



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลกระทบของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อสภาวะของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของ
อาร์เซนิก

The Effect of Leachate Contamination on Groundwater Condition and
Arsenic Movement

نامผู้วิจัย นายเมธี โอภาสเสถียร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อสถานะของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก

The Effect of Leachate Contamination on Groundwater Condition and
Arsenic Movement

โดย

นายเมธี โอภาสเสถียร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

เมธี โอภาสเสถียร 2555: ผลกระทบของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อสถานะของ
น้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D. 129 หน้า

การย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดินอาจมีผลต่อการเคลื่อนที่และสปีชีส์
ของอาร์เซนิกที่พบในชั้นน้ำใต้ดิน โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง
คณิตศาสตร์น้ำใต้ดินในการคาดการณ์หาขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำชะขยะ และ
การประเมินความเป็นไปได้ที่จะพบอาร์เซนิกในสปีชีส์ต่างๆ ในชั้นน้ำใต้ดิน โดยใช้แบบจำลอง
Visual MODFLOW ทำการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน และจำลองการเคลื่อนที่ของ
สารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากค่าความเข้มข้นของ BOD ใน 2 กรณี คือ เทอมของ Advection-
Dispersion และ Advection-Dispersion-Reaction เพื่อคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไป
(Oxygen deficit) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในชั้นน้ำใต้ดิน แล้วนำมาใช้ในการทำนายขอบเขต
ชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก และประเมินผลกระทบของสถานะที่มีการปนเปื้อนน้ำชะขยะต่อ
การเคลื่อนที่และสปีชีส์ของอาร์เซนิกที่ปรากฏ

ผลของแบบจำลองน้ำใต้ดินที่สถานะคงที่ในเวลา 10 ปีข้างหน้า พบว่า น้ำใต้ดินเคลื่อนที่
ผ่านพื้นที่หลุมฝังกลบได้ระยะทางไกลสุดประมาณ 300 เมตร ตามทิศทางการไหลหลัก ส่วนพลูม
ความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดมีระยะทางไม่เกิน 100 เมตร
(เส้นชั้นความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) การปนเปื้อนน้ำชะขยะมีผลทำให้เกิดขอบเขตของชั้นน้ำ
แอน็อกซิกได้ระยะทางไกลสุดประมาณ 200 เมตร (เมื่อกำหนดความเข้มข้นของ DO เริ่มต้นเท่ากับ
2 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งจากสถานะของชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าวสามารถจำแนกพื้นที่ได้รับอิทธิพลจากการ
ปนเปื้อนน้ำชะขยะต่อขอบเขตการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกเป็น 3 พื้นที่ คือ (1) พื้นที่ได้รับ
ผลกระทบ หมายถึง ขอบเขตชั้นน้ำแบบแอน็อกซิกที่มีแนวโน้มปรากฏอาร์เซนิกในสปีชีส์ As(III) (2)
พื้นที่บัพเพอร์ หมายถึง พื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดินเนื่องจากการ
ปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีแนวโน้มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก และ (3) พื้นที่ที่ไม่ได้รับ
ผลกระทบ หมายถึง พื้นที่ที่จะไม่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการ
เปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน

Metee Opasatian 2012: The Effect of Leachate Contamination on Groundwater Condition and Arsenic Movement. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Mr. Suchat Leungprasert, Ph.D. 129 pages.

The biodegradation of organic substances may affect the movement and variation of arsenic species in groundwater. This research aimed to apply the mathematical groundwater modeling for estimation of effected area of leachate contamination and prediction of the arsenic species occurrence in groundwater. The groundwater flow and solute transport model were simulated by Visual MODFLOW. The contaminant was BOD concentration that was run in 2 scenarios: Advection-Dispersion and Advection-Dispersion-Reaction terms for compute the Oxygen Deficit. Then, applied to estimate the Oxidic-Anoxic groundwater area and predict the arsenic species occurrence in groundwater due to the leachate contamination.

The results of steady-state simulation in 10 years found that the groundwater flow through the landfill was distance maximum in 300 meters in main flow direction. The leachate plume was distributed approximately 100 meters from the point source (BOD 0.5 mg/l contour). The effect of leachate caused the Anoxic groundwater area, maximum distance in 200 meters in main flow direction (Initial DO 2 mg/l). In this groundwater condition, the effect of leachate contamination on the arsenic species was classify in 3 zones; (1) Impact zone that was As(III)-speciation in anoxic groundwater zone, (2) Buffer zone that was As(III) or As(V) – speciation in DO variation area due to the leachate biodegradation and (3) Non-impact zone that was not affect the DO changing due to the leachate organic concentration plume.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานกรรมการสอบ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไข จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ อุดมโชค อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ และหัวหน้าหน่วยวิจัยเทคโนโลยีธรณีสัณฐานสิ่งแวดล้อมและพิบัติภัยธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้คำปรึกษา เป็นแรงบันดาลใจ ให้ความไว้วางใจ และให้การสนับสนุนให้ข้าพเจ้ามีประสบการณ์การทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิตยา เลหาะจินดา ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรณพ หอมจันทร์ และคณาจารย์ทุกท่าน ทั้งจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป (ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ ในปัจจุบัน) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอน และถ่ายทอดวิชาความรู้ทางด้านวิชาการ จนสามารถนำความรู้และประสบการณ์มาประยุกต์ใช้ในการวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และญาติที่เคารพรักทุกท่าน ที่สนับสนุนและอุปถัมภ์ให้ข้าพเจ้ามีโอกาสทางการศึกษานับตั้งแต่วัยเยาว์ จนมีความสำเร็จในชีวิต ณ วันนี้ ขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนสนิทมิตรสหายทุกท่าน ซึ่งเป็นทั้งกำลังใจและแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วง

เมธี โอภาสเสถียร

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	65
อุปกรณ์	65
วิธีการ	65
ผลและวิจารณ์	83
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก ผลเจาะสำรวจชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษา	101
ภาคผนวก ข ค่าระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำบริเวณพื้นที่ศึกษา	125
ภาคผนวก ค ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน	127
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	129

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลของวัสดุตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำต่อการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนรูปของอาร์เซนิกจากกระบวนการดูดซับและคาย	10
2	กรณีศึกษาของการปนเปื้อนอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินตามธรรมชาติบริเวณภูมิภาคเอเชียใต้	17
3	ลักษณะทางเคมีทั่วไปของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบใหม่และหลุมฝังกลบเก่า	21
4	ลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบในประเทศไทย	22
5	ค่าคงที่ปฏิกิริยา k_1 และ k_N และความเข้มข้นเริ่มต้นของค่า BOD (L_0) และ Nitrification (NC_0) ที่เป็นดัชนีที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงในแหล่งน้ำ	25
6	ค่ากำหนดของ k_2 ตามประเภทของแหล่งน้ำ	26
7	ข้อมูลสภาพอากาศเฉลี่ยในคาบ 30 ปี	45
8	อัตราการระเหยออกจากแหล่งน้ำผิวดินในคาบ 30 ปี	46
9	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำย่อย	49
10	ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา	64
11	ผลการตรวจวัดทางเคมีของน้ำชะขยะบริเวณพื้นที่ศึกษา	78
ตารางผนวกที่		
ก1	ลักษณะชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษาจากฐานข้อมูลพสุธา กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	102
ก2	ผลการสำรวจลักษณะชั้นดินชั้นหินจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2551	116
ก3	ผลการสำรวจลักษณะชั้นดินชั้นหินจากกรมควบคุมมลพิษกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2552	123
ค1	ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจากกรมควบคุมมลพิษ ปี พ.ศ. 2552	128

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	As(V) ในสารละลายเกลือ 0.01 M NaCl ตามค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C	6
2	As(III) ในสารละลายเกลือ 0.01 M NaCl ตามค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C	6
3	ไดอะแกรม Eh-pH stability ของอาร์เซนิก As-O-S system ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 bar ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิก 10^{-6} mol/L เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ S และ Fe	7
4	ไดอะแกรม Eh-pH stability ของอาร์เซนิก As-Fe-S-O-H ₂ O system ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 bar ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิก 10^{-6} mol/L เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ S และ Fe	8
5	กระบวนการเปลี่ยนรูปทางจุลชีววิทยาของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม	14
6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Eh และ DO ในน้ำใต้ดิน Choshui fan delta (R1 จาก Rose and Long (1998), R2 จาก Smedley and Edmunds (2002), R3 จาก Wen-Fu Chen and Tsung-Kwei Liu (2003))	24
7	การจำลองสภาพ Oxygen sag curve จากแบบจำลองของ Streeter-Phelps	26
8	วัฏจักรทางอุทกวิทยา	27
9	การทดลองตามกฎของดาร์ซี	32
10	ทิศทางการไหลและรูปแบบการไหลของน้ำใต้ดิน	33
11	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน	40
12	ที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศบริเวณพื้นที่ศึกษา	42
13	อิทธิพลของสภาวะอากาศระดับภูมิภาคตามฤดูกาลของประเทศไทย	44
14	การกระจายปริมาณฝนเชิงพื้นที่บริเวณพื้นที่ศึกษา	47
15	ขอบเขตลุ่มน้ำบางปะกงและปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย	50
16	ขอบเขตลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออกและปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย	51
17	ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา	54
18	ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา	58
19	ลักษณะทางปฐพีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา	61
20	ลักษณะการใช้ที่ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา	62
21	ตำแหน่งของหลุมเจาะชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษา	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ขอบเขตของแบบจำลอง	69
23	การออกแบบกริดในแบบจำลอง	70
24	ขอบเขตเงื่อนไขในแบบจำลอง	71
25	พื้นที่การเติมน้ำใต้ดินในแบบจำลอง	75
26	พารามิเตอร์ที่กำหนดให้กับโปรแกรมย่อย RIV ในแบบจำลอง Visual MODFLOW	76
27	การกำหนดขอบเขตค่าความเข้มข้นเริ่มต้น	79
28	ปริมาณสารอินทรีย์ที่สมมูลกับปริมาณความต้องการของออกซิเจนในปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่แปรผันตามระยะทาง	82
29	ผลการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่สภาวะคงที่ (Steady-State)	84
30	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady-State)	85
31	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (K_x)	85
32	ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง	86
33	พหุคูณความเข้มข้น BOD ในน้ำชะขยะที่สภาวะคงที่ในคาบเวลา 10 ปีข้างหน้า (ก) เทอมของ Advection-Dispersion (ข) เทอมของ Advection-Dispersion-Reaction	88
34	ขอบเขตชั้นน้ำแอน็อกซิก (เมื่อกำหนดปริมาณ DO เริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/l)	89
35	ขอบเขตพื้นที่ที่มีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก จากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ลงสู่ดิน	90
ภาพผนวกที่		
ข1	ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำในขอบเขตพื้นที่แบบจำลอง	126

