0.99
34	46	0.997	1	0.999	0.994
35	47	0.998	0.997	0.995	0.995
36	48	0.998	0.999	0.998	0.994
37	49	0.996	0.996	0.999	0.995
38	50	1	0.999	1	0.994
39	51	0.999	0.997	0.997	0.997
40	52	0.997	0.997	1	0.997
41	53	0.998	0.996	0.999	0.999
42	54	0.997	0.999	0.997	0.998
43	55	0.999	0.998	0.999	0.999
44	56	1	0.999	0.997	0.997
45	57	0.997	1	0.999	0.997
46	58	0.998	0.998	0.997	0.998
47	59	0.997	0.999	0.998	0.999
48	60	0.999	0.997	0.997	0.997
49	61	0.998	0.998	0.999	0.997
50	62	0.991	0.997	0.997	0.995
51	63	0.994	0.998	0.998	0.997
52	64	0.995	0.997	0.998	0.997
53	65	0.998	0.996	1	0.997
54	66	0.991	1	1	0.999
55	67	0.997	0.999	0.996	0.998
56	68	0.999	0.999	1	0.998
57	69	1.022	0.998	1	0.997
58	70	0.997	1	0.999	0.999
59	71	0.998	0.998	0.999	0.997
60	72	0.997	0.999	0.998	0.999
61	73	0.998	0.997	0.998	0.997
62	74	0.997	0.998	0.997	0.999
63	75	0.999	1.01	0.999	1
64	76	0.997	0.998	0.997	0.998
65	77	0.999	0.999	1	1.02
66	78	0.998	1	0.999	1

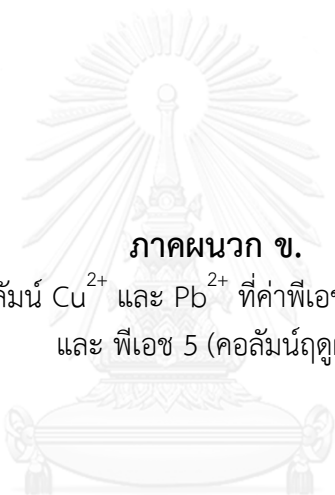
ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	79	0.997	0.997	0.997	0.998
68	80	0.999	0.999	0.998	0.999
69	81	0.998	0.998	0.997	0.999
70	82	0.998	0.998	1	0.997
71	83	0.999	1	1	0.998
72	84	0.998	0.998	0.999	0.999
73	85	0.997	0.998	0.997	0.997
74	86	0.999	0.997	0.998	0.998
75	87	0.998	0.998	1	0.997
76	88	0.999	0.997	0.997	0.999
77	89	0.998	0.999	0.997	0.997
78	90	0.999	0.999	0.998	0.998
79	91	0.997	0.998	0.998	0.998
80	92	0.999	1	0.997	0.999
81	93	0.997	0.998	0.997	0.998
82	94	0.998	0.997	0.999	0.998
83	95	0.997	0.999	0.998	0.999
84	96	0.999	0.998	0.999	0.998
85	98	0.994	1	0.997	0.999
86	100	0.994	0.999	0.998	0.999
87	102	0.894	0.998	0.998	0.999
88	104	0.382	0.993	0.998	0.998
89	106	0.272	0.892	0.998	0.998
90	108	0.098	0.746	0.977	0.999
91	110	0.093	0.613	0.915	0.999
92	112	0.065	0.463	0.821	0.998
93	114	0.046	0.319	0.714	0.938
94	116	0.073	0.118	0.562	0.889
95	118	0.027	0.017	0.449	0.773
96	120	0.0066	0.064	0.332	0.711
97	126	0.0058	0.005	0.111	0.347
98	132	0.0055	0.0048	0.017	0.131
99	138	0.0054	0.0039	0.013	0.004
100	144	0.0054	0.0029	0.0021	0.0045

ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการทดลองเทอร์เซอร์ผ่านตัวกลางรูปทรงระหว่างคอลัมน์ที่เป็นตัวแทนในฤดูร้อน

ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	2	0.0057	0.0042	0.0025	0.0075
2	4	0.0165	0.0078	0.0034	0.0079
3	6	0.3143	0.0075	0.0047	0.0087
4	8	0.7097	0.0148	0.0045	0.0086
5	10	0.9187	0.1021	0.0187	0.0078
6	12	0.9938	0.2772	0.0123	0.0075
7	14	0.995	0.4432	0.1144	0.0076
8	16	0.997	0.6987	0.2472	0.0069
9	18	0.998	0.8431	0.3145	0.0081
10	20	0.998	0.9456	0.4236	0.0083
11	22	0.999	0.9448	0.5987	0.2085
12	24	0.999	0.9561	0.7232	0.2985
13	25	0.999	0.9723	0.8549	0.4389
14	26	0.999	0.9815	0.9731	0.5091
15	27	0.998	0.9976	0.991	0.5282
16	28	0.998	0.9984	0.997	0.6379
17	29	0.999	0.999	0.998	0.7083
18	30	0.999	0.998	0.998	0.7672
19	31	0.999	0.998	0.999	0.8075
20	32	0.998	0.998	0.998	0.8383
21	33	0.998	0.999	0.997	0.8786
22	34	0.999	0.998	0.999	0.8989
23	35	0.998	0.997	1	0.9091
24	36	0.998	0.997	1	0.9186
25	37	0.999	0.998	0.998	0.9565
26	38	0.999	0.998	0.999	0.9678
27	39	1	0.999	0.997	0.9784
28	40	0.998	0.997	0.998	0.9822
29	41	0.999	0.999	0.996	0.9978
30	42	0.998	0.998	0.998	0.998
31	43	0.997	0.998	0.998	0.998
32	44	0.997	0.997	1	0.998

ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	45	0.998	0.999	0.998	0.998
34	46	1	0.999	0.999	0.998
35	47	0.999	1	0.996	0.999
36	48	0.998	1	0.997	0.998
37	49	0.998	0.998	0.999	0.999
38	50	1	1	0.998	0.998
39	51	0.999	0.998	1	0.998
40	52	0.997	0.999	1	0.999
41	53	0.998	0.998	0.999	0.998
42	54	0.999	0.999	1	0.998
43	55	0.999	1	0.998	0.998
44	56	1	1	0.998	0.998
45	57	0.996	0.998	1	0.998
46	58	0.998	1	0.997	0.998
47	59	0.998	0.999	0.995	0.999
48	60	0.999	0.998	0.999	0.999
49	61	0.998	0.997	0.998	0.998
50	62	0.997	0.999	0.999	0.998
51	63	0.999	1	0.998	0.999
52	64	0.999	0.998	0.997	0.998
53	65	0.998	0.999	0.999	0.998
54	66	0.998	0.999	1	0.998
55	67	0.999	1	1	0.997
56	68	0.999	1	0.998	0.999
57	69	0.998	0.998	0.998	1
58	70	1	0.997	0.999	0.999
59	71	1	0.999	1	1
60	72	0.999	0.998	0.999	0.998
61	73	0.998	1	0.997	0.998
62	74	0.999	0.997	0.998	0.999
63	75	0.999	0.999	0.999	0.999
64	76	1	0.998	0.998	0.998
65	77	0.999	0.999	1	0.997
66	78	0.998	0.998	1	0.998

ตัวอย่างที่	เวลา (ชม.)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	79	0.998	0.999	0.999	0.999
68	80	0.999	1	0.997	0.998
69	81	0.999	1	0.998	1
70	82	0.998	0.998	0.999	0.999
71	83	1	0.999	1	0.998
72	84	0.998	0.998	0.999	0.999
73	85	0.999	0.998	0.998	0.999
74	86	0.999	0.999	0.999	1
75	87	0.982	0.997	1	1
76	88	0.966	0.998	1	0.999
77	89	0.838	1	1	0.999
78	90	0.645	0.998	0.999	0.998
79	91	0.513	0.952	0.998	0.997
80	92	0.454	0.923	1	0.997
81	93	0.328	0.9054	0.999	0.995
82	94	0.245	0.812	0.997	0.991
83	95	0.097	0.754	0.997	0.985
84	96	0.07	0.578	0.981	0.963
85	98	0.019	0.323	0.9512	0.947
86	100	0.006	0.289	0.9132	0.917
87	102	0.004	0.217	0.8091	0.898
88	104	0.003	0.0965	0.523	0.852
89	106	0.002	0.0634	0.4118	0.827
90	108	0.002	0.056	0.225	0.712
91	110	0.008	0.048	0.109	0.542
92	112	0.008	0.0421	0.087	0.328
93	114	0.0032	0.0098	0.0095	0.201
94	116	0.0049	0.0086	0.0098	0.093
95	118	0.0041	0.0071	0.0071	0.012
96	120	0.0015	0.0067	0.0049	0.0097



ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดลองคอัลมัน์ Cu^{2+} และ Pb^{2+} ที่ค่าพีเอช 3 ,พีเอช 5 (คอัลมัน์ถูคูร้อน)
และ พีเอช 5 (คอัลมัน์ถูคูฝน)

