



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขัน กระจายตัวและการ
จำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำ
บาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การ
ปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษาบ้านหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

กันยายน 2556

สัญญาเลขที่ MRG5480118

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขัน กระจายตัวและการ
จำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำ
บาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การ
ปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษาบ้านหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์
ภาควิชา ธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยเรื่อง “โครงการการดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขันกระจายตัวและการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษาบ้านหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี” การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ ศรีสุข และรองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ นอกจากนี้ยังได้รับการช่วยเหลือจากผู้นำท้องถิ่นและประชาชนในพื้นที่ที่ให้ข้อมูลตลอดจนทางพื้นที่ทำให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจในพื้นที่ที่เป็นประโยชน์และใช้ประกอบการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์

หัวหน้าโครงการ

กันยายน 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
บทคัดย่อ	ช
บทสรุปผู้บริหาร	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1-4
บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 งานวิจัยด้านการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและน้ำบาดาล	2-1
2.2 งานวิจัยด้านแบบจำลองน้ำบาดาล	2-3
บทที่ 3 พื้นที่ศึกษา	3-1
3.1 พื้นที่ศึกษา	3-1
บทที่ 4 ระเบียบวิธีวิจัย	4-1
บทที่ 5 ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาล	5-1
5.1 ผลการศึกษาภาคสนาม	5-1
5.2 ผลวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่	5-3
5.3 ผลวิเคราะห์สมบัติเคมีต่างๆ ของน้ำบาดาล	5-6
5.4 ผลวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนักในปุ๋ยและน้ำบาดาลใช้ในพื้นที่	5-11
บทที่ 6 ผลการทดลองด้านกายภาพ-เคมีและปริมาณโลหะหนักของดิน	6-1
6.1 การเก็บตัวอย่างดินในสนาม	6-1
6.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดผลของเม็ดตะกอนในพื้นที่ศึกษา	6-3
6.3 ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC)	6-10
6.4 การทดลองการดูดซับของโลหะหนัก	6-14
6.5 การจำลองการไหลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D	6-19
6.6 ผลการทดลองการสกัดอย่างต่อเนื่อง (BCR sequential extraction)	6-23
6.7 ศักยภาพในการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก	6-27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 ผลการจำลองการไหลและเคลื่อนตัวของโลหะหนัก	7-1
7.1 การสร้างแบบจำลองเชิงแนวความคิด (conceptual model)	7-1
7.2 ผลจากการประเมินค่าความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	7-3
7.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	7-3
7.4 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ	7-9
บทที่ 8 ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากโครงการวิจัย	8-1
8.1 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	8-1
8.2 บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ	8-1
8.3 บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ	8-1
8.4 ผลิตภัณฑ์	8-2

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก เอกสารนำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	พารามิเตอร์ต่างๆ ของดินที่ทำการตรวจวัด	4-2
ตารางที่ 5.1	ตำแหน่งบ่อบาดาลระดับต้นที่ทำการเก็บตัวอย่าง	5-2
ตารางที่ 5.2	ระดับน้ำบาดาลและสมบัติทางเคมีของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-5
ตารางที่ 5.3	สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำบาดาลระดับต้นในพื้นที่ศึกษา	5-10
ตารางที่ 5.4	ปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมีเกษตรที่ใช้ในพื้นที่ศึกษา (mg/kg)	5-11
ตารางที่ 5.5	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบจากการออกภาคสนามในฤดูฝน ฤดูแล้ง และค่าเฉลี่ยทั้งปี	5-21
ตารางที่ 6.1	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินในพื้นที่ศึกษา	6-8
ตารางที่ 6.2	ปริมาณโลหะหนัก As, Cu, Pb and Zn ในสัดส่วนต่างๆ ของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง (หน่วย mg/g, mean±SD)	6-24
ตารางที่ 6.3	เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะหนักแต่ละชนิดของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง	6-25
ตารางที่ 6.4	ศักยภาพการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในพื้นที่ศึกษา	6-28
ตารางที่ 7.1	ค่านำเข้าในการจำลองการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในโปรแกรม HYDRUS 1D	7-1
ตารางที่ 7.2	ค่าเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำในแบบจำลองvisual Modflow	7-3
ตารางที่ 7.3	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) ที่ความลึกต่างๆ (หน่วย: มก.ต่อลิตร)	7-5
ตารางที่ 7.4	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ที่ความลึกต่างๆ (หน่วย: มก.ต่อลิตร)	7-6
ตารางที่ 7.5	ความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) จากบ่อที่ตั้งในพื้นที่ไร่พริก	7-9
ตารางที่ 7.6	ความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) จากบ่อที่ตั้งในพื้นที่ไร่พริก	7-9

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ปริมาณความต้องการการใช้น้ำของประเทศไทยในภาคส่วนต่างๆ ปี 2549	1-3
รูปที่ 1.2	พื้นที่ศึกษา ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี	1-4
รูปที่ 3.1	แผนที่พื้นที่ศึกษา บริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	3-1
รูปที่ 3.2	แผนที่อุทกธรณีวิทยาประเทศไทย	3-4
รูปที่ 4.1	เครื่อง Pressure chamber	4-2
รูปที่ 5.1	สภาพแปลงพริกการออกภาคสนามครั้งที่ 1-4	5-1
รูปที่ 5.2	แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่	5-3
รูปที่ 5.3	แผนที่ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (หน่วย: เมตร รทก.)	5-4
รูปที่ 5.4	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-6
รูปที่ 5.5	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลในฤดูฝน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-6
รูปที่ 5.6	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลในฤดูแล้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-7
รูปที่ 5.7	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลตลอดทั้ง ปี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-7
รูปที่ 5.8	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-8
รูปที่ 5.9	ค่าพีเอชของน้ำบาดาลในช่วงหน้าฝน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-8
รูปที่ 5.10	ค่าพีเอชของน้ำบาดาลในช่วงหน้าร้อน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-9
รูปที่ 5.11	ค่าพีเอชของน้ำบาดาลตลอดทั้ง ปี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	5-9
รูปที่ 5.12	ปริมาณสารหนู ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12	5-13
รูปที่ 5.13	แผนที่ปริมาณสารหนู ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) ฤดูแล้ง ข) ฤดูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี	5-14
รูปที่ 5.14	ปริมาณทองแดง ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12	5-15
รูปที่ 5.15	แผนที่ปริมาณทองแดง ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) ฤดูแล้ง ข) ฤดูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี	5-16
รูปที่ 5.16	ปริมาณตะกั่ว ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12	5-17
รูปที่ 5.17	แผนที่ปริมาณตะกั่ว ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) ฤดูแล้ง ข) ฤดูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี	5-18
รูปที่ 5.18	ปริมาณสังกะสี ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12	5-19
รูปที่ 5.19	แผนที่ปริมาณสังกะสี ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อน้ำบาดาลระดับดินบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) ฤดูแล้ง ข) ฤดูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี	5-20
รูปที่ 6.1	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและแปรสภาพ	6-1
รูปที่ 6.2	การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	6-2

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 6.3	การเก็บตัวอย่างดินแบบแปรสภาพในพื้นที่ศึกษา	6-2
รูปที่ 6.4	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 1	6-3
รูปที่ 6.5	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 2	6-3
รูปที่ 6.6	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 3	6-4
รูปที่ 6.7	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 4	6-4
รูปที่ 6.8	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 5	6-4
รูปที่ 6.9	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 6	6-5
รูปที่ 6.10	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 7	6-5
รูปที่ 6.11	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 8	6-5
รูปที่ 6.12	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 9	6-6
รูปที่ 6.13	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 10	6-6
รูปที่ 6.14	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 11	6-6
รูปที่ 6.15	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 12	6-7
รูปที่ 6.16	การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 1-12	6-7
รูปที่ 6.17	ผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 2 (St.2)	6-8
รูปที่ 6.18	ผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 6 (St.6)	6-9
รูปที่ 6.19	ผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 10 (St.10)	6-9
รูปที่ 6.20	เครื่อง Pressure chamber และตัวอย่างแท่งดินที่แช่น้ำเพื่อให้ดินอิ่มตัว	6-10
รูปที่ 6.21	แสดง soil water characteristics curve ตำแหน่งที่ 1	6-11
รูปที่ 6.22	แสดง soil water characteristics curve ข) ตำแหน่งที่ 2	6-11
รูปที่ 6.23	แสดง soil water characteristics curve ค) ตำแหน่งที่ 3	6-12
รูปที่ 6.24	แสดง soil water characteristics curve ง) ตำแหน่งที่ 4	6-12
รูปที่ 6.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดินตำแหน่งที่	6-13

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 6.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดินตำแหน่งที่ 6	6-13
รูปที่ 6.27	แสดงการดูดซับของทองแดง (Cu) ในการทดลองจลพลศาสตร์ในช่วง 3 วัน	6-14
รูปที่ 6.28	แสดงการดูดซับของตะกั่ว (Pb) ในการทดลองจลพลศาสตร์ในช่วง 3 วัน	6-15
รูปที่ 6.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Cu	6-16
รูปที่ 6.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Pb	6-16
รูปที่ 6.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับของ Cu และ Pb ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive sorption system)	6-17
รูปที่ 6.32	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นของ Cu และ Pb ที่คายตัวในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)	6-17
รูปที่ 6.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Cu (sorption- desorption) ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)	6-18
รูปที่ 6.34	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Pb (sorption- desorption) ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)	6-18
รูปที่ 6.35	แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบเดี่ยว	6-19
รูปที่ 6.36	แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบเดี่ยว	6-20
รูปที่ 6.37	แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบแข่งขัน	6-20
รูปที่ 6.38	แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบแข่งขัน	6-21
รูปที่ 6.39	แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนกรกฎาคมในระบบแบบเดี่ยว	6-21
รูปที่ 6.40	แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนกรกฎาคมในระบบแบบเดี่ยว	6-22

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 6.41	ปริมาณโลหะหนักในสัดส่วนต่างๆ ของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง	6-23
รูปที่ 6.42	สัดส่วนของทองแดง ตะกั่ว สารหนูและสังกะสีในดิน 12 ตำแหน่ง	6-25
รูปที่ 6.43	สัดส่วนของ F1 และ F2 ของทองแดง ตะกั่ว สารหนูและสังกะสีในดิน 12 ตำแหน่ง	6-26
รูปที่ 7.1	พื้นผิวด้านบนแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 120-130 เมตร ส่วนพื้นผิวด้านล่างจำลองระดับน้ำบาดาลในพื้นที่	7-2
รูปที่ 7.2	แผนที่ความหนาของระดับชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในบริเวณพื้นที่ศึกษา ต.หัวเรือ อ.เมือง จ.อุบลราชธานี มาตราส่วน 1:10,000	7-4
รูปที่ 7.3	กราฟแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) ณ เวลา 5 ,10 และ 15 ปี ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีการลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น	7-7
รูปที่ 7.4	กราฟแสดงความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ณ เวลา 5 , 10 และ 15 ปี ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีการลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น	7-7
รูปที่ 7.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงและตะกั่ว (mg/L) กับเวลา (วัน) ที่เปลี่ยนแปลงไป ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ความหนา 2.5 เมตร	7-8
รูปที่ 7.6	ความเข้มข้นและการกระจายตัวของตะกั่ว (Pb) ที่เวลา 5, 15 และ 25 ปี	7-10
รูปที่ 7.7	ความเข้มข้นและการกระจายตัวของทองแดง (Cu) ที่เวลา 5, 15 และ 25 ปี	7-11
รูปที่ 7.8	Boxplot ใน Logarithmic scale เปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) จากบ่อน้ำบาดาลที่อยู่ในพื้นที่ไร่พริก	7-12
รูปที่ 7.9	Boxplot ใน Logarithmic scale เปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) จากบ่อน้ำบาดาลที่อยู่นอกพื้นที่ไร่พริก	7-12
รูปที่ 7.10	Boxplot ใน Logarithmic scale เปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดง (Cu) จากบ่อน้ำบาดาลที่อยู่ในพื้นที่ไร่พริก	7-13
รูปที่ 7.11	Boxplot ใน Logarithmic scale เปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดง (Cu) จากบ่อน้ำบาดาลที่อยู่นอกพื้นที่ไร่พริก	7-13

รหัสโครงการ : MRG5480118

ชื่อโครงการ : โครงการการดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขัน กระจายตัวและการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษากันห้วยเรือ จังหวัดอุบลราชธานี

ชื่อนักวิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address : csrileet@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 15 มิ.ย. 2554 – 14 มิ.ย. 2556

พื้นที่บ้านห้วยเรือ จังหวัดอุบลราชธานีถือว่าเป็นหนึ่งในพื้นที่เกษตรกรรมที่ค่อนข้างใหญ่ที่มีใช้สารเคมีเกษตรในกิจกรรมทางการเกษตรอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกพริกและนาข้าวซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในที่สุด ในหลายสิบปีที่ผ่านมาได้มีการสารเคมีเกษตรปริมาณสูงมากในประเทศไทย ซึ่งมีโลหะหนักบางชนิดที่อยู่ในสารเคมีเกษตรเหล่านั้นและอาจจะปนเปื้อนลงสู่ดินและปนเปื้อนเข้าไปในห่วงโซ่อาหารและน้ำบาดาลระดับตื้นในที่สุด จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของโลหะหนักที่ตรวจพบในบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับ As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni and Zn สำหรับ Pb ตรวจพบว่ามีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานน้ำบาดาลใน 4 บ่อซึ่งอยู่ในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ $16.66 \pm 18.52 \mu\text{g/l}$ ผลการทดลองแบบแบดท์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 0.0004 และ 0.043 L/kg ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การคายตัวของทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 0.0003 และ 0.0008 L/kg ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลรวมระหว่าง exchangeable fraction (F1) และ reductible fraction (F2) ของทองแดงและสังกะสีมีค่าส่วนใหญ่เกิน 50 % อยู่ในช่วงระหว่าง 50.32 ถึง 78.13 % ยกเว้น ตำแหน่งที่ 6, 8 และ 11 แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสที่โลหะหนักจะปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ง่าย ศักยภาพในการเคลื่อนตัว (mobility potential) มีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Zn (66.85%) > Cu (59.47%) > Pb (53.34%) > As (27.85%) และพบว่า Cu และ Zn มีค่าผลรวมของ F1 และ F2 สูงกว่า 50 เปอร์เซนต์เกือบทุกจุดที่ทำการสำรวจ ในส่วนสุดท้ายของการศึกษาได้จำลองการเคลื่อนตัวของ โลหะหนักโดยใช้แบบจำลองร่วมระหว่าง HYDRUS-1D และ MODFLOW ผลจากการจำลองได้นำค่าการดูดซับที่ได้จากการทดลองแบบแบดท์มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองผลการจำลองพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ไทด์ที่ 25, 50, 75 และ 99 มีค่า 11.50, 34.15, 54.97 and 212.37 $\mu\text{g/L}$ ของตะกั่ว และ 14.86, 35.52, 59.11 and 283.99 $\mu\text{g/L}$ ของทองแดง ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจภาคสนามทั้ง 4 ครั้งในช่วงศึกษาวิจัย

คำหลัก : น้ำบาดาลระดับตื้น, โลหะหนัก, บ้านห้วยเรือ, การสกัดลำดับส่วน

Abstract

Project Code : MRG5480118

Project Title (ชื่อโครงการ): โครงการการดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขัน กระจายตัวและการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษาบ้านหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี

Investigator (ชื่อนักวิจัย): ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address: csrileet@gmail.com

Project Period (ระยะเวลาโครงการ) : 15 มิ.ย. 2554 – 14 มิ.ย. 2556

One of the most agricultural areas, Tambon Hua Rua, Ubon Ratchatani Province, has long been intensively applied agrochemicals in agricultural activities, particularly for planting chilli and rice that may in turn impact negatively to the environment including human health. In few decades, there has long been used agrochemical, i.e. fertilizers, in many areas in Thailand. Heavy metals contained in such chemicals may release into soils and may eventually transfer into the food chain or reach through shallow groundwater. The concentration of detected metals in each well and the overall mean were below the acceptable groundwater standard limits for As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni and Zn, but Pb levels were higher of 4 wells with an overall average Pb concentration of $16.66 \pm 18.52 \mu\text{g/L}$. The batch experiment was designed to derive sorption coefficient (K_d) value yielding 0.0004 L/kg for Cu and 0.043 L/kg for Pb. The results of the desorption of the previously sorbed Cu and Pb show that the desorption coefficient value yielding 0.0003 L/kg for Cu and 0.0008 L/kg for Pb. Mobility potential of heavy metals in soils was analyzed by the BCR scheme, divided into four sequential fractionation phases and then measured the amount of heavy metals by ICP-MS. The results showed that summation of fraction 1 (exchangeable fraction) and fraction 2 (reducible fraction) of Cu and Zn in most soils were higher than 50%, ranged from 50.32 to 78.13%, except soils collected from point no. 6, 8 and 11, indicating such metals may be easily leached into shallow ground water. The decreasing of mobility potential of metals is in the order of: Zn (66.85%) > Cu (59.47%) > Pb (53.34%) > As (27.85%). Finally, the results of the HYDRUS-1D combined with MODFLOW simulation showed that the percentile 25, 50, 75 and 99 of amounts of Pb to groundwater wells located in the fields were 11.50, 34.15, 54.97 and 212.37 $\mu\text{g/L}$, respectively and

amounts of Cu were 14.86, 35.52, 59.11 and 283.99 µg/L, respectively, which were corresponding to observed concentration in shallow groundwater wells in fields.

Keywords (คำหลัก) : Shallow groundwater, Heavy metals, Hua Rua, Sequential extraction

บทสรุปผู้บริหาร

ชื่อโครงการ “การดูดซับและการคายตัวแบบแข่งขัน การกระจายตัวและการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินและคาดการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักกรณีศึกษาบ้านหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี”

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมเพื่อต้องการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นจึงมีการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลงในปริมาณที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากเคมีเกษตรสู่ดินและน้ำบาดาลในที่สุด ในปุ๋ยเคมีมีโลหะหนักบางชนิดเป็นองค์ประกอบ จึงมีการสะสมอยู่ในดินและถูกชะล้างลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ดังนั้นในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นเวลานานย่อมมีการสะสมตัวของโลหะในดินอยู่ในปริมาณสูงและเสี่ยงต่อการชะละลายโลหะหนักที่สะสมอยู่ลงสู่แหล่งน้ำบาดาล วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่ออธิบายกระบวนการที่ซับซ้อนของการดูดซับและเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และเพื่อคาดการณ์โอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนสู่ธรรมชาติ ตลอดจนอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวและ binding form ของโลหะหนักด้วยการทดลองการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักในสภาวะที่มีการแข่งขันในการทดลองแบบแบดท์และการสกัดลำดับส่วน (BCR sequential extraction) ร่วมกันเพื่อทราบลักษณะของพันธะของโลหะหนักบนดิน ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการถูกชะละลายสู่ธรรมชาติที่แตกต่างกัน และใช้ผลของการทดลองดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ในการอธิบายการเคลื่อนตัวของโลหะหนักแบบพลศาสตร์ในธรรมชาติ และโอกาสเสี่ยงของการปนเปื้อนสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และท้ายสุดคาดการณ์การเคลื่อนตัวของโลหะหนักสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมระหว่างแบบจำลองที่จำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล (HYDRUS-1D) และแบบจำลองที่จำลองการไหลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นน้ำบาดาล (MODFLOW/MT3D) เพื่อให้การจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักมีความครบถ้วนสมบูรณ์ขึ้น

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อสำรวจและวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในดินและน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรม
2. ประเมินความเสี่ยงในการชะละลายของโลหะหนักในดินลงสู่แหล่งน้ำบาดาลระดับตื้น
3. จำลองการปนเปื้อนสู่ระบบชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นโดยพิจารณาโซนที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ค้นคว้านงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย
2. สำรวจภาคสนามเพื่อกำหนดตำแหน่งของบ่อบาดาลในพื้นที่ศึกษาโดยกำหนดไว้เป็น 2 กลุ่มพื้นที่ ได้แก่ บ่อบาดาลระดับตื้นที่อยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมและนอกพื้นที่เกษตรกรรมในด้านเหนือและท้ายน้ำของพื้นที่เกษตรกรรมจำนวนทั้งสิ้น 12 บ่อสังเกตการณ์ (กระจายรอบพื้นที่ที่มีการกระจายตัวของพื้นที่เกษตรหนาแน่น)
3. เก็บตัวอย่างดินทั้งแบบทำลายโครงสร้างตัวอย่าง (disturbed soil sampling) และแบบไม่ทำลายโครงสร้างตัวอย่าง (undisturb soil sampling) ทั้งในพื้นที่เกษตรกรรมจำนวน 20 ตัวอย่าง แบบสุ่มทั้งนี้ใช้เป็นตัวแทนได้เนื่องจากแผนที่แสดงชนิดดินพบว่าพื้นที่บริเวณนี้มีชนิดของดินไม่เกิน 3 ชนิด และใช้ hand auger เก็บตัวอย่างของดินตามความลึกประมาณ 1 เมตรเพื่อทราบลักษณะการกระจายตัวของโลหะหนักในแนวดิ่ง โดยเฉพาะพื้นที่ที่พบโลหะหนักในน้ำบาดาลสูง 3 จุดจุดละ 1 เมตรเนื่องจากระดับน้ำบาดาลบริเวณนี้เฉลี่ย

ประมาณ 1 เมตร ตัวอย่างดินที่ได้นำมาใช้สำหรับการทดลองการดูดซับ/การคายตัว (sorption/desorption) และ BCR sequential extraction และเพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดิน และอธิบายที่มาของการปนเปื้อนจากปริมาณโลหะหนักที่มีรูปแบบสัดส่วน (fractionation) ที่ต่างกันตามความลึก

4. หาสมาการและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่อธิบายคุณสมบัติของดินที่ไม่มีอิ่มตัวด้วยน้ำ (variably saturated zone) โดยใช้โปรแกรม RETC

5. เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นและพื้นที่นอกเขตเกษตรกรรมหนาแน่นเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน (Background) ในการเปรียบเทียบกับทั้งในช่วงหน้าฝนและหน้าแล้ง

6. ตรวจวัดระดับน้ำในบ่อบาดาลทั้งในหน้าฝนและหน้าแล้งเพื่อทราบทิศทางการไหล ของน้ำบาดาลระดับตื้น

7. จัดทำแผนที่แสดงระดับน้ำหรือทิศทางการไหลของน้ำบาดาลระดับชั้นตื้นในช่วงเวลาต่างๆ

8. ทดลอง BCR sequential extraction เพื่อทราบ binding form ของการดูดซับของโลหะหนักแต่ละชนิดในดินทั้งในพื้นที่เกษตรกรรมและนอกพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อประเมินโอกาสที่โลหะหนักจะถูกชะละลายสู่ดินและน้ำบาดาล

9. ทดลองแบบแบตช์เพื่อหาคุณสมบัติในการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนัก

10. สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

11. คาดการณ์การเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินและในน้ำบาดาลระดับตื้น

12. วิเคราะห์และประเมินผลการสำรวจทั้งหมดจากข้อมูลต่างๆ ที่มีเพื่อสรุปผลการวิจัย

13. สรุปผลและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบความถี่การประชุมวิชาการและวารสารวิชาการ

4. ผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าทิศทางการไปของน้ำบาดาลหลักไหลจากด้านทิศเหนือ (พื้นที่อ่างเก็บน้ำ) ของพื้นที่ลงสู่ทิศใต้ผ่านพื้นที่ทำการเกษตรหนาแน่น ความลึกเฉลี่ยของระดับน้ำบาดาลประมาณ 2.85 เมตรจากระดับพื้นผิวดิน ค่าพีเอชของน้ำบาดาลเฉลี่ยมีค่าเฉลี่ย 4.71 ซึ่งมีสภาพความเป็นกรด โดยเฉพาะบางบ่อที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 4 ค่าเฉลี่ยของโลหะหนักที่ตรวจพบในบ่อบาดาลในพื้นที่ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับ As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni and Zn แต่สำหรับ Pb ตรวจพบว่ามีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานน้ำบาดาลใน 4 บ่อซึ่งอยู่ในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยประมาณ $16.66 \pm 18.52 \mu\text{g/l}$ ในการศึกษาการดูดซับและคายตัวของโลหะหนักได้เลือกศึกษาเฉพาะ Cu และ Pb เนื่องจากตรวจพบในปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ และเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษ ผลการศึกษาการดูดซับและการคายตัวพบว่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 0.0004 L/kg และ 0.043 L/kg และสัมประสิทธิ์การดูดซับของทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 0.0003 L/kg และ 0.0008 L/kg จากผลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าตะกั่วจะถูกหน่วงไว้ในดินได้ดีกว่าทองแดงและเคลื่อนที่สู่น้ำบาดาลได้ช้ากว่า และเมื่อพิจารณาผลรวมระหว่าง exchangeable fraction (F1) และ reducible fraction (F2) ซึ่งสามารถประเมินโอกาสที่โลหะหนักจะปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ง่าย กล่าวคือศักยภาพในการเคลื่อนตัว (mobility potential) มีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Zn (66.85%) > Cu (59.47%) > Pb (53.34%) > As (27.85%) นอกจากนี้ยังพบว่า Cu และ Zn มีค่าผลรวมของ F1 และ F2 สูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เกือบทุกจุดที่ทำการสำรวจ ผลการจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยใช้แบบจำลองร่วมระหว่าง HYDRUS-1D และ MODFLOW ซึ่งได้ข้อมูลนำเข้าการทดลองการดูดซับที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ไทด์ที่ 25, 50, 75 และ 99 มีค่าปริมาณ Pb เท่ากับ 11.50, 34.15, 54.97 and 212.37 $\mu\text{g/L}$ และปริมาณ Cu เท่ากับ 14.86, 35.52, 59.11 and 283.99 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณของ Cu และ Pb ที่เปอร์เซ็นต์ไทด์ที่ 25, 50, 75 และ 99 ของปริมาณโลหะดังกล่าวที่ได้จากการสำรวจภาคสนามทั้ง 4 ครั้ง

ในช่วงศึกษาวิจัย จากการศึกษาข้อเสนอแนะให้มีการติดตามตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในพื้นที่ศึกษาต่อเนื่องตลอดจนพื้นที่อื่นๆ ที่มีสภาพใกล้เคียงกัน ตลอดจนจำเป็นที่ต้องการศึกษาเพื่อประเมินความเสี่ยงทางด้านสุขภาพของเกษตรกรที่ดื่มน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาต่อไป

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. **Chotpantarat, S.**, Limpakanwech, C., and Sutthirat, C. 2011. Effect of soil water characteristic curves on simulation of nitrate vertical transport in a Thai agricultural soil. Sustainable Environmental Research 21(3): 187-193(Formerly, Journal of Environmental Engineering and Management, JEEAM, indexed in the Chemical Abstracts Service, Cambridge Scientific Abstracts, EBSCO and INSPEC). **Corresponding author.**

2. **Chotpantarat, S.**, Ong, S.K., Sutthirat, C., and Osathaphan, K. 2012. Sorption and transport of Pb^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , and Zn^{2+} under single, binary and multi-metal systems through lateritic soil: Modeling. Geoderma 189-190: 278-287. **Impact factor 2.318. Corresponding author.**

3. Wongsasuluk, P., **Chotpantarat, S.**, Siriwong, W., Borjan, M, and Robson, M. 2013. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area at Ubon Ratchathani Province, Thailand. Environmental Geochemistry and Health Journal. DOI: 10.1007/s10653-013-9537-8. **Impact factor 2.076. (Accepted) Corresponding author.**

2. อื่น ๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

2.1 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. **Chotpantarat, S.**, Sutthirat, C., and Srisuk, K. 2012. Transport modeling of single and binary metal systems of Pb and Cu through unsaturated soil in an agricultural area: A case study of Hua Rua area, Thailand. The 4th IWA Asia-Pacific Young Water Professionals Conference. Japan, 7-10 Dec., 2012 (Full paper and Oral presentation)

2. **Chotpantarat, S.** and Masipan, T. 2013. Sequential Fractionation of Heavy Metals in Agricultural Soils: A Case Study of Hua Rua Area, Ubon Ratchathani Province. International Conference on Environmental and Hazardous Substance Management, Bangkok, Thailand, 21-23 May, 2013. (Full paper and Oral presentation)

2.2 บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

1. **Chotpantarat, S.**, 2011. Causes and potential acid generation techniques of acid mine drainage (AMD). Engineering Journal 64(4): 59-66.

^{*}Corresponding author.