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

เมตร รทก.	=	เมตร ระดับน้ำทะเลปานกลาง
As(III)	=	Trivalent Arsenic/ Arsenite
As(V)	=	Pentavalent Arsenic/ Arsenate
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
D	=	Oxygen Deficit
DO	=	Dissolved Oxygen
Eh	=	Redox Potential
Km	=	Kilometer
K_1	=	Decay Reaction Constant
K_x, K_y, K_z	=	สัมประสิทธิ์การซึมได้ หรือสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้ในแนวแกน x, y, z
mg/l	=	Milligram per liter
m UTME	=	Meter Universal Transverse Mercator (Coordinate System) East
m UTMN	=	Meter Universal Transverse Mercator (Coordinate System) North
$\mu\text{g/l}$	=	Microgram per liter
$T_{1/2}$	=	Half-life Time
α_L	=	Longitudinal dispersivity

ผลกระทบของการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อสภาวะของน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก

The Effect of Leachate Contamination on Groundwater Condition and Arsenic Movement

คำนำ

การปนเปื้อนอาร์เซนิกในน้ำใต้ดินนั้นได้เกิดขึ้นในหลายภูมิภาคของโลก ทั้งในอเมริกาเหนือ ได้แก่ สหรัฐอเมริกาและเม็กซิโก อเมริกาใต้ ได้แก่ อาร์เจนตินาและชิลี เอเชียใต้ ได้แก่ บังกลาเทศ อินเดีย และปากีสถาน เอเชียตะวันออก ได้แก่ จีน ไต้หวัน มองโกเลีย และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ เวียดนาม ไทย อินโดนีเซีย และกัมพูชา เป็นต้น ทั้งนี้ความรุนแรงและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้แหล่งน้ำที่ปนเปื้อนอาร์เซนิกต่อสุขภาพของประชากรในแต่ละภูมิภาคนั้น แตกต่างกันไป ตามความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ปรากฏ ซึ่งพบว่ามีค่าความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.01-5.00 mg/l (Wang. and Deng, 2009) โดยแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของสารอาร์เซนิกซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งจากการปลดปล่อยอาร์เซนิกที่เป็นองค์ประกอบทางธรณีเคมีตามธรรมชาติ และการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้กำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นของอาร์เซนิกในคุณภาพน้ำดื่มมีค่าไม่เกิน 0.01 mg/l และสำหรับประเทศไทย ก็ได้มีการกำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำผิวดิน (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) และแหล่งน้ำใต้ดิน (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543) ให้มีค่าไม่เกิน 0.01 mg/l ส่วนมาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่ออุตสาหกรรมน้ำบริโภค (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521) และคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคนั้น (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551) กำหนดให้เกณฑ์สูงสุดมีค่าไม่เกิน 0.05 mg/l

สปีชีส์ของอาร์เซนิกที่ปรากฏในแหล่งน้ำทั้งผิวดินและใต้ดินมี 2 รูป คือ อาร์เซไนต์ (Arsenite) หรือ As(III) และอาร์เซเนต (Arsenate) หรือ As(V) ซึ่งกลไกที่สำคัญที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ หรือ รูปแบบเคมีของอาร์เซนิก คือสภาพปฏิกิริยารีดอกซ์และค่าพีเอช (pH) ของแหล่งน้ำ (Smedley and Kinniburgh, 2002) โดยพบว่าแหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน หรือ สภาพออกซิเดชัน อาร์เซนิกในแหล่งน้ำจะปรากฏเป็นสปีชีส์ As(V) แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่มี

ออกซิเจน หรือ สภาพรีดักชัน จะปรากฏเป็นสปีชีส์ As(III) ซึ่งพบว่า As(III) มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตมากกว่าและมีความสามารถในการเคลื่อนที่แพร่กระจายในชั้นน้ำใต้ดินสูงกว่า As(V) ดังนั้นผลกระทบจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน จะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดินลดต่ำลงหรือถูกใช้จนหมดไป ซึ่งจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกที่มีอยู่เดิม และอาจจะถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ตรวจพบที่มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกสูงขึ้นในน้ำใต้ดิน และมีแนวโน้มที่พหุคูณความเข้มข้นจะเคลื่อนตัวไปได้ไกลขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรจากการใช้แหล่งน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนอาร์เซนิกอย่างรุนแรงและครอบคลุมเป็นอาณาบริเวณกว้างมากขึ้น

การศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการวิเคราะห์เพื่อแสดงถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ต่อสถานะของน้ำใต้ดินที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน MODFLOW ในการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากแหล่งกำเนิด และจำลองขอบเขตพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน คือ ขอบเขตของชั้นน้ำใต้ดินแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก เพื่อใช้ในการประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในน้ำใต้ดิน รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในสถานการณ์สมมติ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์สภาพการไหลของน้ำใต้ดิน และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากแหล่งกำเนิดประเภทหลุมฝังกลบ
2. เพื่อจำลองขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก สำหรับการประเมินแนวโน้มความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน

ขอบเขตการวิจัย

1. กำหนดให้แหล่งกำเนิด คือ พื้นที่หลุมฝังกลบขยะมูลฝอย และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดินจากข้อมูลทุติยภูมิบริเวณพื้นที่ศึกษาและคำกำหนดจากงานวิจัยต่างๆ
2. กำหนดแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานศึกษา คือ แบบจำลอง Visual MODFLOW ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อศึกษาระบบการไหลในกรณีสมมติในทางทฤษฎี (Hypothetical approach)

การตรวจเอกสาร

1. อาร์เซนิกในน้ำใต้ดิน

1.1 สปีชีส์ของอาร์เซนิกที่พบในน้ำใต้ดิน

อาร์เซนิก (Arsenic) หรือ สารหนู เป็นธาตุกึ่งโลหะในหมู่ VA สูตรโมเลกุล คือ As สมบัติทางกายภาพและเคมีทั่วไปของอาร์เซนิก คือ มีสถานะเป็นของแข็งหรือผลึก มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 74.9216 มีสีเงินหรือเทา ไม่มีกลิ่น มีจุดเดือดที่ 613 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็งที่ 814 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5.727 (น้ำ=1) ความดันไอ ~0 มม.ปรอท ที่ 372 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในกรดไนตริก กรดอะซิติก และเอทานอล (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

อาร์เซนิกพบได้ในธรรมชาติและเป็นองค์ประกอบของแร่และสารประกอบมากกว่า 200 ชนิด อาร์เซนิกที่พบส่วนใหญ่ปรากฏในรูป อาร์เซเนต (Arsenate) อาร์เซนิกซัลไฟด์ (As-sulfide) และ อาร์เซนิกซัลโฟซอลต์ (As-sulfosalt) รองลงมาปรากฏในรูป อาร์เซไนด์ (Arsenide) อาร์เซไนต์ (Arsenite) อาร์เซนิกออกไซด์ (As-Oxide) อาร์เซนิกซิลิเกต (As-Silicate) และธาตุอาร์เซนิก (As as Element) เหตุที่พบได้มากในธรรมชาติเนื่องจากอาร์เซนิกมีสมบัติเป็น แร่ประกอบหินที่สามารถแทนที่ไอออนต่างๆ เช่น Si^{4+} Al^{3+} Fe^{3+} และ Ti^{4+} ในโครงสร้างของหินได้ แร่ที่มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบที่พบมาก ได้แก่ อาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite, $FeAsS$) รีอัลการ์ (Realgar, As_4S_4) และ ออร์พิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) นอกจากนี้ยังปรากฏอาร์เซนิกในรูปแร่อื่นๆ ได้แก่ เลลลิงไกต์ (Loellingite, $FeAs_4$) ซาฟฟอไลต์ (Saffrolite, $CoAs$) นิกกอลไลต์ (Nicolite, $NiAs$) แรมเมลส์เบิร์กไกต์ (Rammelsbergite, $NiAs_2$) โคบาลไลต์ (Cobalite, $CoAsS$) อีนาไกต์ (Enargite, Cu_3AsS_4) เกอร์สดอร์ฟไฟต์ (Gersdorffite, $NiAsS$) กลอโคดอต (Glaucodot, $(Co,Fe)AsS$) และ เอลิเมนต์อาร์ซีนิก (Element As) (Wang. and Deng, 2009)

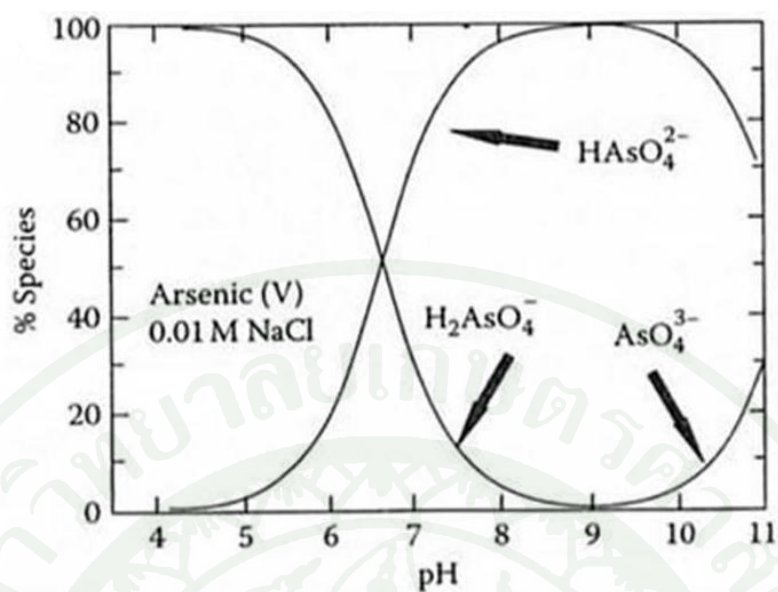
อาร์เซนิกที่ปรากฏทั้งหมดมี 4 วาเลนซ์ โดยจำแนกเป็นอาร์เซนิกที่มีเลขออกซิเดชัน -3, 0, +3 และ +5 ซึ่งปรากฏอยู่ได้สถานะทั้งของแข็ง สารละลาย และก๊าซ และพบได้ในรูป สารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ โดยโลหะอาร์เซนิก (Metallic Arsenic, $As(0)$) พบได้ยากตามธรรมชาติและจะเสถียรในสภาพที่มีค่ารีดออกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential, Eh) ต่ำ และอาร์เซนิกวาเลนซ์ -3 พบได้ในสภาพรีดิวซ์รุนแรง (Very strong reducing condition) ซึ่งเป็น