ตารางที่ 3 ผลที่ได้จากการทดลองของ Cu^{2+} ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C_0 (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.045	0.037	0.019	0.011
2	2	0.04	0.031	0.032	0.023
3	3	0.039	0.0306	0.026	0.026
4	4	0.041	0.0283	0.0197	0.019
5	5	0.045	0.043	0.04	0.0321
6	6	0.071	0.049	0.042	0.038
7	7	0.069	0.053	0.049	0.0379
8	8	0.073	0.055	0.051	0.04
9	9	0.076	0.059	0.053	0.042
10	10	0.075	0.059	0.054	0.0432
11	11	0.077	0.061	0.055	0.045
12	12	0.076	0.063	0.056	0.047
13	13	0.092	0.069	0.059	0.056
14	14	0.097	0.07	0.059	0.055
15	15	0.098	0.07	0.061	0.055
16	16	0.099	0.071	0.062	0.057
17	17	0.1	0.071	0.062	0.058
18	18	0.1	0.072	0.062	0.058
19	19	0.11	0.074	0.064	0.057
20	20	0.12	0.073	0.065	0.059
21	21	0.12	0.074	0.067	0.059
22	22	0.13	0.075	0.069	0.06
23	23	0.12	0.079	0.07	0.06
24	24	0.12	0.079	0.069	0.061
25	25	0.121	0.09	0.07	0.059
26	26	0.121	0.09	0.072	0.062
27	27	0.13	0.099	0.083	0.064
28	28	0.13	0.099	0.085	0.063
29	29	0.165	0.11	0.085	0.064
30	30	0.237	0.102	0.089	0.072
31	31	0.254	0.099	0.089	0.074
32	32	0.272	0.105	0.09	0.079

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	33	0.309	0.11	0.09	0.079
34	34	0.311	0.121	0.09	0.081
35	35	0.310	0.124	0.08	0.082
36	36	0.315	0.162	0.092	0.083
37	37	0.318	0.187	0.098	0.085
38	38	0.332	0.192	0.112	0.092
39	39	0.335	0.212	0.122	0.095
40	40	0.382	0.221	0.124	0.098
41	41	0.395	0.225	0.132	0.112
42	42	0.41	0.251	0.157	0.128
43	43	0.425	0.298	0.168	0.136
44	44	0.429	0.309	0.192	0.151
45	45	0.436	0.31	0.222	0.163
46	46	0.476	0.318	0.254	0.176
47	47	0.485	0.32	0.262	0.183
48	48	0.489	0.32	0.265	0.185
49	49	0.49	0.33	0.265	0.186
50	50	0.5	0.33	0.266	0.188
51	51	0.5	0.34	0.268	0.192
52	52	0.51	0.34	0.271	0.194
53	53	0.51	0.35	0.275	0.195
54	54	0.51	0.35	0.275	0.195
55	55	0.52	0.36	0.28	0.197
56	56	0.52	0.36	0.285	0.197
57	57	0.52	0.37	0.29	0.198
58	58	0.53	0.37	0.29	0.198
59	59	0.53	0.38	0.298	0.21
60	60	0.54	0.38	0.31	0.21
61	61	0.55	0.39	0.31	0.22
62	62	0.55	0.39	0.32	0.21
63	63	0.57	0.4	0.31	0.21
64	64	0.56	0.4	0.32	0.23
65	65	0.57	0.39	0.33	0.23
66	66	0.58	0.41	0.32	0.22

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	67	0.59	0.41	0.34	0.24
68	68	0.59	0.42	0.34	0.24
69	69	0.62	0.434	0.355	0.265
70	70	0.63	0.442	0.36	0.269
71	71	0.63	0.445	0.368	0.273
72	72	0.65	0.449	0.373	0.279
73	73	0.64	0.451	0.378	0.282
74	74	0.65	0.452	0.379	0.289
75	75	0.66	0.455	0.381	0.31
76	76	0.66	0.459	0.383	0.315
77	77	0.68	0.512	0.383	0.318
78	78	0.68	0.517	0.385	0.322
79	79	0.69	0.521	0.387	0.327
80	80	0.71	0.524	0.387	0.328
81	81	0.71	0.523	0.389	0.31
82	82	0.72	0.525	0.389	0.33
83	83	0.729	0.532	0.391	0.34
84	84	0.735	0.545	0.413	0.35
85	85	0.75	0.578	0.428	0.35
86	86	0.798	0.597	0.436	0.36
87	87	0.821	0.616	0.459	0.35
88	88	0.843	0.629	0.479	0.37
89	89	0.869	0.631	0.485	0.37
90	90	0.876	0.652	0.492	0.378
91	91	0.898	0.668	0.508	0.383
92	92	0.912	0.671	0.511	0.391
93	93	0.939	0.685	0.519	0.407
94	94	0.954	0.697	0.523	0.41
95	95	0.989	0.705	0.527	0.411
96	96	0.997	0.722	0.531	0.412
97	97	1.002	0.729	0.543	0.414
98	98	1.01	0.734	0.552	0.421
99	99	1.013	0.739	0.569	0.436
100	100	1.009	0.742	0.587	0.438

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
101	101	1.015	0.756	0.591	0.44
102	102	1.018	0.789	0.624	0.442
103	103	1.021	0.812	0.633	0.442
104	104	1.019	0.823	0.642	0.45
105	105	1.021	0.834	0.656	0.454
106	106	1.035	0.84	0.667	0.463
107	107	1.029	0.857	0.669	0.469
108	108	1.022	0.871	0.677	0.473
109	109	1.032	0.875	0.681	0.478
110	110	1.035	0.879	0.696	0.481
111	111	1.033	0.881	0.698	0.486
112	112	1.035	0.885	0.703	0.489
113	113	1.036	0.889	0.709	0.493
114	114	1.035	0.891	0.713	0.497
115	115	1.034	0.893	0.715	0.501
116	116	1.035	0.893	0.719	0.508
117	117	1.034	0.895	0.722	0.512
118	118	1.03	0.903	0.728	0.525
119	119	1.027	0.909	0.735	0.532
120	120	1.029	0.913	0.739	0.537
121	121	1.025	0.922	0.745	0.545
122	122	1.03	0.929	0.748	0.549
123	123	1.031	0.931	0.753	0.551
124	124	1.03	0.935	0.761	0.557
125	125	1.029	0.938	0.777	0.57
126	126	1.031	0.941	0.781	0.575
127	127	1.028	0.943	0.786	0.579
128	128	1.029	0.952	0.789	0.582
129	129	1.03	0.959	0.79	0.587
130	130	1.031	0.967	0.797	0.589
131	131	1.031	0.971	0.811	0.609
132	132	1.03	0.982	0.818	0.611
133	133	1.029	0.989	0.823	0.614
134	134	1.028	0.993	0.827	0.62

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
135	135	1.029	0.995	0.829	0.626
136	136	1.027	0.998	0.831	0.629
137	137	1.027	1	0.834	0.633
138	138	1.027	1.01	0.838	0.637
139	139	1.025	1.011	0.841	0.639
140	140	1.022	1.011	0.843	0.641
141	141	1.022	1.013	0.845	0.646
142	142	1.024	1.012	0.849	0.65
143	143	1.021	1.01	0.853	0.653
144	144	1.02	1.012	0.855	0.655
145	145	1.02	1.013	0.86	0.659
146	146	1.022	1.013	0.869	0.663
147	147	1.021	1.012	0.872	0.669
148	148	1.017	1.014	0.879	0.671
149	149	1.015	1.012	0.883	0.677
150	150	1.02	1.011	0.888	0.679
151	151	1.015	1.011	0.898	0.688
152	152	1.014	1.012	0.905	0.702
153	153	1.011	1.012	0.909	0.708
154	154	1.013	1.011	0.91	0.711
155	155	1.012	1.012	0.912	0.713
156	156	1.012	1	0.914	0.717
157	157	1.011	1.011	0.916	0.721
158	158	1.013	1	0.922	0.723
159	159	1.011	1.012	0.924	0.729
160	160	1.011	1.011	0.927	0.731
161	161	1.012	1.012	0.929	0.735
162	162	1.011	1.01	0.932	0.739
163	163	1.011	1.011	0.939	0.741
164	164	1	1.01	0.942	0.745
165	165	0.997	1	0.955	0.749
166	166	0.99	1.011	0.949	0.752
167	167	0.98	1.011	0.946	0.755
168	168	0.98	1	0.944	0.759