Tel.: 0-2218-5442; Fax: 0-2218-5464

E-mail: csrilert@gmail.com or lertc77@yahoo.com

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อย่างที่เรารู้กันว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พื้นที่กว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของประเทศใช้เพื่อการเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีการนำน้ำมาใช้ในการเกษตรมากขึ้น ปริมาณการใช้น้ำของไทยในปี 2549 พบว่ามีการใช้น้ำในการเกษตรกรรมถึง 61% ซึ่งเป็นภาคส่วนที่ใช้น้ำมากที่สุด (รูปที่ 1.1) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชนบทหรือชุมชนขนาดเล็กส่วนใหญ่ที่นอกเขตชลประทานซึ่งใช้น้ำเพื่อการบริโภคมากขึ้นเพราะเชื่อว่าแหล่งน้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำที่มีความสะอาดมากกว่าแหล่งน้ำบนผิวดิน และเพื่อต้องการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นจึงมีการใช้น้ำบาดาลปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลงในปริมาณที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากเคมีเกษตรสู่ดินและน้ำบาดาลในที่สุด ในปุ๋ยเคมีมีโลหะหนักบางชนิดเป็นองค์ประกอบ (Eugenia et al., 1995; Ma et al., 2010) โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการทางธรรมชาติจึงมีการสะสมอยู่ในดินและถูกชะล้างลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ดังนั้นในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นเวลานานย่อมมีการสะสมตัวของโลหะในดินอยู่ในปริมาณสูงและเสี่ยงต่อการชะละลายโลหะหนักที่สะสมอยู่ลงสู่แหล่งน้ำบาดาล (Merian, 1991) ทำให้น้ำในบริเวณนั้นมีความเป็นพิษต่อการอุปโภคบริโภคของคนและสิ่งมีชีวิต และการถูกดูดกลับโดยพืชที่ปลูกในบริเวณนั้นจะนำไปสู่การปนเปื้อนในระบบห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง (ค่าพีเอชต่ำ) จะยิ่งส่งเสริมให้โลหะหนักที่ตกค้างอยู่มีความสามารถในการดูดซับลดลงและสามารถเคลื่อนตัวสู่น้ำบาดาลได้เร็วขึ้น (Chen et al., 2010) สำหรับความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิดและเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไปไม่ว่าทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหารและผิวหนัง ตะกั่วส่วนใหญ่จะจับอยู่กับเม็ดเลือดแดง มีผลในการยับยั้งเอ็นไซม์ที่เกี่ยวกับการสร้างเม็ดเลือดแดง นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อดับ หัวใจและเส้นเลือดภาวะเจริญพันธุ์ ไคโรโมโซม และก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และความพิการแต่กำเนิดอีกด้วย และทองแดงทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง เป็นต้น (Sawyer et al., 2003)

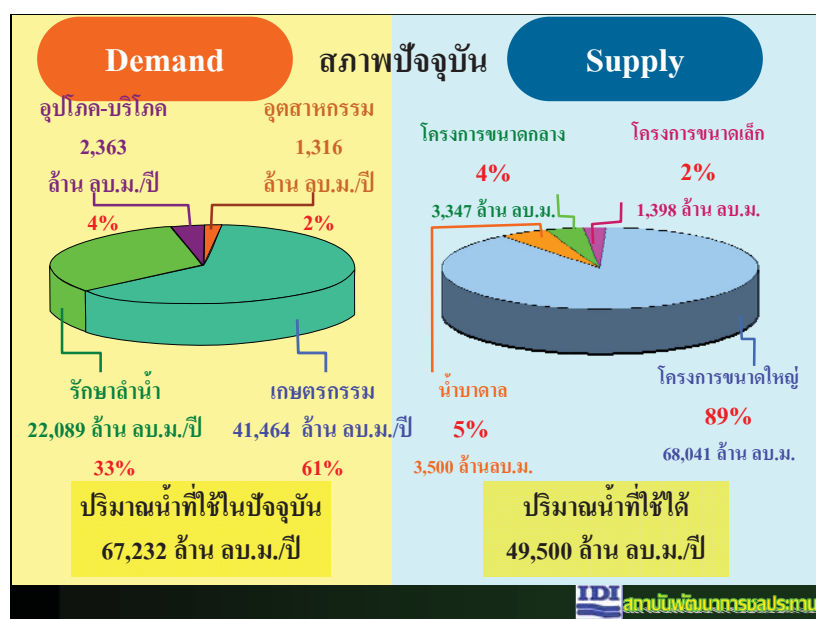
พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในบริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี (รูปที่ 1.2) เป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปลูกพริกและข้าวเป็นจำนวนมากเป็นเวลากว่า 30 ปี และได้มีการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลงหลายชนิด ในบริเวณพื้นที่ศึกษามีบ่อน้ำบาดาลกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นที่ดังกล่าว และจากการสำรวจภาคสนามเบื้องต้น พบว่ามีเกษตรกรบางรายได้อุปโภคบริโภคน้ำจากบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่เกษตรกรรมโดยตรง จากผลการศึกษาของ Srithongdee et al. (2009) พบว่าค่าพีเอชในน้ำบาดาลระดับตื้นมีสภาพเป็นกรดมีค่าอยู่ระหว่าง 3.70-4.80 ซึ่งเป็นปัจจัยที่เสี่ยงต่อการชะละลายของโลหะหนักจากสารเคมีเกษตรสู่ดินและน้ำบาดาลระดับตื้นได้ง่ายขึ้น (Chen et al., 2010) พื้นที่ในภาคอีสานมีลักษณะสภาพดินเป็นดินร่วนปนทรายซึ่งน้ำฝนที่ตกลงมาหรือน้ำจากการชลประทานซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ค่อนข้างดี ดังนั้นปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นส่งเสริมให้พื้นที่ศึกษา

มีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนโลหะหนักและจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาเพื่อประเมินและคาดการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่ดังกล่าว

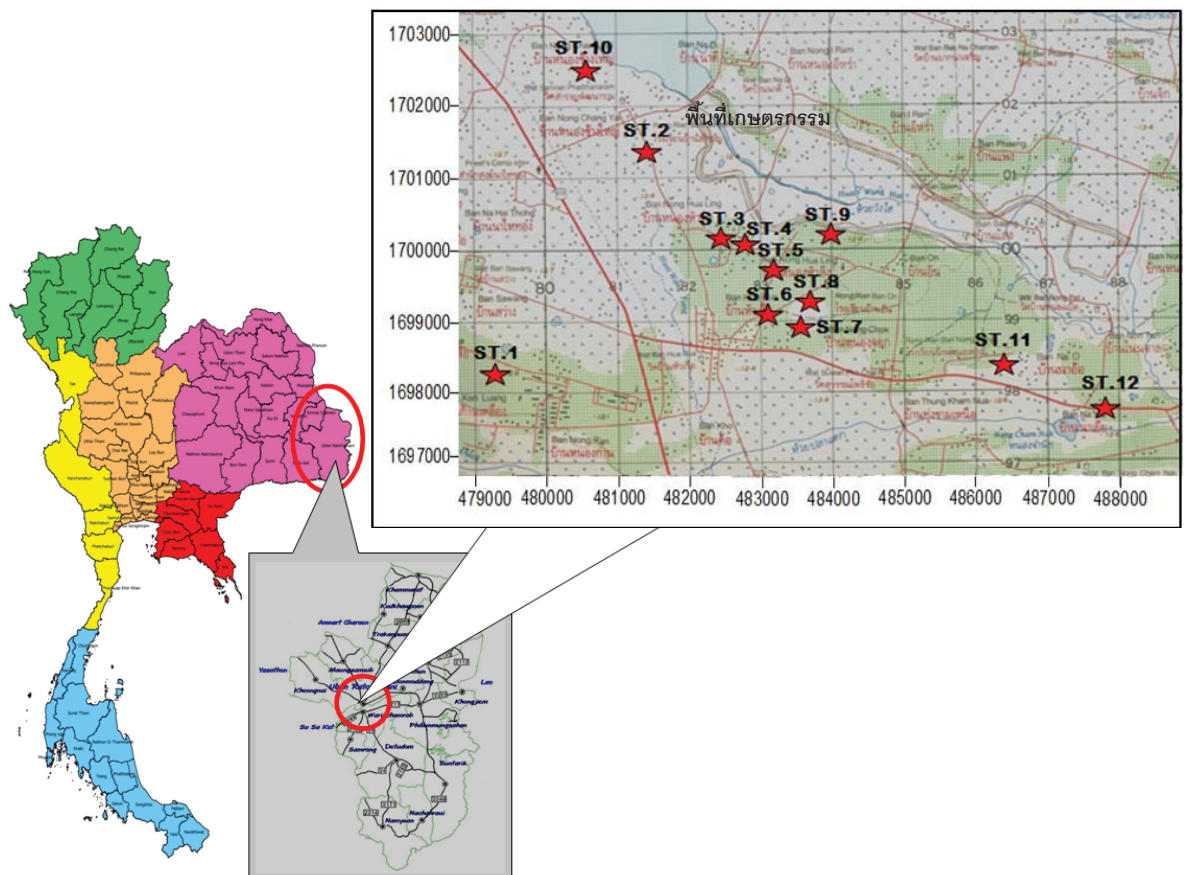
การอธิบายพฤติกรรมของการกระจายตัวและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักเพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในดินและน้ำบาดาล และหาแนวทางในการป้องกันหรือฟื้นฟูพื้นที่ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง หากแต่ในการศึกษาในอดีตจะศึกษาการดูดซับของโลหะเพียงชนิดเดียวบนดินโดยไม่คำนึงผลของโลหะชนิดอื่นที่ถูกชะละลายออกมาด้วยกัน (Kookana and Naidu., 1998; Li, 2000; Williams et al., 2003; Pang et al., 2004; Miretzky et al., 2006; Yolcubal and Akyol, 2007) แต่ในธรรมชาติเมื่อมีการชะละลายเกิดขึ้น (Leaching) จะมีโลหะหลายชนิดที่ถูกชะละลายออกมาพร้อม ๆ กันและเคลื่อนที่สู่ดินและชั้นน้ำบาดาลในที่สุด และปัจจุบันงานวิจัยเพื่อประเมินโอกาสการปนเปื้อนของโลหะหนักจากพื้นที่เกษตรกรรมสู่ดินและน้ำบาดาลของประเทศไทยยังมีน้อยมาก อีกทั้งการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยส่วนใหญ่เป็นเพียงการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่สามารถนำผลมาพิจารณาโอกาสเสี่ยงในการเคลื่อนตัว (potential mobility) และปริมาณที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำเข้าสู่ร่างกายได้ (bioavailability) (Sayen et al., 2009) นอกจากนี้ไม่สามารถอธิบายกลไกของการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในกรณีที่เกิดการชะละลายของโลหะหนักพร้อม ๆ กัน และมีความคลาดเคลื่อนในการนำมาประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์โอกาสเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ดังนั้นเพื่อสามารถอธิบายกระบวนการที่ซับซ้อนของการดูดซับและเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และเพื่อคาดการณ์โอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนสู่ธรรมชาติ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและน้ำบาดาลระดับตื้นด้วยการทดลองการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักในสภาวะที่มีการแข่งขัน (Competitive sorption/desorption) ในการทดลองแบบแบตช์ (Batch experiment) และ BCR sequential extraction (Keivan et al., 2009) รวมกันเพื่อทราบ binding forms ของโลหะหนักชนิดนั้น ๆ บนดิน ซึ่งได้แก่ exchangeable fraction, Fe-Mn oxides fraction, organically complexed fraction และ residual ซึ่งแต่ละส่วน (Fraction) มีความสามารถในการถูกชะละลายสู่ธรรมชาติแตกต่างกัน และใช้ผลของการทดลองดังกล่าวเป็นตัวชี้วัด (indicator) ในการอธิบายการเคลื่อนตัวของโลหะหนักแบบพลศาสตร์ในธรรมชาติ (Heavy metal dynamic) และประเมินโอกาสเสี่ยงของการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากดินสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (potential mobility) และทำสุดคาดการณ์การเคลื่อนตัวของโลหะหนักสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วม (Coupled model) ระหว่างแบบจำลองที่จำลองการชะละลายและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (HYDRUS-1D) ร่วมกับแบบจำลองที่จำลองการไหลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในน้ำใต้ดินในชั้นน้ำบาดาล (MODFLOW/MT3D) เพื่อให้การจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักมีความครบถ้วนสมบูรณ์ขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดประการหนึ่งของแบบจำลอง MODFLOW/MT3D ซึ่งเป็นแบบจำลอง 3 มิติที่นิยมในการจำลองการเคลื่อนตัวของมลสารในปัจจุบันมีความจำกัดในการจำลองในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญในการประเมินการปนเปื้อนของมลสารจากผิวดินสู่ชั้นน้ำบาดาล (Chotpantararat et al., 2009) ในการจำลองจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง competitive sorption/desorption และคุณสมบัติเฉพาะของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวน้ำ (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

ของดินในพื้นที่ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของดิน และความดัน (Suction pressure) เพื่อประเมินการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากผิวดินสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น ประโยชน์จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิงเพื่อใช้ในการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรมอื่นๆ ในประเทศ อย่างเป็นระบบและอธิบายกลไกการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากดินสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น ตลอดจนประยุกต์การใช้แบบจำลองร่วมกันของ HYDRUS-1D และ MT3D ในพื้นที่อื่นๆ และใช้ข้อมูลจากผลการศึกษาเพื่อหามาตรการในการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนที่เหมาะสมและประเมินความเสี่ยงเชิงสุขภาพของเกษตรกรในพื้นที่ต่อไป



รูปที่ 1.1 ปริมาณความต้องการการใช้น้ำของประเทศไทยในภาคส่วนต่างๆ ปี 2549
ที่มา: สถาบันพัฒนาการชลประทาน, 2549



รูปที่ 1.2 พื้นที่ศึกษา ตำบลหัวเรือ จังหวัดอุดรราชธานี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสำรวจและวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในดินและน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่เกษตรกรรม
2. ประเมินความเสี่ยงในการชะละลายของโลหะหนักในดินลงสู่แหล่งน้ำบาดาลระดับตื้น
3. จำลองการปนเปื้อนสู่ระบบชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นโดยพิจารณาโซนที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

บทที่ 2

บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยด้านการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและน้ำบาดาล

Appel และคณะ (2008) ศึกษาดิน 3 ชนิดและทำการวัดค่าการดูดซับของตะกั่ว แคดเมียมและแคลเซียม โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัย 3 ข้อคือหาขอบเขตที่โลหะหนักๆถูกดูดซับอยู่ อธิบายปฏิกิริยาระหว่างโลหะและดิน และเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโลหะเมื่อลงสู่ดิน จากงานวิจัยพบว่าตะกั่วจะมีการเปลี่ยนรูปน้อยกว่าแคดเมียมและขัดขวางการดูดซับของแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่าตะกั่วปรากฏอยู่ในดินมากกว่าแคดเมียมและแคลเซียม ดังนั้นตะกั่วน่าจะเป็นโลหะหนักที่มีโอกาสเคลื่อนตัวสู่น้ำบาดาลได้น้อยกว่าแคดเมียมและแคลเซียม

Chaturvedi และคณะ (2006) ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic of sorption) ของโลหะหนัก 3 ชนิดคือ ตะกั่ว สังกะสีและแคดเมียม ในดินที่ไม่มีสารอินทรีย์ผสมกับดินที่มีสารอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:3 และใช้ 1% hydroxyapatite ซึ่งเป็นสารที่ใช้สำหรับโลหะหนักที่ไม่มีการเคลื่อนที่และมีสมบัติการถูกชะล้าง โดยใช้การทดลองแบบแบตช์ (batch method) และการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของไอโซเทอมแบบต่างๆ และมีการใช้สารละลาย KNO_3 เข้มข้น 0.05 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของโลหะหนักลดลงตามลำดับดังนี้ ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม แสดงให้เห็นว่าตะกั่วมีความสามารถในการถูกชะล้างน้อยที่สุด

Covelo และคณะ (2007) ศึกษาการดูดซับของโลหะหนัก 5 ชนิดคือ ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม นิกเกิลและสังกะสี ในดิน 11 ชนิดที่มีความเป็นกรดซึ่งเป็นดินที่เก็บจากทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศสเปน โดยใช้การทดลองแบบแบตช์ (batch method) และใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองพบว่าตะกั่วและทองแดงถูกดูดซับได้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ และยังพบว่าค่าการดูดซับของตะกั่วและทองแดงมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์ในดินอีกด้วย

Dong และคณะ (2009) ศึกษาความสามารถในการเคลื่อนตัวของตะกั่ว แคดเมียมและโครเมียม (VI) ในดินที่มีการเพาะปลูกและการปนเปื้อนของโลหะหนักเหล่านี้ลงสู่น้ำบาดาลในบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศจีน โดยการทดลองนี้มีการควบคุมค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 5 และทำการทดลองโดยใช้ไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich พบว่าข้อมูลการดูดซับของโครเมียม (VI) เป็นไปตามไอโซเทอมเส้นตรงและการดูดซับของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้เข้าสู่สมดุลภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงเท่านั้น โดยตะกั่วมีการดูดซับที่ดีที่สุดและโครเมียม (VI) มีการดูดซับได้น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับของตะกั่วและแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย เพราะฉะนั้นโลหะหนักที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่มากที่สุดคือ โครเมียม (VI) แคดเมียมและตะกั่วตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่าดินที่ปนเปื้อนโดยน้ำเสียที่มีตะกั่วและแคดเมียมนั้น โลหะหนักทั้งสองชนิดนี้จะเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นน้ำบาดาลได้ช้ามากเพราะมีการดูดซับไว้ในดินสูงและมีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำ ในขณะที่โครเมียม (VI) สามารถเคลื่อนที่ลงสู่ชั้นน้ำบาดาลได้เร็วและถูกดูดซับไว้ในดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Hansen และ Maya (1997) ศึกษาการดูดซับของตะกั่วและแคดเมียมในทะเลสาบ Chapalad โดยการทดลองถูกออกแบบให้ศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ พบว่าตะกั่วสามารถถูกดูดซับได้มากกว่าแคดเมียมและ

ปฏิกิริยาของตะกั่วต่อตะกอนพื้นผิวไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้เมื่อเปรียบเทียบกับแคดเมียมที่ความเข้มข้นที่เท่ากัน

Keivan และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในภาคตะกอนบ่อกุง ในเมือง Selangor ประเทศ Malaysia โดยมีขั้นตอนศึกษา 2 วิธีตามการสกัดตามลำดับ (sequential extraction methods) ดังนี้ 1) วิธี Tessier 5 ขั้นตอน 2) วิธี BCR 3 ขั้นตอน จากการวิเคราะห์ตะกอนในบ่อกุงพบว่า Ca, Fe และ Mn มีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเทียบกับ Zn, Cu, Cr, Cd และ Pb และจากการทดลองสกัดตามลำดับ (sequential extraction methods) พบว่า Cd, Mn และ Pb พบมากในรูปแบบของ exchangeable/carbonate แสดงว่ามีการชะล้างได้ง่าย ส่วน Cu และ Zn ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ oxidizable form ซึ่งผลของการทดลองพบว่าวิธี BCR จะมีความคล้ายคลึงกับวิธี Tessier แต่เมื่อดูเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้จากการทดลองแล้วพบว่าวิธี BCR จะมีความถูกต้องมากกว่าวิธี Tessier

Li และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรที่แห้งแล้ง โดยวัดความเข้มข้นของ Cu, Pb, Cr, Hg และ As ในดินในพื้นที่การเกษตรที่แห้งแล้งและดินในพื้นที่ชลประทาน บริเวณหมู่บ้าน Shajiwuan หมู่บ้าน Gangou และ หมู่บ้าน Sifangwu ในตอนกลางของจังหวัดกานซู ประเทศจีน พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรแห้งแล้งมีค่าสูงยกเว้น Hg มีค่าความเข้มข้นต่ำ โดยความเข้มข้นของ Pb มีค่าเกินมาตรฐานประมาณ 72.46% ซึ่งเป็นอันตราย จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีองค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ในการประเมินข้อมูลดินโดยใช้ varimax rotation กับ Kaiser Normalization พบว่าปัจจัยชลประทาน ปัจจัยทางการเกษตรและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์จะช่วยสนับสนุนความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเคมีและปัจจัยหลักของการสะสมของ Cu, Pb, Cr, Hg และ As ในพื้นที่เกษตรที่แห้งแล้ง ซึ่งมีการเกิดที่แตกต่างกับพื้นที่เกษตรในเขตพื้นที่ชลประทาน

Nouri และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นและการกระจายตัวของโลหะหนัก (i.e., Cu, Cd, Ni, Zn) ในชั้นน้ำบาดาล ในแถบจังหวัด Shush และจังหวัด Andimeshk บริเวณตอนใต้ของประเทศอิหร่านซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการทำการเกษตรค่อนข้างสูง โดยพื้นที่ศึกษามีขนาดประมาณ 1,100 km² อยู่ระหว่างแม่น้ำ Dez และ Karkhe โดยได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 บริเวณ คือ A, B, C และ D จากนั้นทำการเก็บตัวอย่าง 168 ตัวอย่างจาก 42 บ่อ ในระหว่างเดือน เมษายน พฤษภาคม สิงหาคม และเดือนกันยายน ปี 2004 และนำมาหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำตัวอย่างโดยใช้เครื่อง AAS ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Ni ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (Cu 1.3 มก./ลิตร และ Zn 5 มก./ลิตร) และพบว่า Cd 4.8 เปอร์เซ็นต์จากตัวอย่างทั้งหมดมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่ามาตรฐาน (Cd 0.005 mg/L) จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักบริเวณตอนใต้มีค่ามากกว่าบริเวณตอนเหนือของพื้นที่ศึกษา เนื่องจากทางตอนใต้มีพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่อุตสาหกรรมมากกว่า และทิศทางการไหลของน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยปกติจะไหลจากทิศเหนือไปยังทางทิศใต้ของจังหวัด Shush จึงน่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารปนเปื้อนอื่นอยู่ในปริมาณมาก

Nastha และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินในบริเวณที่มีการทำเหมืองและปล่อยทิ้งไว้ ซึ่งส่วนที่เหลือจากการผลิตแร่เมื่อสะสมตัวในดินเป็นเวลานานๆ ก็จะทำให้ดินมีการปนเปื้อนของโลหะหนักในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งได้ศึกษาความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโลหะหนัก (i.e., As,

Cd, Cu, Pb และ Zn) ในตัวอย่างดินจาก Kocani (Macedonia) โดยใช้เครื่อง ICP-AES และดูพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักของดิน ซึ่งผลปรากฏพบ As, Cd, Cu, Pb และ Zn ที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง ซึ่งตรวจพบในดินตัวอย่างจากพื้นที่ VII-2 ซึ่งอยู่ใกล้กับเหมือง Zletovo และแม่น้ำ Zletovska ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันตกของ Kocani โดยได้ทำการเก็บน้ำจากด้านตะวันตกของเหมือง Zletovo ซึ่งลักษณะของโลหะหนักที่มีการกระจายตัวในดินมีการกระจายตัวจากมากไปน้อยดังนี้ $Pb > As > Cd > Zn > Cu$ ดังนั้นความสามารถในการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นจากมากไปน้อย $As > Cu > Pb > Zn > Cd$

Rybicka และคณะ (1995) ศึกษาการดูดซับของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสีและนิกเกิลใน illite, beidellite และ montmorillonite โดยใช้ multichamber device ซึ่งใช้ศึกษาอัตราการดูดซับของโลหะในดินที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย การทดลองพบว่าตะกั่วและทองแดงถูกดูดซับไว้ใน illite ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 80 ถึง 90 ในขณะที่สังกะสี นิกเกิลและแคดเมียมถูกดูดซับไว้เพียงร้อยละ 40 ถึง 50 เท่านั้น

Santos และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษา speciation ของ Zn, Cd, Pb และ Cu ในน้ำบาดาลจำนวน 10 บ่อ ในชั้นน้ำตะกอนน้ำพา (alluvial aquifers) ของแม่น้ำ Guadamar ซึ่งได้รับผลกระทบจากการขุดเหมือง Aznalcollar ซึ่งจากการศึกษาทางเคมีพบว่า น้ำในบ่อตัวอย่างมีค่าพีเอชต่ำ และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง โดยวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องมือ inductively coupled plasma source atomic emission Spectroscopy (ICP-AES) ซึ่งจากการศึกษาปริมาณโลหะหนักและนำมาศึกษา speciation ซึ่งผลที่ได้สะท้อนให้เห็นว่า Pb และ Cu มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้น้อย ซึ่งตรงข้ามกับ Zn และ Cd ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ตลอด

Vega และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับของดินในเหมืองซึ่งมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ เช่น แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่วและสังกะสี พบว่าดินส่วนใหญ่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่มากที่สุดและนิกเกิลปนเปื้อนอยู่ในดินน้อยที่สุด โดยพบว่าการดูดซับของตะกั่วในดินนั้นขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ในดินและดินที่มีปริมาณแร่ gibbsite, goethite และ mica จะมีการดูดซับโครเมียมไว้ในปริมาณมาก

Wong และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ปลูกข้าวบริเวณปากแม่น้ำ Pearl ซึ่งเป็นภูมิภาคที่มีการพัฒนามากที่สุดของประเทศจีน โดยได้ทำการเก็บดิน 3 บริเวณ ดังนี้ คือ บริเวณที่มีการทำการเกษตรในพื้นที่ศึกษา 38 ตัวอย่าง ดินบริเวณที่มีการเพาะปลูกข้าว 16 ตัวอย่าง และดินตามธรรมชาติ 18 ตัวอย่าง จากนั้นได้ทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในดินด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) จากการศึกษพบว่า ดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ปลูกข้าว และดินตามธรรมชาติมีการปนเปื้อนของ Cd และ Pb ซึ่งดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมยังพบโลหะหนักมากที่สุดซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าน่าจะมาจากการใช้ปุ๋ยเคมีและยาฆ่าแมลง

2.2 งานวิจัยด้านแบบจำลองน้ำบาดาล

กรมโยธาธิการ (2538) ใช้แบบจำลอง MODFLOW ในการจำลองสภาพน้ำบาดาลในจังหวัดกำแพงเพชร เพื่อหาความเหมาะสมในการเติมน้ำลงในชั้นหินอุ้มน้ำพร้อมทำการทดลองเติมน้ำด้วยสระภาคนาม สรุปได้ว่าชั้นหินอุ้มน้ำมีความเหมาะสมและน้ำดิบที่มีอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้แต่มีตะกอนปะปนเล็กน้อย **พิศาล และ บัญชา (2547)** ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MODFLOW เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม SGDP และ MIKE SHE พบว่ามีความน่าเชื่อถือมากกว่ามีความยืดหยุ่น และสะดวกในการเพิ่มเติมหรือปรับแก้ไขข้อมูลอีกทั้งเป็นโปรแกรมสาธารณะ

ส่วนการศึกษาน้ำบาดาลบริเวณจังหวัดสุโขทัยพบว่า การสูบที่ปลอดภัยจะอยู่ในช่วง 35-40 ลูกบาศก์เมตร/ปี ซึ่งจะไม่ทำให้สมดุลของชั้นน้ำเปลี่ยนแปลงไป แต่ในปัจจุบันมีอัตราการสูบต่างๆ กันในแต่ละปี ตั้งแต่ 35-55 ลูกบาศก์เมตร

รณัท (2554) จำลองการไหลของน้ำบาดาลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในเชิง 3 มิติในพื้นที่ศึกษา นี้จากการใช้โปรแกรม Visual MODFLOW โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นน้ำและระดับน้ำบาดาล พบว่าน้ำบาดาลระดับตื้นมีการไหลจากทิศเหนือ (recharge zone) ไปสู่ทิศใต้ (discharge zone) ภายในชั้นหินอุ้มน้ำของดินทราย และหินทรายและได้มีการนำข้อมูล เช่น สมบัติการซึมผ่านและบริเวณที่มีการเติมน้ำ เป็นต้น มาปรับเทียบค่าเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากแบบจำลองพบว่าโลหะหนักมีการเคลื่อนตัวตามการไหลของชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น

ปัทมา (2553) ได้ทำการศึกษาการดูดซับและจำลองการเคลื่อนตัวของตะกั่วและทองแดงในพื้นที่นี้ โดยมีการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองไปใช้ในแบบจำลอง HYDRUS-1D พบว่าหากค่าสมบัติการดูดซับ (K_d) มีค่ามากจะทำให้การเคลื่อนตัวของโลหะหนักช้า และจะพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลในปริมาณที่น้อย แต่ถ้าค่าสมบัติการดูดซับ (K_d) มีค่าน้อย โลหะหนักจะสามารถเคลื่อนตัวได้เร็วและจะพบการปนเปื้อนในน้ำบาดาลในปริมาณที่สูง

สุธาสนี (2553) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของความเป็นกรด-ด่างในน้ำบาดาลในพื้นที่นี้ พบว่าบริเวณที่มีการทำการเกษตรกรรมหนาแน่น ประกอบกับการใช้สารเคมีทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ปุ๋ยเคมี จะมีความเป็นกรดสูงกว่าบริเวณรอบข้างที่มีการทำการเกษตรที่น้อยกว่า ซึ่งน้ำบาดาลที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักมาก จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรด (จากการศึกษาพบว่าน้ำมี pH เฉลี่ยเท่ากับ 4.67) และยังสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของน้ำและค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ซึ่งพบว่าบริเวณตอนกลางของพื้นที่ซึ่งมีค่าความชันทางชลศาสตร์น้อย จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักมาก เนื่องจากเกิดการชะล้างของปุ๋ยลงไป ทำให้มีการสะสมตัวของโลหะหนักในปริมาณที่มาก ส่วนบริเวณที่ค่าความชันทางชลศาสตร์มาก จะมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะน้อย เนื่องมาจากน้ำที่ไหลไป

Ayenew และคณะ (2008) ทำแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาล ที่ตอนกลางของประเทศอียิปต์ พบว่าการไหลของเส้นทางน้ำหลักมีความลึกไม่เกิน 50 เมตรและถูกจำกัดการไหลโดยแนวรอยเลื่อน และรอยแตกในชั้นหิน ชั้นระดับน้ำตื้นยังถูกควบคุมจากสภาพภูมิประเทศและความแตกต่างของชั้นน้ำ ส่งผลให้เกิดสภาพแบบน้ำพุ บริเวณตอนเหนือ ตะวันตก ตะวันตกเฉียงเหนือในของพื้นที่ที่สำคัญถ้ายังคงมีการปนเปื้อนของน้ำผิวดินอยู่และหากมีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณที่สูงเช่นเดิมจะส่งผลกระทบต่อ การปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลได้ในอนาคต

Reimann และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของสารในชั้นไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-2D และชั้นอุ้มน้ำด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลอง MODFLOW ในพื้นที่เกษตรกรรมทางตอนเหนือของประเทศเยอรมัน โดยเน้นศึกษาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น พบว่าการเคลื่อนตัวของสารบริเวณเหนือระดับน้ำบาดาลเป็นแบบ 3 มิติ ทำให้ความเข้มข้นของสารที่จะเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นน้ำบาดาลลดลง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงคาปิลลารี (Capillary force) ระหว่างน้ำและเม็ดตะกอน ส่งผลให้ค่าอัตราการไหลซึมของน้ำ (Hydraulic conductivity) มีค่าลดลง

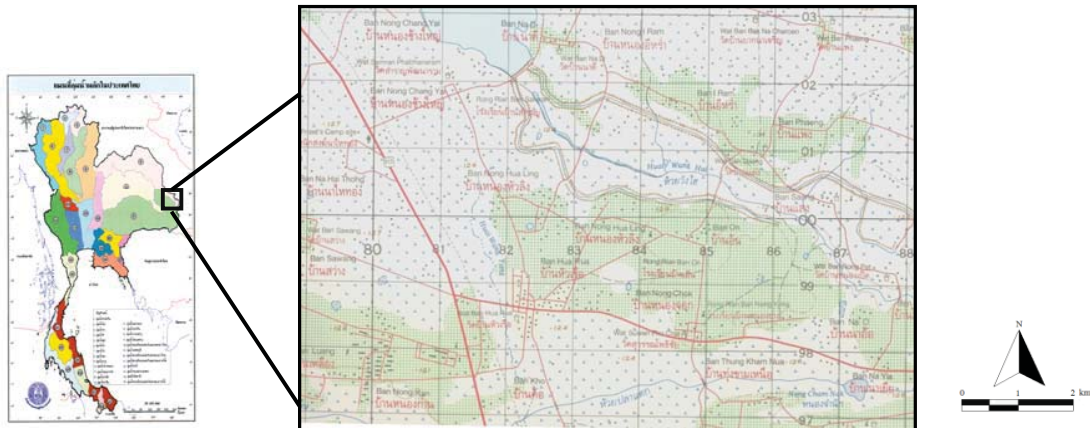
Tsou และWhittemore (2001) ศึกษาการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม GIS กับแบบจำลอง MODFLOW ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรม GIS ช่วยในการจัดการวิเคราะห์และแสดงภาพของข้อมูลต่างๆ และสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของโมเดลและผลลัพธ์ อีกทั้งยังสร้างข้อมูลสำหรับการตัดสินใจและหาคำตอบของแบบจำลอง

Van der Griff and Griffioen (2007) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในพื้นที่รับน้ำ 3 แห่งที่ดินปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงถลุงแร่สังกะสี ซึ่งอยู่ในเขตการปกครอง Kempen ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำข้อมูลจากแบบจำลองการเคลื่อนตัวของแคดเมียมและสังกะสีในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและแบบจำลองการไหลของน้ำบาดาลมาใช้ควบคู่กัน ซึ่งการไหลของน้ำในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นส่วนใหญ่เป็นการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ส่วนการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำจะเป็นการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ทำให้เมื่อมีการนำความเข้มข้นของโลหะหนักของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำตรงบริเวณระดับน้ำบาดาลจากแบบจำลอง HYDRUS-1D ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำกับชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำมาใช้เสมือนเป็นความเข้มข้นที่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำได้รับ สำหรับใช้ในการจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลต่อไป โดยการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนั้นใช้แบบจำลอง MODFLOW และ MT3DMS จากการศึกษาพบว่าแคดเมียมและสังกะสีมีการกระจายตัวบริเวณระดับน้ำบาดาลมากกว่าบริเวณดินชั้นบนสุด พบว่าแคดเมียมและสังกะสีเคลื่อนตัวลงมาได้ลึกสุดประมาณ 70-100 cm.เท่านั้น โดยปกติแล้วแคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้ช้าในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากที่ pH เป็นกลาง แคดเมียมจะถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้คาดการณ์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในช่วงปี ค.ศ. 1950-2050 โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามปัจจัยสำคัญคือคุณสมบัติทางเคมีของดิน ดังนั้นแบบจำลองก็สามารถปรับแก้ตัวแปรให้เข้ากับสถานการณ์ของแต่ละพื้นที่รับน้ำได้ จึงเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์การเคลื่อนตัวและผลกระทบจากการปนเปื้อนของโลหะในชั้นน้ำบาดาลในอนาคตได้

บทที่ 3 พื้นที่ศึกษา

3.1 พื้นที่ศึกษา

บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ครอบคลุมแผนที่ภูมิประเทศ **รูปที่ 3.1** มาตราส่วน 1: 50,000 ราว 59391 มีพิกัดอยู่ระหว่าง ลองจิจูด $104^{\circ}45' E$ ถึง $105^{\circ}00' E$ และละติจูด $15^{\circ}15' N$ ถึง $15^{\circ}30' N$



รูปที่ 3.1 แผนที่พื้นที่ศึกษา บริเวณตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

3.1.1 ลักษณะภูมิประเทศ

จังหวัดอุบลราชธานี ตั้งอยู่ในแอ่งโคราช (Khorat basin) ลักษณะโดยทั่วไปเป็นที่สูงต่ำเป็นที่ราบสูงลาดเอียงไปทางตะวันออกมีแม่น้ำโขง เป็นแนวเขตกับจังหวัดอุบลราชธานีกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มีแม่น้ำชีไหลมาบรรจบกับ แม่น้ำมูลซึ่งไหลผ่านกลางจังหวัด จากทิศตะวันตกมายังทิศตะวันออกแล้วไหลลงสู่แม่น้ำโขง ที่อำเภอ โขงเจียม และมีลำน้ำใหญ่ ๆ อีกหลายสาย ได้แก่ ลำเซบก ลำโดมใหญ่ ลำโดมน้อยและมีภูเขา สลับซับซ้อนหลายแห่ง ทางบริเวณชายแดน ตอนใต้ที่สำคัญคือ เทือกเขาบรรทัดและเทือกเขาพนมดงรักซึ่งกันอาณาเขตระหว่างจังหวัดอุบลราชธานีกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว และกัมพูชา ลักษณะภูมิฐานของ จังหวัดอุบลราชธานี แบ่งออกโดยสังเขป ดังนี้

บริเวณที่เป็นสันดินริมน้ำ (River levee) เกิดจากตะกอนลำน้ำที่พัดพามาทับถม สภาพพื้นที่เป็นเนินสันดินริมฝั่งแม่น้ำโขง และบางบริเวณสันดินริมฝั่งลำเซบาย

บริเวณที่เป็นแบบลานตะพักลำน้ำ (Terrace) ที่เกิดจากการกระทำของขบวนการของน้ำนานมาแล้ว ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นลานตะพักลำน้ำระดับต่ำ ระดับกลางและระดับสูง ลักษณะพื้นที่ที่มีทั้งที่เป็นที่ราบแบบลูกคลื่นลอนลาดจนถึงลูกคลื่นลอนชันจะอยู่ถัดจากบริเวณที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงขึ้นมาพื้นที่เหล่านี้จะพบในบริเวณทั่วไปของจังหวัดกล่าวคือทางตอนเหนือทางตะวันออกและทางใต้บางแห่งใช้สำหรับทำนาและบางแห่งใช้สำหรับปลูกพืชไร่