อาร์เซนิกที่พบในสถานะก๊าซ คือ Arsine (AsH_3) (Fetter, 1991; Richard, 1998; Wang and Deng, 2009)

สำหรับอาร์เซนิกที่พบในแหล่งน้ำ ทั้งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินพบในอีก 2 วาเลนซ์ที่เหลือ คือ อาร์เซไนต์ (Arsenite, As(III)) และอาร์เซเนต (Arsenate, As(V)) มีเลขออกซิเดชัน +3 และ +5 ตามลำดับ โดยสารประกอบอนินทรีย์อาร์เซนิกทั้งในรูปอาร์เซไนต์ หรือ อาร์เซเนต ในน้ำตามธรรมชาตินั้น จะอยู่ในรูปของออกซิแอนไอออนิก (Oxyanionic) ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้หลายขั้นขึ้นกับค่าพีเอช (pH) โดยปกติแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะมีค่า pH ระหว่าง 6-9 ซึ่งจะพบว่า สปีชีส์ของอาร์เซเนต หรือ As(V) จะพบอยู่ในรูปไอออนของ H_2AsO_4^- หรือ HAsO_4^{2-} ดังภาพที่ 1 ส่วนสปีชีส์ของอาร์เซไนต์ หรือ As(III) จะพบอยู่ในรูปไอออนของ H_3AsO_3 หรือ H_2AsO_3 ดังภาพที่ 2

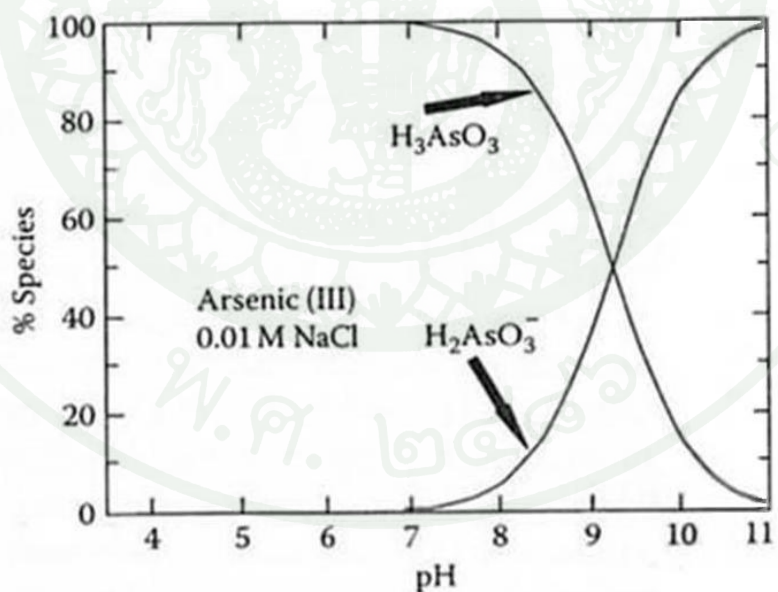
การเคลื่อนตัวของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินนั้นถูกควบคุมด้วยหลายปัจจัย ได้แก่ 1) สภาพรีดอกซ์ (Redox condition) 2) pH 3) กิจกรรมของจุลินทรีย์ (Biological activity) และ 4) ปฏิกิริยาการดูดซับและการคาย (Adsorption-Desorption reaction) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวในน้ำใต้ดินมากกว่าค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ทั้งนี้ก็ขึ้นกับสปีชีส์และความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่พบ อย่างไรก็ตามปัจจัยควบคุม 2 ชนิดที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกคือ ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential, Eh) และค่า pH โดยค่า Eh นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO) กล่าวคือ แหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะมีออกซิเจน (Aerobic condition) หรือ สภาพออกซิไดส์ (Oxidizing condition) จะมีค่า Eh สูง และมักพบสปีชีส์ของอาร์เซนิกปรากฏอยู่ในรูป As(V) ในทางตรงข้ามถ้าแหล่งน้ำอยู่ในสภาวะไม่มีออกซิเจน (Anaerobic condition) หรือ สภาพรีดิวซ์ (Reducing condition) จะมีค่า Eh ต่ำ และพบว่าสปีชีส์ของอาร์เซนิกปรากฏอยู่ในรูป As(III) แสดงความสัมพันธ์ตามไดอะแกรมดังภาพที่ 3

นอกจากนี้ สปีชีส์และการเคลื่อนตัวของอาร์เซนิกยังถูกควบคุมด้วยไอออนในน้ำ 2 ชนิด คือ ซัลเฟต และเหล็ก กล่าวคือ อาร์เซนิกจะถูกดูดซับได้ดีเมื่อมีออกไซด์ของเหล็ก ขณะที่ซัลไฟด์สามารถทำให้อาร์เซนิกปลดปล่อยหรือเคลื่อนตัวได้ดีสู่สิ่งแวดล้อม (เป็น Source/Sink ให้กับอาร์เซนิก) ในสภาวะต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมดังภาพที่ 4



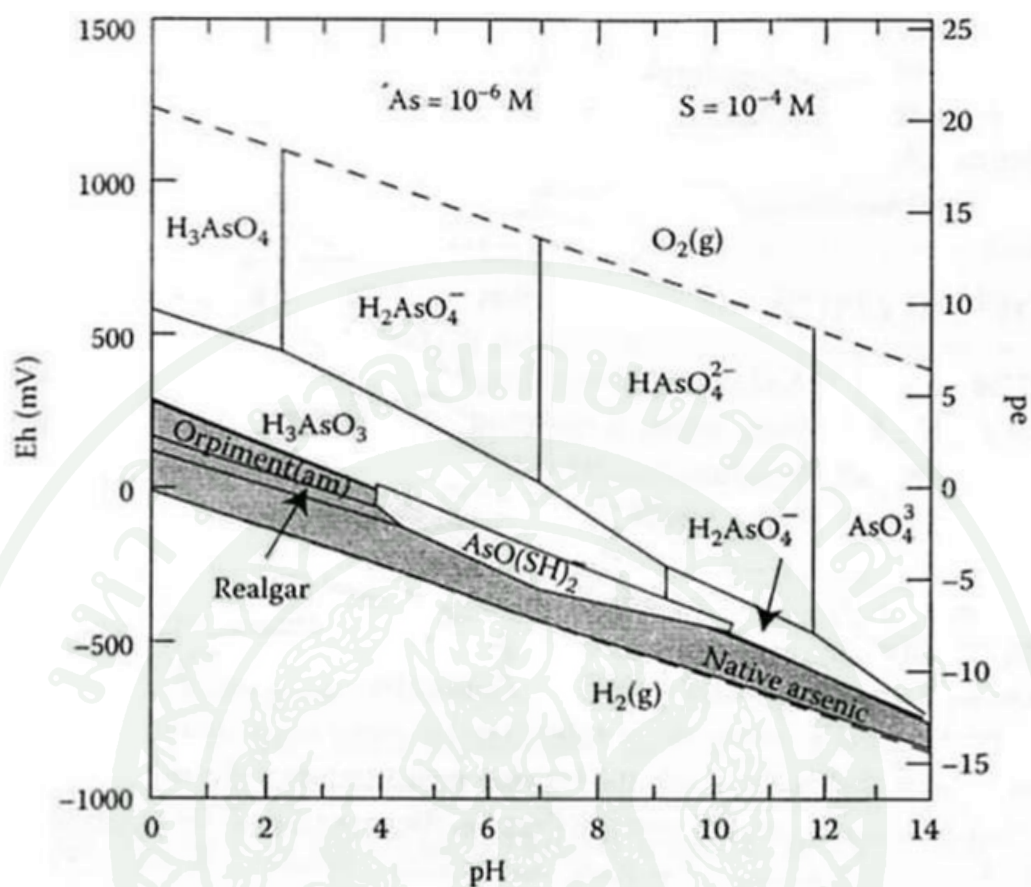
ภาพที่ 1 As(V) ในสารละลายเกลือ 0.01 M NaCl ตามค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา: Wang and Deng (2009)



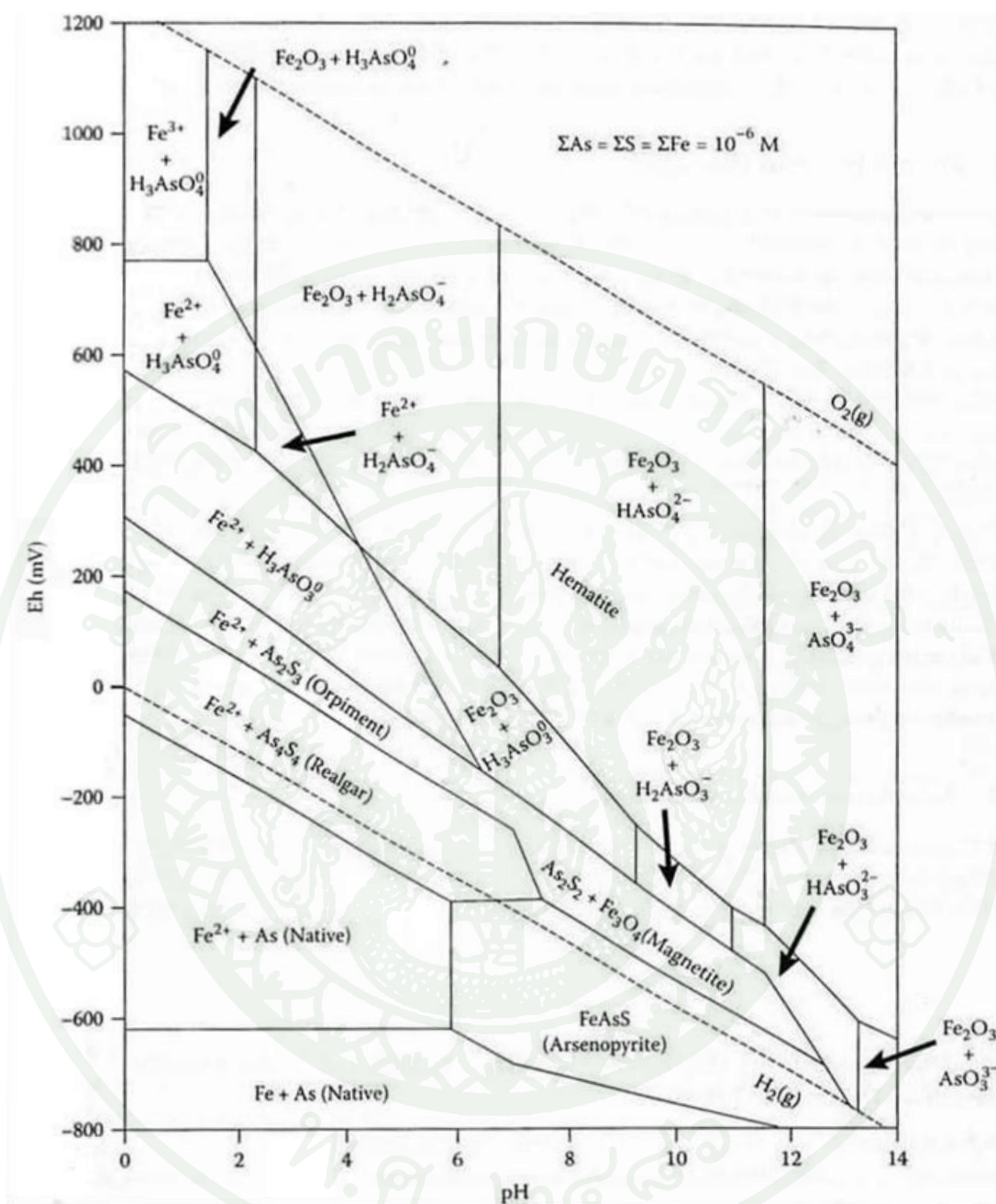
ภาพที่ 2 As(III) ในสารละลายเกลือ 0.01 M NaCl ตามค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา: Wang. and Deng (2009)