ตารางที่ 4 ผลที่ได้จากการทดลองของ Pb^{2+} ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 3 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C_0 (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.008	0.017	0.015	0.031
2	2	0.017	0.016	0.012	0.03
3	3	0.018	0.012	0.012	0.028
4	4	0.016	0.011	0.008	0.027
5	5	0.03	0.02	0.015	0.008
6	6	0.03	0.025	0.017	0.01
7	7	0.033	0.027	0.02	0.008
8	8	0.038	0.024	0.02	0.012
9	9	0.039	0.027	0.019	0.013
10	10	0.056	0.026	0.019	0.01
11	11	0.062	0.028	0.02	0.011
12	12	0.07	0.035	0.021	0.013
13	13	0.09	0.05	0.01	0.021
14	14	0.12	0.08	0.04	0.019
15	15	0.15	0.09	0.03	0.023
16	16	0.18	0.09	0.03	0.022
17	17	0.19	0.11	0.04	0.023
18	18	0.19	0.1	0.03	0.025
19	19	0.19	0.12	0.05	0.025
20	20	0.2	0.12	0.04	0.027
21	21	0.21	0.12	0.07	0.026
22	22	0.21	0.11	0.06	0.025
23	23	0.22	0.12	0.07	0.027
24	24	0.21	0.17	0.08	0.028
25	25	0.23	0.18	0.09	0.027
26	26	0.23	0.18	0.09	0.028
27	27	0.23	0.19	0.13	0.035
28	28	0.25	0.18	0.13	0.04
29	29	0.26	0.19	0.14	0.05
30	30	0.28	0.19	0.14	0.05
31	31	0.28	0.2	0.14	0.07
32	32	0.3	0.2	0.16	0.09

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	33	0.33	0.22	0.17	0.11
34	34	0.34	0.23	0.18	0.11
35	35	0.35	0.21	0.16	0.11
36	36	0.37	0.24	0.18	0.13
37	37	0.39	0.25	0.18	0.13
38	38	0.42	0.26	0.2	0.14
39	39	0.43	0.27	0.2	0.14
40	40	0.45	0.27	0.21	0.15
41	41	0.46	0.28	0.22	0.16
42	42	0.46	0.28	0.22	0.16
43	43	0.47	0.28	0.24	0.17
44	44	0.48	0.29	0.24	0.17
45	45	0.48	0.3	0.24	0.18
46	46	0.49	0.32	0.26	0.19
47	47	0.5	0.34	0.27	0.2
48	48	0.51	0.35	0.28	0.2
49	49	0.51	0.35	0.28	0.21
50	50	0.52	0.36	0.29	0.21
51	51	0.52	0.36	0.29	0.22
52	52	0.53	0.37	0.3	0.23
53	53	0.54	0.38	0.3	0.23
54	54	0.54	0.39	0.31	0.24
55	55	0.55	0.39	0.31	0.24
56	56	0.55	0.4	0.32	0.24
57	57	0.56	0.4	0.32	0.25
58	58	0.58	0.41	0.33	0.27
59	59	0.58	0.41	0.33	0.27
60	60	0.59	0.42	0.34	0.28
61	61	0.59	0.42	0.34	0.28
62	62	0.59	0.43	0.35	0.29
63	63	0.6	0.42	0.35	0.29
64	64	0.6	0.43	0.36	0.29
65	65	0.61	0.44	0.35	0.3
66	66	0.6	0.45	0.36	0.3

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	67	0.62	0.45	0.36	0.31
68	68	0.62	0.45	0.37	0.31
69	69	0.62	0.45	0.37	0.31
70	70	0.63	0.46	0.37	0.32
71	71	0.63	0.46	0.38	0.32
72	72	0.63	0.46	0.38	0.31
73	73	0.64	0.45	0.37	0.32
74	74	0.64	0.47	0.38	0.33
75	75	0.64	0.47	0.38	0.33
76	76	0.65	0.49	0.38	0.33
77	77	0.67	0.48	0.39	0.34
78	78	0.69	0.49	0.38	0.34
79	79	0.71	0.5	0.39	0.33
80	80	0.73	0.51	0.39	0.35
81	81	0.73	0.52	0.39	0.35
82	82	0.75	0.52	0.39	0.35
83	83	0.77	0.55	0.42	0.37
84	84	0.8	0.57	0.43	0.36
85	85	0.83	0.57	0.46	0.37
86	86	0.85	0.61	0.48	0.38
87	87	0.87	0.63	0.49	0.39
88	88	0.89	0.64	0.49	0.38
89	89	0.93	0.65	0.51	0.39
90	90	0.94	0.67	0.53	0.39
91	91	0.96	0.68	0.55	0.41
92	92	0.99	0.68	0.55	0.41
93	93	1.02	0.72	0.57	0.42
94	94	1.03	0.75	0.58	0.43
95	95	1.03	0.78	0.59	0.43
96	96	1	0.79	0.61	0.44
97	97	1.02	0.81	0.62	0.45
98	98	1.02	0.83	0.64	0.45
99	99	1.03	0.83	0.65	0.46
100	100	0.99	0.85	0.67	0.47

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
101	101	1	0.87	0.67	0.46
102	102	1.01	0.87	0.69	0.47
103	103	1	0.88	0.69	0.48
104	104	1.03	0.89	0.68	0.49
105	105	1.001	0.9	0.69	0.48
106	106	1.01	0.91	0.7	0.49
107	107	1	0.9	0.71	0.5
108	108	1.01	0.92	0.71	0.51
109	109	1	0.93	0.72	0.52
110	110	1.01	0.93	0.73	0.52
111	111	1.02	0.94	0.74	0.53
112	112	1.01	0.96	0.75	0.54
113	113	1.01	0.96	0.74	0.54
114	114	1	0.97	0.75	0.55
115	115	1.01	0.98	0.77	0.57
116	116	1.02	0.99	0.78	0.59
117	117	1	0.99	0.78	0.59
118	118	1.03	0.99	0.79	0.61
119	119	1.02	1	0.79	0.61
120	120	1.01	1.01	0.8	0.63
121	121	1.02	1	0.81	0.62
122	122	1.01	1.01	0.81	0.63
123	123	1.02	1	0.82	0.65
124	124	1.03	1	0.83	0.65
125	125	1.01	1.02	0.83	0.67
126	126	1.02	1.01	0.84	0.67
127	127	1.03	1	0.85	0.69
128	128	1.02	1.01	0.84	0.68
129	129	1.01	1	0.86	0.7
130	130	1.01	1.01	0.88	0.73
131	131	1.02	1.01	0.9	0.73
132	132	1.01	1	0.92	0.73
133	133	1	1.02	0.93	0.74
134	134	1.00	1.01	0.95	0.75

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
135	135	0.99	1.02	0.95	0.75
136	136	1	1.01	0.96	0.74
137	137	1.05	1.01	0.97	0.76
138	138	1.05	1.03	0.97	0.76
139	139	1.04	1.02	0.97	0.76
140	140	1.03	1.02	0.98	0.78
141	141	1.02	1.02	0.99	0.77
142	142	1.02	1.01	0.98	0.78
143	143	1.01	1.01	0.99	0.79
144	144	1.02	1.02	0.99	0.79
145	145	1.02	1.01	0.99	0.79
146	146	1.01	1.02	1.01	0.8
147	147	1.02	1.01	1	0.81
148	148	1.01	1.01	1.01	0.81
149	149	1.01	1.02	1.01	0.83
150	150	1.02	1.01	1.02	0.83
151	151	1.02	1.01	1	0.84
152	152	1.02	1.01	1.01	0.84
153	153	1.02	1.01	1.02	0.86
154	154	1.01	1.02	1	0.86
155	155	1	1.01	1	0.87
156	156	1	1	1.01	0.88
157	157	1.02	1	1.01	0.89
158	158	1	1.01	1.01	0.92
159	159	1.01	1.02	1.02	0.92
160	160	1.01	1.02	1.02	0.93
161	161	1	1	1.01	0.93
162	162	0.96	1.01	1.02	0.92
163	163	0.95	1	1	0.92
164	164	0.93	1.01	1.01	0.91
165	165	0.91	1	1	0.9
166	166	0.88	1	1	0.9
167	167	0.86	1.01	1.01	0.89
168	168	0.85	1.02	1	0.89

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
169	169	0.85	1	1.01	0.88
170	170	0.84	0.99	1.02	0.86
171	171	0.84	0.97	1.01	0.87
172	172	0.82	0.95	1	0.86
173	173	0.81	0.95	1.01	0.85
174	174	0.79	0.93	1	0.85



ตารางที่ 5 ผลที่ได้จากการทดลองของ Cu^{2+} ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C_0 (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.043	0.035	0.0187	0.012
2	2	0.04	0.033	0.021	0.013
3	3	0.035	0.03	0.024	0.016
4	4	0.039	0.03	0.02	0.016
5	5	0.0412	0.0351	0.023	0.018
6	6	0.043	0.0372	0.0252	0.0181
7	7	0.0492	0.039	0.0285	0.019
8	8	0.051	0.045	0.0287	0.0209
9	9	0.053	0.0495	0.037	0.023
10	10	0.0593	0.0512	0.0392	0.029
11	11	0.064	0.053	0.045	0.031
12	12	0.098	0.059	0.05	0.04
13	13	0.098	0.055	0.05	0.04
14	14	0.11	0.072	0.053	0.042
15	15	0.11	0.07	0.05	0.04
16	16	0.115	0.075	0.055	0.045
17	17	0.116	0.079	0.058	0.049
18	18	0.119	0.082	0.061	0.053
19	19	0.12	0.082	0.061	0.055
20	20	0.121	0.084	0.062	0.056
21	21	0.12	0.084	0.064	0.056
22	22	0.121	0.086	0.064	0.057
23	23	0.121	0.087	0.066	0.057
24	24	0.121	0.088	0.067	0.058
25	25	0.122	0.088	0.069	0.058
26	26	0.123	0.098	0.071	0.058
27	27	0.123	0.1	0.071	0.059
28	28	0.125	0.112	0.08	0.06
29	29	0.129	0.114	0.08	0.06
30	30	0.131	0.114	0.081	0.061
31	31	0.132	0.115	0.081	0.061
32	32	0.135	0.115	0.082	0.062