บริเวณที่เป็นแอ่ง (Depression) หรือที่ราบต่ำหลังแม่น้ำ (Back swamp) เกิดจากการกระทำของขบวนการของน้ำ พบบางแห่งในบริเวณริมแม่น้ำโขง แม่น้ำชี ลำเซบายและลำโดมใหญ่ จะมีน้ำแช่ขังนานใน ฤดูฝน

บริเวณที่เป็นเนินตะกอนรูปพัด (Coalescing fans) สภาพพื้นที่แบบนี้มีลักษณะเด่น คือ รูปร่างจะเป็นรูปพัด เกิดจากหินในบริเวณเหล่านั้น ถูกทำให้แตกหักสะสมอยู่กับพวกที่มีอนุภาคละเอียดกว่าเมื่อฝนตกลงมาในปริมาณมาก กำลังของน้ำจะมีมากจนสามารถพัดพาเอาตะกอนเหล่านั้นออกมานอกหุบเขาได้ เมื่อมาถึงนอกหุบเขาหรือเชิงเขา สภาพพื้นที่ก็จะเป็นที่ราบทางน้ำไหลกระจายออกไป ทำให้กำลังของน้ำลดลงก็จะตกตะกอนในบริเวณน้ำจะพบบ่อยทางตอนใต้และทางตะวันตกของจังหวัด

บริเวณที่เป็นเนินที่เกิดจากการไหลของธารลาวา (Lava flow hill) เป็นเนินเขาที่เกิดจากการไหลของธารลาวา ดินบริเวณนี้จะมีศักยภาพทางการเกษตรสูง ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวฟุ้งของหินบะซอลต์ บริเวณนี้จะพบบ่อยในอำเภอน้ำยืน

บริเวณที่ลาดเชิงเขา (Foot hill slope) เป็นที่ลาดเชิงเขาที่ตะกอนบริเวณที่เกิดจากขบวนการของน้ำ นานมาแล้วทับถมกันบริเวณนี้ จะพบบ่อยในอำเภอโขงเจียม อำเภอพิบูลย์มังสาหาร อำเภอศรีเมืองใหม่ และอำเภอตระการพืชผล

3.1.2 ลักษณะภูมิอากาศ

ฤดูฝนจะเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมเรื่อยไปจนถึงปลายเดือนตุลาคม และมักปรากฏเสมอว่าฝนทั้งช่วงในเดือนมิถุนายน ถึงเดือนกรกฎาคม แต่ระยะเวลาการทิ้งช่วงมักจะไม่เหมือนกันในแต่ละปี และในช่วงปลายฤดูฝนมักจะมีพายุดีเปรสชันฝนตกชุกบางปีอาจมีภาวะน้ำท่วมแต่ไม่รุนแรงนัก

ฤดูหนาว เนื่องจากเป็นจังหวัดที่ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกสุดของประเทศ ทำให้ได้รับอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือก่อนภูมิภาคอื่น อุณหภูมิจะเริ่มลดต่ำลงตั้งแต่เดือนตุลาคมและสิ้นสุดปลายเดือนมกราคม

ฤดูร้อน ถึงแม้ว่าเคยปรากฏบ่อยครั้งว่าอากาศยังคงหนาวเย็นยืดเยื้อมาจนถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ โดยส่วนใหญ่แล้วอากาศจะเริ่มอบอุ่น ในเดือนกุมภาพันธ์ไปจนถึงประมาณต้นเดือนพฤษภาคมซึ่งอาจจะมีฝนเริ่มตกอยู่บ้างในปลายเดือนเมษายน แต่ปริมาณน้ำฝนมักจะไม่เพียงพอเพาะปลูก

นอกจากนี้ลักษณะภูมิอากาศทั่วไป คล้ายคลึงกับจังหวัดอื่น ๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือ จะมีอากาศร้อนและค่อนข้าง หนาวในฤดูหนาว ส่วนในฤดูฝนจะมีฝนตกชุก ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2541 มีฝนตกประมาณ 106 วัน ปริมาณน้ำฝนวัดได้ 1,297.3 มิลลิเมตร

3.1.3 ลักษณะธรณีวิทยา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) ประกอบด้วยชั้นเกลือหิน (Rock salt) เป็นลักษณะเด่น ส่วนบนเป็นหินทรายแป้ง สีน้ำตาลแดง สีส้ม ลักษณะหินจะผุมาก สลับหินโคลนสีน้ำตาลแดง ลักษณะเป็นชั้นหนา มีชั้นทรายแทรกมีอายุประมาณยุคครีเทเชียสตอนปลาย (Upper Cretaceous) หมวดหินนี้กระจายตัวระหว่างหมวดหินโคกกรวดและหมวดหินภูทอก

3.1.4 ศักยภาพแหล่งน้ำใต้ดินในจังหวัดอุบลราชธานี

ตะกอนน้ำพา ประกอบด้วยตะกอนหินร่วนของชั้นกรวดและทรายโดยการนำพาของทางน้ำในอดีตและปัจจุบัน ดังนั้นชั้นน้ำบาดาลได้แก่ พื้นที่ราบลุ่มของแม่น้ำสายสำคัญ เช่น แม่น้ำโขง แม่น้ำชี และแม่น้ำมูล ร่องลงมาได้แก่แม่น้ำเลย แม่น้ำศรีสงครามและลำห้วยสายใหญ่ เป็นต้น สำหรับอำเภอเมืองอุบลราชธานีจะได้อิทธิพลมาจาก

บทที่ 4

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย เช่น แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่อุทกธรณีวิทยา แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่การใช้ที่ดิน เป็นต้น เพื่อใช้ในการวางแผนในการวิจัยและเก็บตัวอย่าง

2. สืบหาภาคสนามเพื่อกำหนดตำแหน่งของบ่อบาดาลในพื้นที่ศึกษาโดยกำหนดไว้เป็น 2 กลุ่มพื้นที่ได้แก่ บ่อบาดาลระดับตื้นที่อยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมและนอกพื้นที่เกษตรกรรมในด้านเหนือและท้ายน้ำของพื้นที่เกษตรกรรมดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งหมดจำนวนทั้งสิ้น 12 บ่อสังเกตการณ์

3. เก็บตัวอย่างดินทั้งแบบทำลายโครงสร้างตัวอย่าง (disturbed soil sampling) และแบบไม่ทำลายโครงสร้างตัวอย่าง (undisturbed soil sampling) ทั้งในพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นจำนวน ตัวอย่างและพื้นที่นอกเขตเกษตรกรรมหนาแน่นรวมจำนวน 10 ตัวอย่าง และใช้ hand auger เก็บตัวอย่างของดินตามความลึกเพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวัดดังตารางที่ 4.1 โดยแบ่งเป็น

3.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากตัวอย่างที่เก็บแบบทำลายโครงสร้าง เช่น พีเอช (pH) ของดิน ค่า CEC อินทรีย์สารในดิน (organic matter) เนื้อดิน (soil texture) bulk density เป็นต้น นอกจากนี้วิเคราะห์หา Mineralogical composition โดยใช้เครื่อง XRF (X-ray fluorescence spectrophotometer) และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer)

3.2 พารามิเตอร์ที่วัดจากตัวอย่างดินที่เก็บแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ได้แก่ bulk density ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่าน ความพรุน และทดลองหาคูณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้เครื่อง Pressure chamber ดังรูปที่ 4.1 เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความดันของน้ำในดิน (soil water characteristics curve, SWCC) ซึ่งมีผลต่อการประเมินการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักสู่บ่อบาดาลระดับตื้น เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงกับความดันของน้ำในดิน ตามวิธี ASTM D 6836

8.4 หาสมการและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่อธิบายคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (variably saturated zone) โดยใช้โปรแกรม RETC (van Genuchten et al., 1991)

8.5 วิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยเคมีชนิดต่างๆ ที่เกษตรกรใช้ในพื้นที่เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนัก (total multi-elemental analysis) ที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมีโดยใช้ตัวอย่างปุ๋ยที่ได้บดแล้วหนัก 0.5 มก.และย่อยด้วยกรด HCl เข้มข้น 3 มล.ร่วมกับกรด HNO_3 9 มล.ในเครื่อง Microwave ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในวิธี EPA 3052 ก่อนทำการปรับปริมาตรเท่ากับ 50 มล. หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ของดินที่ทำการตรวจวัด

property	method	reference
pH	Soil/water ratio of 1:2.5 (W/W) โดยใช้พีเอชมิเตอร์	Ma et al., 2010
CEC	1 M NH ₄ OAc (pH7) solution extraction	Pansu and Gautheyrou, 2006
Organic matter	Wet oxidation method	Walkey and Black, 1934
Soil texture	Sieve and sedimentation methods	Allen, 1974
Bulk density	Determine from soil cores	Blake and Hartge, 1986
Porosity	Determine from soil cores	Blake and Hartge, 1986
Hydraulic conductivity	Falling head permeability method	ASTM D 7100
SWCC	Test methods for determination of the soil water	ASTM D 6836-02, 2003



รูปที่ 4.1 เครื่อง Pressure chamber

8.6 เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในพื้นที่เกษตรกรรมหนาแน่นและพื้นที่นอกเขตเกษตรกรรมหนาแน่นเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน (Background) ในการเปรียบเทียบกับพื้นที่เกษตรกรรมที่ตั้งตำแหน่งที่ระบุไว้ในรูปที่ 1.1 ทั้งในช่วงหน้าฝนและหน้าแล้งโดยหยดกรด HNO₃ 2-3 หยดในตัวอย่างน้ำบาดาลที่เก็บในสนามเพื่อรักษาสภาพของโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำและแช่ไว้ในถังน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนจะนำกลับห้องปฏิบัติการเพื่อวัดปริมาณของโลหะหนักในน้ำในแต่ละช่วงเวลา

ดิน

8.7 ตรวจวัดระดับน้ำในบ่อบาดาลทั้งในหน้าฝนและหน้าแล้งเพื่อทราบทิศทางการไหลของน้ำบาดาลระดับ

8.8 จัดทำแผนที่แสดงระดับน้ำหรือทิศทางการไหลของน้ำบาดาลระดับชั้นดินในช่วงเวลาต่างๆ

8.9 ทดลอง BCR sequential extraction เพื่อทราบรูปแบบของการดูดซับ (binding form) ของโลหะหนักแต่ละชนิดในดินเพื่อประเมินโอกาสที่โลหะหนักจะถูกชะละลายสู่ดินและน้ำบาดาลโดยทดลองกับตัวอย่างดินซึ่งรวมถึงตัวอย่างดินที่เก็บตามความลึกด้วยเพื่อพิจารณารูปแบบของการดูดซับ (binding form) ของโลหะต่างๆ ตามความลึก ก่อนการทำการทดลอง BCR sequential extraction จะต้องเตรียมตัวอย่างดินโดยการร่อนตัวอย่างดินแห้งให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มม.

ขั้นตอนการสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยวิธี BCR scheme (Perez and Valiente, 2005; Pueyo et al., 2008) ซึ่งมีวิธีการสกัดอย่างต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 (Exchangeable and weak acid soluble fraction) เติม acetic acid (CH_3COOH) 20 ml (0.11 mol/l) และตะกอนดิน (sludge) 1 กรัม ลงในขวดขนาด 100 ml นำไปใส่เครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ $22\pm 5^\circ\text{C}$ ด้วยความเร็วรอบ 30 ± 10 rpm นาน 16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 3000 rpm นาน 20 นาที ตัวทำละลายจะถูกแยกส่วนโดยส่วนที่เป็นของเหลวที่ลอยเหนือตะกอนจะถูกแยกออกมาแล้วกรองแยกส่วนใสด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 ได้ Extract step 1 แล้วใส่ภาชนะปิดสนิทจากนั้นนำไปวิเคราะห์ทันที ส่วนตะกอนที่เหลือจะนำไปผสมน้ำกลั่น 20 ml และเขย่าด้วยเครื่อง shaker นาน 15 นาที และนำไปปั่นที่ 3000 rpm นาน 20 นาทีเพื่อส่วนที่ลอยเหนือตะกอนออก

ขั้นที่ 2 (reducible fraction) เติม hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) 40 ml (0.5 mol/l) (ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 1.5 ด้วย HNO_3 2 mol/l) ที่เตรียมใหม่ลงกับส่วนที่เหลือจากขั้นตอนแรกลงในหลอด centrifuge ขนาด 100 ml นำไปใส่เครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ $22\pm 5^\circ\text{C}$ ด้วยความเร็วรอบ 30 ± 10 rpm นาน 16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 3000 rpm นาน 15 นาที ตัวทำละลายจะถูกแยกส่วนออกมาแล้วกรองแยกส่วนใสด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 ได้ Extract step 2 แล้วใส่ภาชนะปิดสนิทจากนั้นนำไปวิเคราะห์ทันที ส่วนตะกอนที่เหลือจะนำไปผสมน้ำกลั่น 20 ml และเขย่าด้วยเครื่อง shaker นาน 15 นาที และนำไปปั่นต่อ 3000 rpm นาน 20 นาทีเพื่อส่วนที่ลอยเหนือตะกอนออกเช่นเดียวกัน

ขั้นที่ 3 (oxidisable fraction) เติม hydrogen peroxide (H_2O_2) 10 ml (8.8 mol/l) ลงในหลอด centrifuge ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมงเขย่าเป็นครั้งคราวที่อุณหภูมิ $22\pm 5^\circ\text{C}$ และ 1 ชั่วโมงต่อมาที่อุณหภูมิ $85\pm 2^\circ\text{C}$ เขย่าเป็นครั้งคราว ต่อมาเปิดฝา tube และเพิ่มความร้อนขึ้นอีกจนสารใน tube ลดลงเหลือปริมาณน้อยกว่า 3 ml ต่อมาใส่ hydrogen peroxide (H_2O_2) 10 ml ลงไปปิดฝาและนำไปตั้งที่อุณหภูมิ $85\pm 2^\circ\text{C}$ ต่อมา 1 ชั่วโมง โดยเขย่า ต่อมาเปิดฝา tube จนสารใน tube ลดลงเหลือปริมาณ 1 ml ใส่ ammonium acetate ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 50 ml (1.0 mol/l) ลงในสารที่ได้ (หลังทำให้เย็น) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2 และนำไปใส่เครื่องเขย่าที่ 30 ± 10 rpm ที่อุณหภูมิ $22\pm 5^\circ\text{C}$ นาน 16 ชั่วโมง แยกสารเหลวออกมาด้วยวิธีการเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ได้ Extract step 3

ขั้นที่ 4 (residual fraction) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นตอนที่ 3 (residue) ไปย่อยด้วย Aqua regia (2.3 ml. HCl + 0.77 ml HNO₃ + น้ำ 2.3 ml) ด้วยเครื่อง Microwave digester จะได้สารละลายออกมาได้ Extract step 4 จากนั้นนำสารละลายข้างต้นที่สกัดแล้วทั้งหมดมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES ทำการทดลองซ้ำจากขั้นที่ 1 – 4 ซ้ำ กับตัวอย่างอื่นๆ

8.10 ทดลองแบบแบตช์ (batch sorption experiment) เพื่อหาคุณสมบัติในการดูดซับและการคายตัวของ โลหะหนัก (sorption/desorption) โดยพิจารณาจากโลหะที่มีโอกาสเสี่ยงที่ถูกชะละลายสู่ธรรมชาติได้ง่ายและมีความเป็นพิษสูง (toxicity) ในดินทั้งการดูดซับแบบเดี่ยว (single metal systems) และแบบมีการแข่งขัน (competitive system) เพื่อประเมินกระบวนการ sorption reversibility ซึ่งช่วยในการอธิบายถึงโอกาสเสี่ยงที่ โลหะหนักชนิดนั้นจะคายจากผิวดินและเคลื่อนที่สู่น้ำใต้ดินในที่สุด (Sastre et al., 2007) ตลอดจนปริมาณ ของโลหะหนักที่คงค้างอยู่ในดิน (retained metal) โดยสามารถคำนวณโลหะที่คงค้างอยู่ในดินโดยใช้สมการที่ 3

$$A_{retained} = A_{sorbed} - A_{desorbed} = \int_0^{\alpha} K_F C_e^{\beta} dC_e - \int_0^{\alpha} K_{Fd} C_e^{\beta_d} dC_e \quad (3)$$

8.11 สํารวจคุณสมบัติทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

8.12 สร้างแบบจำลองเชิงมโนทัศน์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วม (Coupled model) ระหว่างแบบจำลองที่จำลองการชะละลายและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (HYDRUS-1D) ร่วมกับแบบจำลองที่จำลองการไหลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในน้ำใต้ดินในชั้นน้ำบาดาล (MODFLOW/MT3D) โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาคูณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ กล่าวคือ สมการที่อธิบายการไหลของน้ำในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัว เช่น van Genuchten หรือ Brook and Corey เป็นต้น และคุณสมบัติของการดูดซับของโลหะในกรณี single และ competitive system

8.13 คาดการณ์การเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินและในน้ำบาดาลระดับต้น

8.14 วิเคราะห์และประเมินผลการสำรวจทั้งหมดจากข้อมูลต่างๆ ที่มีเพื่อสรุปผลการวิจัย

8.15 สรุปผลและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบบทความทั้งการประชุมวิชาการและวารสารวิชาการ

บทที่ 5

ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาล

5.1 ผลการศึกษาภาคสนาม

การออกภาคสนามมีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บตัวอย่าง ปุ๋ย ดินและน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่พบ โดยการออกภาคสนามครั้งที่ 1 เป็นช่วงปลายฤดูปลูกพริกและออกภาคสนามครั้งที่ 2 เป็นช่วงระยะพักดินโดยมีการปลูกพืชหมุนเวียนแทนก่อนจะเริ่มต้นปลูกพริกในฤดูถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 แสดงตำแหน่งพ่อบาดาลระดับดินที่เก็บตัวอย่างโดยมีรายละเอียดของบริเวณพื้นที่ทำการเก็บตัวอย่างดังนี้



รูปที่ 5.1 สภาพแปลงพริกการออกภาคสนามครั้งที่ 1 -4

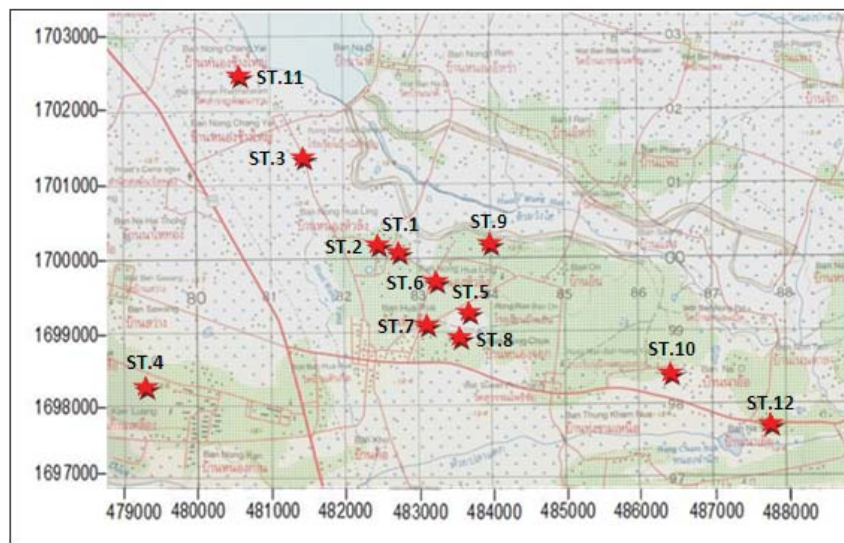
ตารางที่ 5.1 ตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลระดับดินที่ทำการเก็บตัวอย่าง

Location	Grid (x)	Grid (y)	Name	Ground surface Elevation*(m)
1	482809	1700103	บ้านผู้ใหญ่	124
2	482543	1700208	ทองดี	121
3	481445	1701485	ปัญญา	125
4	479334	1698338	บึงอร	126
5	483768	1699325	คำถา อบอุ้น	125
6	483218	1699760	พิศ จอมหงส์	128
7	483186	1699127	ประกาศ วันดี	132
8	483615	1698930	คำบุ	128
9	484076	1700218	วิรัช	129
10	486499	1698419	วราภรณ์	126
11	480622	1702595	บ้านหนองช้างใหญ่	119
12	487854	1697752	บ้านนาเยี่ย	126

* ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง

5.1.1 ขั้นตอนการเก็บน้ำตัวอย่างในภาคสนาม

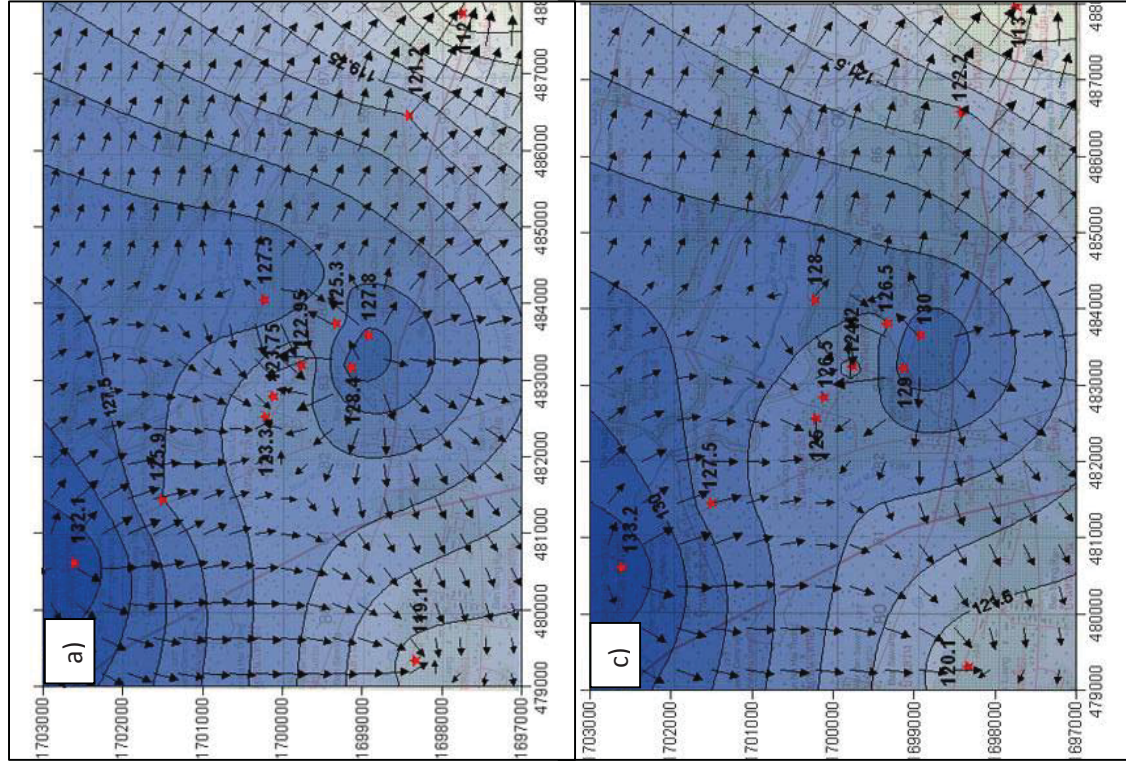
1. เลือกตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 5.2) ทั้งสิ้นจำนวน 12 บ่อ ซึ่งเป็นบ่อน้ำบาดาลระดับดินอยู่ในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม
2. เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในภาคสนาม ได้แก่ เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (electric conductivity, EC) และเครื่องมือวัดความลึกของน้ำใต้ดิน
3. เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในขวด polypropylene โดยทำการวัดระดับน้ำบาดาล หลังจากนั้นปั้มน้ำขึ้นมาทิ้งไว้ประมาณ 5 -10 นาที เพื่อปั้มน้ำที่ขังในบ่อออกมาและให้น้ำบาดาลที่อยู่บริเวณรอบบ่อไหลเข้าไปแทนที่หลังจากนั้นหยดกรด HNO_3 ประมาณ 2-3 หยดเพื่อให้ค่าพีเอชประมาณ 2 และนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS): Perkin Elmer SCIEX ELAN 6000



รูปที่ 5.2 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและตำแหน่งบ่อบาดาลในพื้นที่

5.2 ผลวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่

จากการออกภาคสนามเพื่อสำรวจระดับน้ำพบว่าค่าระดับน้ำมีค่าตั้งแต่ 112-132.1 เมตร (รทก.) ค่าเฉลี่ยระดับน้ำในพื้นที่เท่ากับ 123.12 เมตร (รทก.) และเมื่อนำค่าระดับมาสร้างแผนที่การไหลของน้ำบาดาลแสดงในรูปที่ 5.3 (ครั้งที่ 1 – 4) และตารางที่ 5.3 ซึ่งมีทิศทางการไหลในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และทิศเหนือ-ทิศใต้ ซึ่งลักษณะการไหลสอดคล้องกับลักษณะทางภูมิประเทศ ซึ่งทางด้านทิศเหนือเป็นที่ตั้งของอ่างเก็บน้ำ และมีแนวลำน้ำที่ไหลในแนวตะวันออกเฉียงใต้



รูปที่ 5.3 แผนที่ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา (หน่วย: เมตร รทก.)

ครั้งที่ 1 27 มิ.ย. 2010 b) ครั้งที่ 2 8 ส.ค. 2010 c) ครั้งที่ 3 29 พ.ย 2010 d) ครั้งที่ 4 19 ม.ค. 2011

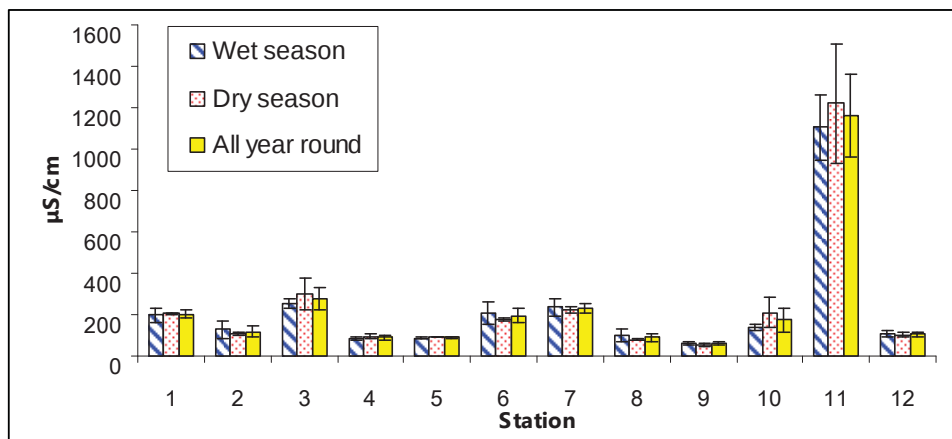
ตารางที่ 5.2 ระดับน้ำบาดาลและสมบัติทางเคมีของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ave.+ SD
Elevation	128.00	127.00	129.00	122.00	128.00	126.00	131.00	132.00	130.00	124.00	137.00	115.00	127.42 ± 5.50
pH	3.93 ± 0.18	4.02 ± 0.06	4.18 ± 0.18	4.26 ± 0.5	4.20 ± 0.09	4.60 ± 1.29	4.30 ± 0.58	4.68 ± 0.74	4.64 ± 0.35	4.17 ± 0.17	7.25 ± 0.93	4.74 ± 0.19	4.78 ± 1.14
Groundwater Level													
Wet Season													
(m MSL)	123.88 ± 0.18	123.40 ± 0.14	125.85 ± 0.07	120.18 ± 1.52	125.40 ± 0.14	122.45 ± 0.71	127.70 ± 0.99	128.40 ± 0.85	127.38 ± 0.18	121.35 ± 0.21	132.55 ± 0.64	111.58 ± 0.60	124.18 ± 5.23
Conductivity (µS/cm)	196.20 ± 31.40	127.45 ± 41.37	254.00 ± 25.46	85.00 ± 9.90	85.05 ± 3.46	209.50 ± 53.32	235.90 ± 411.15	97.30 ± 30.97	62.75 ± 7.42	141.10 ± 15.98	1104.50 ± 156.27	106.25 ± 16.33	225.42 ± 284.13
Well Depth (m)	4.13 ± 0.18	3.60 ± 0.14	3.15 ± 0.07	1.83 ± 1.52	2.60 ± 0.14	3.55 ± 0.71	3.30 ± 0.99	3.60 ± 0.85	2.63 ± 0.18	2.65 ± 0.21	4.45 ± 0.64	3.43 ± 0.60	3.24 ± 0.73
pH	4.01 ± 0.16	4.03 ± 0.11	4.74 ± 0.57	4.64 ± 0.02	5.40 ± 0.64	4.19 ± 0.21	4.24 ± 0.32	4.21 ± 0.07	4.72 ± 0.03	4.61 ± 0.59	8.29 ± 1.47	5.24 ± 0.01	4.65 ± 0.57
Groundwater Level													
Dry Season													
(m MSL)	125.75 ± 1.06	124.50 ± 0.71	126.80 ± 0.99	119.75 ± 0.49	126.25 ± 0.35	123.66 ± 0.76	128.94 ± 0.08	128.87 ± 1.60	127.70 ± 0.42	121.85 ± 0.49	132.70 ± 0.71	112.66 ± 0.48	124.95 ± 5.17
Conductivity (µS/cm)	205.50 ± 4.95	110.8 ± 7.35	299.00 ± 74.95	95.75 ± 8.27	92.50 ± 2.97	179.55 ± 8.41	223.50 ± 12.02	80.70 ± 4.24	54.95 ± 5.73	209.25 ± 73.19	1220.00 ± 289.91	101.80 ± 10.04	239.44 ± 317.36
Well Depth (m)	2.25 ± 1.06	2.51 ± 0.71	2.20 ± 0.99	2.25 ± 0.49	1.75 ± 0.35	2.34 ± 0.76	2.06 ± 0.08	3.13 ± 1.60	2.30 ± 0.42	2.15 ± 0.49	4.30 ± 0.71	2.34 ± 0.48	2.46 ± 0.66
pH	3.97 ± 0.14	4.02 ± 0.07	4.46 ± 0.47	4.45 ± 0.36	4.80 ± 0.79	4.40 ± 0.49	4.27 ± 0.38	4.44 ± 0.51	4.68 ± 0.21	4.39 ± 0.44	7.77 ± 1.17	4.99 ± 0.31	4.71 ± 0.72
Groundwater Level													
All Year Round													
(m MSL)	3.19 ± 1.33	3.06 ± 0.77	2.68 ± 0.67	2.04 ± 0.30	2.18 ± 0.60	2.95 ± 0.86	2.68 ± 0.88	3.37 ± 0.33	2.47 ± 0.23	2.4 ± 0.35	4.38 ± 0.11	2.89 ± 0.77	2.85 ± 0.79
Conductivity (µS/cm)	200.85 ± 19.12	119.13 ± 26.09	276.50 ± 52.57	90.38 ± 9.70	88.78 ± 5.04	194.53 ± 35.64	229.70 ± 25.77	89.00 ± 20.44	58.85 ± 7.04	175.18 ± 58.47	1162.25 ± 201.5	104.03 ± 11.36	232.43 ± 9.92
Well Depth (m)	3.19 ± 1.33	3.06 ± 0.77	2.68 ± 0.67	2.04 ± 0.30	2.18 ± 0.60	2.95 ± 0.86	2.68 ± 0.88	3.37 ± 0.33	2.47 ± 0.23	2.4 ± 0.35	4.38 ± 0.11	2.89 ± 0.77	2.85 ± 0.79

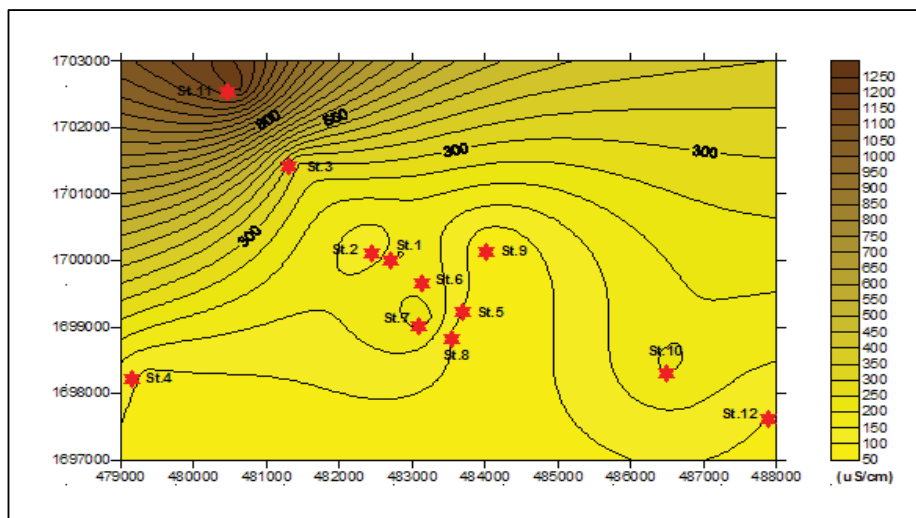
5.3 ผลวิเคราะห์สมบัติเคมีต่าง ๆ ของน้ำบาดาล