ภาพที่ 3 ไดอะแกรม Eh-pH stability ของอาร์เซนิก As-O-S system ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 bar ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิก 10^{-6} mol/L เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ S และ Fe

ที่มา: Wang and Deng (2009)



ภาพที่ 4 ไดอะแกรม Eh-pH stability ของอาร์เซนิก As-Fe-S-O-H₂O system ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 bar ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิก 10^{-6} mol/L เช่นเดียวกับกับความเข้มข้นของ S และ Fe

ที่มา: Wang and Deng (2009)

1.2 กลไกและพฤติกรรมของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน

อาร์เซนิกจัดเป็นแร่ประกอบหินชนิดหนึ่ง จึงพบที่มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกในดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ปรากฏขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกถูกควบคุมโดย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุและน้ำ (Mineral-Water interaction) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการหลัก ทางด้านธรณีเคมี 4 กระบวนการ ได้แก่ การตกตะกอนและการชะละลาย (Precipitation-Dissolution), กระบวนการดูดซับและคาย (Adsorption-Desorption), ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction) และ กระบวนการเปลี่ยนรูปทางจุลชีววิทยา (Microbial Transformation) นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับอินทรีย์วัตถุตามธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) (Wang and Deng 2009)

1.2.1 การตกตะกอนและการชะละลาย (Precipitation-Dissolution)

กระบวนการการตกตะกอนและการชะละลายเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิด และการพังทลายของหินและแร่ธาตุ กระบวนการดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเมื่อมีการตกตะกอนของ อาร์เซนิกจากปัจจัยทางธรณีเคมี ซึ่งกระบวนการ Precipitation-Dissolution เกิดขึ้นได้และดำเนิน ไปอย่างซ้ำๆ ที่สภาวะสมดุล

การตกตะกอนและการชะละลายของอาร์เซนิกในธรรมชาติพบได้ เช่น อาร์เซเนียนไพไรต์ (Arsenian pyrite, Fe(AsS)_2) อาจเกิดจากการตกตะกอนสารละลายของแข็ง (Solid solution) ด้วยอาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) หรือเรียกว่าแร่ออริเจนิคไพไรต์ (Authigenic pyrite) เกิดขึ้นเมื่อมีสารอินทรีย์หรืออินทรีย์วัตถุ (Organic matter, OM) ในระบบ ที่มีเหล็กและซัลเฟอร์มาก (Iron- and Sulfur-rich system) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของอาร์เซนิก ละลายน้ำ (Dissolved As) ลดลงในกระบวนการเกิดไพไรต์

1.2.2 กระบวนการดูดซับและคาย (Adsorption-Desorption)

กระบวนการดูดซับและคายเป็นกระบวนการที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของ อาร์เซนิกภายใต้สภาพออกซิไดส์ กระบวนการดูดซับติดผิววัสดุตัวกลางจึงมีความสำคัญในการควบคุม การเคลื่อนที่ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน สามารถสรุปกลไกกระบวนการ Adsorption-Desorption จำแนกตามชนิดของวัสดุตัวกลางในชั้นน้ำใต้ดินดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของวัสดุตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำต่อกลไกการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนรูปของอาร์เซนิกจากกระบวนการดูดซับและคาย

ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ	กลไกที่เกิดขึ้น
Fe hydroxides	- As(V), $\text{CH}_3\text{AsO}_2(\text{OH})^-$, and $(\text{CH}_3)_2\text{AsOOH}$ adsorption at pH 4-7, maximized around pH 4 - As(III) adsorption at pH , maximized around pH 4 - Desorption when pH increases - Amorphous phases of a higher adsorption capacity) than Crystalline phases - Releasing sorbed As during chemical and microbial reductive dissolution - As(III) oxidation, catalyzed by light or H_2O_2 in alkaline pH
Al hydroxides	- As(V), $\text{CH}_3\text{AsO}_2(\text{OH})^-$, and $(\text{CH}_3)_2\text{AsOOH}$ adsorption up to pH 7 and decreases significantly at higher pH - As(III) adsorption at pH 6-9.5 and decreases at higher pH - Amorphous phases of a higher adsorption capacity) than Crystalline phases
Mn hydroxides	- Negligible As(V) adsorption, but increased in the presence of other divalent cations - Slightly greater As(III) oxidation at low pH (pH 4)
Clay	- Poorly crystalline phase with high surface areas are more efficient - As(V) adsorption up to pH 7 and decreases with pH increases - Low As(III) adsorption at low pH and increases with pH - Clays with high surface areas showing a higher adsorption capacity - As(III) oxidation in the presence of trace amounts of impurities such as Fe or Mn oxides, iodide, or TiO_2.
Sulfides	- As substitution for S in sulfides, forming of As sulfide precipitates in the reduced environment - Releasing As during chemical and microbial oxidation of As-bearing sulfides.

ตารางที่ 1 (ต่อ)

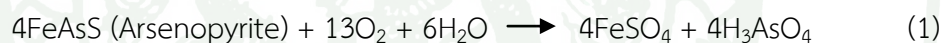
ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ	กลไกที่เกิดขึ้น
Calcite	- Equilibrium data of As(III) sorption onto calcite depicts an S-shaped sorption isotherm. - At low concentrations, As(OH)₃ is adsorbed by complexation of surface Ca surface sites. - Sorbed As increases linearly with solution concentration, up to the saturation of As with respect to the precipitation of CaHAsO₃ (s).
Muscovite and mica	- Function of solution pH (pH 3-8 for muscovite, and 3-11 for biotite), amount of As adsorbed increases with increasing pH, exhibiting a maximum value, before decreasing at higher pH values. - Maxima correspond to 3.22 ± 0.06 mmol/kg As(V) at pH 4.6-5.6 and 2.86 ± 0.05 mmol/kg As(III) at pH 4.1-6.2 for biotite, and 3.08 ± 0.06 mmol/kg As(III) and 3.13 ± 0.05 mmol/kg As(V) at pH 4.2-5.5 for muscovite.
NOM	- Enhancing As release mainly through competition for active adsorption sites, forming aqueous complexes, and changing the redox chemistry of site surfaces and As species - Inhibiting As mobility by serving as a binding agent and/or by forming insoluble complexes, especially when saturated with metal cations
Anion	- Competition for active adsorption sites, influenced by pH and concentration ratios between anion and As
Cation	- Enhancing As sorption by increasing the amount of positive charge on the oxide surfaces and/or forming a positively charged surface

ที่มา: Wang and Deng (2009)

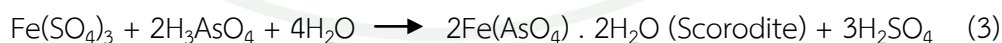
1.2.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

ปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นปฏิกิริยาหลักในการควบคุมสปีชีส์ของอาร์เซนิก โดยค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (ค่า Eh) ถูกควบคุมด้วยธาตุหลัก (major redox-sensitive element) ประกอบด้วย O, C, N, S และ Fe และธาตุรอง (minor redox-sensitive element/ trace element) ซึ่งอาร์เซนิกจัดเป็นธาตุรองชนิดหนึ่ง โดยปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำผิวดินและชั้นน้ำใต้ดินทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ กล่าวคือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ จุลินทรีย์จะใช้ O_2 เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในปฏิกิริยา เมื่อ O_2 ถูกใช้ไปจนหมด จากนั้นตัวรับอิเล็กตรอนลำดับถัดไปจะถูกใช้ในปฏิกิริยา ได้แก่ NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} และ CO_2 ตามลำดับ

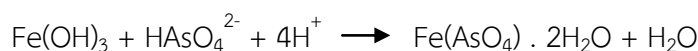
สารหนูที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแหล่งหินแร่ มักพบในแร่ของสารประกอบซัลไฟด์ เช่น Arsenopyrite ($FeAsS$), Cobaltite ($CoAsS$), Enargite ($CuAsS_4$) และ Orpiment (As_2S_3) เมื่อมีการผุกร่อนของหินและแร่อาร์เซนิกที่สัมผัสกับอากาศและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอาร์เซนดั่งสมการ



สารประกอบอาร์เซนดละลายได้ดีในน้ำที่มีสภาวะความเป็นกรดสูง จึงสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกล แต่ถ้าน้ำมีสภาวะความเป็นกรดอ่อน เป็นกลางหรือด่าง จะเกิดการตกตะกอน โดยการดูดซับกับสารประกอบเหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ตกตะกอนกลายเป็นแร่ธาตุต่างๆ ดังสมการ



สารประกอบอาร์เซนดสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าสารประกอบอาร์เซนเต เนื่องจากสารประกอบอาร์เซนเตจะถูกดูดซับได้ง่ายกว่า (Mok and Wai, 1994) และถูกตรึงไว้จากการตกตะกอนกับสารละลายออกไซด์ของเหล็ก กลายเป็นแร่ Scorodite ดังสมการ



Bhattacharya et al. (2002) ได้แสดงสมการรีดอกซ์พื้นฐานของการควบคุมการปลดปล่อยอาร์เซนิกออกสู่ชั้นน้ำใต้ดินของเบงกอลเดลต้า (Bengal delta) ดังสมการที่ 5 ถึง 9

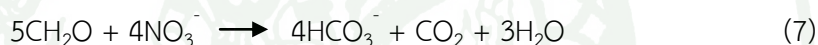
(Organic matter oxidation by O_2)