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	33	0.135	0.115	0.085	0.062
34	34	0.145	0.117	0.087	0.063
35	35	0.136	0.117	0.089	0.064
36	36	0.137	0.118	0.09	0.064
37	37	0.137	0.119	0.091	0.065
38	38	0.138	0.119	0.091	0.065
39	39	0.139	0.119	0.092	0.065
40	40	0.141	0.121	0.093	0.067
41	41	0.145	0.123	0.095	0.067
42	42	0.153	0.123	0.098	0.068
43	43	0.155	0.125	0.099	0.069
44	44	0.151	0.124	0.1	0.069
45	45	0.157	0.127	0.1	0.07
46	46	0.165	0.127	0.101	0.07
47	47	0.169	0.129	0.108	0.077
48	48	0.172	0.13	0.11	0.079
49	49	0.174	0.132	0.112	0.081
50	50	0.175	0.139	0.116	0.0825
51	51	0.179	0.141	0.118	0.0837
52	52	0.179	0.143	0.118	0.0856
53	53	0.18	0.151	0.121	0.0897
54	54	0.191	0.155	0.128	0.0917
55	55	0.193	0.162	0.135	0.0945
56	56	0.195	0.167	0.138	0.0953
57	57	0.21	0.179	0.151	0.0964
58	58	0.214	0.184	0.163	0.0975
59	59	0.229	0.192	0.165	0.1087
60	60	0.235	0.195	0.167	0.1129
61	61	0.251	0.211	0.169	0.117
62	62	0.262	0.227	0.178	0.12
63	63	0.278	0.232	0.199	0.123
64	64	0.297	0.238	0.202	0.126
65	65	0.3	0.24	0.203	0.129
66	66	0.301	0.241	0.203	0.13

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	67	0.303	0.252	0.204	0.131
68	68	0.31	0.278	0.222	0.145
69	69	0.321	0.296	0.238	0.149
70	70	0.357	0.313	0.241	0.153
71	71	0.373	0.342	0.267	0.161
72	72	0.397	0.356	0.277	0.185
73	73	0.454	0.366	0.28	0.209
74	74	0.471	0.373	0.282	0.214
75	75	0.483	0.387	0.289	0.217
76	76	0.492	0.392	0.293	0.219
77	77	0.521	0.398	0.297	0.232
78	78	0.543	0.41	0.311	0.238
79	79	0.567	0.415	0.315	0.241
80	80	0.598	0.419	0.319	0.243
81	81	0.623	0.421	0.32	0.245
82	82	0.642	0.434	0.333	0.249
83	83	0.651	0.447	0.345	0.252
84	84	0.663	0.463	0.368	0.258
85	85	0.682	0.479	0.377	0.263
86	86	0.696	0.491	0.382	0.274
87	87	0.722	0.515	0.391	0.283
88	88	0.743	0.523	0.393	0.289
89	89	0.748	0.53	0.412	0.292
90	90	0.751	0.541	0.416	0.298
91	91	0.758	0.546	0.419	0.306
92	92	0.772	0.552	0.421	0.31
93	93	0.788	0.574	0.428	0.315
94	94	0.818	0.585	0.432	0.319
95	95	0.824	0.611	0.435	0.328
96	96	0.831	0.619	0.439	0.331
97	97	0.839	0.627	0.442	0.337
98	98	0.842	0.635	0.451	0.341
99	99	0.856	0.646	0.458	0.349
100	100	0.873	0.659	0.464	0.352

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
101	101	0.898	0.678	0.479	0.363
102	102	0.916	0.682	0.495	0.377
103	103	0.933	0.687	0.511	0.379
104	104	0.942	0.691	0.515	0.381
105	105	0.949	0.696	0.521	0.385
106	106	0.958	0.701	0.532	0.389
107	107	0.967	0.707	0.548	0.392
108	108	0.971	0.709	0.554	0.397
109	109	0.989	0.713	0.567	0.41
110	110	0.991	0.718	0.569	0.415
111	111	0.993	0.722	0.572	0.419
112	112	0.997	0.724	0.579	0.422
113	113	0.998	0.729	0.581	0.427
114	114	1.01	0.737	0.585	0.429
115	115	1	0.743	0.589	0.431
116	116	1.01	0.747	0.592	0.432
117	117	1.01	0.749	0.594	0.434
118	118	1	0.751	0.598	0.436
119	119	1.01	0.752	0.6	0.439
120	120	1	0.755	0.611	0.441
121	121	1	0.759	0.613	0.443
122	122	1.01	0.76	0.616	0.445
123	123	1.011	0.762	0.619	0.447
124	124	1.011	0.771	0.623	0.449
125	125	1	0.779	0.626	0.451
126	126	1	0.782	0.631	0.454
127	127	1.01	0.787	0.639	0.456
128	128	1.011	0.795	0.642	0.459
129	129	1.01	0.799	0.649	0.462
130	130	1	0.817	0.653	0.464
131	131	1.003	0.821	0.655	0.469
132	132	1	0.825	0.657	0.471
133	133	1.005	0.829	0.656	0.475
134	134	1.011	0.832	0.661	0.479

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
135	135	1.012	0.837	0.665	0.482
136	136	1.009	0.839	0.666	0.486
137	137	1.008	0.84	0.669	0.489
138	138	1	0.842	0.67	0.492
139	139	1.01	0.845	0.672	0.497
140	140	1.013	0.849	0.675	0.499
141	141	1.01	0.85	0.678	0.501
142	142	1.012	0.855	0.682	0.511
143	143	1.007	0.858	0.684	0.514
144	144	1.009	0.86	0.687	0.519
145	145	1.01	0.863	0.689	0.52
146	146	1.01	0.865	0.692	0.523
147	147	1.012	0.869	0.695	0.528
148	148	1.009	0.873	0.697	0.531
149	149	1.008	0.877	0.709	0.535
150	150	1.01	0.881	0.712	0.538
151	151	1.009	0.885	0.715	0.541
152	152	1.008	0.887	0.719	0.548
153	153	1.011	0.892	0.722	0.551
154	154	1.012	0.895	0.738	0.556
155	155	1.008	0.897	0.747	0.559
156	156	1.009	0.898	0.749	0.563
157	157	1.009	0.911	0.751	0.567
158	158	1.011	0.909	0.755	0.569
159	159	1.007	0.914	0.777	0.573
160	160	1.009	0.919	0.789	0.577
161	161	1	0.928	0.791	0.581
162	162	1.011	0.934	0.795	0.586
163	163	1.009	0.945	0.798	0.589
164	164	1	0.951	0.802	0.594
165	165	1.007	0.973	0.807	0.598
166	166	1	0.997	0.808	0.598
167	167	1	0.998	0.811	0.599
168	168	0.99	0.98	0.815	0.599

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
169	169	0.99	0.976	0.799	0.602

ตารางที่ 6 ผลที่ได้จากการทดลองของ Pb²⁺ ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 5 (คอลัมน์ฤดูร้อน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.006	0.005	0.003	0.001
2	2	0.014	0.012	0.009	0.006
3	3	0.015	0.013	0.01	0.009
4	4	0.015	0.013	0.012	0.009
5	5	0.02	0.015	0.014	0.01
6	6	0.02	0.015	0.013	0.01
7	7	0.021	0.017	0.014	0.009
8	8	0.025	0.02	0.017	0.01
9	9	0.03	0.02	0.017	0.01
10	10	0.031	0.021	0.018	0.01
11	11	0.031	0.025	0.019	0.01
12	12	0.07	0.05	0.02	0.015
13	13	0.07	0.05	0.02	0.01
14	14	0.09	0.06	0.03	0.017
15	15	0.10	0.05	0.03	0.015
16	16	0.12	0.06	0.04	0.018
17	17	0.12	0.07	0.04	0.021
18	18	0.14	0.07	0.05	0.023
19	19	0.15	0.08	0.05	0.025
20	20	0.15	0.08	0.05	0.025
21	21	0.17	0.1	0.06	0.025
22	22	0.17	0.1	0.06	0.026
23	23	0.18	0.12	0.07	0.026
24	24	0.18	0.14	0.07	0.027
25	25	0.2	0.15	0.09	0.028
26	26	0.21	0.15	0.09	0.028
27	27	0.22	0.15	0.09	0.028