5.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาล

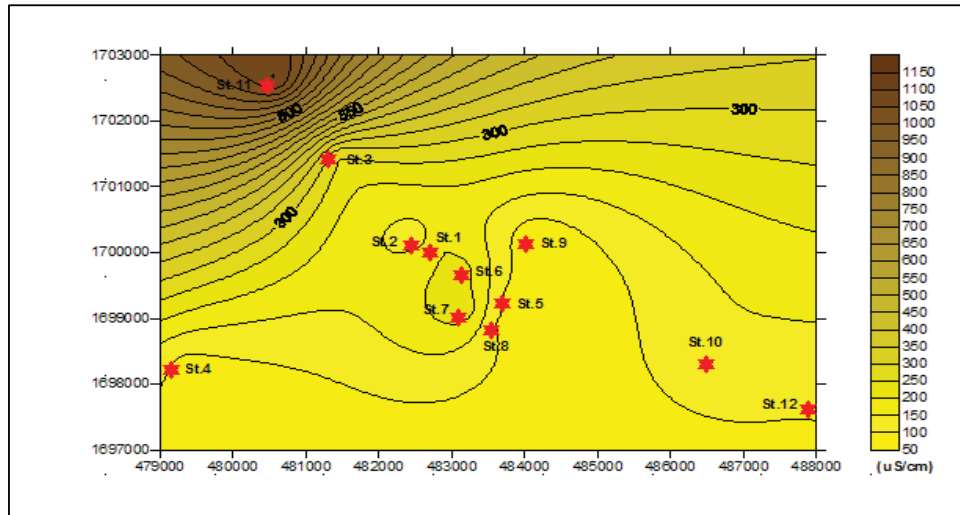
ผลวิเคราะห์สมบัติของน้ำบาดาลค่าการนำไฟฟ้า (EC) ดังแสดงในรูปที่ 5.4-5.7 และตารางที่ 5.4 พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่บ่อน้ำบาดาลที่ 11 มีค่าประมาณ 1,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ โดยมีค่าสูงสุดในช่วงหน้าแล้งและมีค่าน้อยที่สุดที่บ่อที่ 9 มีค่าประมาณ 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และเส้นชั้นเท่าของค่าการนำไฟฟ้าในฤดูแล้ง ฤดูฝนและค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี (รูปที่ 5.5-5.7) จากผลการตรวจวัดพบว่าในบริเวณทางด้านเหนือของพื้นที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูงทั้ง 2 ช่วง



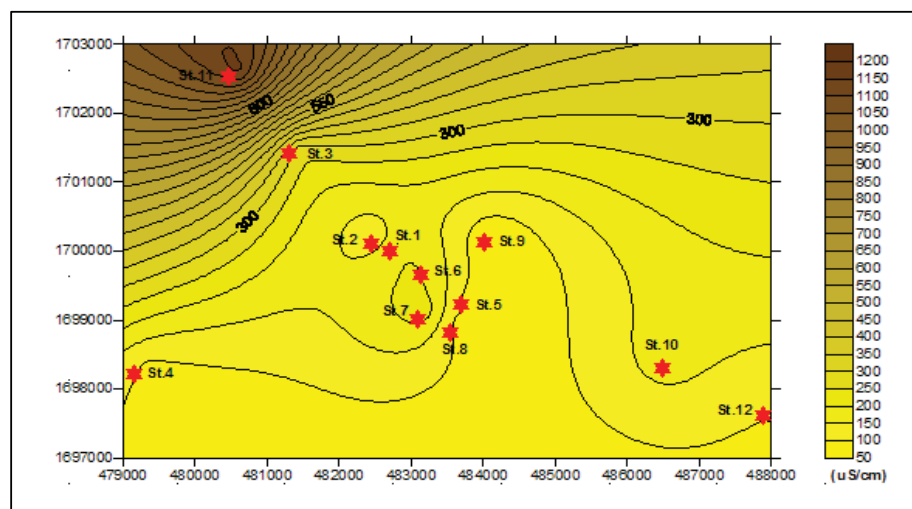
รูปที่ 5.3 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 5.4 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลในฤดูแล้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



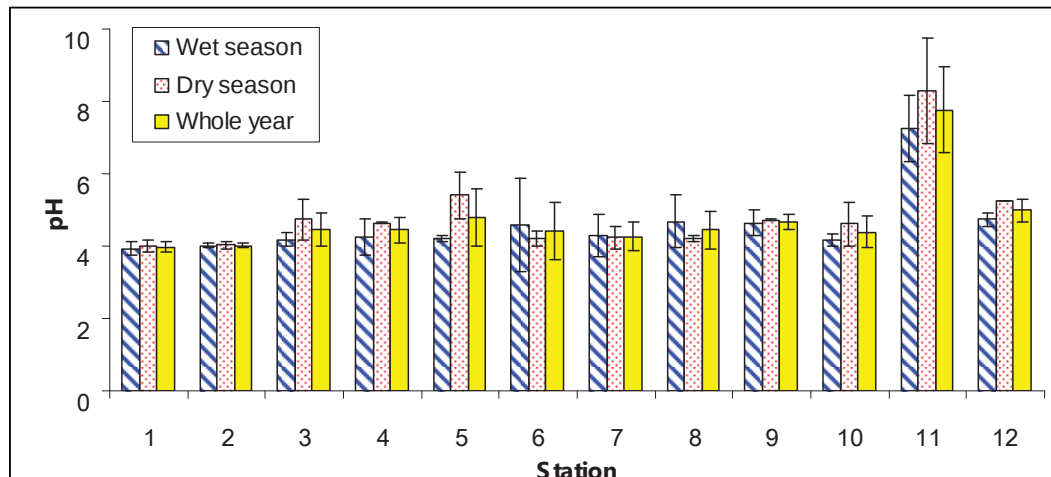
รูปที่ 5.6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลในฤดูฝน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



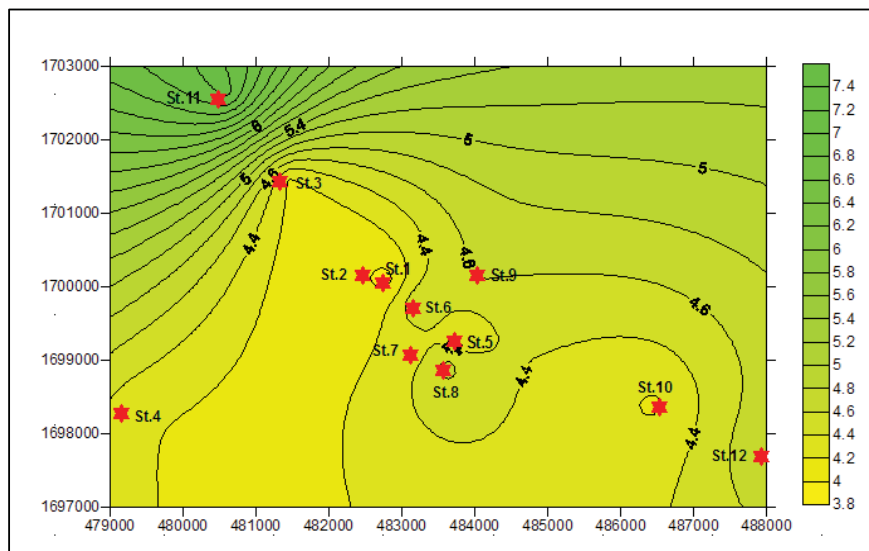
รูปที่ 5.7 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลตลอดทั้งปี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

5.3.2 ค่าพีเอชของน้ำบาดาล

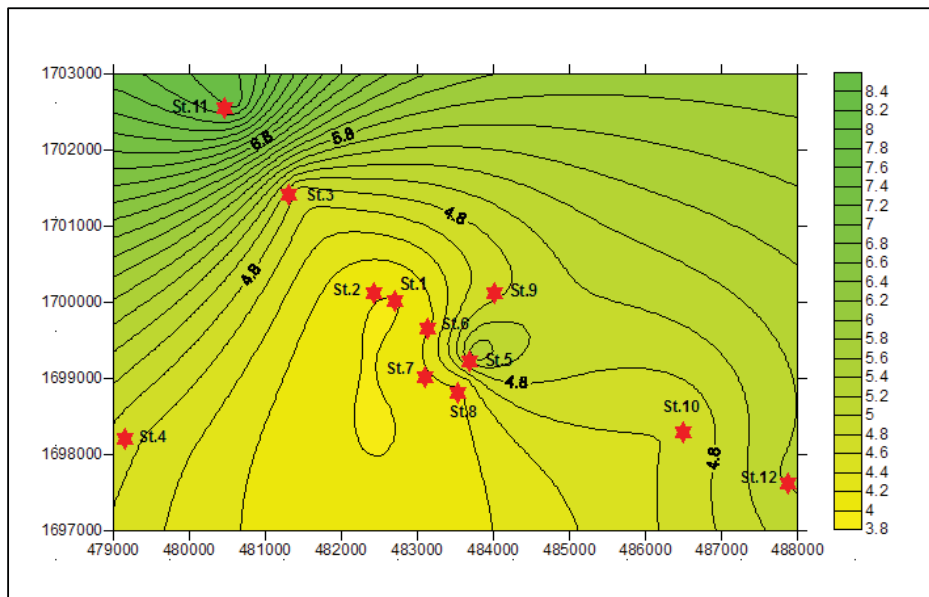
ค่าพีเอชของน้ำบาดาล (pH) ของแต่ละช่วงฤดูกาลและค่าตลอดทั้งปี แสดงในรูปที่ 5.8 และ ตารางที่ 5.4 และเส้นชั้นเท่าของค่าพีเอชแสดงในรูปที่ 5.9-5.11 ค่าพีเอชในน้ำบาดาลมีค่าโดยส่วนใหญ่เป็นกรดโดยเฉพาะในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา



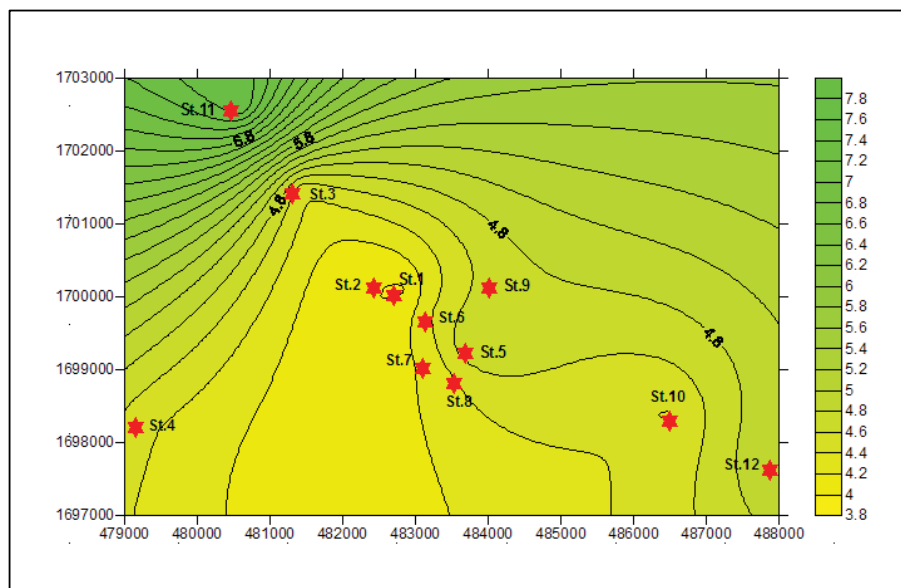
รูปที่ 5.8 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 5.9 ค่าพีเอชของน้ำบาดาลในช่วงหน้าฝน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 5.10 ค่าพีเอชของน้ำบาดาลในช่วงหน้าร้อน อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 5.11 ค่าพีเอชของน้ำบาดาลตลอดทั้งปี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

ตารางที่ 5.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำบาดาลระดับตื้นในพื้นที่ศึกษา

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ave.± SD
Ground surface elevation	128.00	127.00	129.00	122.00	128.00	126.00	131.00	132.00	130.00	124.00	137.00	115.00	127.42 ± 5.50
pH	3.93 ± 0.18	4.02 ± 0.06	4.18 ± 0.18	4.26 ± 0.5	4.20 ± 0.09	4.60 ± 1.29	4.30 ± 0.58	4.68 ± 0.74	4.64 ± 0.35	4.17 ± 0.17	7.25 ± 0.93	4.74 ± 0.19	4.78 ± 1.14
Groundwater Level	123.88 ± 0.18	123.40 ± 0.14	125.85 ± 0.07	120.18 ± 1.52	125.40 ± 0.14	122.45 ± 0.71	127.70 ± 0.99	128.40 ± 0.85	127.38 ± 0.18	121.35 ± 0.21	132.55 ± 0.64	111.58 ± 0.60	124.18 ± 5.23
Conductivity (µS/cm)	196.20 ± 31.40	127.45 ± 41.37	254.00 ± 25.46	85.00 ± 9.90	85.05 ± 3.46	209.50 ± 53.32	235.90 ± 41.15	97.30 ± 30.97	62.75 ± 7.42	141.10 ± 15.98	1104.5 ± 156.27	106.25 ± 16.33	225.42 ± 284.13
Well Depth (m)	4.13 ± 0.18	3.60 ± 0.14	3.15 ± 0.07	1.83 ± 1.52	2.60 ± 0.14	3.55 ± 0.71	3.30 ± 0.99	3.60 ± 0.85	2.63 ± 0.18	2.65 ± 0.21	4.45 ± 0.64	3.43 ± 0.60	3.24 ± 0.73
pH	4.01 ± 0.16	4.03 ± 0.11	4.74 ± 0.57	4.64 ± 0.02	5.40 ± 0.64	4.19 ± 0.21	4.24 ± 0.32	4.21 ± 0.07	4.72 ± 0.03	4.61 ± 0.59	8.29 ± 1.47	5.24 ± 0.01	4.65 ± 0.57
Groundwater Level	125.75 ± 1.06	124.50 ± 0.71	126.80 ± 0.99	119.75 ± 0.49	126.25 ± 0.35	123.66 ± 0.76	128.94 ± 0.08	128.87 ± 1.60	127.70 ± 0.42	121.85 ± 0.49	132.70 ± 0.71	112.66 ± 0.48	124.95 ± 5.17
Conductivity (µS/cm)	205.50 ± 4.95	110.8 ± 7.35	299.00 ± 74.95	95.75 ± 8.27	92.50 ± 2.97	179.55 ± 8.41	223.50 ± 12.02	80.70 ± 4.24	54.95 ± 5.73	209.25 ± 73.19	1220.0 ± 89.91	101.80 ± 10.04	239.44 ± 317.36
Well Depth (m)	2.25 ± 1.06	2.51 ± 0.71	2.20 ± 0.99	2.25 ± 0.49	1.75 ± 0.35	2.34 ± 0.76	2.06 ± 0.08	3.13 ± 1.60	2.30 ± 0.42	2.15 ± 0.49	4.30 ± 0.71	2.34 ± 0.48	2.46 ± 0.66
pH	3.97 ± 0.14	4.02 ± 0.07	4.46 ± 0.47	4.45 ± 0.36	4.80 ± 0.79	4.40 ± 0.49	4.27 ± 0.38	4.44 ± 0.51	4.68 ± 0.21	4.39 ± 0.44	7.77 ± 1.17	4.99 ± 0.31	4.71 ± 0.72
Groundwater Level	3.19 ± 1.33	3.06 ± 0.77	2.68 ± 0.67	2.04 ± 0.30	2.18 ± 0.60	2.95 ± 0.86	2.68 ± 0.88	3.37 ± 0.33	2.47 ± 0.23	2.4 ± 0.35	4.38 ± 0.11	2.89 ± 0.77	2.85 ± 0.79
Conductivity (µS/cm)	200.85 ± 19.12	119.13 ± 26.09	276.50 ± 52.57	90.38 ± 9.70	88.78 ± 5.04	194.53 ± 35.64	229.70 ± 25.77	89.00 ± 20.44	58.85 ± 7.04	175.18 ± 58.47	1162.25 ± 201.5	104.03 ± 11.36	232.43 ± 9.92
Well Depth (m)	3.19 ± 1.33	3.06 ± 0.77	2.68 ± 0.67	2.04 ± 0.30	2.18 ± 0.60	2.95 ± 0.86	2.68 ± 0.88	3.37 ± 0.33	2.47 ± 0.23	2.4 ± 0.35	4.38 ± 0.11	2.89 ± 0.77	2.85 ± 0.79

จากผลการตรวจวัดค่าพีเอชพบว่าในบริเวณส่วนกลางของพื้นที่มีค่าสภาวะเป็นกรดซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนักที่พบสูงกว่าพื้นที่รอบข้างเนื่องจากเกิดการชะละลายของปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายในสภาวะกรด (acidic condition) นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวพบว่าน้ำมีค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำมาบริโภคเพราะค่าพีเอชต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้ในช่วงค่า 6.5-8.2

5.4 ผลวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนักในปุ๋ยและน้ำบาดาลใช้ในพื้นที่

5.4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักในปุ๋ย

นำปุ๋ยที่ผ่านการบดย่อยด้วย $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ ด้วยเครื่อง Microwave หลังจากได้สารละลายออกมา จากนั้นนำสารละลายข้างต้นที่สกัดมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) ตามวิธี EPA 3052 จากการสำรวจและสัมภาษณ์เกษตรกรและร้านขายปุ๋ยเคมีเกษตรในพื้นที่พบว่าโดยทั่วไปเกษตรกรสวนพริกใช้ปุ๋ยอยู่ 4 ชนิดดังนี้ Yara Mila, กระต่าย, Top one, อะโกรเฟต ผลการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักในปุ๋ยเคมีเกษตรดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมีเกษตรที่ใช้ในพื้นที่ศึกษา (mg/kg)

Fertilizers (mg/kg)	Ag	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
Yara Mila	0.24	145.95	0.00	0.07	3.79	2.56	209.03	2.34	0.91	4.58
กระต่าย	0.20	1.20	1.18	0.07	0.00	0.26	1.17	0.00	1.53	0.43
Top One	0.18	848.22	0.00	0.05	22.04	1.20	1552.60	5.38	0.00	49.85
อะโกรเฟต	0.15	2352.90	2.14	0.41	13.22	1.21	1817.13	1.54	1.80	4.20

จากตารางที่ 5.5 จะสังเกตพบว่าปริมาณโลหะหนักที่พบในปริมาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่นๆ ได้แก่ Cu Ni Pb และ Zn อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักดังกล่าวมีปริมาณไม่เกินค่ามาตรฐานของดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2547)) จากการทดลองเพื่อประเมินโอกาสที่โลหะอยู่รูปแบบ (form) ที่สามารถหลุดออกมาได้ง่ายในธรรมชาติ Exchangeable (F1) Reducible (F2) กล่าวคือจะมีโอกาสในการปนเปื้อนลงสู่พื้นผิวดินและน้ำบาดาลได้ง่ายพบว่าปุ๋ยกระต่ายและอะโกรเฟตมีโอกาสจะถูกชะละลายออกมาได้ง่ายกว่าปุ๋ย Yara Mila และ Top one

5.4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักในน้ำบาดาล

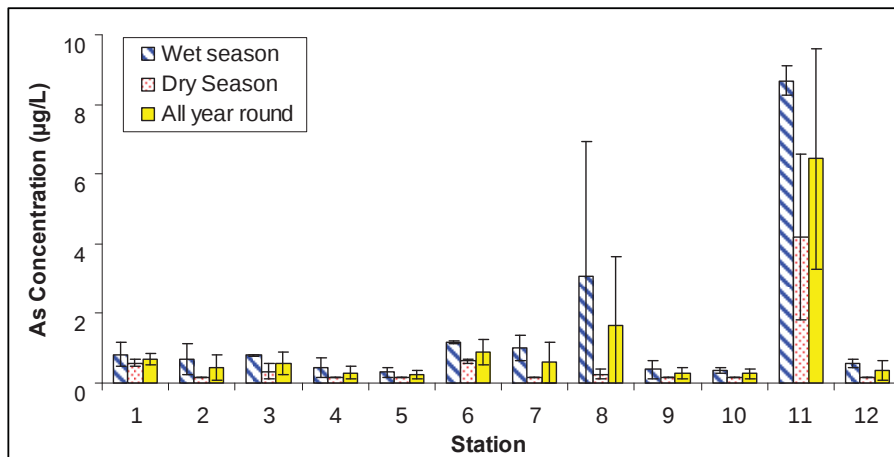
จากการเก็บน้ำบาดาลจากการออกทั้ง 4 ครั้งโดยแบ่งเป็น 2 ครั้งในฤดูร้อนและ 2 ครั้งในฤดูฝน ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 5.4 และผลการวิเคราะห์แสดงปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในฤดูร้อน ฤดูฝนและค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปีแสดงในตารางที่ 5.6 และเมื่อทำการพิจารณาเชิงพื้นที่เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิดที่มีปริมาณค่อนข้างสูงได้แก่ Pb Cu As และ Zn แสดงในรูปที่ 5.12 – 5.15 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ Zn (86.37 µg/L) > Cu (79.81 µg/L) > Pb (21.35 µg/L) > As (1.06 µg/L)

สารหนู (Arsenic, As)

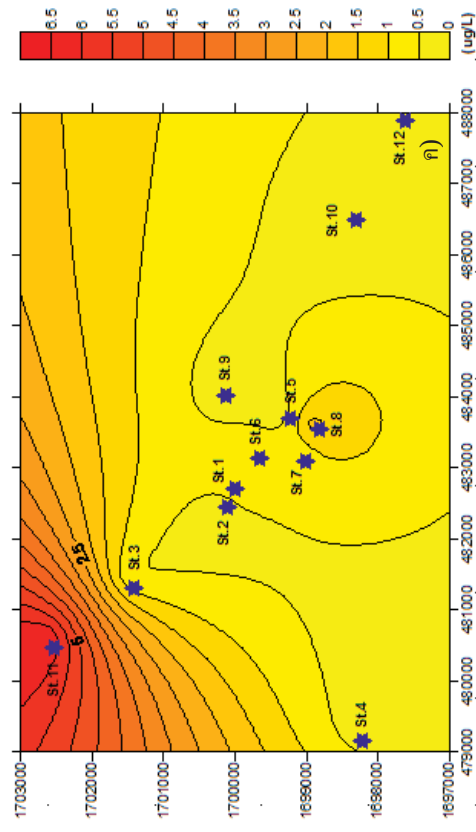
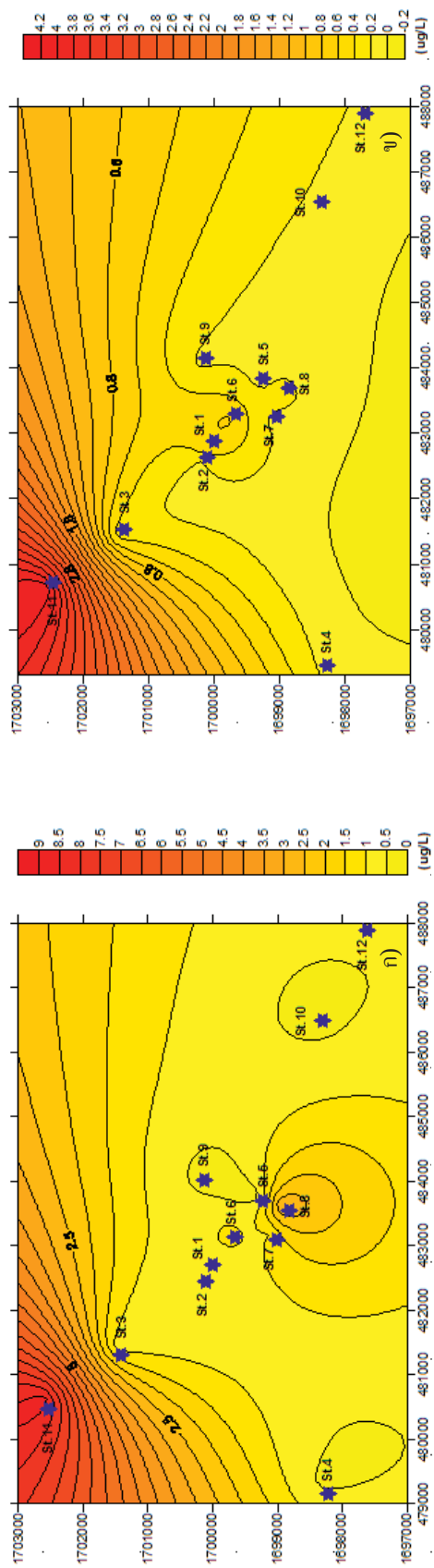
ปริมาณของสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลในช่วงฤดูฝนมีค่าระหว่าง 0.32-8.68 µg/L และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.52 ± 2.37 µg/L และปริมาณของสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลในช่วงฤดูร้อนมีค่าระหว่าง 0.17-5.87 µg/L และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.60 ± 1.14 µg/L ค่าเฉลี่ยของสารหนูตลอดทั้งปีอยู่ในช่วง 0.25 ± 0.11 µg/L (สถานี 5) ถึง 6.44 ± 3.17 µg/L (สถานี 11) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.06 ± 1.74 µg/L ปริมาณสารหนูสูงสุดที่บ่อ 11 (ตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.28-5.29)

มาตรฐานของสารหนูน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับดื่มมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.01, 0.01 mg/L จากกรมควบคุมมลพิษ (PCD), WHO และ EU ตามลำดับ (Pollution Control Department, 2004; WHO, 1993; EU, 1998) พบว่าค่าปริมาณสารหนูในบ่อบาดาลมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มบ่อบาดาล

ปริมาณของสารหนูที่ตรวจพบที่บ่อที่ 11 มีค่าสูงกว่าบ่อบาดาลอื่นๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากผลของค่าพีเอชที่เป็นเบสในบ่อดังกล่าว ในขณะที่บ่ออื่นที่มีสภาพเป็นกรด จากการศึกษารายงานว่าสารหนูที่อยู่ในรูปของ H_2AsO_3^- มีความสามารถในการละลายน้ำได้ง่ายที่ค่าพีเอชสูงหรือในสภาพเบส ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่าที่ค่าพีเอชสูงอาจจะส่งผลในปริมาณสารหนูมีค่าสูง นอกจากนี้การศึกษารายงานของ Claesson and Fagerberg (2003) พบว่ารูปแบบที่จะพบในน้ำบาดาลได้แก่ อาร์เซไนต์ (arsenite, As(III)) ได้แก่ H_2AsO_3^- และ H_3AsO_3 และอาร์เซเนต (arsenate, As(V)) ได้แก่ H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} และพบว่าค่าพีเอชที่ตรวจพบในน้ำบาดาลบริเวณ Santiago del Estero ประเทศอาร์เจนตินามีค่าอยู่ในช่วง 6.4 ถึง 9.3 โดยที่ปริมาณสารหนูมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5.12 ปริมาณสารหนู (µg/L) ของบ่อน้ำบาดาลระดับตื้นบ่อที่ 1-12

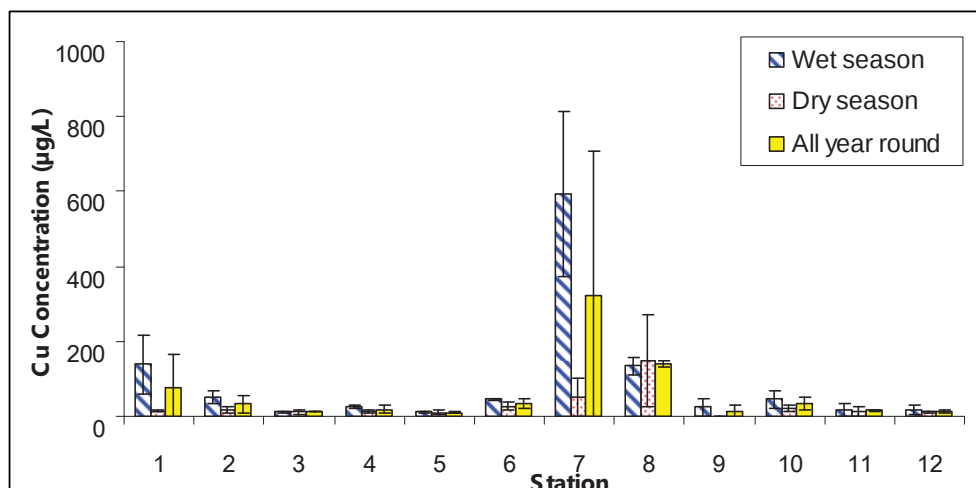


รูปที่ 5.13 แผนที่ปริมาณสารหนู ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อบาดาลระดับบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) จุดฝน ข) จุดอุทก ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

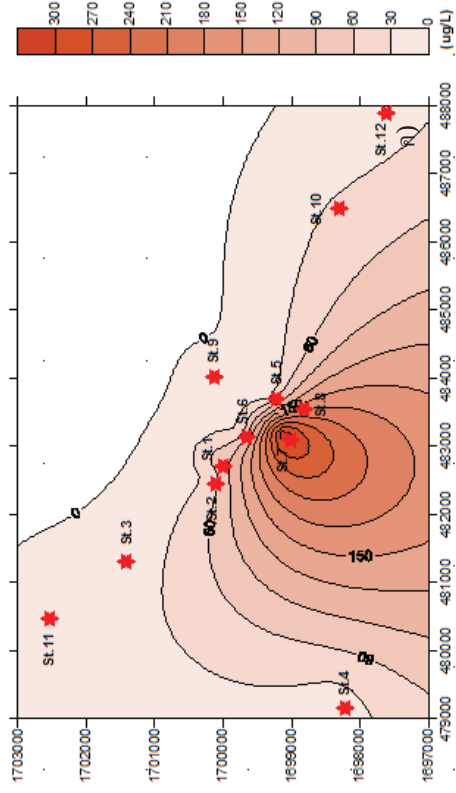
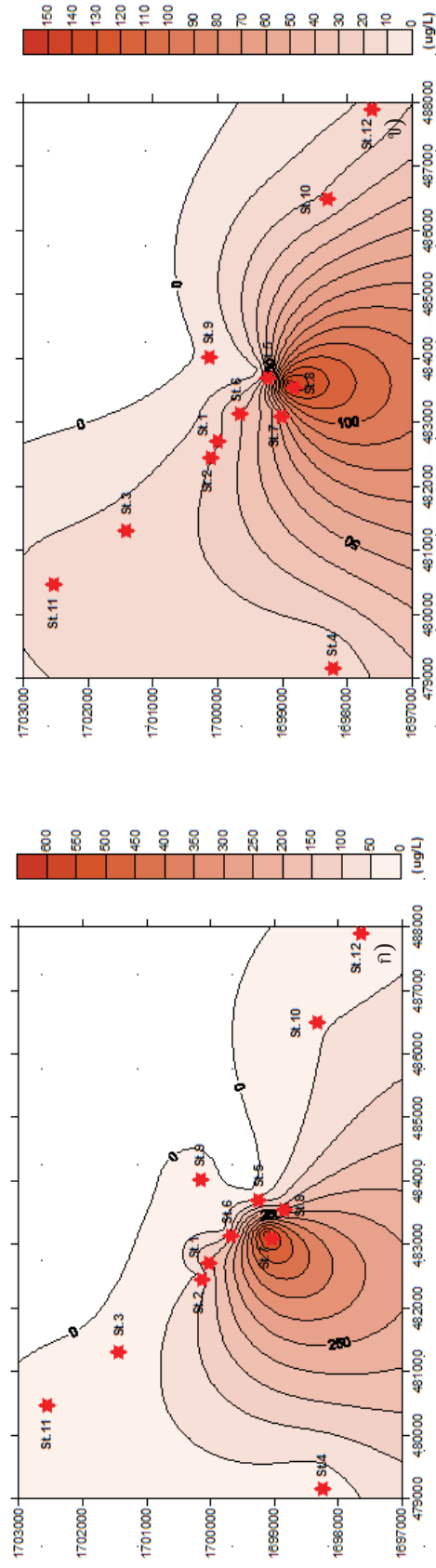
ทองแดง Copper (Cu)

ปริมาณทองแดงในน้ำบาดาลในช่วงหน้าฝนค่าในช่วง 4.27 ถึง 751.0 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าเฉลี่ยของทองแดง $92.49 \pm 164.27 \mu\text{g/L}$ ปริมาณทองแดงในน้ำบาดาลในช่วงหน้าร้อนค่าในช่วง 0.58 ถึง 234.0 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าเฉลี่ยของทองแดง $28.03 \pm 39.47 \mu\text{g/L}$ ค่าเฉลี่ยของทองแดงตลอดทั้งปีอยู่ในช่วง $10.03 \pm 1.23 \mu\text{g/L}$ (บ่อที่ 5) ถึง $323.23 \pm 384.35 \mu\text{g/L}$ (บ่อที่ 7) มีค่าเฉลี่ยของทุกบ่อตลอดทั้งปีเท่ากับ $60.26 \pm 90.98 \mu\text{g/L}$ ปริมาณของทองแดงที่บ่อที่ 7 มีค่าสูงสุด ปริมาณทองแดงแสดงในรูปที่ 5.14-5.15 และตารางที่ 5.5