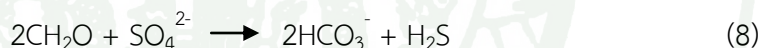
(Dissolution and hydrolysis)



(Denitrification)



(Sulfate reduction)



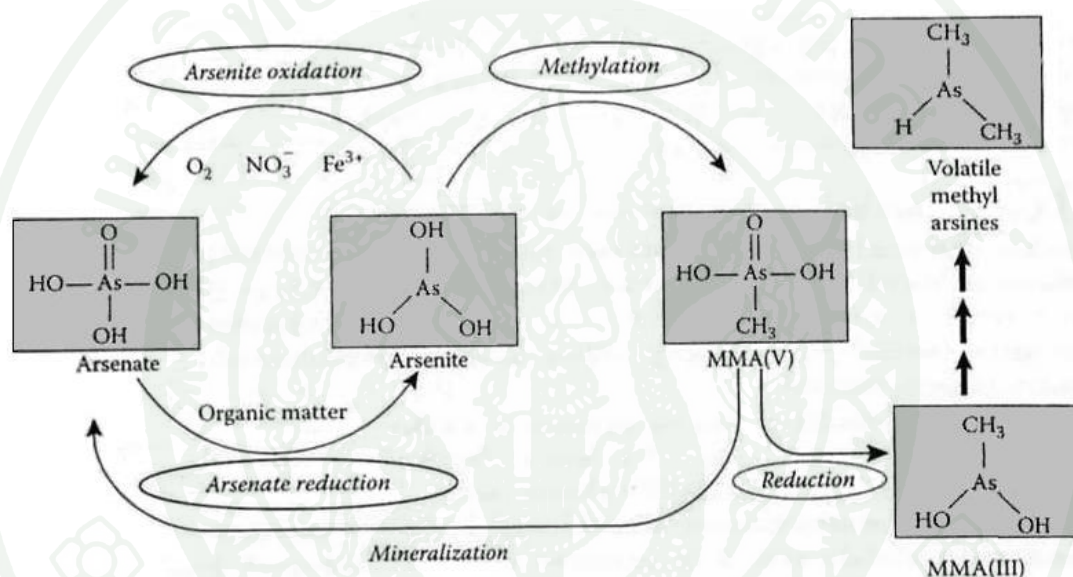
(Reductive dissolution Fe oxides)



โดยปฏิกิริยาอาร์เซนิกจะดูดติดกับเหล็กออกไซด์ แต่เมื่อมีค่า Eh ลดลง เกิดสภาวะรีดักชันเนื่องจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ เหล็ก หรือ เพอริกออกไซด์ (Fe^{III} oxides) จะถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{II}) ทำให้อาร์เซนิกถูกปลดปล่อยออกมาจากรูปออกไซด์เป็นสารละลาย โดย Wang and Deng (2009) อ้างถึง Saunders et al. (1997 และ 2005) และ Lee et al. (2005) ว่าอาร์เซนิกจะเคลื่อนที่ได้ภายใต้สภาวะ Fe-reducing condition และจะไม่เคลื่อนที่ได้ภายใต้สภาวะ SO_4^{2-} -reducing condition เมื่อมีตัวให้และรับอิเล็กตรอน (Electron donors and acceptors) มากเพียงพอ

1.2.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปทางจุลชีววิทยา (Microbial Transformation)

อาร์เซนิกสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ตามธรรมชาติ โดยมีจุลินทรีย์บางชนิดถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Bacterially catalyzed) ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซไนต์และปฏิกิริยารีดักชันของอาร์เซเนต และมีสาหร่าย รา และแบคทีเรียบางกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา Biomethylation ซึ่งเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอินทรีย์อาร์เซนิกในกลุ่ม Monomethylarsonic acid (MMA(V)) และ Monomethylarsonous acid (MMA(III)) แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการเปลี่ยนรูปทางจุลชีววิทยาของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม

ที่มา: Wang and Deng (2009)

1.2.5 อินทรีย์วัตถุ (Natural organic matter, NOM)

อินทรีย์วัตถุ เช่น กรดฮิวมิก (Humic acid, HA) และกรดฟุลวิก (Fulvic acid, FA) ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของเศษซากพืชซากสัตว์ เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับและคายของอาร์เซนิกจากดินและตะกอนลงสู่ น้ำใต้ดิน ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง NOM กับ อาร์เซนิกเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่า pH ค่า Eh ชนิดและความเข้มข้นของอาร์เซนิก ไอออน (Competing ions) และลิแกนด์เชิงซ้อน (Complexing ligands) สมบัติทางแร่วิทยาของชั้นน้ำใต้ดิน และค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

แม้ว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง NOM และ อาร์เซนิกจะมีความซับซ้อน แต่สามารถสรุปความสัมพันธ์ออกเป็น 3 ทาง คือ 1) กระบวนการแย่งดูดซับระหว่าง NOM และ As (Competitive adsorption) 2) ผลต่อสปีชีส์ของอาร์เซนิกในปฏิกิริยารีดอกซ์ และ 3) การสร้างสารเชิงซ้อน (Aqueous NOM-As complexation)

1.3 กรณีประวัติการปนเปื้อนอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน

Wang and Deng (2009) สรุปความสัมพันธ์ของเหตุการณ์การปนเปื้อนอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินระดับต้นบริเวณภาคพื้นเอเชียใต้ เช่น แม่น้ำคงคา-แม่น้ำเมฆนา-แม่น้ำพรหมบุตร เดลต้า (Ganges-Meghna-Brahmaputra Delta) แอ่งแม่น้ำโขง (Mekong basin) พนมเปญ ประเทศกัมพูชา และลุ่มน้ำแม่น้ำแดง ฮานอย ประเทศเวียดนาม พบว่า 1) มีต้นน้ำมาจากเทือกเขาหิมาลัย 2) พื้นที่ที่มีการทับถมของอินทรีย์วัตถุที่สัมพันธ์กับลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาที่เป็นแอ่งสะสมตะกอนควอเตอร์นารีในยุคโฮโลซีน 3) เป็นพื้นที่ลุ่มน้ำแผ่กว้างและมีเกรเดียนต์ต่ำ โดยสรุปกรณีศึกษาที่พบการปนเปื้อนอาร์เซนิกตามธรรมชาติดังตารางที่ 2 และจากกรณีศึกษาการปนเปื้อนอาร์เซนิกตามธรรมชาติในชั้นน้ำใต้ดิน แสดงให้เห็นว่าเมื่อแหล่งน้ำใต้ดินอยู่ในสภาพแอ่งออกซิเจน หรือ สภาพไม่มีออกซิเจน และมีการสะสมตะกอนหรือการทับถมของอินทรีย์วัตถุในพื้นที่ ซึ่งจากสถานการณ์ดังกล่าว มีแนวโน้มทำให้เกิดสภาพรีดิวซ์ในชั้นน้ำใต้ดิน และนำไปสู่การปลดปล่อยอาร์เซนิกสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

Keimowitz et al. (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินระดับต้นบริเวณพื้นที่ลุ่มฝ่งกลบ โดยพิจารณาถึงแหล่งกำเนิดของอาร์เซนิก กลไกการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก และแนวทางในการบำบัด ซึ่งจากการศึกษาเดิมของพื้นที่ศึกษาพบว่า เดิมเคยเป็นพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทไดเมทิล ฟอर्मัลดีไฮด์ (Dimethyl formaldehyde, DMF) และได้มีการบำบัดด้วยการเติมออกซิเจน แต่กลับพบว่ามีแนวโน้มปรากฏค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ค่าความเข้มข้นของ DMF ที่วัดได้จากบ่อสังเกตการณ์ลดลง และพบว่าแหล่งกำเนิดของอาร์เซนิกนั้น ไม่แสดงให้เห็นว่าเกิดจากน้ำชะขยะ ซึ่งสามารถคาดการณ์ว่าได้น้ำชะขยะอาจทำให้เกิดสภาพรีดิวซ์ในชั้นน้ำใต้ดิน และเป็นสาเหตุให้อาร์เซนิกมีอยู่ในตะกอนชั้นดินชั้นหินถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

สำหรับการปนเปื้อนของอาร์เซนิกครั้งสำคัญพบในประเทศไทย คือ การปนเปื้อนของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน เนื่องจากมีกองกากแร่จากการทำเหมืองแร่ดีบุก-พลูม บริเวณพื้นที่ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

โดยเริ่มพบผู้ป่วยโรคไข้ดำใน ปี พ.ศ. 2530 (จันทร์เพ็ญ, 2537) ดังนั้นกรมทรัพยากรธรณีจึงได้ทำการตรวจสอบและพบการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำใต้ดินและผิวดินในปีเดียวกันนี้ และได้ทำการนำกองกากแร่อาร์เซนิกออกไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลในเวลาต่อมา (ศักดิ์, 2544) ส่วนสาเหตุของการปนเปื้อนนั้น กล่าวโดยสรุปเกิดจากการพัดพาทั่วมุมตะกอนของกองกากแร่ และของเสียจากการแต่งแร่ บางส่วนถูกนำมาทิ้งทั่วมุมกับขยะครัวเรือน ทำให้เกิดจากปนเปื้อนจากการเกิดสภาวะรีดักชันและปลดปล่อยอาร์เซนิกลงสู่พื้นดิน

2. น้ำชะขยะ

2.1 นิยาม

น้ำชะขยะ (Leachate) คือ ของเหลวที่ไหลผ่านขยะมูลฝอยแล้วมีการชะละลายเอาสารละลายหรือสารแขวนลอยต่างๆ ออกมากับของเหลวนั้น (Tchobanoglous et.al, 1993) โดยทั่วไปแล้วน้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ การเติมน้ำจากแหล่งภายนอก ได้แก่ น้ำไหลบ่าหน้าดิน น้ำฝน น้ำใต้ดิน หรือ น้ำพุ เป็นต้น และน้ำที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอย

2.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะ

สมบัติทางเคมีทั่วไปของน้ำชะขยะโดยเปรียบเทียบระหว่างหลุมฝังกลบใหม่และหลุมฝังกลบเก่า ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของน้ำชะขยะนั้นมีการแปรผันตามอายุของหลุมฝังกลบ และช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง กล่าวคือ ถ้าเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะมาวิเคราะห์ในช่วง Acid phase จะพบว่ามีค่า pH ต่ำ ส่วนความเข้มข้นของค่าบีโอดี (BOD) สารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ค่าซีโอดี (COD) สารอาหาร (Nutrient substances) และโลหะหนักจะมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าทำการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ในช่วง Methane fermentation phase จะพบว่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 ส่วนความเข้มข้นของค่า BOD, TOC, COD และสารอาหารจะมีความลดต่ำลง และโดยทั่วไปโลหะก็จะมีค่าความเข้มข้นในน้ำชะขยะต่ำลงเนื่องจากโลหะส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ ในสภาพ pH เป็นกลาง แต่อย่างไรก็ตามค่า pH ไม่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับค่าความดันย่อย (Partial pressure) ของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในก๊าซจากหลุมฝังกลบที่สัมผัสกับน้ำชะขยะ