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
28	28	0.24	0.16	0.1	0.029
29	29	0.25	0.16	0.1	0.029
30	30	0.25	0.18	0.12	0.031
31	31	0.25	0.18	0.12	0.031
32	32	0.25	0.18	0.13	0.031
33	33	0.25	0.19	0.13	0.033
34	34	0.26	0.19	0.14	0.035
35	35	0.26	0.19	0.14	0.035
36	36	0.27	0.2	0.15	0.04
37	37	0.28	0.2	0.15	0.042
38	38	0.28	0.21	0.15	0.043
39	39	0.29	0.21	0.16	0.043
40	40	0.29	0.22	0.16	0.045
41	41	0.31	0.22	0.16	0.047
42	42	0.31	0.23	0.17	0.049
43	43	0.32	0.23	0.17	0.049
44	44	0.32	0.23	0.16	0.05
45	45	0.33	0.24	0.18	0.053
46	46	0.33	0.24	0.19	0.053
47	47	0.33	0.25	0.2	0.055
48	48	0.34	0.25	0.2	0.055
49	49	0.35	0.26	0.22	0.056
50	50	0.34	0.26	0.22	0.056
51	51	0.35	0.25	0.23	0.056
52	52	0.36	0.26	0.23	0.057
53	53	0.36	0.27	0.22	0.057
54	54	0.37	0.27	0.22	0.062
55	55	0.37	0.27	0.22	0.065
56	56	0.38	0.28	0.23	0.066
57	57	0.38	0.28	0.23	0.069
58	58	0.38	0.28	0.22	0.071
59	59	0.39	0.29	0.24	0.073
60	60	0.39	0.29	0.24	0.073
61	61	0.41	0.32	0.26	0.085

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
62	62	0.42	0.32	0.26	0.09
63	63	0.43	0.33	0.27	0.11
64	64	0.45	0.34	0.27	0.13
65	65	0.47	0.33	0.28	0.13
66	66	0.47	0.34	0.28	0.14
67	67	0.48	0.35	0.29	0.15
68	68	0.51	0.37	0.31	0.15
69	69	0.53	0.38	0.3	0.16
70	70	0.54	0.38	0.32	0.18
71	71	0.56	0.4	0.33	0.18
72	72	0.59	0.41	0.34	0.22
73	73	0.61	0.41	0.35	0.25
74	74	0.62	0.43	0.35	0.26
75	75	0.65	0.46	0.37	0.26
76	76	0.68	0.48	0.37	0.28
77	77	0.69	0.49	0.39	0.28
78	78	0.72	0.52	0.38	0.3
79	79	0.74	0.53	0.4	0.31
80	80	0.78	0.55	0.42	0.3
81	81	0.81	0.56	0.42	0.31
82	82	0.81	0.57	0.43	0.32
83	83	0.83	0.57	0.43	0.32
84	84	0.83	0.59	0.45	0.32
85	85	0.84	0.59	0.44	0.33
86	86	0.83	0.61	0.46	0.34
87	87	0.84	0.62	0.47	0.34
88	88	0.85	0.62	0.47	0.35
89	89	0.87	0.65	0.48	0.36
90	90	0.89	0.66	0.48	0.36
91	91	0.9	0.66	0.49	0.38
92	92	0.89	0.68	0.49	0.38
93	93	0.92	0.69	0.49	0.39
94	94	0.94	0.69	0.5	0.4
95	95	0.98	0.71	0.51	0.4

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
96	96	1	0.71	0.53	0.42
97	97	1	0.73	0.52	0.43
98	98	1.01	0.75	0.55	0.43
99	99	1	0.76	0.55	0.45
100	100	1.01	0.77	0.54	0.46
101	101	1.02	0.78	0.57	0.46
102	102	0.99	0.78	0.59	0.47
103	103	1	0.79	0.61	0.48
104	104	1.01	0.82	0.63	0.49
105	105	0.99	0.81	0.64	0.49
106	106	1.01	0.83	0.65	0.51
107	107	1.01	0.83	0.64	0.51
108	108	1	0.85	0.65	0.52
109	109	1.01	0.85	0.66	0.53
110	110	1	0.87	0.67	0.54
111	111	1.01	0.86	0.67	0.54
112	112	1	0.88	0.68	0.55
113	113	1	0.88	0.69	0.55
114	114	1.01	0.89	0.69	0.57
115	115	1.02	0.9	0.7	0.58
116	116	1.01	0.92	0.71	0.59
117	117	1	0.93	0.7	0.61
118	118	1	0.93	0.73	0.61
119	119	1.01	0.95	0.75	0.62
120	120	1.01	0.96	0.75	0.64
121	121	1.02	0.96	0.77	0.65
122	122	1	0.98	0.78	0.65
123	123	1.01	1	0.78	0.65
124	124	1	0.99	0.79	0.66
125	125	1.01	1	0.81	0.67
126	126	1.01	1.01	0.82	0.67
127	127	1	1	0.83	0.67
128	128	1	1.01	0.83	0.68
129	129	1.01	1	0.85	0.68

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C _o (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
130	130	1	1	0.86	0.69
131	131	1	1.02	0.87	0.7
132	132	1.01	1.01	0.87	0.71
133	133	1	1.01	0.88	0.7
134	134	1	1.02	0.88	0.72
135	135	1.02	1.02	0.87	0.71
136	136	1	1.011	0.89	0.71
137	137	1.01	1.01	0.9	0.72
138	138	1.02	1	0.9	0.73
139	139	1	1.02	0.91	0.75
140	140	1.01	1.012	0.91	0.77
141	141	1	1.009	0.9	0.76
142	142	1	1.01	0.92	0.78
143	143	1.01	1.007	0.92	0.78
144	144	1.012	1.01	0.93	0.8
145	145	1	1	0.95	0.81
146	146	1.011	1.02	0.94	0.8
147	147	1.002	1	0.95	0.82
148	148	1	1.01	0.96	0.82
149	149	1.01	1.009	0.96	0.83
150	150	1.011	1	0.97	0.82
151	151	1.008	1	0.99	0.83
152	152	1.009	1.01	1	0.85
153	153	1	1	1.008	0.85
154	154	1.02	1	1.005	0.87
155	155	1	1.009	1	0.86
156	156	1.009	1.008	1.009	0.88
157	157	1.008	1	1.007	0.88
158	158	1	1.01	1	0.9
159	159	1.01	1.011	1.01	0.91
160	160	1.009	1	1.01	0.9
161	161	1	1.012	1.011	0.92
162	162	1.011	1.007	1	0.94
163	163	1.009	1	1.004	0.95

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
164	164	1.006	1.009	1.006	0.94
165	165	1	1	1	0.96
166	166	0.99	1	1	0.97
167	167	0.99	1.01	1.01	0.97
168	168	0.98	1	1	0.96
169	169	0.96	1	1	0.96
170	170	0.95	1	1.01	0.95
171	171	0.94	0.98	1	0.95
172	172	0.94	0.97	1	0.94



ตารางที่ 7 ผลที่ได้จากการทดลองของ Cu^{2+} ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C_0 (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.045	0.037	0.021	0.019
2	2	0.049	0.039	0.028	0.025
3	3	0.052	0.041	0.032	0.028
4	4	0.054	0.043	0.036	0.032
5	5	0.058	0.045	0.039	0.034
6	6	0.061	0.049	0.04	0.037
7	7	0.065	0.051	0.043	0.038
8	8	0.074	0.053	0.044	0.039
9	9	0.076	0.055	0.045	0.04
10	10	0.081	0.057	0.047	0.042
11	11	0.083	0.059	0.049	0.044
12	12	0.085	0.061	0.05	0.049
13	13	0.089	0.063	0.052	0.05
14	14	0.093	0.066	0.055	0.053
15	15	0.095	0.068	0.059	0.055
16	16	0.098	0.069	0.06	0.056
17	17	0.1	0.07	0.062	0.057
18	18	0.115	0.071	0.063	0.057
19	19	0.119	0.072	0.063	0.058
20	20	0.121	0.072	0.065	0.058
21	21	0.123	0.073	0.065	0.059
22	22	0.125	0.073	0.065	0.059
23	23	0.134	0.087	0.072	0.061
24	24	0.145	0.089	0.078	0.063
25	25	0.149	0.092	0.085	0.066
26	26	0.152	0.095	0.088	0.069
27	27	0.159	0.099	0.09	0.07
28	28	0.169	0.109	0.092	0.071
29	29	0.173	0.112	0.093	0.071
30	30	0.191	0.125	0.107	0.075
31	31	0.21	0.132	0.111	0.079
32	32	0.219	0.146	0.128	0.083

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
33	33	0.235	0.151	0.13	0.085
34	34	0.257	0.155	0.135	0.088
35	35	0.298	0.169	0.139	0.093
36	36	0.336	0.184	0.153	0.098
37	37	0.345	0.189	0.155	0.101
38	38	0.352	0.19	0.167	0.112
39	39	0.409	0.215	0.169	0.118
40	40	0.425	0.236	0.172	0.121
41	41	0.455	0.249	0.179	0.123
42	42	0.498	0.262	0.18	0.129
43	43	0.512	0.27	0.181	0.13
44	44	0.523	0.291	0.193	0.135
45	45	0.534	0.296	0.195	0.137
46	46	0.545	0.298	0.196	0.141
47	47	0.549	0.305	0.198	0.145
48	48	0.557	0.309	0.199	0.148
49	49	0.563	0.31	0.2	0.148
50	50	0.57	0.31	0.2	0.15
51	51	0.591	0.329	0.217	0.17
52	52	0.613	0.337	0.228	0.17
53	53	0.633	0.367	0.242	0.18
54	54	0.667	0.393	0.259	0.185
55	55	0.679	0.423	0.273	0.189
56	56	0.694	0.456	0.279	0.19
57	57	0.711	0.475	0.281	0.192
58	58	0.748	0.479	0.289	0.195
59	59	0.767	0.482	0.293	0.199
60	60	0.785	0.485	0.315	0.211
61	61	0.796	0.491	0.318	0.214
62	62	0.823	0.523	0.323	0.218
63	63	0.855	0.549	0.327	0.222
64	64	0.873	0.565	0.329	0.224
65	65	0.878	0.571	0.333	0.229
66	66	0.881	0.575	0.345	0.23