มาตรฐานของทองแดงในน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับดื่มมีค่าเท่ากับ 1.5, 2, 2 mg/L จากกรมควบคุมมลพิษ (PCD), WHO และ EU ตามลำดับ (Pollution Control Department, 2004; WHO, 1993; EU, 1998) โดยไม่พบว่าปริมาณทองแดงในบ่อบาดาลทุกบ่อไม่เกินค่ามาตรฐานของน้ำดื่ม หากเปรียบเทียบปริมาณทองแดงของบ่อต่างๆ โดยใช้การทดสอบแบบที (t-test) ระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝนพบว่าไม่มีความแตกต่างของปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)



รูปที่ 5.14 ปริมาณทองแดง ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อบาดาลระดับต้นบ่อที่ 1-12

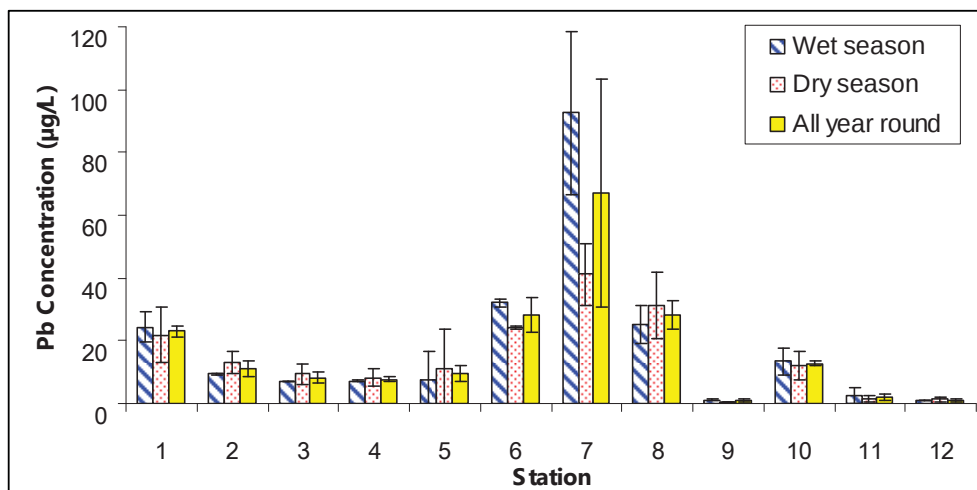


รูปที่ 5.15 แผนที่ปริมาณทองแดง (ug/L) ของบ่อบาดาระดับต้นปีที่ 1-12 ระหว่าง ก) ตุลาคม ข) กันยายน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

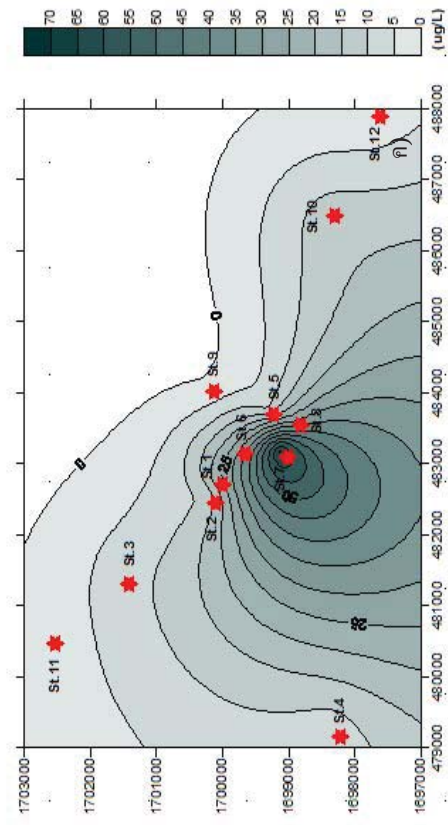
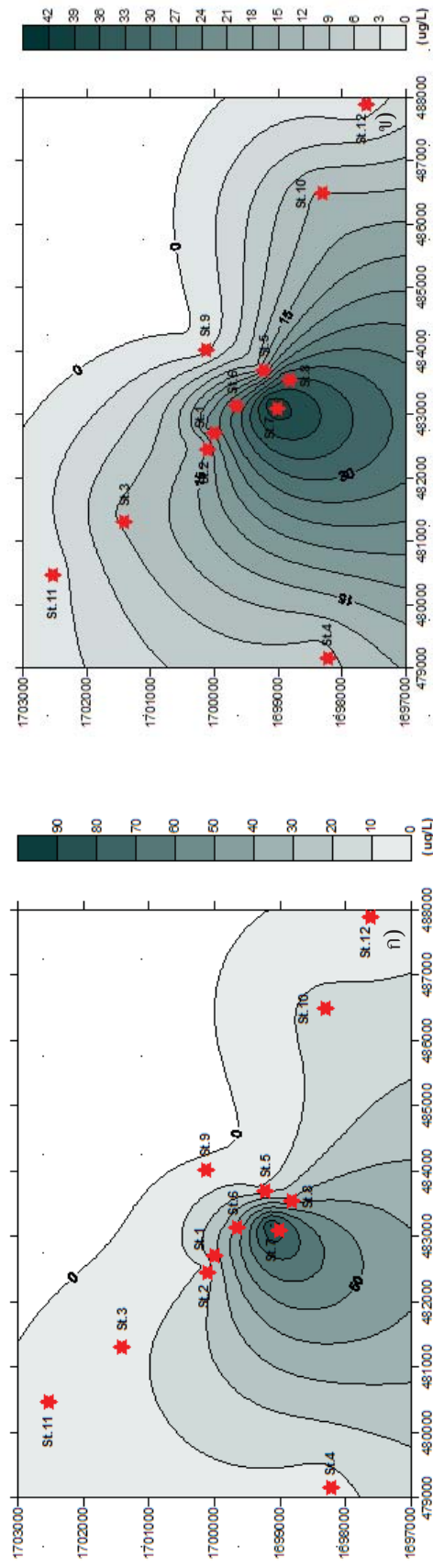
ตะกั่ว (Pb)

ปริมาณทองแดงในน้ำบาดาลในช่วงหน้าฝนค่าในช่วง 0.82 ถึง 92.55 µg/L และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.64 ± 25.38 µg/L ปริมาณทองแดงในน้ำบาดาลในช่วงหน้าร้อนค่าในช่วง 0.65 to 48.10 µg/L และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.67 ± 4.38 µg/L ค่าเฉลี่ยของตะกั่วตลอดทั้งปีอยู่ในช่วง 0.95 ± 0.42 µg/L ถึง 66.85 ± 36.35 µg/L และค่าเฉลี่ยของทุกบ่อตลอดทั้งปีเท่ากับ 16.66 ± 18.52 µg/L ปริมาณของตะกั่วพบสูงสุดที่บ่อที่ 1 และปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบในบ่อบาดาลอื่นๆ แสดงในรูปที่ 5.16-5.17 และตารางที่ 5.5

มาตรฐานของตะกั่วในน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับดื่มมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.01, 0.01 mg/L จากกรมควบคุมมลพิษ (PCD), WHO และ EU ตามลำดับ (Pollution Control Department, 2004; WHO, 1993; EU, 1998) โดยไม่พบว่าปริมาณทองแดงในบ่อบาดาลทุกบ่อไม่เกินค่ามาตรฐานของน้ำดื่ม หากเปรียบเทียบปริมาณทองแดงของบ่อต่างๆ โดยใช้การทดสอบแบบที (t-test) ระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝนพบว่าไม่มีความแตกต่างของปริมาณตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)



รูปที่ 5.16 ปริมาณตะกั่ว (µg/L) ของบ่อบาดาลระดับต้นบ่อที่ 1-12

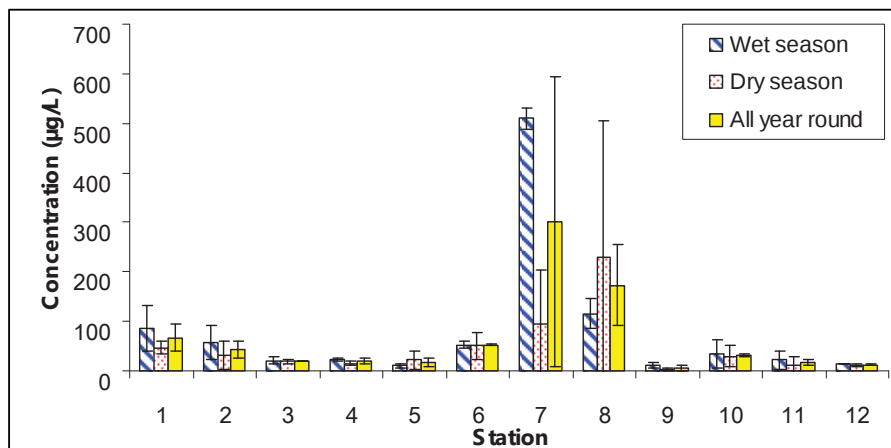


รูปที่ 5.17 แผนที่ปริมาณตะกั่ว (ug/L) ของบ่อบาดาลระดับบ่อน้ำ 1-12 ระหว่าง ก) ถูฝน ข) ถูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

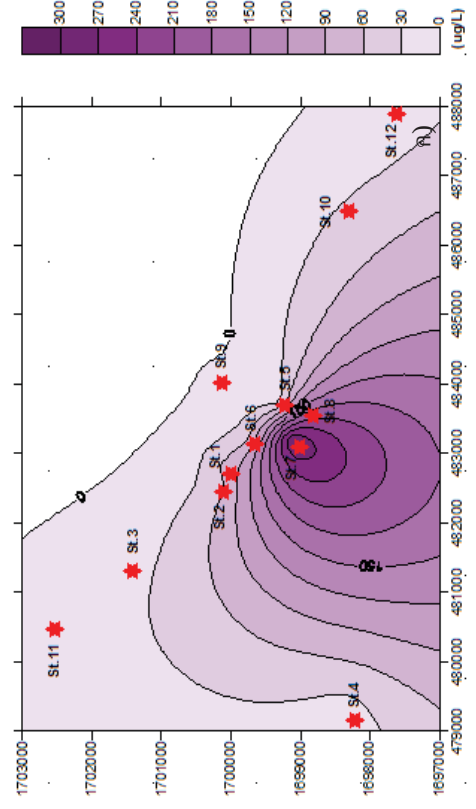
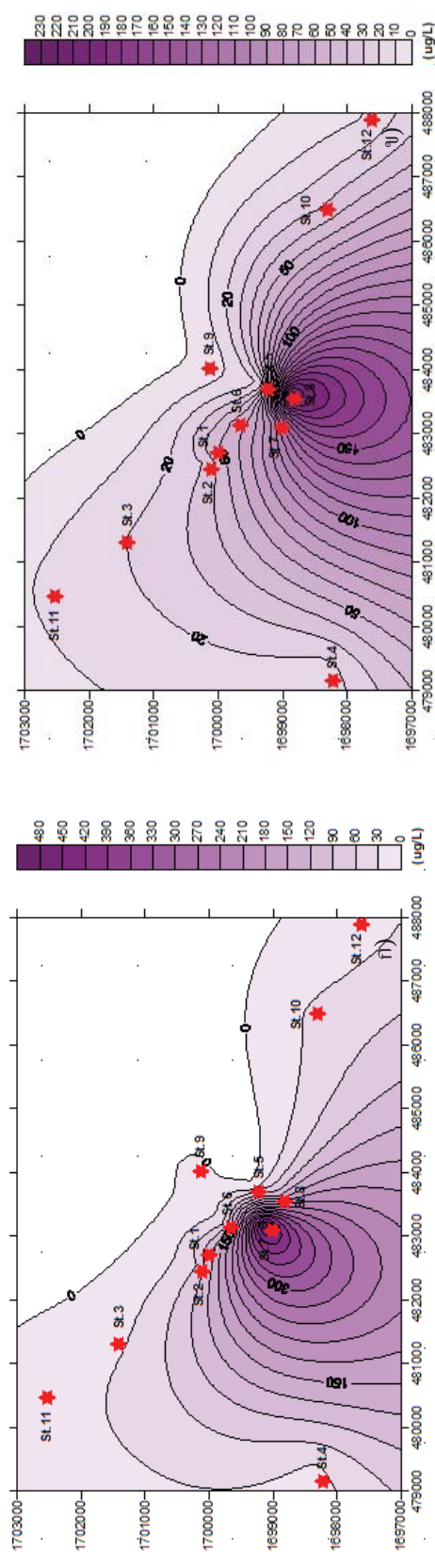
สังกะสี (Zn)

ปริมาณสังกะสีในน้ำบาดาลในช่วงหน้าฝนค่าในช่วง 10.05 ถึง 509.50 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $79.53 \pm 139.27 \mu\text{g/L}$ ปริมาณสังกะสีในน้ำบาดาลในช่วงหน้าร้อนค่าในช่วง 1.70 ถึง 424.0 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $47.32 \pm 62.89 \mu\text{g/L}$ ค่าเฉลี่ยของสังกะสีตลอดทั้งปีอยู่ในช่วง $6.94 \pm 5.73 \mu\text{g/L}$ ถึง $302.43 \pm 292.85 \mu\text{g/L}$ และค่าเฉลี่ยของทุกบ่อตลอดทั้งปีเท่ากับ $63.43 \pm 87.75 \mu\text{g/L}$ ปริมาณของสังกะสีพบสูงสุดที่บ่อที่ 7 และปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบในบ่อบาดาลอื่นๆ แสดงในรูปที่ 5.18-5.19 และตารางที่ 5.5

มาตรฐานของตะกั่วในน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับดื่มมีค่าเท่ากับ 15 และ 3 mg/L จากกรมควบคุมมลพิษ (PCD) และ WHO ตามลำดับ (Pollution Control Department, 2004; WHO, 1993) โดยไม่พบว่าปริมาณสังกะสีในบ่อบาดาลทุกบ่อไม่เกินค่ามาตรฐานของน้ำดื่ม หากเปรียบเทียบปริมาณสังกะสีของบ่อต่างๆ โดยใช้การทดสอบแบบที (t-test) ระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝนพบว่าไม่มีความแตกต่างของปริมาณตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)



รูปที่ 5.18 ปริมาณสังกะสี ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อบาดาลระดับตื้นบ่อที่ 1-12



รูปที่ 5.19 แผนที่ปริมาณสังกะสี ($\mu\text{g/L}$) ของบ่อบาดาลระดับบ่อที่ 1-12 ระหว่าง ก) ถูฝุ่น ข) ถูร้อน ค) ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

ตารางที่ 5.5 ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบจากการออกภาคสนามในฤดูฝน ฤดูแล้ง และค่าเฉลี่ยทั้งปี

Time	Metals	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6	Station 7	Station 8	Station 9	Station 10	Station 11	Station 12	Ave.+ SD
Wet Season	As	0.81 ± 0.34	0.68 ± 0.44	0.80 ± 0.02	0.44 ± 0.28	0.32 ± 0.02	1.15 ± 0.04	1.00 ± 0.36	3.06 ± 3.87	0.39 ± 0.25	0.36 ± 0.07	8.68 ± 0.42	0.56 ± 0.11	1.52 ± 2.37
	Cd	0.13 ± 0.01	0.22 ± 0.13	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.25 ± 0.05	0.31 ± 0.21	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.16 ± 0.06
	Cr	0.51 ± 0.15	0.15 ± 0.01	3.84 ± 5.05	0.14 ± 0.00	0.15 ± 0.01	0.25 ± 0.00	0.26 ± 0.03	0.93 ± 0.30	0.25 ± 0.15	0.14 ± 0.00	0.78 ± 0.51	1.14 ± 0.00	0.71 ± 1.04
	Cu	137.85 ± 76.58	50.30 ± 16.12	11.10 ± 1.41	25.55 ± 3.89	10.90 ± 2.13	44.75 ± 3.75	595.00 ± 220.62	134.00 ± 22.63	23.40 ± 24.33	44.50 ± 24.32	16.19 ± 16.85	16.30 ± 11.74	92.49 ± 164.27
	Pb	24.30 ± 4.81	9.46 ± 0.28	7.02 ± 0.18	7.20 ± 0.32	7.81 ± 9.04	32.10 ± 1.13	92.55 ± 26.09	25.00 ± 6.08	1.24 ± 0.18	13.50 ± 4.38	2.64 ± 2.60	0.82 ± 0.03	18.64 ± 25.38
	Hg	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00
	Ni	8.89 ± 2.99	4.73 ± 0.44	6.15 ± 1.79	5.80 ± 0.18	5.51 ± 3.54	18.90 ± 2.26	12.65 ± 0.35	4.27 ± 1.43	3.88 ± 2.60	9.07 ± 2.31	0.91 ± 0.72	1.64 ± 0.76	6.87 ± 4.99
Dry Season	Zn	85.85 ± 46.88	56.25 ± 34.72	20.80 ± 7.21	22.80 ± 2.69	10.05 ± 4.88	52.85 ± 6.15	509.50 ± 21.92	115.50 ± 30.41	10.99 ± 5.68	33.70 ± 28.85	22.10 ± 18.82	14.00 ± 0.71	79.53 ± 139.27
	As	0.58 ± 0.09	0.17 ± 0.00	0.33 ± 0.22	0.17 ± 0.00	0.17 ± 0.00	0.63 ± 0.07	0.17 ± 0.00	0.26 ± 0.13	0.17 ± 0.00	0.17 ± 0.00	4.19 ± 2.38	0.17 ± 0.00	0.60 ± 1.14
	Cd	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.16 ± 0.05	0.17 ± 0.00	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.14 ± 0.01
	Cr	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00	0.44 ± 0.00
	Cu	14.40 ± 1.84	17.05 ± 7.71	12.17 ± 5.98	11.89 ± 3.41	9.16 ± 6.42	26.90 ± 10.75	51.45 ± 49.30	146.95 ± 123.11	0.99 ± 0.59	20.35 ± 8.27	13.69 ± 13.60	11.33 ± 2.64	28.03 ± 39.47
	Pb	21.90 ± 8.63	13.05 ± 3.61	9.49 ± 3.27	8.27 ± 2.59	11.30 ± 12.59	24.15 ± 0.64	41.15 ± 9.83	31.25 ± 10.54	0.53 ± 0.17	12.13 ± 4.49	1.48 ± 1.17	1.28 ± 1.89	14.67 ± 4.38
	Hg	0.96 ± 0.64	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.14 ± 0.26
	Ni	6.03 ± 1.71	4.23 ± 0.83	6.29 ± 0.37	5.64 ± 1.38	3.25 ± 0.68	12.35 ± 0.07	12.75 ± 3.04	5.22 ± 0.02	1.26 ± 1.08	6.35 ± 2.59	0.38 ± 0.00	1.03 ± 0.02	5.40 ± 3.95
	Zn	47.30 ± 14.14	30.70 ± 28.14	19.45 ± 4.17	14.90 ± 4.81	22.02 ± 19.06	50.85 ± 26.52	95.35 ± 108.40	230.75 ± 273.30	2.89 ± 1.68	30.05 ± 20.58	12.80 ± 15.70	10.78 ± 2.44	47.32 ± 62.89

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบจากการออกภาคสนามในฤดูฝน ฤดูแล้ง และค่าเฉลี่ยทั้งปี

Time	Metals	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6	Station 7	Station 8	Station 9	Station 10	Station 11	Station 12	Ave.+ SD
All Year Round	As	0.69 ± 0.16	0.43 ± 0.36	0.56 ± 0.33	0.30 ± 0.19	0.25 ± 0.11	0.89 ± 0.36	0.59 ± 0.59	1.66 ± 1.98	0.28 ± 0.16	0.27 ± 0.13	6.44 ± 3.17	0.36 ± 0.28	1.06 ± 1.74
	Cd	0.14 ± 0.01	0.18 ± 0.06	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.15 ± 0.02	0.21 ± 0.06	0.23 ± 0.12	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.15 ± 0.03
	Cr	0.48 ± 0.05	0.30 ± 0.21	2.14 ± 2.40	0.29 ± 0.21	0.30 ± 0.21	0.35 ± 0.13	0.35 ± 0.13	0.69 ± 0.35	0.35 ± 0.13	0.29 ± 0.21	0.61 ± 0.24	0.79 ± 0.49	0.58 ± 0.52
	Cu	76.13 ± 87.29	33.68 ± 23.51	11.64 ± 0.76	18.72 ± 9.66	10.03 ± 1.23	35.83 ± 12.62	323.23 ± 384.35	140.48 ± 9.16	12.20 ± 15.85	32.43 ± 17.08	14.94 ± 1.77	13.82 ± 3.51	60.26 ± 90.98
	Pb	23.10 ± 1.70	11.26 ± 2.54	8.26 ± 1.75	7.74 ± 1.76	9.56 ± 2.47	28.13 ± 5.62	66.85 ± 36.35	28.13 ± 4.42	0.95 ± 0.42	12.82 ± 0.97	2.06 ± 0.82	1.05 ± 0.33	16.66 ± 18.52
	Hg	0.51 ± 0.64	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.10 ± 0.13
	Ni	7.46 ± 2.02	4.48 ± 0.35	6.22 ± 0.10	5.72 ± 0.11	4.38 ± 1.60	15.63 ± 4.63	12.70 ± 0.07	4.75 ± 0.67	2.57 ± 1.85	7.71 ± 1.92	0.65 ± 0.37	1.34 ± 0.43	6.13 ± 4.38
	Zn	66.58 ± 27.26	43.48 ± 18.07	20.13 ± 0.95	18.85 ± 5.59	16.04 ± 8.46	51.85 ± 1.41	302.43 ± 292.85	173.13 ± 81.49	6.94 ± 5.73	31.88 ± 2.58	17.45 ± 6.58	12.39 ± 2.28	63.43 ± 87.75

บทที่ 6

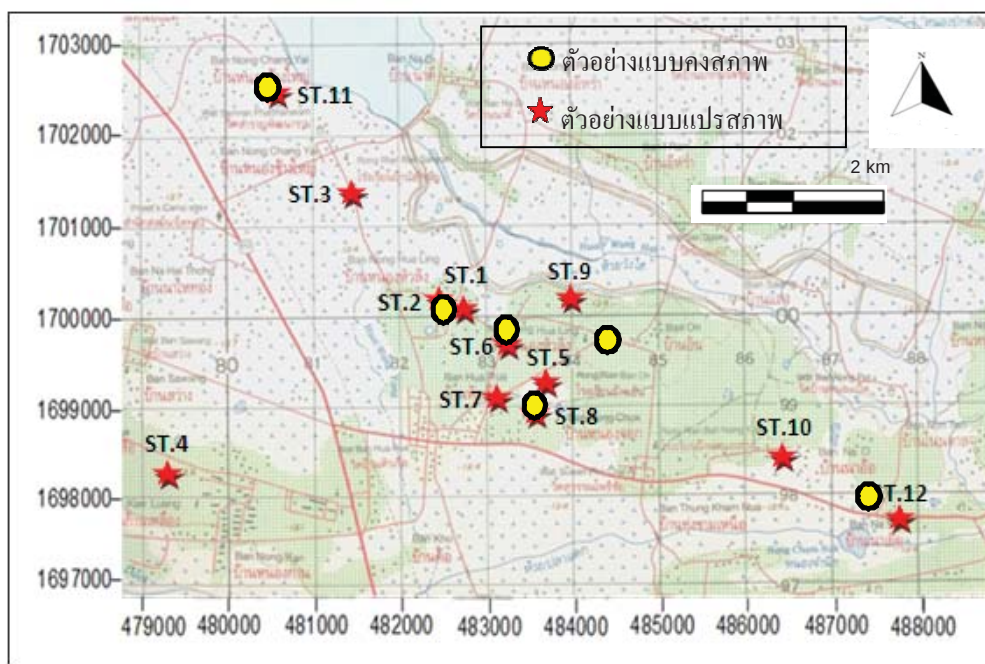
ผลการทดลองด้านกายภาพ-เคมีและปริมาณโลหะหนักของดิน

6.1 การเก็บตัวอย่างดินในสนาม

1. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินในภาคสนาม แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ และแบบแปรสภาพ ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 6.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ คือ การเก็บตัวอย่างดินที่เป็นแท่งเพื่อคงสภาพของดินให้เหมือนกับดินในสนาม ในการศึกษานี้ทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร สำหรับตำแหน่งในการเลือกเก็บตัวอย่าง 2 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณต้นน้ำ (ST 11) และ บริเวณท้ายน้ำ (ST 12) ตำแหน่งละ 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของดินดังนี้

- 1) ความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC)
- 2) ค่าความพรุนของดิน (soil porosity)
- 3) ค่าความหนาแน่นของดิน (bulk density)
- 4) ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (hydraulic conductivity)



รูปที่ 6.1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและแปรสภาพ



รูปที่ 6.2 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

1.2 เก็บตัวอย่างดินแบบแปรสภาพ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของดินและปริมาณโลหะหนักในสัดส่วนรูปแบบต่างๆ ในดิน **รูปที่ 6.3** ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

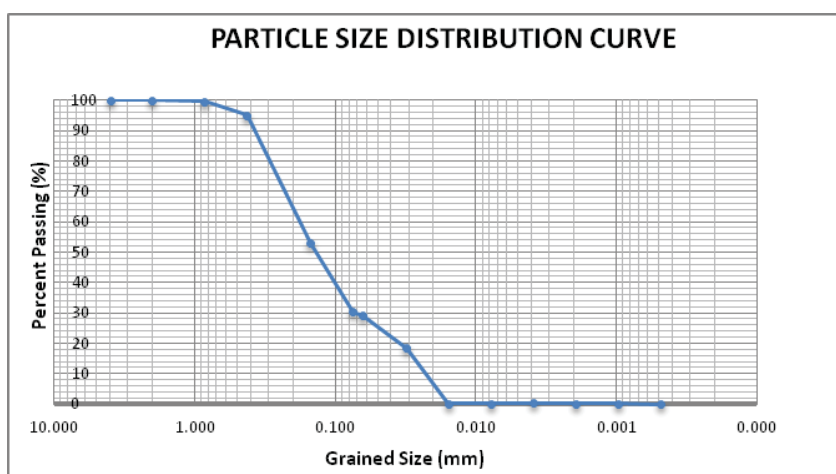
- 1) เลือกบริเวณที่จะเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 12 ตัวอย่างรอบบ่อบาดาลที่เก็บน้ำบาดาลตัวอย่างบริเวณที่ปลูกพริกในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม
- 2) ขุดดินลึกลงไปจากผิวดิน 5 เซนติเมตร จากนั้นขุดลงไปอีก 10 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างดินประมาณ 1 กิโลกรัม ใส่ถุงซิปล็อค
- 3) เก็บตัวอย่างดินตามระดับความลึกด้วยโดยเก็บที่ระดับความลึก 15 ซม. 30 ซม. 60 ซม. และที่ 1 เมตร ที่ตำแหน่ง ST2, ST10 และ ST11 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในแนวดิ่ง
- 4) จากนั้นนำดินตัวอย่างไปสกัดด้วยวิธี BCR scheme ([Perez and Valiente, 2005](#)) และดำเนินการวัดความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)



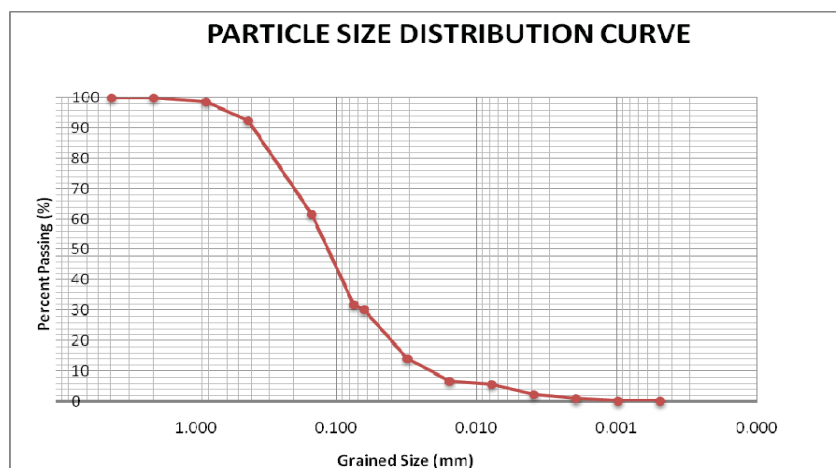
รูปที่ 6.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปรสภาพในพื้นที่ศึกษา

6.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดผลของเม็ดตะกอนในพื้นที่ศึกษา

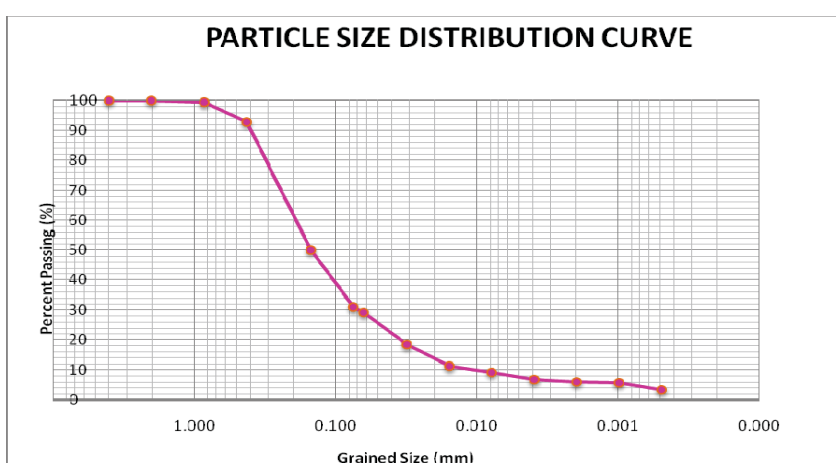
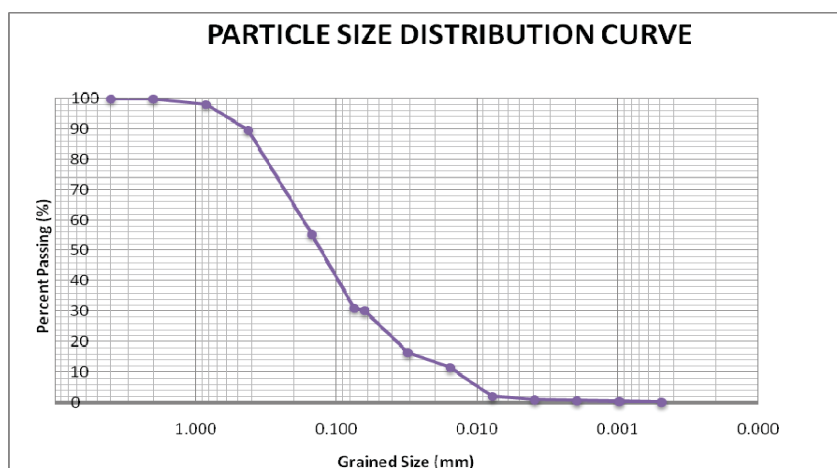
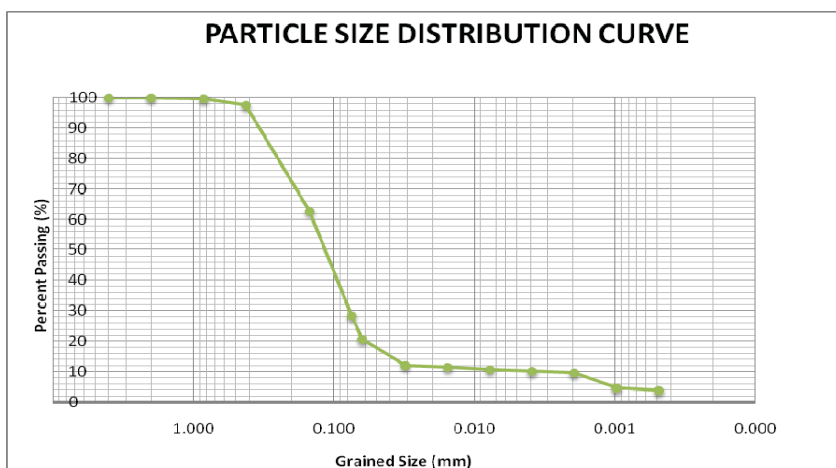
นำตัวอย่างดินที่เก็บแบบแปรสภาพมาหาประเภทของเนื้อดินในห้องปฏิบัติการโดยการทำ Sieve Analysis Test โดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 ตาม ASTM D 421-85, ASTM D 422-63 และ Pipette analysis Test เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงขนาดผลของเม็ดดิน (Grain size distribution curve) ของดินตำแหน่งที่ 1 (ST1) ถึงตำแหน่งที่ 12 (ST12) ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4-6.15 และกราฟแสดงขนาดผลเฉลี่ยในรูปที่ 6.16 พบว่าดินส่วนใหญ่เป็น sand และ loamy sand