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาของการปนเปื้อนอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินตามธรรมชาติบริเวณภูมิภาคเอเชียใต้

Country/Region	Area (km ²)	Population Exposed	As Concentration Range (µg/L)	Aquifer Type	Groundwater Conditions	Sediments/As Contents
Bangladesh	150,000	35,000,000	<1-2,300	Holocene alluvial/deltaic sediments. Abundance of solid OM	Strongly reducing, neutral pH, high alkalinity, occurrence of CH ₄ , slow groundwater flow rates	Fine to medium sized sand shallow: brown to gray; deep: orange; As: 2-10 µg/g
West Bengal, India	23,000	5,000,000	<10-3,200	As Bangladesh	As Bangladesh	Similar to those in Bangladesh
Vietnam Red River Delta	1,200	10,000,000	1-3,050	Holocene alluvial/deltaic sediments.	Reducing, high Fe, Mn, NH ₄ , high alkalinity, Ca-HCO ₃ or Mg-HCO ₃ type, rich in CH ₄	Brown to black-brown clay 6-23 µg/g; gray clay 2-12 µg/g; brown to gray sand 0.6-5 µg/g; average 7.5 µg/g As
Cambodia	3,700	120,000	1-1,340	Unconsolidated alluvial deposits of the Quaternary	Neutral pH, low Eh, high Fe and bicarbonate contents, moderate salinities, and low dissolved sulfate	As-rich area: gray clays, silts and sands. As and Fe decrease with depth; near surface, As(V) dominated; 35-60% As reduced to As(III) by 17 m depth

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Country/Region	Area (km ²)	Population Exposed	As Concentration Range (µg/L)	Aquifer Type	Groundwater Conditions	Sediments/As Contents
Terai Region, Nepal	30,000	550,000	1.7-404	Thick sand and gravel deposits of Holocene age. Interlocked with alluvium flood plains	High HCO ₃ ³⁻ and low SO ₄ ²⁻ , high Fe and Mn	Average As: 9 µg/g; iron oxide, titanium oxide, and calciumoxide concentration were 5%, 0.7%, and 3.9% respectively
Punjab, Pakistan	?	3,040	32-1,900	Quaternary alluvial and deltaic sediments	Alkaline pH (7.3-8.7) ; high Fe, As, SO ₄ ²⁻ ; water type: Na-HCO ₃ or Na-HCO ₃ ⁻ SO ₄ dominant	Mostly coarse sand, containing high percentage of fine to very fine sand and silt

ที่มา: Wang and Deng (2009)

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะจากพื้นที่ฝังกลบในประเทศไทยนั้น ได้มีการศึกษาน้ำชะขยะเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ กัน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วได้มีวิธีการเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำชะขยะจากบริเวณแอ่งน้ำขังของกองขยะ พบว่า ค่าความเข้มข้นของแต่ละองค์ประกอบมีความแปรปรวนแตกต่างกันซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ช่วงเวลาหรือฤดูกาลที่เก็บรวบรวมตัวอย่าง ปริมาณและองค์ประกอบของขยะที่แตกต่างกันแต่ละพื้นที่ เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า พื้นที่ฝังกลบที่เริ่มมีการเปิดใช้งานมานาน (มากกว่า 10 ปี) และยังเปิดใช้งานอยู่ (ณ วันเวลาที่ทำการศึกษางานวิจัยนั้น) มีค่าของแต่ละองค์ประกอบสอดคล้องกับเกณฑ์ตามตารางที่ 1 โดยมีบางพารามิเตอร์ที่มีความแปรปรวนหรือมีความแตกต่างจากเกณฑ์ เช่น ค่า pH, BOD, COD, Org-N หรือ $\text{NH}_4\text{-N}$ เป็นต้น มีรายละเอียดดังนี้

จตุพร (2542) และ เบกพล (2542) ศึกษาลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลเมืองบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี พบว่ามีค่า pH ระหว่าง 7.9-8.2 มีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 420-650 mg/l และ 4,500-6,530 mg/l ตามลำดับ มีค่า TSS อยู่ในช่วง 180-320 mg/l ค่าทีเคเอ็น (TKN) และ $\text{NO}_3\text{-N}$ อยู่ในช่วง 1,980-2,870 mg/l as N และ 3.06-4.41 mg/l as N ตามลำดับ มีค่า Total-P อยู่ในช่วง 4.7-6.5 mg/l as P และพบโลหะหนักคือ Ni มีความเข้มข้นที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.28-0.42 mg/l

กรมควบคุมมลพิษ (2542) และ (2543) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะในบริเวณพื้นที่ฝังกลบบริเวณพื้นที่ภาคเหนือและภาคกลางรวมทั้งสิ้น 15 แห่ง และพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกอย่างละ 2 แห่ง รวมทั้งสิ้น 4 แห่ง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหลุมฝังกลบที่ได้มีการเปิดใช้มานาน (มากกว่า 10 ปี) และยังคงเปิดใช้อยู่ (ณ วันเวลาที่ทำการศึกษา) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะในบริเวณที่เป็นแอ่งหรือที่ขังของน้ำชะขยะ ถ้าไม่ปรากฏน้ำชะขยะในบริเวณที่เป็นแอ่งจะทำการขุดหลุมในบริเวณใกล้เคียงกองมูลฝอยหรือในที่ลุ่ม โดยแสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำชะขยะ ดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า pH ของน้ำชะขยะส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกลาง-ด่างเล็กน้อย (ประมาณ 7.0-8.5) ค่า BOD และ COD มีค่าอยู่ในช่วงกว้างมาก โดยเฉพาะพื้นที่หลุมฝังกลบบริเวณภาคกลางและภาคเหนือบางแห่งมีค่า BOD ก่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 100 mg/l) เนื่องจากเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูฝน (เดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคม)

ธิดารัตน์ (2543) ศึกษา น้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบขยะกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม พบว่ามีค่า BOD เฉลี่ยเท่ากับ 1,800 mg/l ค่า COD อยู่ในช่วง 6,000-7,515 mg/l ค่า TSS อยู่ในช่วง 20-200 mg/l ค่า TDS เฉลี่ยเท่ากับ 12.5 mg/l ตามลำดับ ค่า Org-N และ $\text{NH}_4\text{-N}$

อยู่ในช่วง 232-519 mg/l และ 2,471-3,856 mg/l ตามลำดับ และพบโลหะหนักได้แก่ Mn, Cu, Zn, Pb, Total Cr, Cd, Hg และ Ni มีความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 0.132, 2.450, 0.228, 1.060, 0.018, 0.030 และ 0.394 mg/l

ปาริชาติ (2544) ศึกษา น้ำชะขยะจากกองขยะของเทศบาลเมืองนนทบุรี ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2542 ถึงเดือนมิถุนายน 2543 พบว่า มีค่า pH ระหว่าง 8.04-8.15 มีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 1,550-2,005 mg/l และ 5419.2-5,851.9 mg/l ตามลำดับ มีค่า TSS และ TDS อยู่ในช่วง 0.53-0.64 mg/l และ 15.71-16.92 mg/l ค่า TKN อยู่ในช่วง 2,113-2,337 mg/l และมีค่า Total-P อยู่ในช่วง 1.09-1.16 mg/l

ปิยะ (2544) ศึกษาสมบัติของน้ำชะขยะจากสถานที่ฝังกลบบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ทั้งหมด 10 แห่ง พบว่า มีค่า pH ระหว่าง 7.5-8.5 มีค่า Alkalinity อยู่ในช่วง 150-6,620 mg/l as CaCO_3 มีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 100-800 mg/l และ 600-8,800 mg/l ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนระหว่าง BOD:COD ระหว่าง 1:16 ถึง 1:3 มีค่า TSS อยู่ในช่วง 0.7-150 mg/l และพบโลหะหนักได้แก่ Total Cr และ Ni มีความเข้มข้นที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.07-3.05 mg/l และ 0.08-0.66 mg/l ตามลำดับ

อนุชิต (2547) ศึกษา น้ำชะขยะจากสถานที่กำจัดมูลฝอยองค์การบริหารส่วนจังหวัด นนทบุรี ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2545 ถึง เดือนสิงหาคม 2546 พบว่า มีค่า pH ระหว่าง 8.1-8.2 มีค่า BOD และ COD อยู่ในช่วง 520-624 mg/l และ 12,624-15,218 mg/l ตามลำดับ มีค่า TKN, $\text{NH}_4\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ อยู่ในช่วง 1,986.5-5,872.2 mg/l 1,624.6-2,012.4 mg/l และ 1.98-2.20 mg/l ตามลำดับ และมีค่า Total-P อยู่ในช่วง 60.6-68.2 mg/l

ตารางที่ 3 ลักษณะทางเคมีทั่วไปของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบใหม่และหลุมฝังกลบเก่า

องค์ประกอบ	ค่า, mg/l ¹⁾		
	หลุมฝังกลบใหม่ (น้อยกว่า 2 ปี)		หลุมฝังกลบเก่า (มากกว่า 10 ปี)
	ช่วง ²⁾	ทั่วไป ³⁾	
บีโอดี ₅ (BOD ₅)	2,000-30,000	10,000	100-200
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC)	1,500-20,000	6,000	80-160
ซีโอดี (COD)	3,000-60,000	18,000	100-500
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	200-2,000	500	100-400
สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-N)	10-800	200	80-120
แอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₄ -N)	10-800	200	20-40
ไนเตรต (NO ₃ ⁻)	5-400	25	5-10
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total-P)	5-100	30	5-10
ออร์โธฟอสฟอรัส (Ortho-P)	4-80	20	4-8
ความเป็นด่าง (Alkalinity as CaCO ₃)	1,000-10,000	3,000	200-1,000
พีเอช (pH)	4.5-7.5	6.0	6.6-7.5
ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness as CaCO ₃)	300-10,000	3,500	200-500
แคลเซียม (Ca)	200-3,000	1,000	100-400
แมกนีเซียม (Mg)	50-1,500	250	50-200
โพแทสเซียม (K)	200-1,000	300	50-400
โซเดียม (Na)	200-2,500	500	100-200
คลอไรด์ (Cl ⁻)	200-3,000	500	100-400
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	50-1,000	300	20-50
เหล็ก (Fe)	50-1,200	60	20-200