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
67	67	0.885	0.584	0.356	0.234
68	68	0.893	0.587	0.361	0.239
69	69	0.895	0.592	0.368	0.241
70	70	0.906	0.611	0.37	0.249
71	71	0.912	0.626	0.375	0.256
72	72	0.915	0.628	0.381	0.26
73	73	0.923	0.632	0.387	0.263
74	74	0.927	0.639	0.389	0.269
75	75	0.931	0.646	0.391	0.271
76	76	0.939	0.651	0.395	0.278
77	77	0.947	0.662	0.399	0.282
78	78	0.958	0.673	0.411	0.287
79	79	0.959	0.679	0.417	0.289
80	80	0.96	0.702	0.42	0.291
81	81	0.963	0.709	0.424	0.297
82	82	0.969	0.711	0.428	0.302
83	83	0.971	0.713	0.436	0.311
84	84	0.978	0.719	0.439	0.315
85	85	0.985	0.723	0.449	0.323
86	86	0.997	0.726	0.452	0.328
87	87	1.001	0.729	0.456	0.329
88	88	1	0.732	0.464	0.334
89	89	1.002	0.738	0.469	0.338
90	90	1.006	0.74	0.473	0.34
91	91	1.008	0.745	0.481	0.347
92	92	1.008	0.751	0.487	0.352
93	93	1	0.755	0.489	0.355
94	94	1.007	0.759	0.491	0.357
95	95	1.01	0.761	0.493	0.359
96	96	1.008	0.763	0.498	0.341
97	97	1.007	0.769	0.5	0.345
98	98	1.008	0.771	0.51	0.348
99	99	1.007	0.775	0.51	0.351
100	100	1.01	0.779	0.516	0.359

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
101	101	1.01	0.782	0.522	0.411
102	102	1	0.786	0.527	0.419
103	103	1	0.791	0.529	0.424
104	104	1.01	0.794	0.534	0.428
105	105	1	0.798	0.539	0.432
106	106	1.01	0.799	0.541	0.439
107	107	1.01	0.812	0.545	0.441
108	108	1.01	0.819	0.549	0.444
109	109	1	0.825	0.55	0.448
110	110	1	0.828	0.551	0.45
111	111	1.01	0.829	0.554	0.452
112	112	1	0.831	0.562	0.455
113	113	1.01	0.838	0.567	0.459
114	114	1.012	0.843	0.569	0.461
115	115	1.011	0.847	0.571	0.464
116	116	1.011	0.849	0.576	0.469
117	117	1.012	0.85	0.579	0.472
118	118	1.009	0.852	0.581	0.476
119	119	1.01	0.855	0.583	0.479
120	120	1.007	0.858	0.587	0.481
121	121	1.007	0.862	0.589	0.486
122	122	1.009	0.869	0.592	0.489
123	123	1.01	0.873	0.594	0.492
124	124	1.01	0.876	0.597	0.497
125	125	1.008	0.879	0.599	0.508
126	126	1.01	0.885	0.604	0.511
127	127	1.012	0.889	0.611	0.514
128	128	1.009	0.892	0.613	0.517
129	129	1.007	0.899	0.617	0.519
130	130	1.009	0.912	0.619	0.521
131	131	1.01	0.916	0.62	0.522
132	132	1.01	0.921	0.622	0.528
133	133	1.009	0.927	0.625	0.529
134	134	1.01	0.931	0.631	0.53

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
135	135	1.01	0.935	0.634	0.538
136	136	1	0.937	0.637	0.541
137	137	1.01	0.939	0.639	0.548
138	138	1	0.945	0.641	0.552
139	139	1	0.949	0.643	0.557
140	140	1.009	0.952	0.655	0.559
141	141	1	0.958	0.661	0.564
142	142	1.006	0.961	0.669	0.569
143	143	1.008	0.967	0.672	0.571
144	144	1.009	0.973	0.678	0.576
145	145	1.007	0.976	0.682	0.582
146	146	1.009	0.979	0.688	0.587
147	147	1.008	0.984	0.691	0.592
148	148	1.009	0.988	0.697	0.598
149	149	1.008	0.99	0.712	0.603
150	150	1.008	1	0.736	0.613
151	151	1.005	1	0.739	0.625
152	152	1.006	1.005	0.745	0.631
153	153	1.003	1.003	0.757	0.645
154	154	1.006	1	0.789	0.667
155	155	1.005	1.004	0.791	0.669
156	156	1.002	1.007	0.796	0.674
157	157	1	1.005	0.798	0.686
158	158	1	1.005	0.813	0.689
159	159	1.007	1.002	0.825	0.712
160	160	1.007	1.003	0.831	0.714
161	161	1	1	0.843	0.723
162	162	1	1.004	0.866	0.728
163	163	1.006	1.005	0.873	0.731
164	164	1.005	1	0.866	0.741
165	165	1.004	1.001	0.859	0.752
166	166	1	1	0.85	0.765
167	167	1	1.004	0.848	0.773
168	168	0.998	1	0.839	0.757

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
169	169	0.991	1.003	0.831	0.723
170	170	0.987	1	0.829	0.695

ตารางที่ 8 ผลที่ได้จากการทดลองของ Pb²⁺ ผ่านคอลัมน์ดินร่วนปนทรายที่พีเอช 5 (คอลัมน์ฤดูฝน)

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
1	1	0.016	0.012	0.009	0.003
2	2	0.016	0.013	0.01	0.005
3	3	0.018	0.014	0.01	0.008
4	4	0.018	0.016	0.012	0.008
5	5	0.02	0.016	0.012	0.009
6	6	0.021	0.018	0.013	0.01
7	7	0.023	0.02	0.013	0.012
8	8	0.028	0.022	0.018	0.012
9	9	0.029	0.032	0.021	0.015
10	10	0.035	0.045	0.023	0.017
11	11	0.042	0.049	0.024	0.018
12	12	0.055	0.056	0.026	0.018
13	13	0.09	0.078	0.028	0.02
14	14	0.13	0.079	0.028	0.021
15	15	0.15	0.08	0.029	0.022
16	16	0.16	0.082	0.031	0.023
17	17	0.16	0.085	0.033	0.025
18	18	0.17	0.094	0.041	0.025
19	19	0.18	0.097	0.047	0.026
20	20	0.19	0.099	0.049	0.026
21	21	0.19	0.1	0.052	0.027
22	22	0.19	0.1	0.055	0.027
23	23	0.2	0.11	0.07	0.029
24	24	0.21	0.12	0.09	0.03
25	25	0.23	0.12	0.09	0.032
26	26	0.23	0.15	0.1	0.032
27	27	0.25	0.16	0.11	0.034

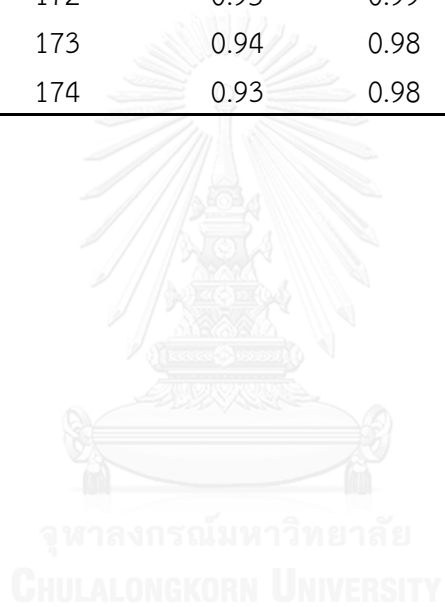
ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
28	28	0.29	0.19	0.12	0.034
29	29	0.3	0.22	0.15	0.04
30	30	0.3	0.22	0.15	0.05
31	31	0.31	0.22	0.15	0.05
32	32	0.31	0.23	0.14	0.06
33	33	0.32	0.23	0.15	0.06
34	34	0.31	0.22	0.16	0.07
35	35	0.32	0.23	0.16	0.07
36	36	0.32	0.23	0.16	0.08
37	37	0.33	0.24	0.17	0.09
38	38	0.35	0.24	0.17	0.1
39	39	0.36	0.24	0.16	0.11
40	40	0.39	0.25	0.17	0.11
41	41	0.43	0.25	0.18	0.12
42	42	0.45	0.26	0.18	0.11
43	43	0.49	0.26	0.18	0.12
44	44	0.51	0.28	0.19	0.13
45	45	0.52	0.29	0.2	0.15
46	46	0.54	0.28	0.2	0.15
47	47	0.55	0.29	0.21	0.16
48	48	0.57	0.31	0.21	0.15
49	49	0.57	0.31	0.22	0.17
50	50	0.59	0.33	0.22	0.17
51	51	0.62	0.35	0.24	0.19
52	52	0.65	0.38	0.25	0.21
53	53	0.65	0.43	0.25	0.23
54	54	0.68	0.45	0.27	0.25
55	55	0.71	0.49	0.29	0.25
56	56	0.73	0.49	0.31	0.26
57	57	0.74	0.51	0.33	0.26
58	58	0.77	0.53	0.35	0.28
59	59	0.79	0.54	0.36	0.29
60	60	0.81	0.56	0.36	0.31
61	61	0.82	0.58	0.38	0.31