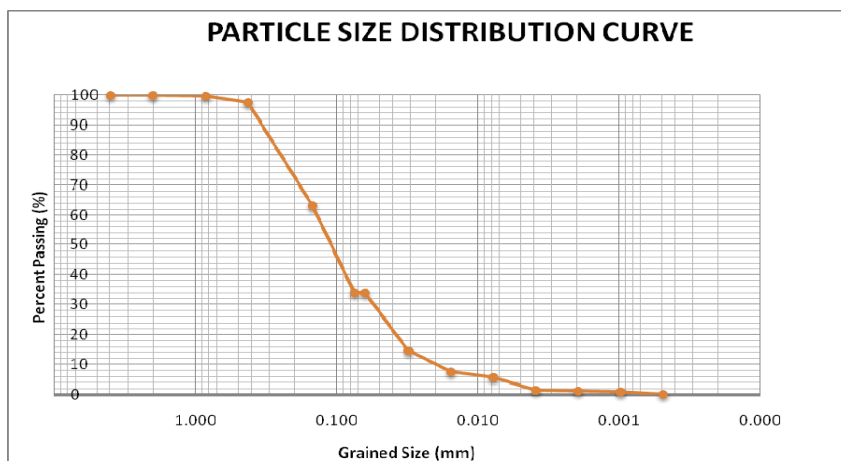


รูปที่ 6.4 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 1

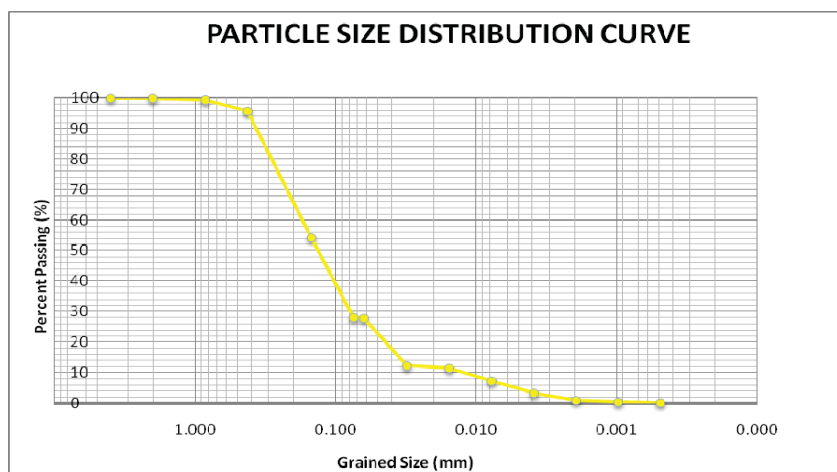


รูปที่ 6.5 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 2

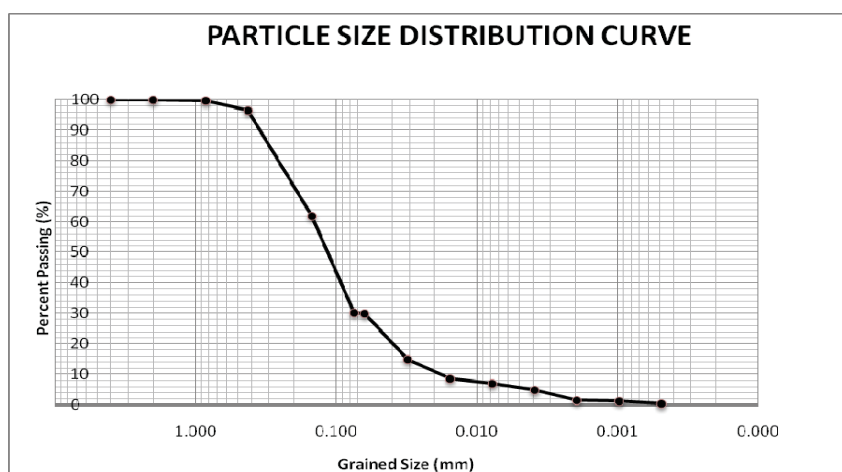




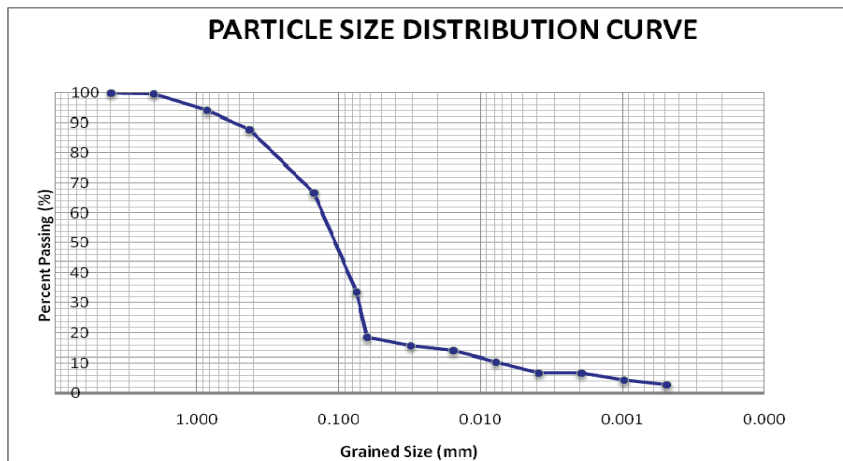
รูปที่ 6.9 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 6



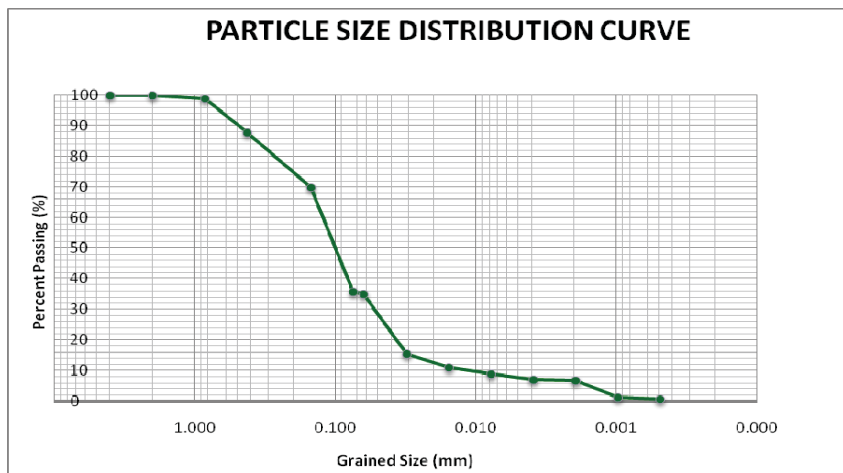
รูปที่ 6.10 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 7



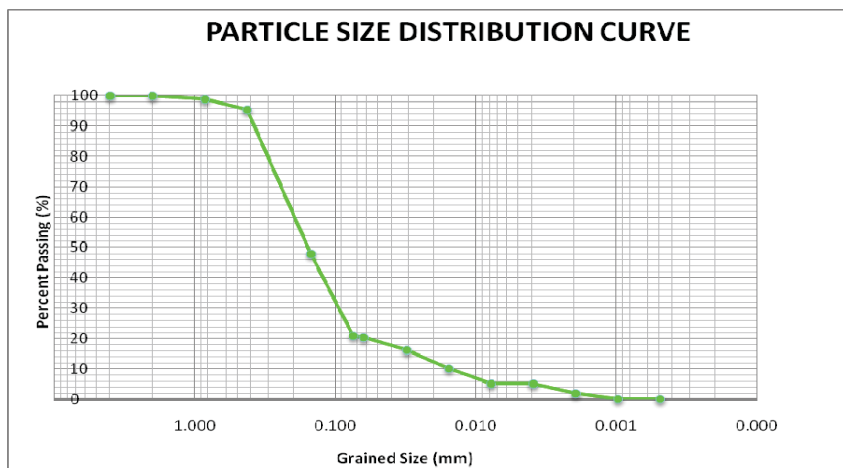
รูปที่ 6.11 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 8



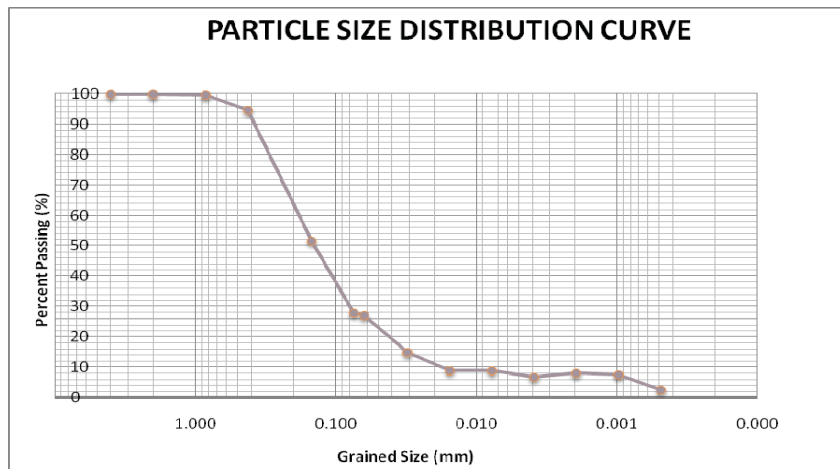
รูปที่ 6.12 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 9



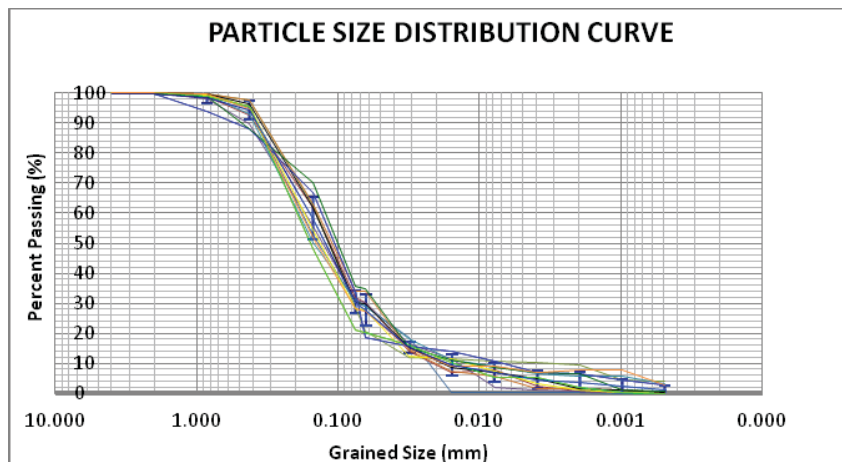
รูปที่ 6.13 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 10



รูปที่ 6.14 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 11



รูปที่ 6.15 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 12



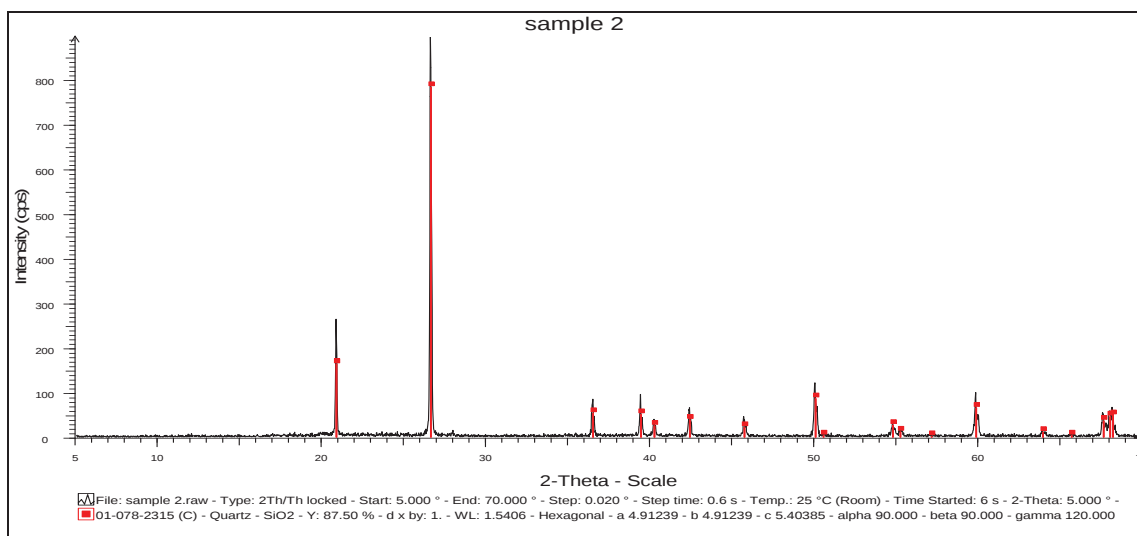
รูปที่ 6.16 การกระจายขนาดของดินตำแหน่งที่ 1-12

จากผลการทดสอบสมบัติของดินทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างดินตัวแทน แสดงในตารางที่ 6.1 ซึ่งได้จากการผสมตัวอย่างดินจากทั้ง 12 จุด เพื่อดำเนินการทดลองการดูดซับของโลหะหนักในการทดลองจลพลศาสตร์ (Kinetic sorption experiment) และการทดลองการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนัก (Sorption/desorption batch experiment) ต่อไป

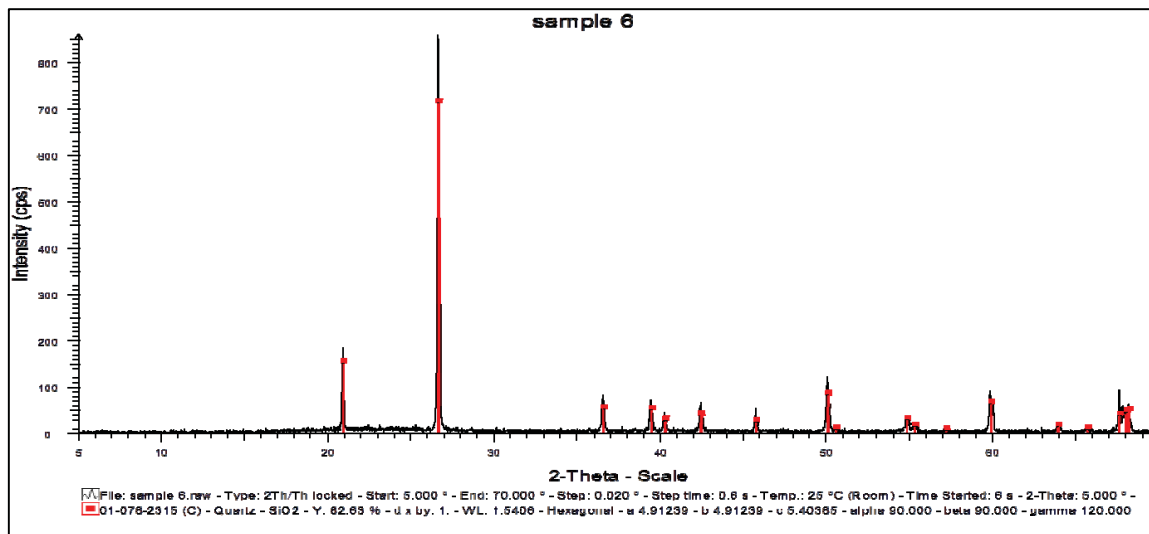
ตารางที่ 6.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินในพื้นที่ศึกษา

Site	Soil texture	Sand %	Silt %	clay %	Hydraulic conductivity, Ks cm day ⁻¹	Organic matter %	CEC cmol kg ⁻¹	Bulk density g cm ⁻¹	Porosity cm ³ cm ⁻³
1-12	Loamy sand	77.0	15.0	8.0	11.73±4.57	1.06	2.3	1.56±0.06	0.43±0.06

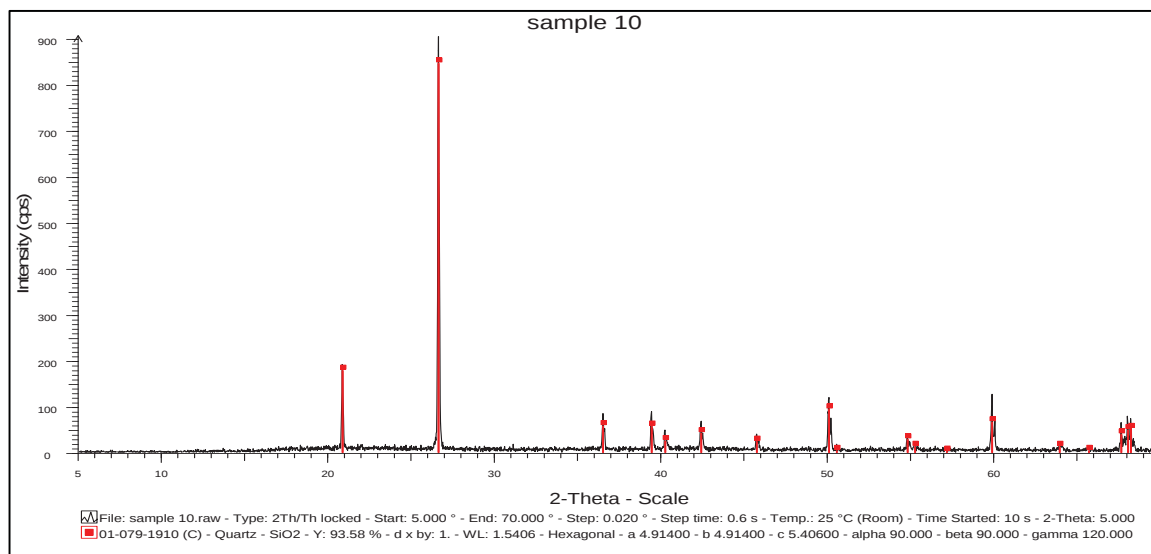
จากการนำตัวอย่างดินที่ถูกเก็บจากบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลมาวิเคราะห์หาแร่องค์ประกอบในดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) พบว่าแร่ที่เป็นองค์ประกอบในดินในพื้นที่ศึกษานั้นส่วนใหญ่แล้วเป็นแร่ Quartz (SiO₂) ทั้งหมดดังรูปที่ 6.17-6.19 เป็นผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างดินตำแหน่งที่ 2, 6 และ 10 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณทรายที่มีสัดส่วนมากและค่าอัตราการซึมของดินมีค่าเท่ากับ 11.73 ซม.ต่อวัน ซึ่งตรงกับชนิดดินกลุ่ม B ตามการจัดกลุ่มดินของแผนที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินโดยจัดเป็นทรายแป้งหรือดินร่วน (Silt loam or loam) ส่งผลให้โลหะหนักมีการดูดซับอยู่กับผิวดินได้น้อย จึงมีโอกาสนในการชะละลายลงสู่ชั้นน้ำด้านล่างได้สูงทำให้ปนเปื้อนในน้ำบาดาลในที่สุด



รูปที่ 6.17 ผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 2 (St.2)



รูปที่ 6.18 ผลการวิเคราะห์แร่ของตัวอย่างดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 6 (St.6)



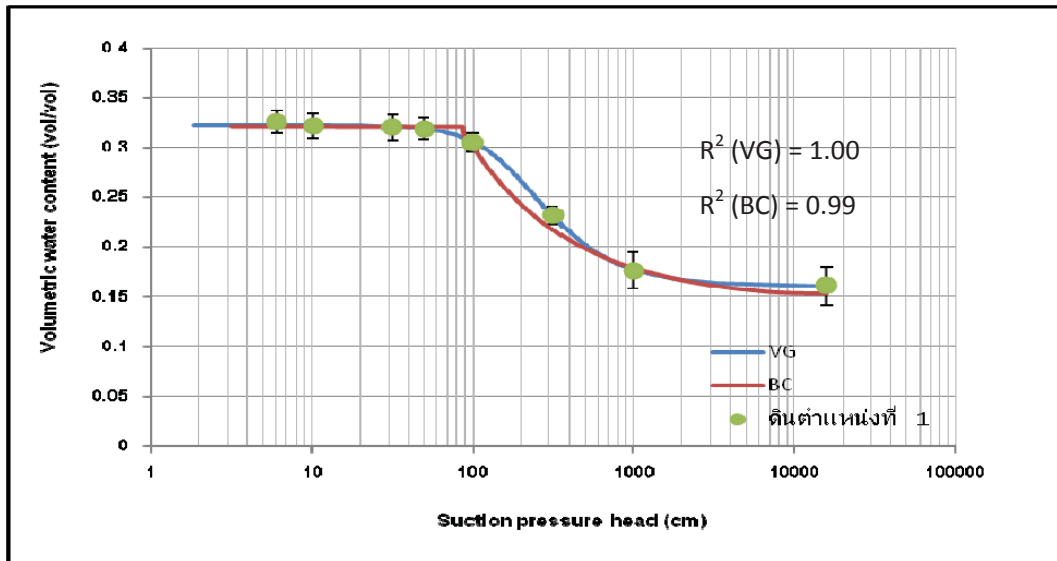
รูปที่ 6.19 ผลการวิเคราะห์แร่ของตัวอย่างดินโดยเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) จากดินบริเวณรอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่ 10 (St.10)

6.3 ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC)

จากการเก็บตัวอย่างดินที่เก็บแบบคงสภาพ (undisturbed sample) มาหาความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC) โดยใช้วิธี Pressure extraction ตาม ASTM D 6836 โดยกำหนดให้ค่า pF เท่ากับ 0.8, 1.0, 1.5, 1.7, 2.0, 2.5, 3.0 และ 4.2 ซึ่งได้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติ การปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร โดยใช้เครื่อง Pressure chamber (รูปที่ 6.20) เมื่อนำกระบอกเก็บตัวอย่างดินเข้าเครื่อง Pressure Chamber แล้วทำการปรับค่าความดันไปที่ค่าแรกสุด ($pF=0.8$) รอให้ความดันและปริมาณน้ำในดินถึงจุดสมดุล (ใช้เวลาประมาณ 1 อาทิตย์ต่อ 1 ค่าความดัน) สังเกตได้จากน้ำจะหยุดไหลออกจากท่อสายยางที่ต่อออกมาจากภายใน Pressure Chamber นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาค่าความชื้นของดิน (soil water content) หลังจากนั้นนำกระบอกเก็บตัวอย่างดินเข้าเครื่อง Pressure Chamber เพื่อเพิ่มความดันจุดความดันต่อไป ทำตามขั้นตอนดังกล่าวจนได้ค่าความดันที่จุดต่างๆ จากนั้นก็จะนำข้อมูลมาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC) ในการทดลองนี้ทดสอบตัวอย่างทั้งสิ้น 18 ตัวอย่างจาก 6 จุดซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล 1 โดยเก็บตัวอย่างจุดละ 3 ตัวอย่าง และผลของการทดลองอธิบายโดยสมการของ van Genuchten (VG) และ Brook and Corey (BC) พบว่าสมการของ van Genuchten (VG) อธิบายความสัมพันธ์นี้ได้ดีกว่า Brook and Corey (BC) (Brooks and Corey, 1964) ในการอธิบายจุดข้อมูลดังกล่าวได้ใช้โปรแกรม RETC (van Genuchten et al., 1991) ผลจากการทดลองของดินตำแหน่งต่างๆ แสดงในรูปที่ 6.21- รูปที่ 6.24

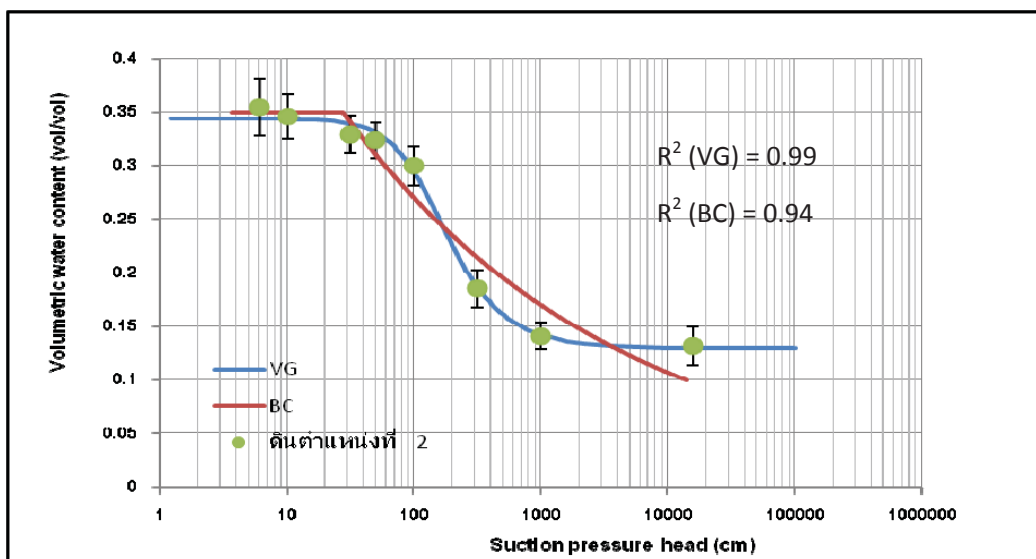


รูปที่ 6.20 เครื่อง Pressure chamber และตัวอย่างแท่งดินที่แช่น้ำเพื่อให้ดินอิ่มตัว

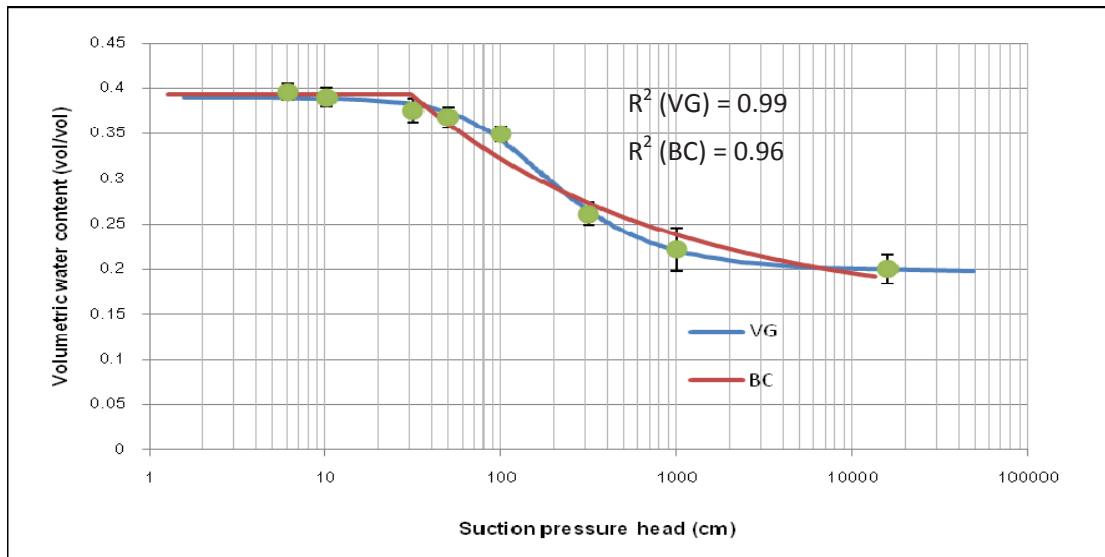


รูปที่ 6.21 แสดง soil water characteristics curve ตำแหน่งที่ 1

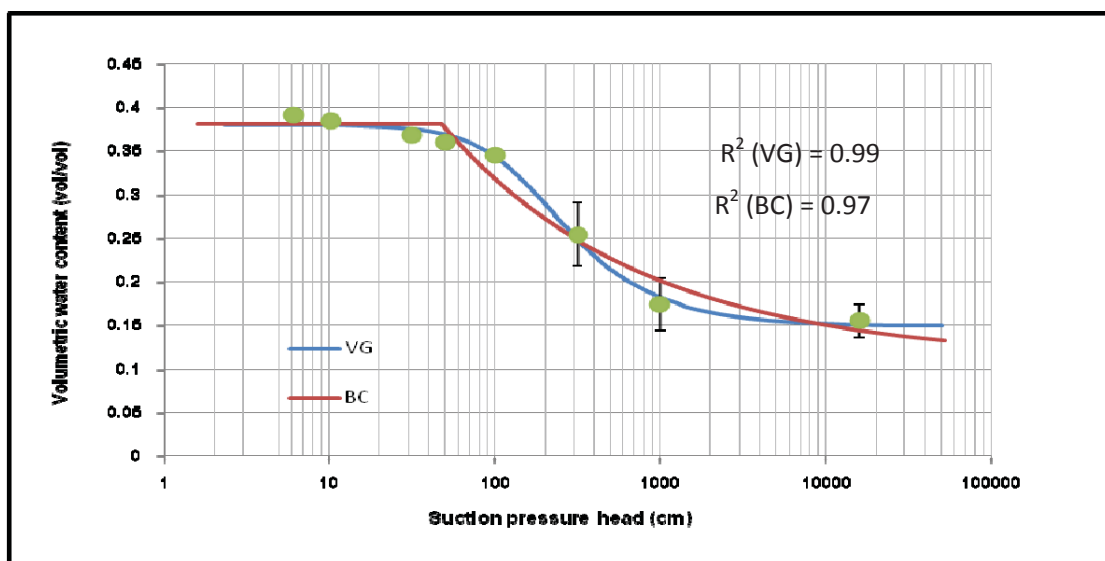
จุดเขียว : ค่า water content จากการทดลอง



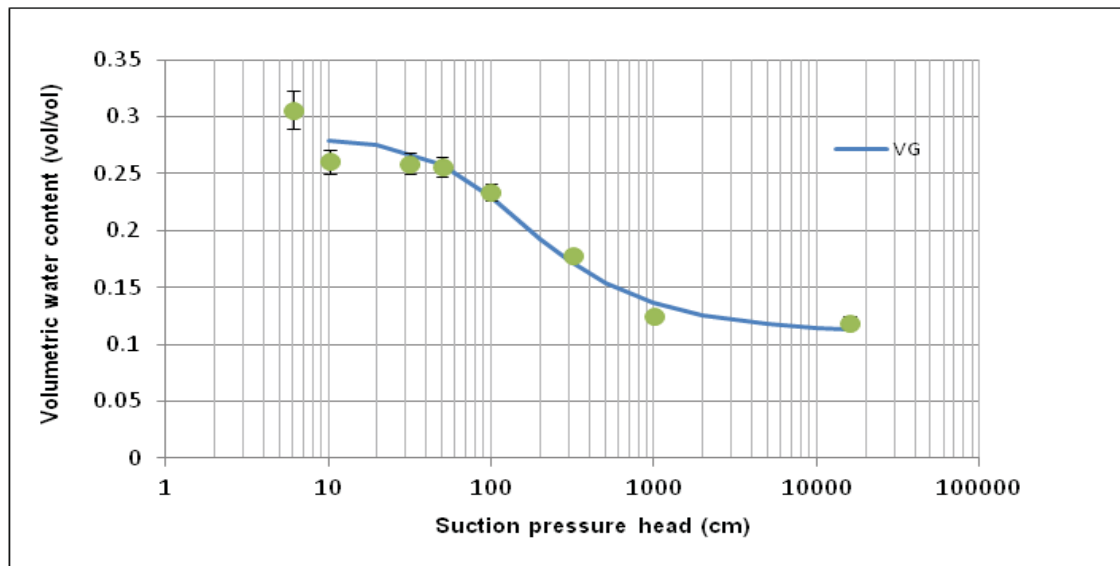
รูปที่ 6.22 แสดง soil water characteristics curve ข) ตำแหน่งที่ 2



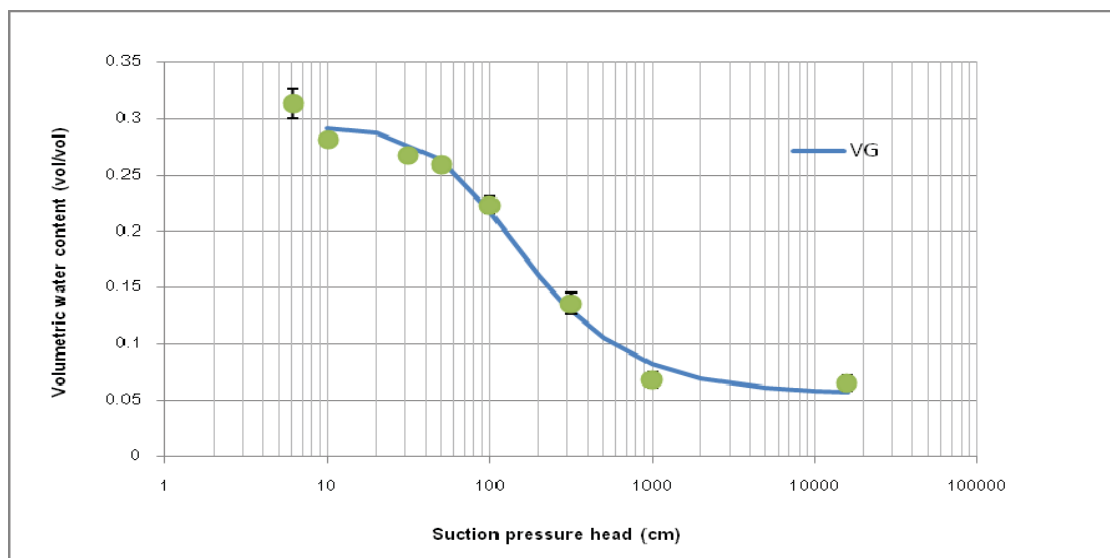
รูปที่ 6.23 แสดง soil water characteristics curve ค) ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 6.24 แสดง soil water characteristics curve ง) ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดินตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดินตำแหน่งที่ 6

จากการกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นในดินกับความดันของน้ำในดิน (SWCC) พบว่าสมการของ van Genuchten Equation (VG) สามารถนำมาอธิบายลักษณะของดินในพื้นที่ที่ศึกษาได้ดีกว่าสมการของ Brooks and Corey Constitution (BC) โดยดูได้จากค่าสหสัมพันธ์ ดังนั้นในตัวอย่างที่ 5 และ 6 (รูปที่ 6.25 และ 6.26) จะอธิบายโดยใช้สมการ van Genuchten เท่านั้น จากการทดลองค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดิน (hydraulic conductivity) 6 จุดที่ได้เก็บแบบคงสภาพพบว่าค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.22 เซนติเมตรเมตรต่อวัน ของ loamy sand