หมายเหตุ ¹⁾ ยกเว้นค่าพีเอช (pH) ที่ไม่มีหน่วย

²⁾ เป็นช่วงค่าตัวแทน มีค่าที่สูงกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการตรวจเอกสารในบางองค์ประกอบ

³⁾ ค่าทั่วไปของหลุมฝังกลบใหม่ อาจมีค่าแปรผันตามระยะของปฏิกิริยาชีวภาพที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ

ที่มา: Tchobanoglous et.al (1993)

ตารางที่ 4 ลักษณะทางเคมีของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบในประเทศไทย

พารามิเตอร์	หน่วย	ภาคกลางและภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	
		ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ย	ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ย
Field Test					
1. Static water level	m	-	-	-	-
2. Appearance	-	Brown-Black	-	Black	-
3. Temperature	°C	30.4-32.1	31.2	29.0-32.0	30.3
Lab Analysis					
1. Color	Color unit			350-15,000	
2. pH		6.26-8.18	7.45	6.7-8.3	7.7
3. Conductivity	µmho/cm	1,820-24,500	9,753.3	4,500-39,800	15,316.7
4. Salinity	PPT	-	-	3.0-25.0	9.7
5. Acidity	mg/l	-	-	33-258	112.1
6. Alkalinity	mg/l	-	-	670-5,900	3,277.5
7. TS	mg/l	1,370-20,800	7,952.0	3,570-32,800	11,958.3
8. TDS	mg/l	685-19,400	7,317.0	3,090-34,300	11,136.7
9. Chloride	mg/l	206-7,180	2,052.1	880-7,900	2,582.5
10. BOD	mg/l	37-10,900	1,648.5	278-6,630	1,419.3
11. COD	mg/l	250-17,900	2,663.1	1,490-10,880	4,164.2
12. Sulfide	mg/l	0.300-11.700	2.700	0.213-2.600	1.491
13. Mn	mg/l	0.38-22.80	3.43	0.21-6.30	1.48
14. NH ₄ -N	mg/l	1.0-806.0	269.8	13.0-693.0	168.6
15. NO ₃ -N	mg/l	0.03-232.00	16.92	0.01-1.91	1.17
16. Fe	mg/l	-	-	11.6-65.2	28.8
17. Ni	mg/l	0.021-0.498	0.135	0.10-1.14	0.38
18. Cd	mg/l	0.012	0.012	ND	-
19. Pb	mg/l	0.027-0.144	0.094	ND	-
20. Cr ⁺⁶	mg/l	0.014-0.240	0.127	0.025-0.580	0.233
21. Total Cr	mg/l	-	-	0.040-1.200	0.422
22. Hg	mg/l	0.0004-0.0191	0.0022	0.001-0.035	0.013
23. VOCs	µg/l	-	-	nil	nil

- หมายเหตุ 1) ความเข้มข้นของโลหะหนักคิดเฉพาะค่าที่ตรวจวัดได้เท่านั้น
 2) ND หมายถึง ตรวจวัดไม่ได้ เพราะมีค่าต่ำกว่า detection limit
 3) nil หมายถึง ไม่มี หรือ ตรวจไม่พบ

3. ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน

3.1 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน

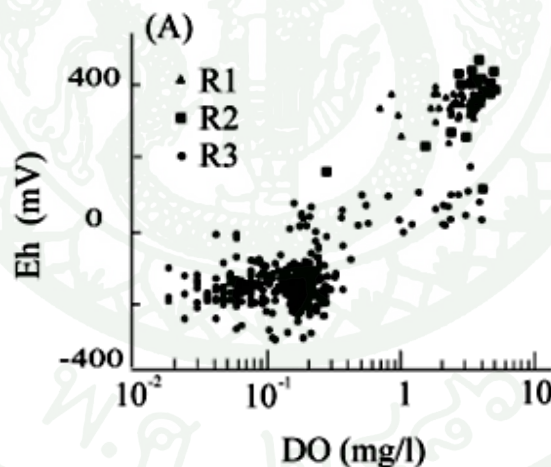
โมเลกุลของออกซิเจนนั้นคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ของบรรยากาศโลก โดยความสามารถในการละลายของออกซิเจนในอากาศลงสู่แหล่งน้ำทั้งผิวดินและใต้ดิน จะแปรผันตามความดันบรรยากาศ และแปรผกผันกับอุณหภูมิของน้ำและความเค็ม (Salinity) โมเลกุลของออกซิเจนนั้นมีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) จึงมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาทางชีวภาพและปฏิกิริยารีดอกซ์ในน้ำ กล่าวคือ ออกซิเจนจะถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนในกระบวนการเมตาบอลิซึม และในทางธรณีเคมีปริมาณออกซิเจนในน้ำยังควบคุมการละลายของจุลธาตุ (Trace element) เช่น ในแหล่งน้ำใต้ดินที่มีออกซิเจน (Oxic groundwater) จะพบที่มีความเข้มข้นของเหล็กลดลงต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม เนื่องจากเหล็กจะตกตะกอนเป็นเหล็กออกซิไฮดรอกไซด์ (Iron oxyhydroxide) ในขณะเดียวกันไอออนของ oxyhydroxide นี้ก็มีความสำคัญในการเป็นตัวดูดซับ หรือควบคุมการชะละลายของธาตุโลหะหนักตัวอื่นๆ (Stumm and Morgan, 1981)

ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดินนั้นโดยปกติจะถูกใช้ไปในกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์และการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุตั้งแต่พื้นผิวดินและในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) (Winograd and Robertson, 1982) แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าในน้ำใต้ดินระดับลึกยังคงมีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ เช่น Wen-fu Chen and Tsung-Kwei Liu (2003) วัดค่า DO จากในแหล่งน้ำใต้ดินที่ระดับความลึกต่างๆ จนถึงประมาณ 250 เมตรจากผิวดิน พบว่าตัวอย่างประมาณ 16% พบว่าเป็นน้ำใต้ดินแบบอ็อกซิก (Oxic groundwater) ที่มีค่า DO สูงกว่า 0.5 mg/l (มีค่าระหว่าง 1-7 mg/l) ซึ่งพบในพื้นที่ที่มีธรณีสัณฐานแบบเนินตะกอนรูปพัด (Alluvial delta fan) ส่วนในพื้นที่ชายฝั่งทะเลพบว่ามีค่ามัธยฐานของ DO เท่ากับ 2.6 mg/l (Abbene, 2010) ซึ่งจากลักษณะนี้อาจบ่งชี้ได้ว่าปริมาณของออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดินนั้นขึ้นกับ 1) ปริมาณจุลชีพและปริมาณสารอินทรีย์ในชั้นน้ำใต้ดิน 2) ประสิทธิภาพของการส่งผ่านออกซิเจนละลายจากชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ตามลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ (Rose and Long, 1988)

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

ดังที่กล่าวไปข้างต้นว่าออกซิเจนในน้ำมีความสำคัญในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยพารามิเตอร์ที่สามารถวัดปฏิกิริยารีดอกซ์ในน้ำได้คือ ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox potential) หรือ ค่า Eh หรือ ค่า ORP (Oxidation-Reduction potential) ซึ่งเป็นมาตรฐานพลังงานศักย์ไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในตัวอย่างน้ำเทียบกับเซลล์ไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (Standard reference electrode cell) มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) หรือ มิลลิโวลต์ (mV) โดยค่า Eh จะบ่งชี้ถึงสภาพรีดอกซ์ในน้ำ กล่าวคือ สภาพที่มีค่า Eh ในน้ำสูงแสดงว่าปฏิกิริยารีดอกซ์อยู่ในสภาวะออกซิเดชัน ในทางกลับกันถ้าค่า Eh ต่ำแสดงว่าอยู่ในสภาวะรีดักชัน

จากการศึกษาของ Wen-fu Chen and Tsung-Kwei Liu (2003) พบว่า ค่า Eh ที่วัดได้ในน้ำใต้ดินทั้งแบบออกซิก ($DO \geq 0.5$ mg/l) และแอน็อกซิก ($DO < 0.5$ mg/l) นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0-200 mV และ -400-0 mV ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่า Eh และค่า DO ที่ตรวจวัดได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Eh และ DO ในน้ำใต้ดิน Choshui fan delta (R1 จาก Rose and Long (1998), R2 จาก Smedley and Edmunds (2002), R3 จาก Wen-Fu Chen and Tsung-Kwei Liu (2003))

ที่มา: Wen-Fu Chen and Tsung-Kwei Liu (2003)

3.3 ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป (Oxygen Deficit)

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งประเภแม่น้ำลำธารนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งทำการศึกษาโดยอาศัยแบบจำลอง Streeter-Phelps oxygen-sag model ซึ่งเป็นสมการที่ใช้จำลองผลจากการปนเปื้อนจากแหล่งมลพิษประเภท Point-Source ปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำที่สภาวะคงที่ (Steady-State) มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$D_{O_2} = \frac{k_1 L_i}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 \theta_H} - e^{-k_2 \theta_H}) + D_i e^{-k_2 \theta_H} \quad (10)$$

เมื่อ

- D_{O_2} คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป, [M/L³]
 L_i คือ ความเข้มข้นของค่า BOD, [M/L³]
 k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาการย่อยสลาย, [T⁻¹]
 k_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาการเติมอากาศ, [T⁻¹]
 θ_H คือ เวลา, [T]
 D_i คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปเริ่มต้น ณ จุดปล่อยสารปนเปื้อน, [M/L³]

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ปฏิกิริยา k_1 และ k_N และความเข้มข้นเริ่มต้นของค่า BOD (L_0) และ Nitrification (NC_0) ที่เป็นดัชนีที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงในแหล่งน้ำ

Source	k_1 (1/24h)	k_N (1/24h)	L_0 (mg/l)	NC_0 (mg/l)
Municipal waste water	0.35-0.40	0.15-0.25	180-300	20-45
Mechanically treated waste water	0.32-0.36	0.10-0.15	100-200	18-35
Biologically treated waste water	0.10-0.25	0.05-0.20	10-40	15-32
Potable water	0.05-0.10	0.03-0.06	0-2	0-1
River water (average)	0.05-0.15	0.04-0.10	1-4	0-2
Agricultural drainage water	0.08-0.20	0.04-0.12	5-25	0-10
Waste water, food industry	0.4-0.5	0.1-0.25	200-5,000	20-200