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
62	62	0.85	0.59	0.41	0.32
63	63	0.87	0.62	0.43	0.33
64	64	0.89	0.62	0.44	0.33
65	65	0.9	0.63	0.45	0.35
66	66	0.91	0.65	0.45	0.34
67	67	0.9	0.64	0.47	0.35
68	68	0.91	0.66	0.48	0.37
69	69	0.93	0.67	0.49	0.37
70	70	0.92	0.66	0.49	0.38
71	71	0.93	0.67	0.51	0.38
72	72	0.93	0.69	0.52	0.39
73	73	0.94	0.71	0.52	0.39
74	74	0.94	0.71	0.54	0.41
75	75	0.95	0.73	0.55	0.41
76	76	0.95	0.73	0.57	0.42
77	77	0.96	0.75	0.59	0.43
78	78	0.96	0.75	0.59	0.43
79	79	0.97	0.75	0.59	0.45
80	80	0.98	0.77	0.61	0.45
81	81	0.99	0.76	0.61	0.47
82	82	0.98	0.78	0.63	0.47
83	83	0.99	0.78	0.62	0.48
84	84	1.01	0.79	0.65	0.48
85	85	1.01	0.82	0.64	0.49
86	86	1.03	0.84	0.65	0.49
87	87	1.02	0.84	0.67	0.51
88	88	1.03	0.86	0.69	0.51
89	89	1.02	0.86	0.68	0.52
90	90	1	0.87	0.69	0.52
91	91	1.02	0.88	0.71	0.53
92	92	1.02	0.89	0.72	0.55
93	93	1.01	0.89	0.72	0.55
94	94	1.02	0.9	0.73	0.57
95	95	1.01	0.91	0.74	0.56

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
96	96	1	0.91	0.73	0.57
97	97	1.01	0.92	0.75	0.58
98	98	1.02	0.93	0.75	0.58
99	99	1.01	0.93	0.76	0.58
100	100	1.02	0.93	0.76	0.58
101	101	1.01	0.95	0.75	0.59
102	102	1.01	0.94	0.76	0.59
103	103	1	0.95	0.76	0.58
104	104	1	0.97	0.77	0.59
105	105	1.01	0.97	0.77	0.61
106	106	1.02	0.97	0.78	0.61
107	107	1	0.98	0.79	0.62
108	108	1.01	0.98	0.79	0.62
109	109	1.01	0.99	0.8	0.64
110	110	1.02	0.98	0.81	0.63
111	111	1.01	0.99	0.81	0.64
112	112	1.01	0.99	0.83	0.66
113	113	1.02	1.01	0.82	0.67
114	114	1.01	1.02	0.83	0.67
115	115	1	1	0.85	0.68
116	116	1.02	1	0.84	0.68
117	117	1	1	0.87	0.69
118	118	1.01	1.02	0.89	0.68
119	119	1	1.01	0.91	0.69
120	120	1	1.01	0.93	0.69
121	121	1.01	1.01	0.92	0.71
122	122	1.01	1.02	0.94	0.71
123	123	1.02	1.02	0.96	0.73
124	124	1.02	1.02	0.97	0.72
125	125	1.01	1.01	0.97	0.73
126	126	1	1	0.98	0.75
127	127	1	1	0.98	0.76
128	128	1.03	1.02	0.99	0.76
129	129	1.02	1.01	1	0.78

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
130	130	1.02	1.02	1.01	0.79
131	131	1	1.01	1	0.82
132	132	1.01	1	1.02	0.83
133	133	1.01	1.02	1.01	0.85
134	134	1.02	1.01	1.02	0.85
135	135	1.01	1	1.01	0.87
136	136	1.01	1.01	1.01	0.87
137	137	1	1.01	1.01	0.88
138	138	1	1	1	0.88
139	139	1.01	1	1.01	0.89
140	140	1.02	1.01	1.01	0.91
141	141	1.01	1.02	1.02	0.91
142	142	1	1	1.02	0.93
143	143	1	1.01	1.01	0.92
144	144	1	1.01	1	0.93
145	145	1.01	1	1.01	0.94
146	146	1.01	1	1	0.95
147	147	1.01	1.01	1.01	0.95
148	148	1	1.01	1.01	0.97
149	149	1	1	1	0.98
150	150	1.01	1	1.01	0.99
151	151	1	1	1.01	0.99
152	152	1	1.01	1	1
153	153	1.01	1.01	1	1
154	154	1.02	1.01	1.01	1
155	155	1.01	1	1.01	1.01
156	156	1.01	1	1	1.01
157	157	1	1	1	1
158	158	1	1.01	1	1.01
159	159	1	1.01	1.02	1.01
160	160	1	1.01	1.01	1
161	161	1.01	1	1.01	1
162	162	1.01	1	1	1.01
163	163	1	1.01	1.01	1

ตัวอย่างที่	เวลา (วัน)	C/C ₀ (mg/l)			
		6.25 cm.	12.5 cm.	18.75 cm.	25 cm.
164	164	1	1.01	1.01	1.01
165	165	1	1	1	1
166	166	0.99	1.01	1.01	1
167	167	0.98	1	1	1.01
168	168	0.98	1	1.01	1
169	169	0.97	1.01	1.02	1
170	170	0.97	1.02	1.01	1.01
171	171	0.96	1	1.01	1
172	172	0.95	0.99	1	1
173	173	0.94	0.98	0.99	1
174	174	0.93	0.98	0.99	1.01



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวตุลญา มะสีพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย ปทุมธานี ในปีการศึกษา 2549 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ วิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 และได้เข้าศึกษาต่อระดับ ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

บางส่วนของงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอผลงานในการประชุมระดับประเทศ “การประชุม วิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 15 : 50 ปี มข. กกับการอุทิศเพื่อสังคม” ใน หัวข้อเรื่อง การประเมินการปนเปื้อนของทองแดง และตะกั่วผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่ เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเทคนิคคอลัมน์ โดยใช้แบบจำลอง HYDRUS- 1D เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2557 และได้ส่งผลงานวิจัยตีพิมพ์ในการประชุมระดับนานาชาติ “2015 5th International Conference on Future Environment and Energy (ICFEE 2015) January 24-25, 2015 Taipei, Taiwan” ในหัวข้อเรื่อง Experimental and modelling investigations of tracer transport in variably saturated agricultural soil of Thailand ในวันที่ 24-25 มกราคม 2558 ซึ่งงานวิจัยนี้อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์

- Antanaitis, D. and A. Antanaitis (2012). "Migration of heavy metals in soil and their concentration in sewage and sewage sludge." *Ekologija* 1: 42-45.
- Atafar, Z., et al. (2010). "Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration." *Environ Monit Assess* 160: 1-4.
- Bas Van Der Grift, H. P., Joachim Rozemeijer and Jasper Griffioen (2007). "Integrated Modeling of Cadmium and Zinc Contamination in Groundwater and Surface Water of the Kempen Region, The Netherlands." *Environmental Pollution* 148(3): 855-866.
- Carles M. Rubio and Rafael, P. (2012). "Applicability of Hydrus-1D in a Mediterranean Mountain Area Submitted to Land Use Changes." *Soil Science* 2012: 7.
- Chen, G., et al. (2010). "Transfer of heavy metals from compost to red soil and groundwater under simulated rainfall conditions." *Journal of Hazardous Materials*, 181: 211-216.
- Chia M. Chang, M. K. W., Ta W. Chang, C. Lin, Yih R. Chen (2001). "Transport modeling of copper and cadmium with linear and nonlinear retardation factors." *Chemosphere* 43: 1133-1139.
- Chotpantarat, S. and C. Sutthirat (2011). "Different sorption approaches and leachate fluxes affecting on Mn^{2+} transport through lateritic aquifer." *American Journal of Environmental Sciences* 7(1): 57-64.
- Chotpantarat, S., et al. (2011). "Effects of soil water characteristic curves on simulation of nitrate vertical transport in a Thai agricultural soil." *Sustainable Environment Research*, 21(3): 187-193.
- Chou, P. Y. and G. Wyseure (2009). "Hydrodynamic dispersion characteristics of lateral inflow into a river tested by a laboratory model." *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 217-228.
- Dişli, E. (2010). "Batch and column experiments to support heavy metals (Cu, Zn and Mn) in alluvial sediments." *Chinese Journal of Geochemistry* 29(4): 365-374.
- Dong, D., et al. (2009). "Investigation of the potential mobility of Pb, Cd and Cr(VI) from moderately contaminated farmland soil to groundwater in Northeast China." *Journal of Hazardous Materials* 162: 1261-1268.
- Harter, R. D. (1992). "Competitive sorption of cobalt, copper and nickel ions by a calcium saturated soil. *Soil Science Society of America Journal*. ." *Soil Science Society of America Journal*. 56: 444-449.
- Jabbar, A., et al. (1993). "Pesticide Residues in Cropland Soils and Shallow Groundwater in Punjab Pakistan." *Environ Contam Toxicol* 51: 268-273