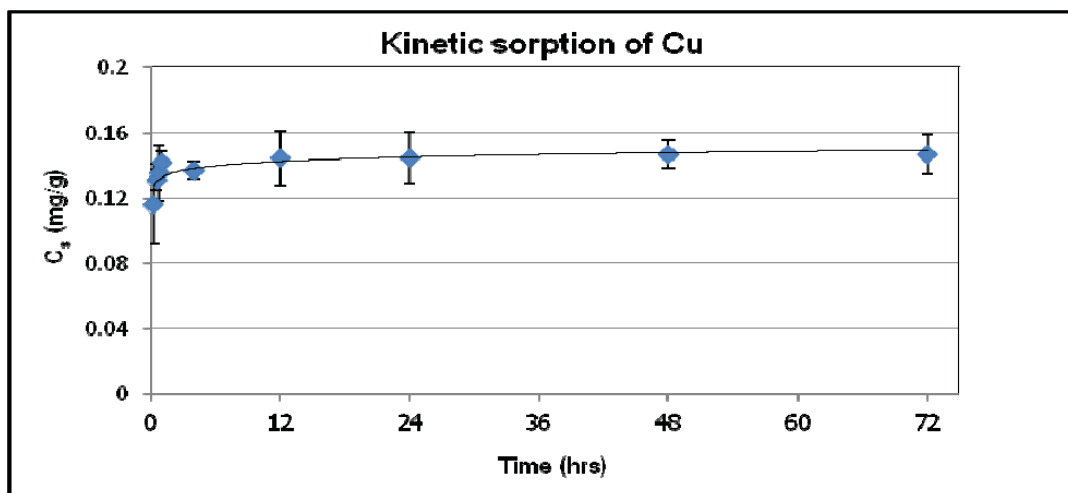
6.4 การทดลองการดูดซับของโลหะหนัก

6.4.1 การทดลองจลพลศาสตร์ (kinetic sorption experiment)

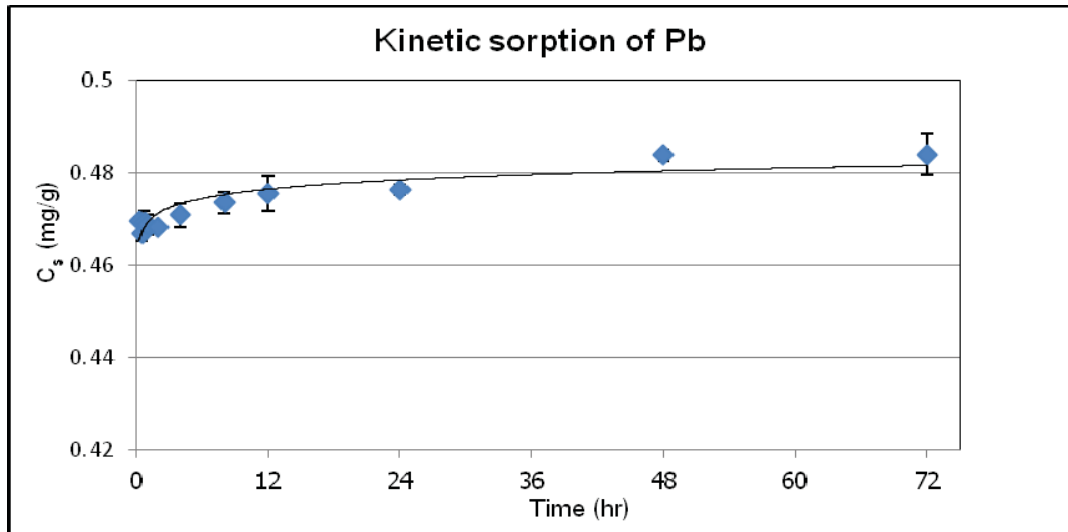
ขั้นตอนในการทดลองจลพลศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการผสมสารละลายตะกั่วและทองแดงที่เตรียมไว้กับดินในขวดทดลอง อัตราส่วน 1:20 (g: ml) โดยผสมสารละลายตะกั่วกับดินจำนวน 33 ขวดและผสมสารละลายทองแดงกับดินจำนวน 33 ขวด
2. ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 15, 30, 45 นาที, 1, 2, 4, 8, 12 ชั่วโมง, 1, 2 และ 3 วันที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที
3. เมื่อครบกำหนดในแต่ละเวลาทำการนำขวดทดลองที่มีสารละลายผสมตะกั่วกับดินและสารละลายผสมทองแดงกับดินออกจากเครื่องเขย่าอย่างละ 3 ขวด
4. นำสารละลายผสมที่นำออกจากเครื่องเขย่ามาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกและทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้โดยเครื่อง AAS
5. นำปริมาณความเข้มข้นที่วัดได้มาทำการสร้างกราฟเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไป เพื่อหาเวลาที่มีการดูดซับตะกั่วของดินเข้าสู่สมดุล

จากการทดลองจลพลศาสตร์พบว่าจะต้องทำการทดลองดูดซับของทองแดงและตะกั่วที่ 1 และ 2 วันตามลำดับเพื่อการดูดซับของโลหะหนักดังกล่าวเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 6.27 และ 6.28



รูปที่ 6.27 แสดงการดูดซับของทองแดง (Cu) ในการทดลองจลพลศาสตร์ในช่วง 3 วัน



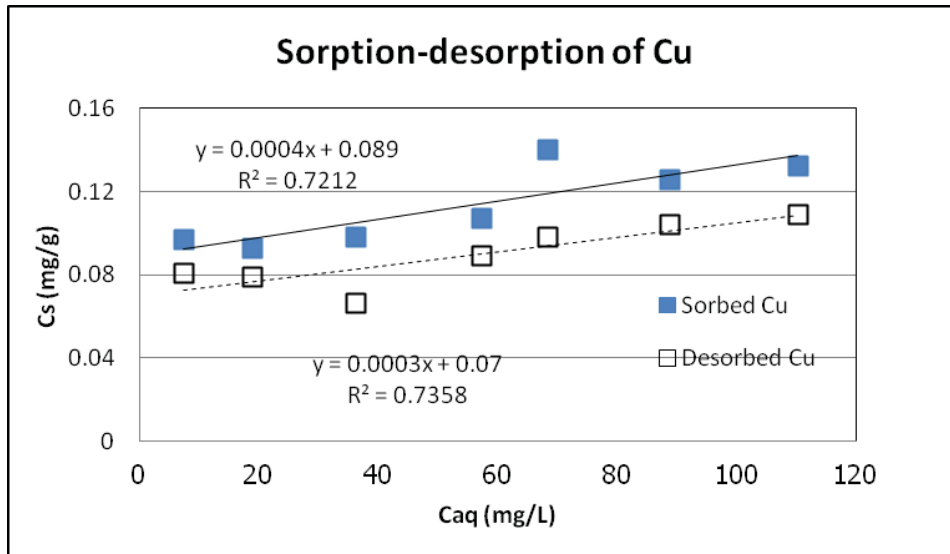
รูปที่ 6.28 แสดงการดูดซับของตะกั่ว (Pb) ในการทดลองจลพลศาสตร์ในช่วง 3 วัน

6.4.2 การทดลองการดูดซับและการคายตัวของโลหะหนักในการทดลองแบบแบตช์ (Sorption/desorption batch experiment)

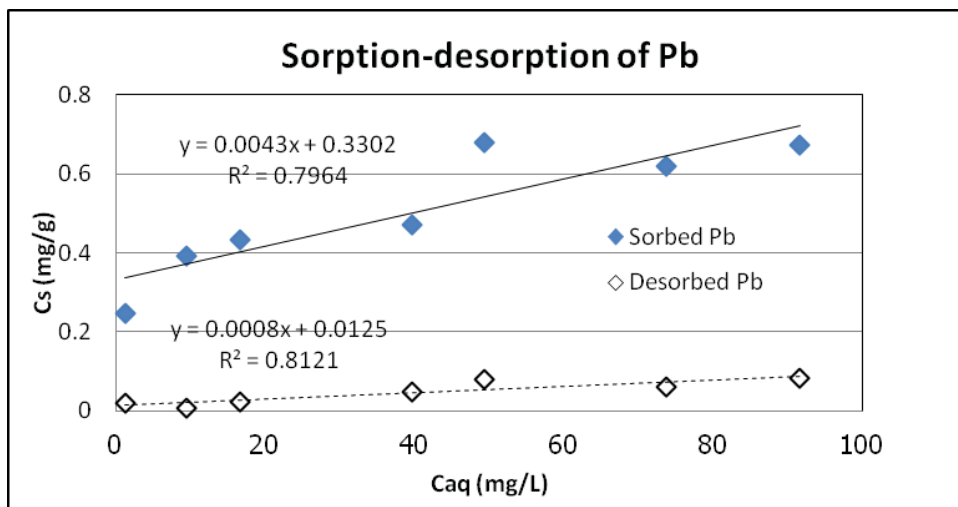
ขั้นตอนในการทดลอง

- 1) ทำการเตรียมสารละลายตะกั่วและทองแดงที่มีความเข้มข้น 15, 25, 40, 60, 80, 100 และ 120 mg/L อย่างละ 100 มิลลิลิตรและทำการปรับ pH ให้เท่ากับ 4
- 2) นำสารละลายความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมไว้ในขวดทดลองอย่างละ 3 หลอด หลอดละ 20 มิลลิลิตร
- 3) ทำการชั่งดิน 1 กรัมใส่ในขวดทดลองแต่ละขวด
- 4) ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 วันเพื่อให้เกิดสภาวะที่สมดุลของการดูดซับ
- 5) เมื่อครบกำหนดเวลานำสารละลายผสมที่นำออกจากเครื่องเขย่ามาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกและทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น ของสารละลายที่กรองได้โดยเครื่อง AAS
- 6) นำปริมาณความเข้มข้นที่วัดได้มาทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย (C_{aq}) กับความเข้มข้นของสารละลายที่ดินดูดซับได้ (C_s)

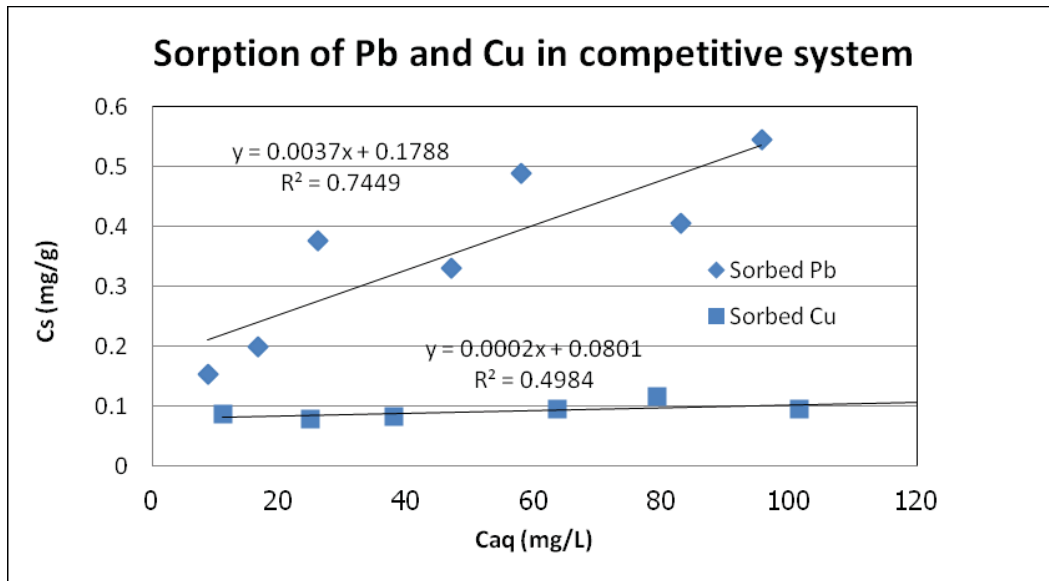
ผลการทดลองการดูดซับและการคายตัวของทองแดงและตะกั่วในระบบแบบเดี่ยว (Single metal systems) แสดงในรูปที่ 6.29 - 6.30 ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าในระบบแบบเดี่ยวและแบบแข่งขันทำให้สมบัติในการดูดซับและคายตัวของโลหะหนักทั้งสองชนิดแตกต่างจากเดิมโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (sorption coefficient) ซึ่งได้อธิบายโดยสมการเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 6.31-6.34



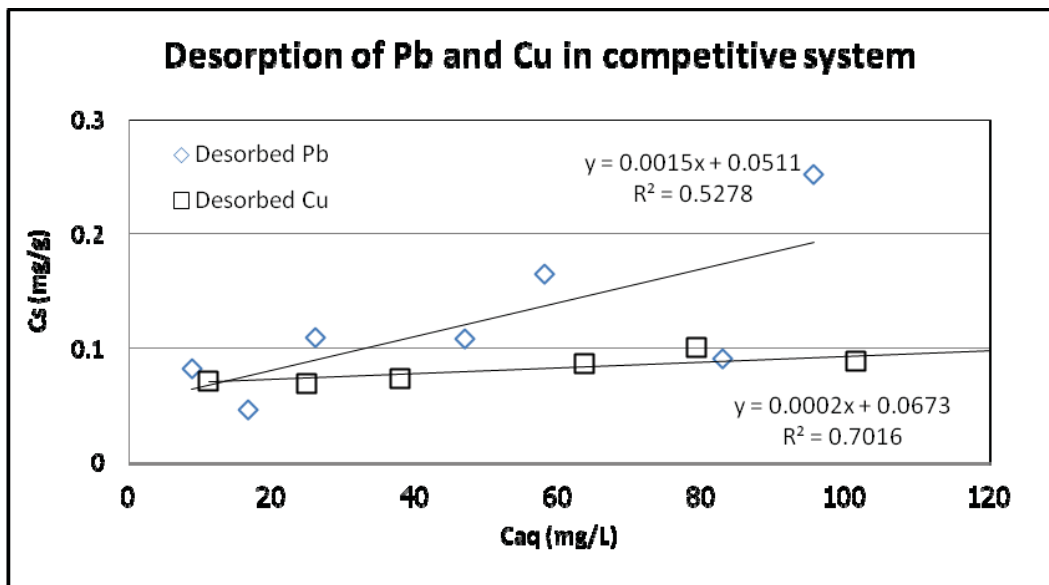
รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Cu



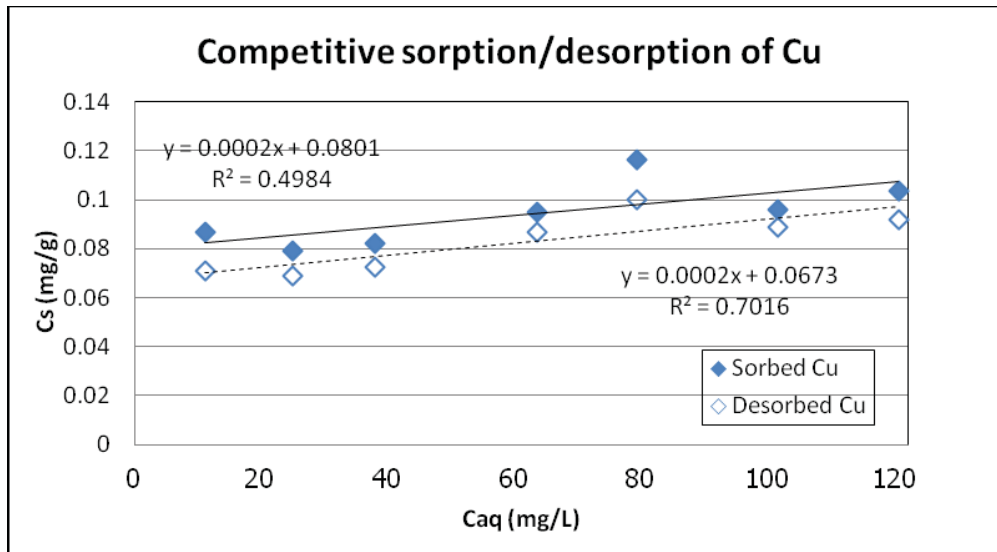
รูปที่ 6.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Pb



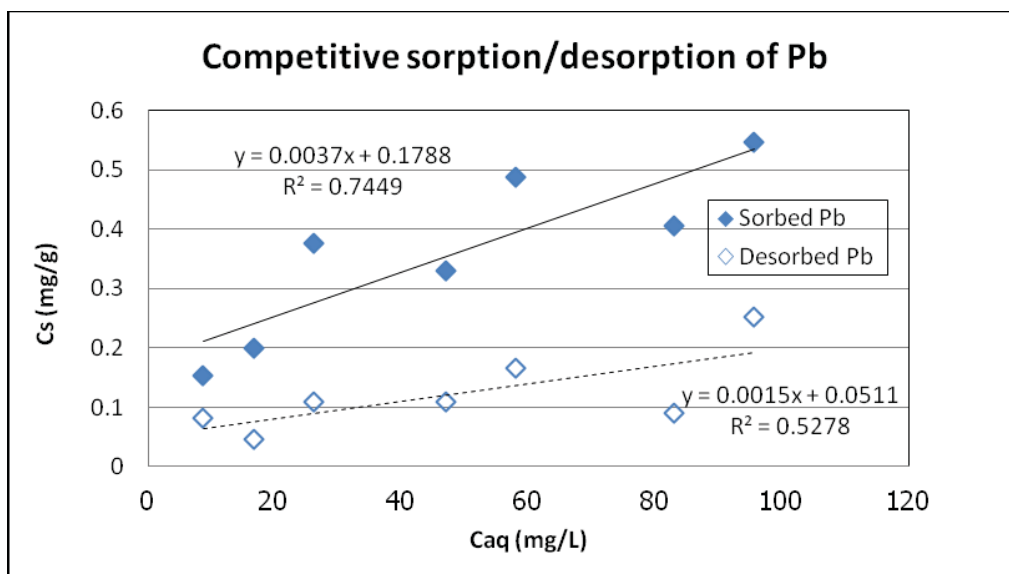
รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับของ Cu และ Pb ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive sorption system)



รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นของ Cu และ Pb ที่คายตัวในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)



รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Cu (sorption- desorption) ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)



รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นที่ดูดซับและคายตัวของ Pb (sorption- desorption) ในระบบที่มีการแข่งขัน (Competitive desorption system)

6.5 การจำลองการไหลและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยใช้แบบจำลอง HYDRUS-1D

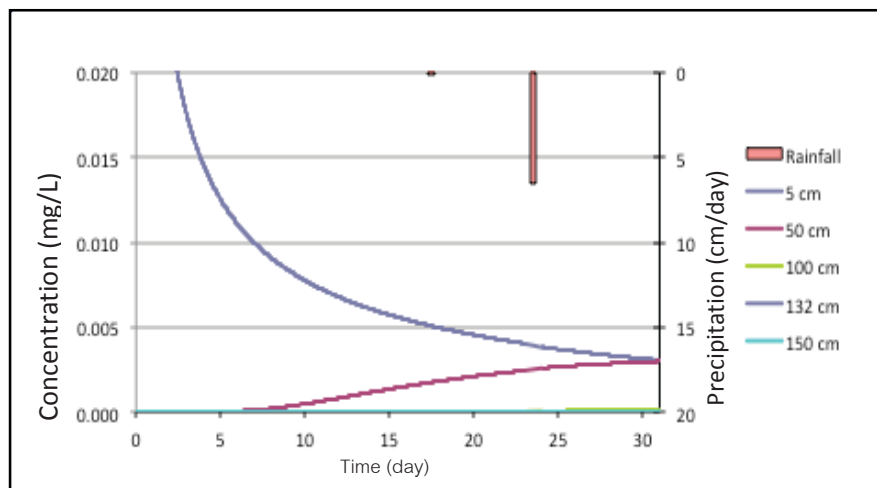
จากการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม HYDRUS-1D ในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ได้กำหนดค่าปริมาณตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) เริ่มต้นเท่ากับ 0.342 และ 0.476 mg/L ตามลำดับ ซึ่งโดยค่าเริ่มต้นเป็นค่าเฉลี่ยตามปริมาณการใช้ปุ๋ยที่มีโอกาสชะออกมาในพื้นที่เพาะปลูกในหนึ่งปี และได้มีการนำข้อมูลฝนและอัตราการระเหยของน้ำในพื้นที่มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ได้มีการใช้ข้อมูลฝน 3 ช่วงเวลา คือ เดือนมีนาคมซึ่งเป็นเดือนที่มีปริมาณฝนน้อยที่สุด ปี 2553 เดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นเดือนที่มีปริมาณฝนตกมากที่สุดในปี 2553

ผลจากการจำลองพบว่าที่ระดับน้ำบาดาลเฉลี่ย (132 เซนติเมตร) จากผิวดินในเดือนกรกฎาคม ซึ่งเป็นเดือนที่มีปริมาณฝนตกมากที่สุดในรอบปีพบว่าตะกั่วมีความเข้มข้น 2.04×10^{-5} mg/L และทองแดงมีความเข้มข้น 2.27×10^{-3} mg/L ในกรณีพิจารณาแบบแบบเดียว สำหรับรายละเอียดผลการจำลองเบื้องต้นแสดงในรูปที่ 6.35 – 6.38 ดังนี้

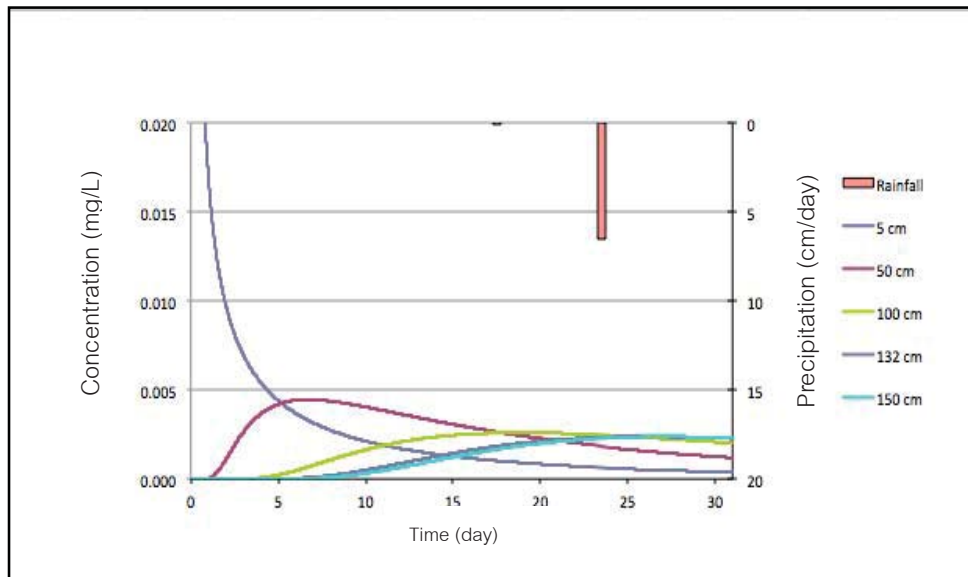
6.5.1 ผลการจำลองในเดือนมีนาคม

กรณีที่ 1 ระบบโลหะหนักแบบเดียว (Single sorption system)

ผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 6.35-6.36 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วและทองแดงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในเดือนมีนาคมที่ระดับความลึกต่างๆ ในระบบของโลหะหนักแบบเดียว (Single sorption system)



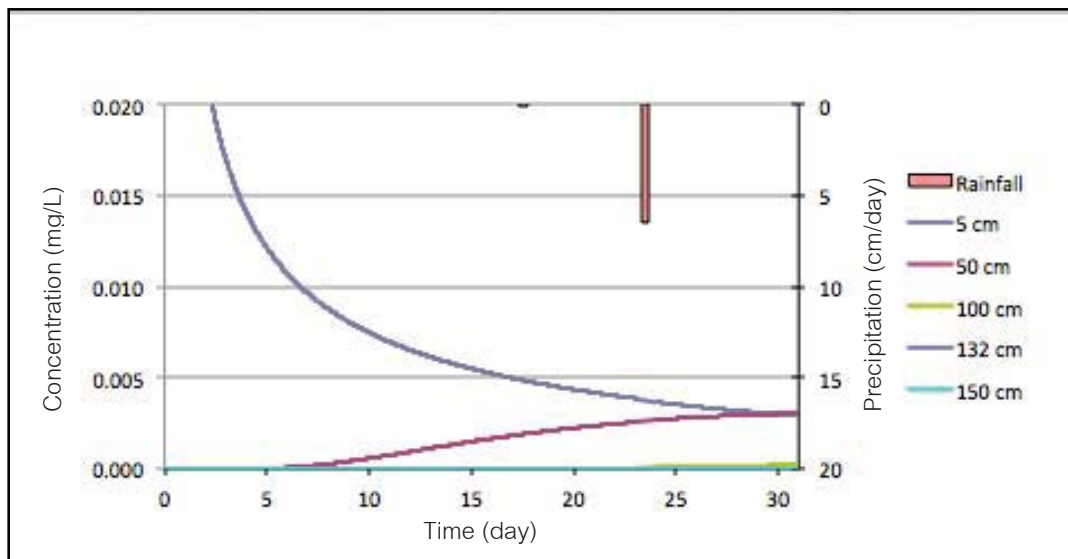
รูปที่ 6.32 แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบเดียว



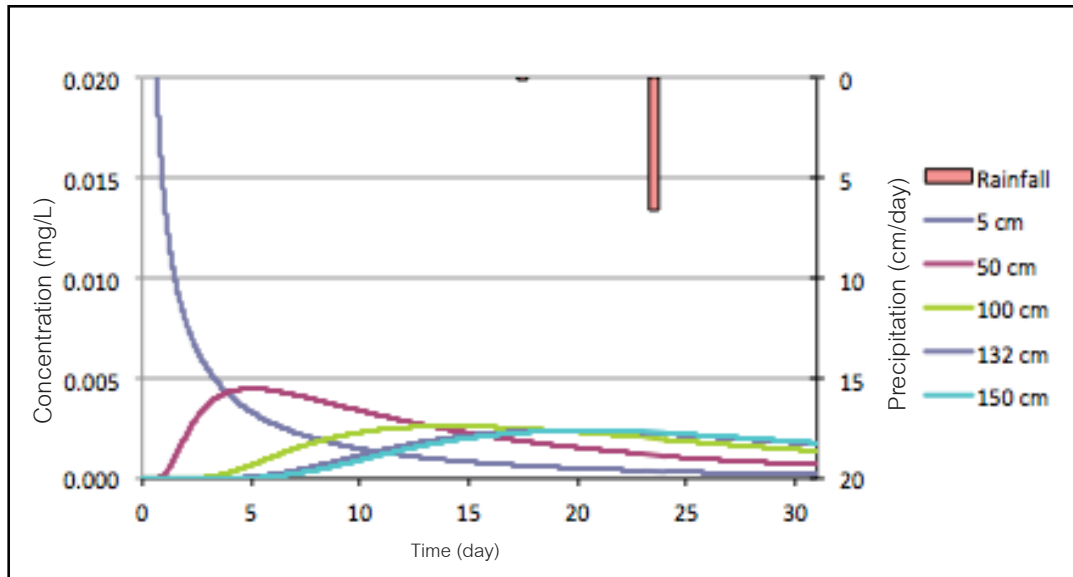
รูปที่ 6.33 แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบเดี่ยว

กรณีที่ 2 ระบบโลหะหนักแบบแข่งขัน (Competitive metal system)

ผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 6.37-6.38 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วและทองแดงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในเดือนมีนาคมที่ระดับความลึกต่างๆ ในระบบของโลหะหนักแบบแข่งขัน (competitive sorption system)



รูปที่ 6.37 แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบแข่งขัน

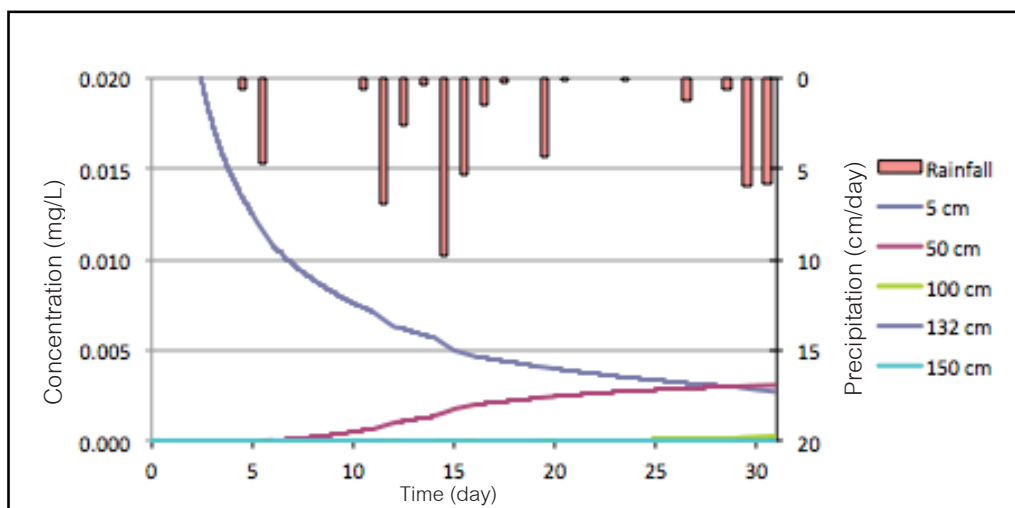


รูปที่ 6.38 แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนมีนาคมในระบบแบบแข่งขัน

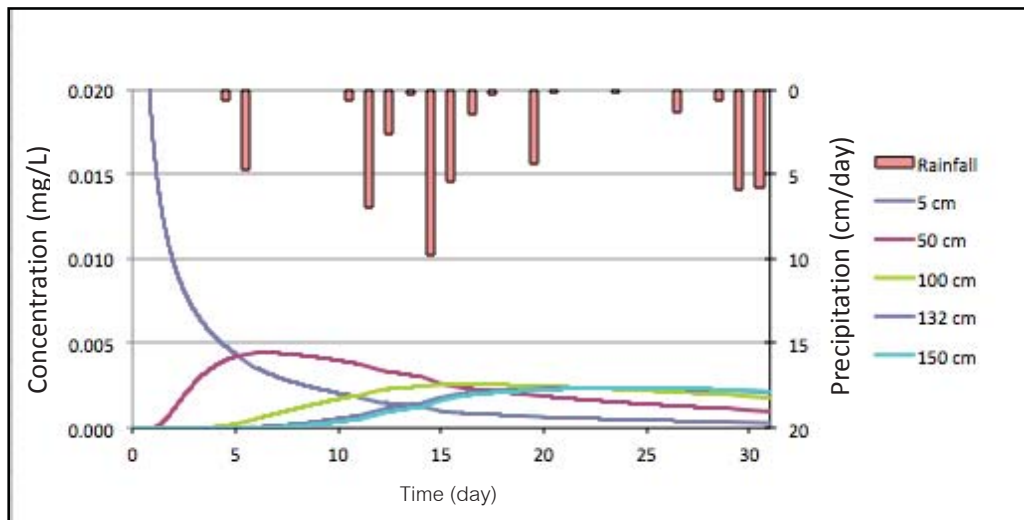
6.5.2 ผลการจำลองในเดือนกรกฎาคม

กรณีที่ 1 ระบบโลหะหนักแบบเดี่ยว (Single sorption system)

ผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 6.39-6.40 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วและทองแดงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในเดือนมีนาคมที่ระดับความลึกต่างๆ ในระบบของโลหะหนักแบบเดี่ยว (Single sorption system)



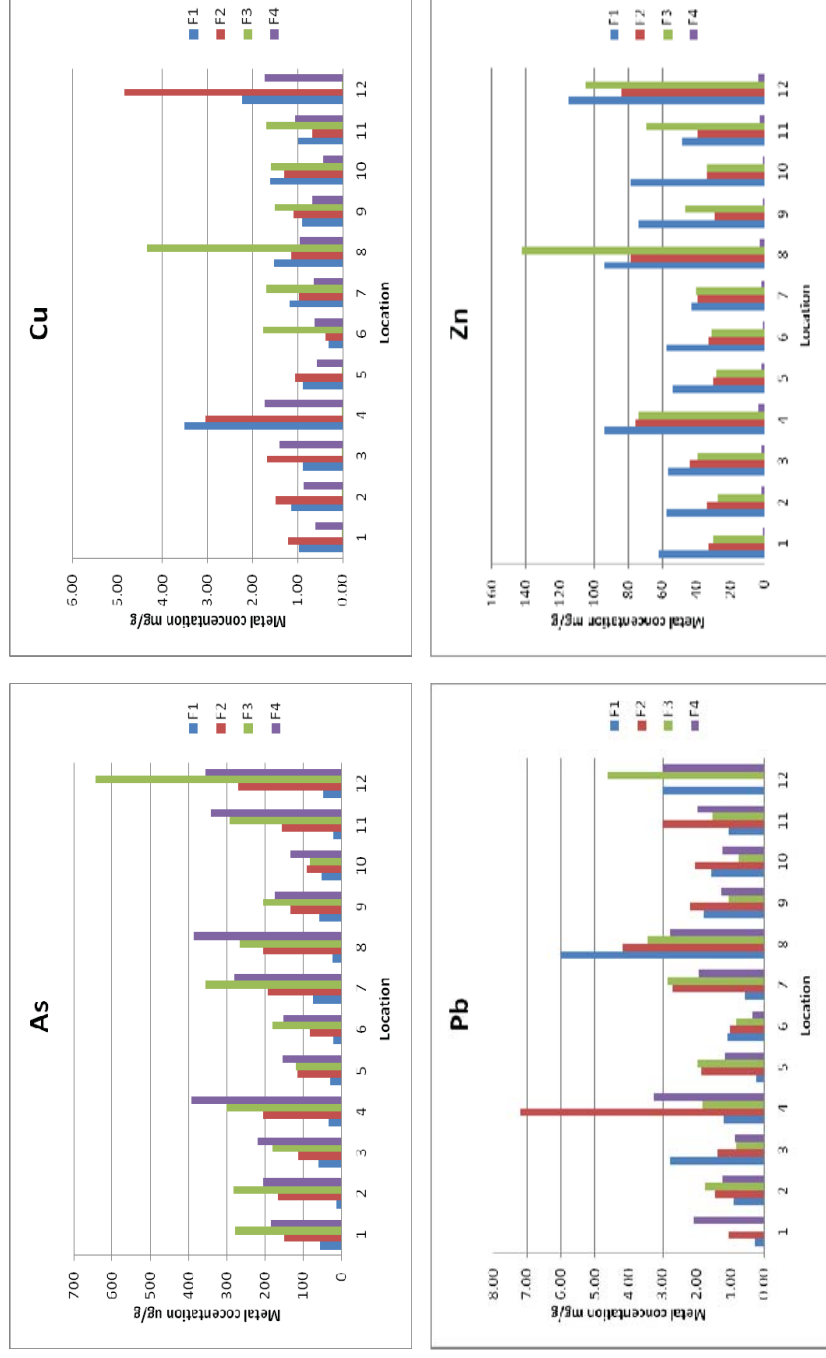
รูปที่ 6.39 แสดงปริมาณตะกั่วที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนกรกฎาคมในระบบแบบเดี่ยว



รูปที่ 6.40 แสดงปริมาณทองแดงที่ระดับความลึกต่างๆ ในเดือนกรกฎาคมในระบบแบบเดี่ยว

6.6 ผลการทดลองการสกัดอย่างต่อเนื่อง (BCR sequential extraction)

ผลการทดลองการสกัดอย่างต่อเนื่อง (BCR sequential extraction) ของดินทั้ง 12 ตำแหน่งแสดงในตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.41 และพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของแต่ละสัดส่วนในรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.41 ปริมาณโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง

ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวิเคราะห์ในดินในพื้นที่หัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานีแสดงในรูปที่ 6.41 และตารางที่ 6.2 พบว่าโลหะหนักที่พบใน exchangeable fraction (F1) สูงสุดคือ สังกะสี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69.47 mg/g และมีค่าอยู่ในช่วง 48.58 – 114.50 mg/g และพบรองลงมาใน reducible fraction (F2) เท่ากับ 45.97 mg/g อยู่ในช่วง 29.64 – 84.00 mg/g ปริมาณโลหะสังกะสีทั้งหมด (F1+F2+F3+F4) ที่ตรวจพบมากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 8 มีค่าเท่ากับ 317.08 mg/g และโลหะที่ตรวจพบน้อยที่สุดใน exchangeable fraction (F1) คือ สารหนูมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.60 µg/g และมีค่าอยู่ในช่วง 13.18-74.73 µg/g ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบมากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 12 มีค่าเท่ากับ 1,308.6 µg/g

ตารางที่ 6.2 ปริมาณโลหะหนัก As, Cu, Pb and Zn ในสัดส่วนต่างๆ ของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง (หน่วย mg/g, mean±SD)

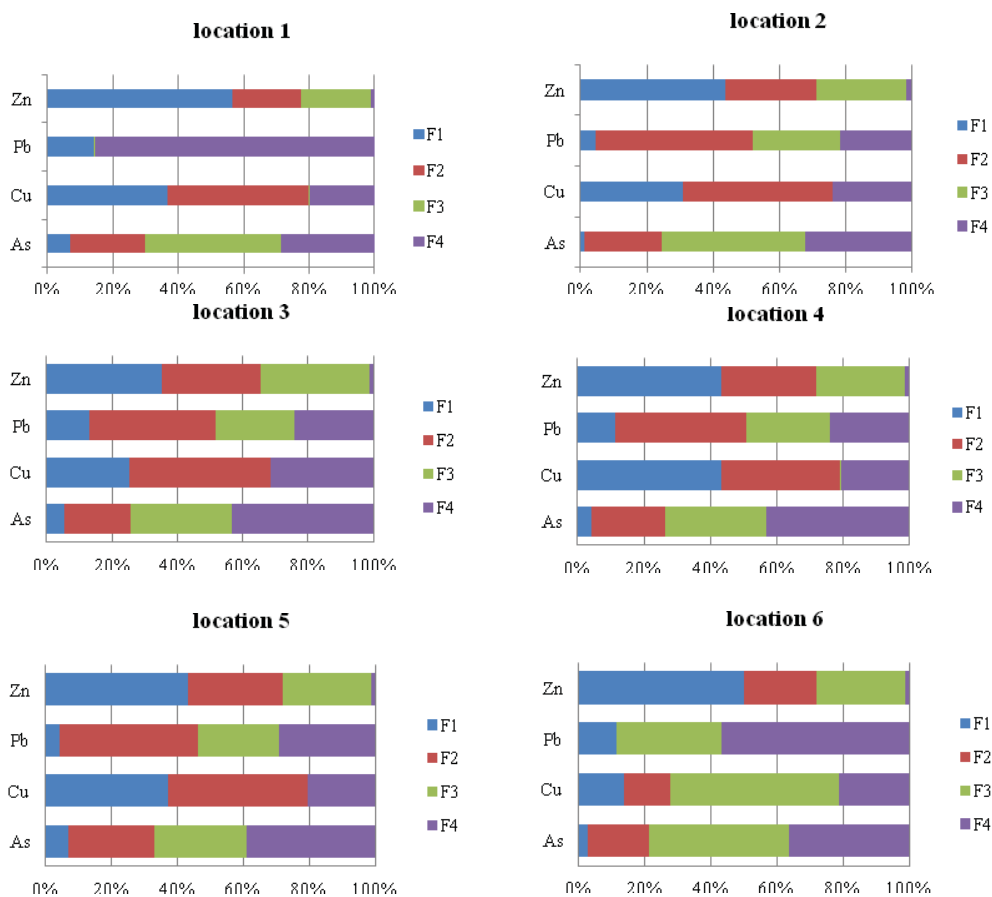
Site 1-12	Exchangeable fraction	reducible fraction	oxidisable fraction	residual fraction
As	41.60(19.05)*	156.82(63.38)*	265.65(156.57)*	248.53(105.28)*
Cu	1.35(0.91)	1.58(1.30)	1.05(0.85)	0.94(0.52)
Pb	1.71(0.95)	2.34(1.88)	1.79(1.28)	1.84(0.90)
Zn	69.47(28.19)	45.97(21.85)	55.37(27.13)	1.88(0.88)

*(หน่วย µg/g)

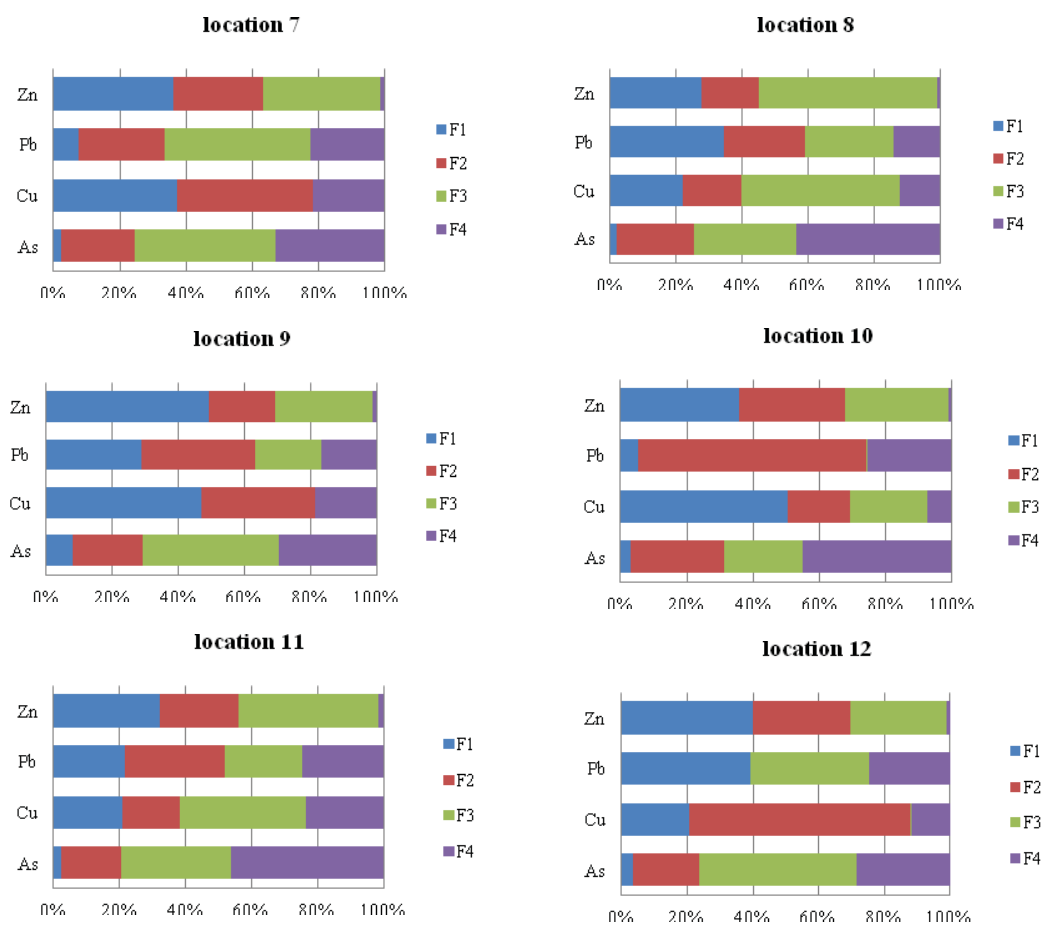
นอกจากนี้หากพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวิเคราะห์ในดินในพื้นที่หัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานีแสดงในรูปที่ 6.42 และตารางที่ 6.3 พบว่าโลหะหนักที่พบใน exchangeable fraction เรียงจากสูงสุดไปต่ำสุดดังนี้ Zn (40.23%) > Cu (27.41%) > Pb (22.50%) > As (5.84%) และโลหะหนักที่ตรวจพบใน reducible fraction เรียงจากสูงสุดไปต่ำสุดดังนี้ Cu (32.06%) > Pb (30.84%) > Zn (26.62%) > As (22.01%) และพิจารณาผลรวมระหว่าง exchangeable fraction และ reducible fraction ซึ่งสามารถประเมินโอกาสที่โลหะหนักจะปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ง่าย (mobilizable and bioavailable forms) มีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Zn (66.85%) > Cu (59.47%) > Pb (53.34%) > As (27.85%) (รูปที่ 6.43) ดังนั้นสังกะสีมีโอกาสในการถูกชะละลายลงสู่ดินและชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ง่ายกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 6.3 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะหนักแต่ละชนิดของดินทั้ง 12 ตำแหน่ง

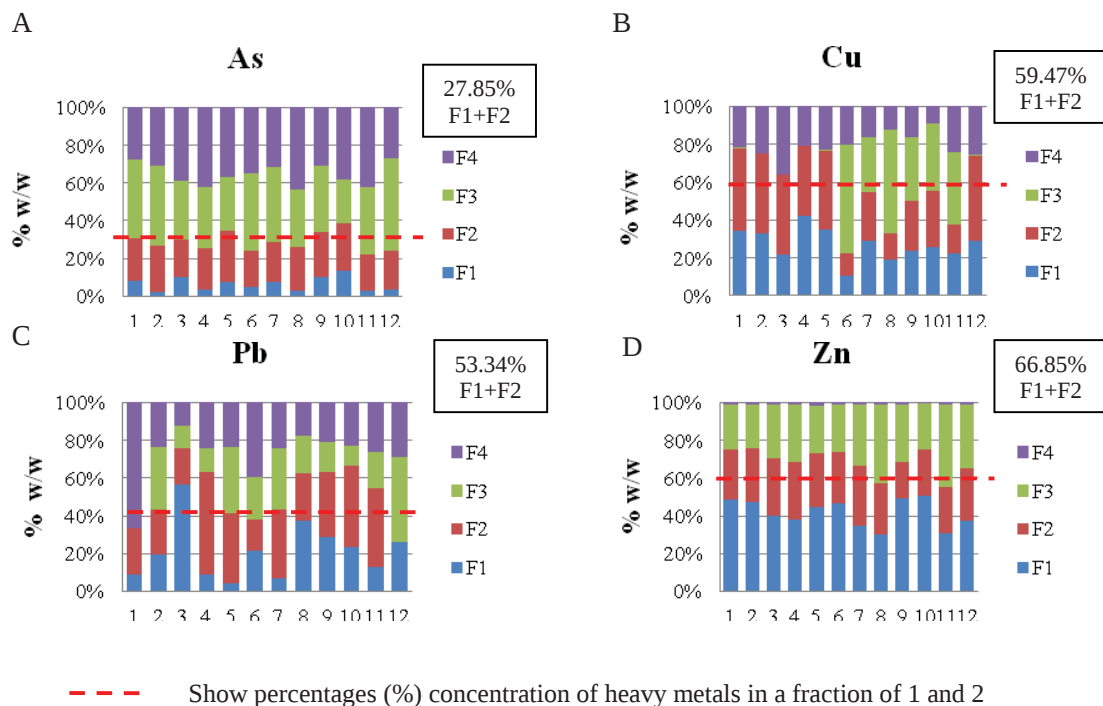
Site 1-12	Exchangeable, F1	Reducible, F2	Oxidizable, F3	Residual,F4
As	5.84± (2.74)	22.01± (7.70)	37.28± (20.13)	34.88± (13.62)
Cu	27.41± (16.90)	32.06± (24.79)	21.43± (26.86)	19.10± (9.19)
Pb	22.50± (21.26)	30.84± (24.63)	23.52± (17.17)	23.14± (11.89)
Zn	40.23± (12.64)	26.62± (11.93)	32.06± (20.88)	1.09± (0.45)



รูปที่ 6.42 สัดส่วนของทองแดง ตะกั่ว สารหนูและสังกะสีในดิน 12 ตำแหน่ง



รูปที่ 6.42 (ต่อ) สัดส่วนของทองแดง ตะกั่ว สารหนูและสังกะสีในดิน 12 ตำแหน่ง



รูปที่ 6.43 สัดส่วนของ F1 และ F2 ของทองแดง ตะกั่ว สังกะสีและสังกะสีในดิน 12 ตำแหน่ง

จากการศึกษาของ Filgueiras et al. (2002) พบว่าโลหะที่อยู่ใน fraction 1 ค่อนข้างมากจะมีโอกาสในการชะละลายหลุดออกมาได้ง่ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange mechanism) ปริมาณทองแดงและสังกะสี โดยผลรวมที่ตรวจพบมากกว่า 50 % โดยพบอยู่บริเวณพื้นที่ตอนกลาง นอกจากนี้ ปริมาณทองแดงที่ตรวจพบใน exchangeable fraction มากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 4 มีค่าประมาณ 42.39% และสังกะสีพบใน exchangeable fraction มากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 10 มีค่าประมาณ 53.56% (รูปที่ 6.43)

6.7 ศักยภาพในการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Mobility potential of heavy metals)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าศักยภาพในการเคลื่อนตัวของโลหะหนักหรือในทางตรงข้ามคือโลหะที่ถูกหน่วงไว้ในดินขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือชนิดของพันธะ (binding forms) ของโลหะหนักชนิดนั้นๆ กับดิน ผลการเปรียบเทียบรูปแบบสัดส่วนของโลหะหนักแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 6.4 พบว่าสังกะสี (Zn) จะถูกชะละลายออกมาได้ง่ายใน fraction 1 (exchangeable form) และทองแดง (Cu) จะถูกสกัดหลุดออกมาใน fraction 2 (reducible form) มากที่สุด ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าสังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) จะมีโอกาสถูกชะออกมาในสิ่งแวดล้อมมากที่สุด นอกจากนี้โลหะหนักที่อยู่ใน oxidisable form และ residual form ในสัดส่วนที่สูงจะมีโอกาสหลุดออกมาในสิ่งแวดล้อมน้อยลง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงเช่นกัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้แก่สารหนู (As) โดยทั่วไปในส่วนของ residual form จะถูกพิจารณาว่าไม่มีการหลุดออกมาในสิ่งแวดล้อม (non-mobile fraction)

ตารางที่ 6.4 ศักยภาพการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในพื้นที่ศึกษา

Step	Condition	Mobility
1	Exchangeable fraction	Zn > Cu > Pb > As
2	Reducible fraction	Cu > Pb > Zn > As
3	Oxidizable fraction	As > Zn > Pb > Cu
4	Residual fraction	As > Pb > Cu > Zn

บทที่ 7

ผลการจำลองการไหลและเคลื่อนตัวของโลหะหนัก

7.1 การสร้างแบบจำลองเชิงแนวความคิด (conceptual model)

การสร้างแบบจำลองแนวความคิดเป็นการรวบรวมข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยาร่วมกับข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน ลักษณะของชั้นน้ำ ลักษณะภูมิประเทศ การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปริมาณน้ำฝน ค่าการระเหย และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในดินที่ถูกตรวจพบโดยใช้ข้อมูลเหล่านี้สร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

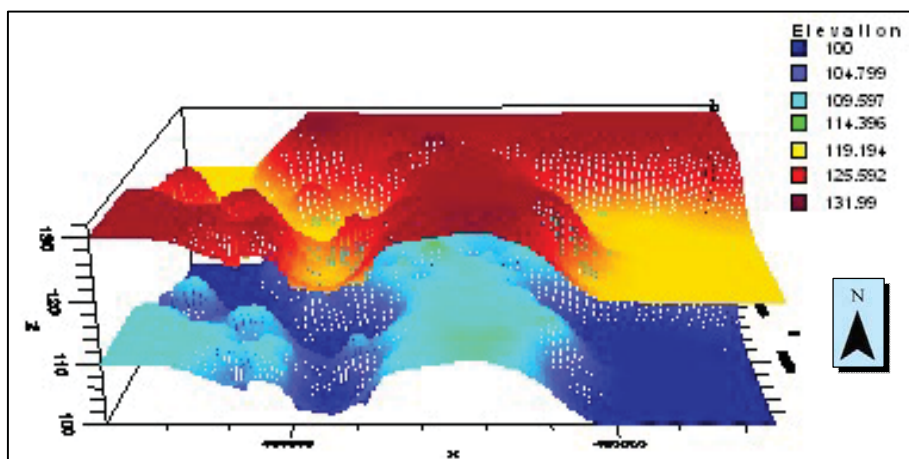
7.1.1 ใช้โปรแกรม HYDRUS 1D เพื่อจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) เพื่อหาความเข้มข้น ณ ตำแหน่งด้านล่างสุดของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยข้อมูลนำเข้าในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำดังแสดง **ตารางที่ 7.1** กำหนดให้เวลาที่โลหะหนักเคลื่อนตัวผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็น 25 ปี โดยสร้างแบบจำลองทุกความหนาของชั้นน้ำในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 7.1 ค่านำเข้าในการจำลองการไหลของน้ำและการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในโปรแกรม HYDRUS 1D

Input parameter	Value	Reference
ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	Pb =1.73 Cu =1.85	วงศ์สกุลักษณ์ (2552)
Adsorption isotherm coefficient, k_d [L/g]	Pb =0.226 Cu =0.069	ปัทมา (2553)
Bulk density [g/cm ³]	1.64	ปัทมา (2553)
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [cm/day]	7.625	ปัทมา (2553)
Residual soil water content, Q_r [-]	0.16	ปัทมา (2553)
Saturated soil water content, Q_s [-]	0.36	ธนัท (2554)
Parameter α in the soil water retention function [m ⁻¹]	0.007	ธนัท (2554)
Parameter n in the soil water retention function	2.19	ธนัท (2554)
Tortuosity parameter in the conductivity function [-]	0.5	ปัทมา (2553)
Freundlich exponent	1	ปัทมา (2553)

7.1.2 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Visual MODFLOW 4.2 ซึ่งในชุดของโปรแกรมจะประกอบด้วย โมดูล MODFLOW 2000 และ MT3DMS ซึ่งเป็นการพัฒนาของ Waterloo Hydrologic Inc. สร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก ด้วยโปรแกรม Visual MODFLOW ตามค่าความเข้มข้นที่เปอร์เซ็นต์ไทด์ที่ 25, 50, 75 และ 99 (P_{25} , P_{50} , P_{75} และ P_{99}) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม HYDRUS-1D และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ค่าดังกล่าว สำหรับรายละเอียดของแบบจำลองได้ดังนี้

- 1.ขอบเขตที่มีระดับน้ำคงที่ (constant-head boundary) กำหนดให้แถวล่างสุดของพื้นที่ โดยกำหนดที่ค่าระดับน้ำคงที่ 120 เมตร
- 2.ขอบเขตที่มีระดับน้ำไม่คงที่ (general-head) กำหนดให้แถวบนสุดของพื้นที่ให้มีระดับน้ำประมาณ 130 เมตร
- 3.ขนาดของกริดในแบบจำลองในชั้นอิมัลชันด้วยน้ำนี้กำหนดตามแนวแกน X แบ่งเป็น 168 แถว มีระยะทาง 23.1 กิโลเมตร แกน Y มีระยะทาง 15.4 กิโลเมตร แบ่งเป็น 136 คอลัมน์ แต่ละกริดมีพื้นที่ 160 ตารางเมตร คิดเป็นพื้นที่ทั้งหมด 356 ตารางกิโลเมตร ส่วนในแนวแกน Z แบ่งเป็น 1 ชั้น เนื่องจากศึกษาเฉพาะชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นและคุณสมบัติของชั้นดินไม่มีความแตกต่างกัน
- 4.นำเข้าค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโลหะหนักตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ในแต่ละกริดที่อยู่ในพื้นที่ไร่พริก



รูปที่ 7.1 พื้นผิวด้านบนแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 120-130 เมตร ส่วนพื้นผิวด้านล่างจำลองระดับน้ำบาดาลในพื้นที่

ตารางที่ 7.2 ค่าเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในแบบจำลอง visual Modflow

Input parameter	Value	Reference
Bulk density [mg/m^3]	1.64×10^9	ปัทมา (2553)
Hydraulic conductivity in X-direction, K_x [m/day]	0.6	
Hydraulic conductivity in Y-direction, K_y [m/day]	0.06	ธนัท (2554)
Hydraulic conductivity in Z-direction, K_z [m/day]	0.06	ธนัท (2554)
Specific Storage, S_s [m^{-1}]	0.00001	ธนัท (2554)
Specific Yield, S_y	0.25	ธนัท (2554)
Total Porosity	0.35	ธนัท (2554)
Recharge [mm/year]	214	ธนัท (2554)

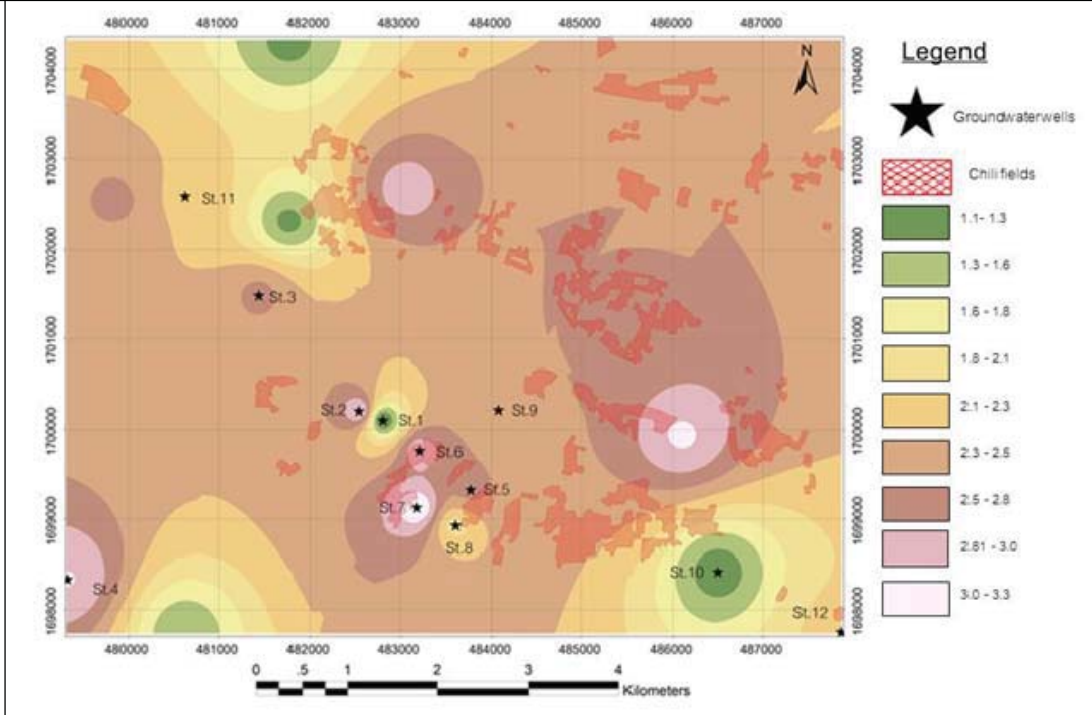
7.2 ผลจากการประเมินค่าความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากการใช้เครื่องมือ IDW ใน โปรแกรม ArcGIS 9.3 สร้างแผนที่แสดงความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) จากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามระหว่างระดับพื้นดินและระดับน้ำบาดาลจากการสำรวจภาคสนามของน้ำบาดาลทั้งหมด 12 บ่อ และทำการซ้อนทับกับพื้นที่เกษตรกรรมไร้พริกในบริเวณพื้นที่ศึกษา จากการวิเคราะห์พบว่าความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่ศึกษา มีค่าความหนาเฉลี่ยตั้งแต่ 1.4 – 3.3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.2

7.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากการใช้โปรแกรม HYDRUS-1D ศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) โดยความเข้มข้นของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) เท่ากับ 1.73 และ 1.85 mg/L ตามลำดับ ซึ่งได้จากการวัดความเข้มข้นของโลหะหนักรอบบ่อน้ำบาดาลและได้นำค่าปริมาณน้ำฝนและค่าการระเหยรายวันมาใช้ในแบบจำลอง สร้างแบบจำลองทุกค่าความหนาของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในพื้นที่ศึกษาเมื่อเวลาผ่านไป 25 ปี ค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ณ ตำแหน่งด้านล่างสุดของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีหลายค่า ดังนั้นจึงเลือกหาค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50, 75 และ 99 เพื่อจะได้ครอบคลุมทุกช่วงค่าความเข้มข้น จะได้ดังตารางที่ 7.3 และ 7.4

Thickness of Unsaturated zone of Tambon Hua Rua, Amphoe Muang, Changwat Ubonratchathani



รูปที่ 7.2 แผนที่ความหนาของระดับชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในบริเวณพื้นที่ศึกษา ต.หัวเรือ อ.เมือง จ.อุบลราชธานี
มาตราส่วน 1:10,000

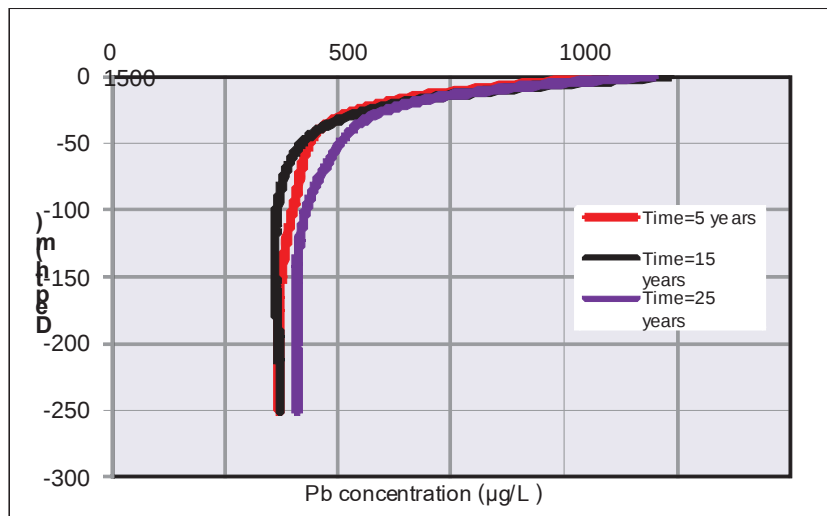
สังเกตจากข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ที่เคลื่อนตัวผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีความหนาน้อยจะมีค่าความเข้มข้น ณ ตำแหน่งด้านล่างสุดของชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่าชั้นที่มีความหนามาก เนื่องจากโลหะดังกล่าวใช้เวลาในการเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างน้อยกว่า ดังแสดงใน ตารางที่ 7.3 และ 7.4

ตารางที่ 7.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) ที่ความลึกต่างๆ (หน่วย: มก.ต่อลิตร)

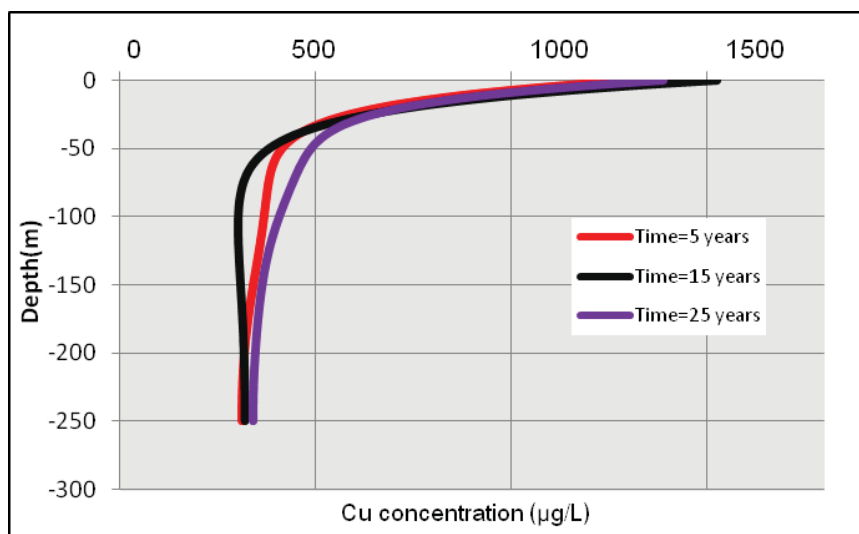
Thickness of unsaturated zone (m)	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₉
1.4	3.35	3.75	5.86	13.70
1.5	3.26	3.58	5.35	11.10
1.6	3.21	3.49	4.93	9.35
1.7	3.13	3.40	4.61	8.12
1.8	3.11	3.34	4.44	7.20
1.9	3.10	3.31	4.31	6.51
2.0	3.09	3.30	4.20	5.99
2.1	3.09	3.31	4.16	8.96
2.2	3.08	3.31	3.97	5.25
2.3	3.06	3.32	3.92	5.88
2.4	3.06	3.33	3.88	5.62
2.5	3.06	3.32	3.82	4.73
2.6	3.07	3.32	3.81	4.64
2.7	3.11	3.33	3.77	5.43
2.8	3.09	3.35	3.85	7.09
2.9	3.13	3.42	3.86	5.39
3.0	3.07	3.33	3.63	4.83
3.1	3.10	3.35	3.76	5.07
3.2	3.09	3.31	3.63	4.30
3.3	3.22	3.49	3.88	4.58

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ที่คงามลึกต่างๆ (หน่วย: มก.ต่อลิตร)

Thickness of unsaturated zone (m)	P ₂₅	P ₅₀ (mg/L)	P ₇₅ (mg/L)	P ₉₉ (mg/L)
1.4	3.40	4.34	5.80	16.60
1.5	3.28	4.09	5.31	13.10
1.6	3.23	3.88	4.99	10.90
1.7	3.20	3.73	4.72	9.31
1.8	3.19	3.61	4.57	8.39
1.9	3.18	3.52	4.44	7.70
2.0	3.16	3.47	4.30	7.20
2.1	3.14	3.44	4.34	22.40
2.2	3.12	3.43	4.18	6.44
2.3	3.10	3.39	4.14	7.09
2.4	3.11	3.43	4.14	6.43
2.5	3.11	3.35	4.09	5.71
2.6	3.11	3.43	4.08	5.54
2.7	3.13	3.34	4.07	7.19
2.8	3.17	3.43	4.11	12.30
2.9	3.18	3.53	4.19	6.65
3.0	3.18	3.37	3.96	6.34
3.1	3.19	3.40	4.07	6.93
3.2	3.20	3.35	3.92	4.94
3.3	3.33	3.76	4.23	5.41



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักตะกั่ว (Pb) ณ เวลา 5 ,10 และ 15 ปี ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีการลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7.4 กราฟแสดงความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ณ เวลา 5 , 10 และ 15 ปี ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีการลดลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น