- Jenne, E. A. (1968). "Control of Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water-the dominant role of hydrous manganese and iron oxides." *Advances in Chemistry* 7: 337-387.
- Manika G., et al. (2012). "Persistence and mobility of 2,4- D in unsaturated soil zone under winter wheat crop in sub-tropical region of India. ." *Agriculture Ecosystems and Environment* 146: 60–72.
- Manish, K., et al. (2014). "Emerging Water Quality Problems in Developing Countries." *The Scientific World Journal* 2014: 1-2.
- Matos, A., et al. (2001). "Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils." *environmental pollutants* 111(3): 429-435.
- Minh , N., et al. (2009). "Simulation of retention and transport of copper, lead and zinc in a paddy soil of the Red River Delta, Vietnam. ." *Agriculture Ecosystems and Environment* 129: 8–16.
- Nayak, P. S., and Sigsh, B. K. (2007). " Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR Bull." *Journal of Materials Science* 30: 235-238.
- Neuman, P. S. (1990). "Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media." *Water Resources Research* 26: 1749– 1758.
- Nielsen, D. R., et al. (1986). "Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone." *Water Resources Research* 22: 89-108.
- Nkedi-Kizza, P., et al. (1987). "Influence of organic cosolvent on leaching of hydrophobic organic chemicals through soils. ." *Environmental Science & Technology* 21: 1107–1111.
- Nouri J., M. A. H., Babaei A.A. (2006). "Investigation of Heavy Metals in Groundwater." *Pakistan Journal of Biological Sciences* 9(3): 377-384.
- P. Panuwet, et al. (2012). "Agricultural pesticide management in Thailand: status and population health risk. ." *Environmental science & policy*, 17(72-81).
- Porro, I., et al. (1993). "Solute transport through large uniform and layeres soil columns. ." *Water Resources Research* 29(4): 1321-1330.
- Sayyad, G., et al. (2010). "Transport of Cd, Cu, Pb, and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation-A column study. ." *Geoderma* 154(3-4): 311–320.
- Schreinemachers, P. and P. Tipraqsa (2012). "Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries." *Food Policy* 37(6): 616-626.

- Simunek, J., et al. (2008). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Version 4.0. . Environmental Sciences, California Riverside, California.
- Thapinta, A. and P. Hudak (2003). "Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. ." Environment International 29: 87– 93.
- Van Genuchten, M. T., and R.J. Wagenet. (1989). "Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solutions." Soil Science Society of America Journal 53: 1303–1310.
- Wierenga, P. J. and M. T. van Genuchten (1989). "Solute transport through small and large unsaturated columns." Ground Water, 27(1): 35-42.
- Wong S.C., et al. (2002). "Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China." Environmental Pollution 119(1): 33-44.
- Wongsasuluk, P. (2010). Human health risk assessment associated with heavy metals in drinking shallow groundwater wells at Ubon Ratchathani province, Thailand. Graduate School Science Program in Environmental Management, Chulalongkorn University. Master.
- Yu L., et al. (2008). "Heavy metal contamination and source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China." Journal of Environmental Sciences 20: 607-6012.
- เกษรา จิตนิยม, et al. (2553). การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของสมเมกไทต์. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกษราพร สุอรุณ and โกวิท ยะมังคลา (2555). "จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน." KKU Sci. J. 40(4): 1285-1300.
- ลลิตา แสงอาทิตย์ (2554). การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8. วิทยาสตรสิ่งแวดลอม. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร. วิทยาสตรมหาบัณฑิต.
- กนกวรรณ สมคิด, สมลักษณ์ พันธุ์งอก, ไพลิน เกาตระการวิวัฒน์ (2554). การบำบัดน้ำเสียสีย้อมเมทิลไวโอเลตด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบไทเทเนียมออกไซด์. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
- กรมทรัพยากรธรณี (2528). "การเกิดดิน ". Retrieved 15 สิงหาคม 2555, from <http://www.dmr.go.th/main.php>
- กรมทรัพยากรน้ำ (2551). "น้ำบาดาลเพื่อชีวิต ภูมิวิทยามหาชน." Retrieved 15 มีนาคม 2555, from http://www.dgr.go.th/journal/file/2556/vol12_2013.pdf.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2520). "คู่มือประกอบกิจการน้ำบาดาล." Retrieved 15 มีนาคม 2556, from http://www.dgr.go.th/water/waterforlife1_1.htm.

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2548). "โครงการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ." Retrieved 12 มีนาคม 2555, from <http://www.dgr.go.th/water/groundwater1.htm>.
- กรมวิชาการเกษตร (2551). "คู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยเคมี." Retrieved 25 มิถุนายน 2556, from <http://aglib.doa.go.th/lib/images/Downloads/2552/EB00060.pdf>.
- กรมส่งเสริมการเกษตร (2540). "ความรู้เรื่องปุ๋ย". Retrieved 7 กุมภาพันธ์ 2556, from http://www.doae.go.th/library/html/know_all.html
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ก. (2547). "การประเมินความเสี่ยงเนื่องจากการปนเปื้อน." Retrieved 13 พฤษภาคม 2558, from www.lamphun.doae.go.th/evaluation_gap.DOC.
- กระทรวงสาธารณสุข (2532). "พิษจากโลหะตะกั่ว." Retrieved 15 พฤษภาคม 2556, from http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_txR_search.asp?info_id=41.
- กิจการ พรหมมา, (2555). อุทกธรณีวิทยา. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฉันทพร อยู่ยั้งยืน (2547). พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในชั้นน้ำใต้ดิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- น่านนที ทองปัญญา (2555). แบบจำลองการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลระดับต้นในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม ต.หัวเรือ อ.เมือง จ.อุบลราชธานี. คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต.
- บุญแสน เตียนกุลธรรม (2005). "ความชื้นของดิน". Retrieved 30 มีนาคม 2558, from http://elearning.nsruc.ac.th/web_elearning/soil/lesson_4_2.php.
- ปัทมา โชติกวิน (2553). การดูดซับและการจำลองการเคลื่อนตัวของตะกั่วและทองแดงในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ภาควิชาเคมีศึกษา ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาธรณีวิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต.
- ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2005). "ทรัพยากรน้ำ." Retrieved 25 เมษายน 2556, from <http://www.thaivimonitor.net/Concept/priority2.htm>.
- ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2004). "ปฏิกิริยาของมลสารในดิน." Retrieved 29 กันยายน 2557, from <http://cyberlab.lh1.ku.ac.th/elearn/faculty/science/sci29/Homepage/Page/reaction.htm>.
- ภาวณิ วนาพรรณ (2553). ผลของปุ๋ยเคมีต่อการดูดติดแคดเมียมด้วยการปลูกอ้อยในดินที่มีการปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาธรณีวิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต.
- รัชพล พิพิธสมบัติ (2553). การศึกษาพฤติกรรมในห้องระดับปฏิบัติการและจำลองลักษณะการชะละลายและการเคลื่อนที่ของไนเตรทในระบบชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิชัญ คุณจักร (2548). การจำลองลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำไม่อิ่มตัว. วิศวกรรมแหล่งน้ำ. วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- วีระพล แต่สมบัติ (2528). หลักอุทกวิทยา. กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง (2555). "เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer AAS ". Retrieved 30 มีนาคม 2558, from <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/137-atomic-absorption-spectrophotometer-aas.html>.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา (2548). Retrieved 21 มีนาคม 2556, from http://webdb.dmso.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296
- ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล (2552). "การเกิดน้ำบาดาล." Retrieved 15 มีนาคม 2555, from <http://it.dgr.go.th/>.
- สำนักเศรษฐกิจการเกษตร (2555). "รายงานประจำปี." Retrieved 24 มีนาคม 2555, from <http://www.oae.go.th/download/journal/AnnualOAE2555.pdf>.
- สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2542). สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ. กรุงเทพฯ.
- สุทธิณี มีสุข (2554). "มลพิษของโลหะหนัก ". Retrieved 23 มีนาคม 2556, from http://www.reo13.go.th/KM_reo13/data_know/54-06-02_metal.pdf.
- สุธาสิณี ชื่อสัตย์. (2553). การกระจายตัวและศักยภาพในการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม: กรณีศึกษาตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี. คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยาศาสตร์บัณฑิต.
- องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ (2554). "สภาพทั่วไปของตำบลหัวเรือ ". Retrieved 13 พฤษภาคม 2558, from <http://www.huaruea.go.th/indx.php/about-us/general>