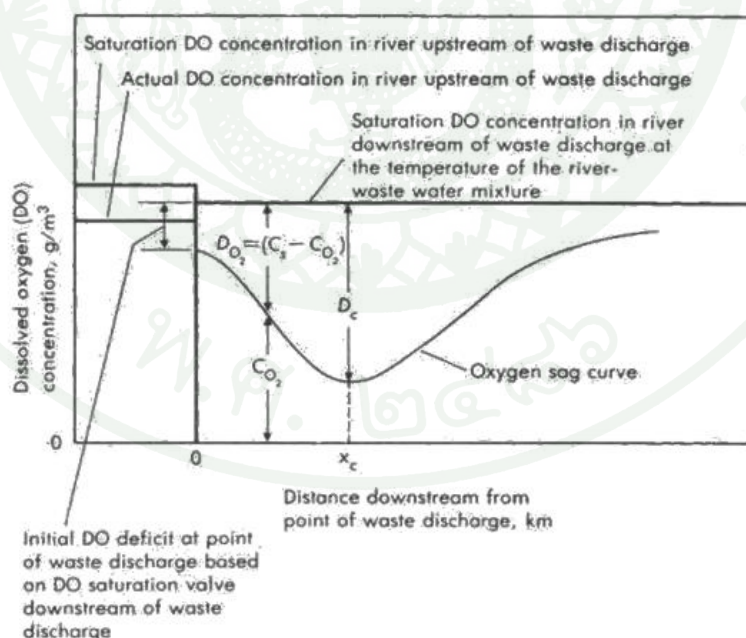
ที่มา: Bendoricchio and Jorgensen (2001)

ตารางที่ 6 ค่ากำหนดของ k_2 ตามประเภทของแหล่งน้ำ

Water body	Range of k_2 at 20°C, day ⁻¹
Small ponds and backwaters	0.10-0.23
Sluggish stream and large lakes	0.23-0.35
Large streams of low velocity	0.35-0.46
Large streams of normal velocity	0.46-0.69
Swift streams	0.69-1.15
Rapids and waterfalls	>1.15

ที่มา: Tchobanoglous and Schroeder (1985)

เมื่อนำแบบจำลองของ Streeter-Phelps ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนละลาย (ค่า DO) จากแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน สามารถจำลองสภาพของการฟื้นฟูคุณภาพแหล่งน้ำ (Self Purification) หรือแสดงลักษณะของ Oxygen sag curve แสดงดังภาพที่ 7



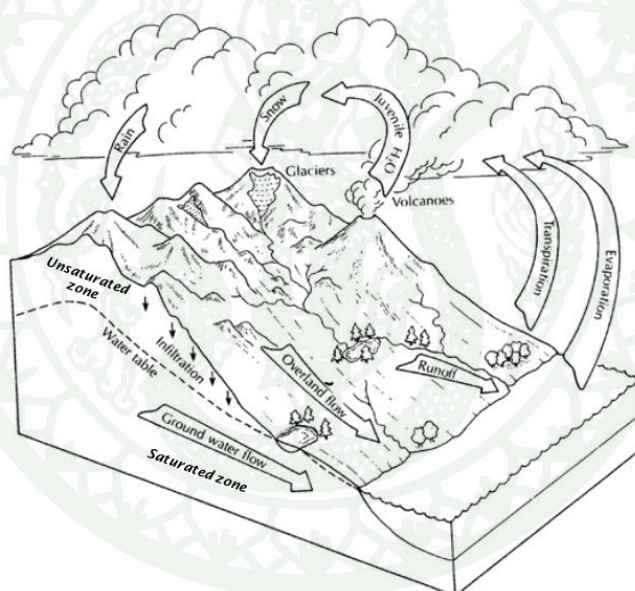
ภาพที่ 7 การจำลองสภาพ Oxygen sag curve จากแบบจำลองของ Streeter-Phelps

ที่มา: Tchobanoglous and Schroeder (1985)

4. น้ำใต้ดิน

4.1 ระบบน้ำใต้ดิน

ระบบน้ำใต้ดินเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรทางอุทกวิทยา (Hydrological cycle) แสดงดังภาพที่ 8 กล่าวคือ เมื่อหยาดน้ำฟ้า (หมายรวมถึงน้ำฝน ลูกเห็บ หรือหิมะ) ตกลงสู่พื้นผิวดินแล้ว น้ำส่วนที่ไหลซึมผ่านผิวดินลงมาจะถูกกักเก็บอยู่ภายในช่องว่างของชั้นดินชั้นหิน เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) โดยมีระดับน้ำใต้ดิน (Water table) เป็นแนวกายภาพที่แบ่งขอบเขตของระบบน้ำใต้ดิน คือ ขอบเขตของตัวกลางที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) และ ขอบเขตของตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) มีรายละเอียดดังนี้ (ทวีศักดิ์, 2546)



ภาพที่ 8 วัฏจักรทางอุทกวิทยา

ที่มา: ดัดแปลงจาก Fetter (2001)

4.1.1 เขตไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone or Vadose zone) หมายถึง ส่วนของชั้นดินหรือชั้นหินนับจากระดับผิวดินถึงระดับน้ำใต้ดิน ช่องว่างของชั้นดินชั้นหินในเขตอิมอากาศจะมีทั้งส่วนที่เป็นน้ำกักเก็บ และอากาศแทรกอยู่ โดยน้ำใต้ดินในเขตอิมอากาศนี้ เรียกว่า น้ำแขวนลอย (Vadose or Suspended water) เขตอิมอากาศสามารถจำแนกออกเป็น 3 ส่วนย่อยดังนี้

1) ชั้นความชื้นของดิน (Belt of soil water or Soil water zone) หมายถึง ส่วนบนสุดของเขตอิมอากาศ ซึ่งประกอบด้วย ดิน วัตถุอินทรีย์ และอนินทรีย์ต่างๆ น้ำที่ถูกกักเก็บใน ชั้นนี้ เรียกว่า ความชื้นของดิน (Soil moisture or Soil water) ซึ่งได้จากการดูดซับความชื้น ในบรรยากาศ การดึงน้ำดูดซึม (Capillary water) จากเขตอิมน้ำ และการซึมซาบน้ำลงสู่ดินเนื่องจาก แรงโน้มถ่วงของโลก

2) ชั้นกลาง (Intermediate belt or Intermediate zone) หมายถึง ส่วนที่อยู่ระหว่าง Soil water zone กับ Capillary fringe โดยเป็นเพียงทางผ่านของน้ำที่ซึมผ่านลงสู่เขต อิมน้ำเท่านั้น ซึ่งความหนาของชั้นดังกล่าวขึ้นขึ้นกับความลึกของเขตอิมน้ำหรือระดับน้ำใต้ดิน เมื่อเทียบจากผิวดิน

3) ชั้นน้ำดูดซึม (Capillary zone) หมายถึง ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน จนถึงจุดสูงสุดที่น้ำซึมขึ้นไปด้วยแรงคาปิลารี (Capillary force) เนื่องจากมีความดันของน้ำต่ำกว่า ความดันบรรยากาศ

4.1.2 เขตอิมน้ำ (Zone of saturation) หมายถึง ส่วนของชั้นดินชั้นหินที่ทุกช่องว่าง เต็มไปด้วยน้ำ หรืออิมตัวด้วยน้ำ โดยน้ำที่ถูกกักเก็บในเขตอิมน้ำนี้ เรียกว่า น้ำใต้ดิน หรือน้ำบาดาล (Groundwater) ระดับบนสุดของเขตอิมน้ำ เรียกว่า ระดับน้ำใต้ดิน (Water table) ซึ่งมีความดันของ น้ำในช่องว่างเท่ากับความดันบรรยากาศ และเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งที่ลึกลงไปนับจากระดับน้ำใต้ดิน เนื่องจากน้ำหนักของชั้นน้ำที่วางทับอยู่

4.2 การจำแนกประเภทของชั้นน้ำใต้ดิน

โดยโครงสร้างธรณีวิทยาแล้ว ชั้นหินอาจประกอบไปด้วย รอยเลื่อน รอยแตก หรือโพรง หรือช่องว่างของเนื้อหินเนื้อดินที่ทำให้มีความพรุนแตกต่างกัน ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวทำให้ชั้นดิน ชั้นหินในประเภทต่างๆ มีสมบัติที่สามารถกักเก็บน้ำใต้ดินได้มากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนก ชั้นดินชั้นหินตามสภาพการกักเก็บน้ำใต้ดิน ดังนี้

4.2.1 ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) หมายถึง ชั้นหินหรือกลุ่มของชั้นหินที่อิมตัวด้วยน้ำ

1) ชั้นหินอุ้มน้ำไม่มีแรงดัน (Unconfined aquifer) หมายถึง ชั้นหินอุ้มน้ำที่ไม่ได้อยู่ภายใต้แรงดัน กล่าวคือ ไม่มีชั้นหินกั้นน้ำปิดทับอยู่ เป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่อยู่ถัดจากผิวดินลงไป ตอนบนสุดของชั้นหินอุ้มน้ำ คือ ระดับน้ำใต้ดิน หากมีการเจาะบ่อบาดาลลงในชั้นหินอุ้มน้ำไม่มีแรงดันนี้จะพบว่าระดับน้ำในบ่อจะมีระดับเดียวกันกับระดับน้ำบาดาลบริเวณข้างเคียง

2) ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน (Confined aquifer) หมายถึง ชั้นหินอุ้มน้ำที่มีชั้นหินกั้นน้ำปิดทับอยู่ หมายรวมถึงมีชั้นหินกั้นน้ำปิดทับเฉพาะด้านบนหรือมีทั้งปิดทับด้านบนและรองรับด้านล่าง ทำให้น้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำนี้อยู่ภายใต้แรงดันที่มากกว่าแรงดันบรรยากาศ หากทำการเจาะบ่อบาดาลผ่านชั้นหินกั้นน้ำเข้าไปในชั้นหินอุ้มน้ำนี้ จะพบว่าระดับน้ำในบ่อจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินหรือระดับน้ำของเขตอิมน้ำเสมอ เรียกแนวระดับสมมตินี้ว่า ระดับแรงดันน้ำ (Potentionmetric surface หรือ Piezometric surface)

3) ชั้นหินอุ้มน้ำปลอม (Perched aquifer) หมายถึง ชั้นหินอุ้มน้ำที่วางตัวอยู่บนชั้นหินเนื้อแน่น และอยู่ในระดับที่เหนือกว่าเขตอิมน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีชั้นหินที่น้ำซึมผ่านได้ยากในเขตอิมอากาศ และวางตัวอยู่ในลักษณะโค้งงอคล้ายแอ่ง เมื่อน้ำฝนซึมลงจากผิวดิน น้ำบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้เหนือชั้นหินเนื้อแน่นนั้น โดยระดับน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำปลอม เรียกว่า ระดับน้ำใต้ดินปลอม

4.2.2 ชั้นหินกั้นน้ำ (Confining layer) หมายถึง ชั้นหินที่เนื้อหินเป็นวัสดุกั้นน้ำ มีคุณสมบัติไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านหรือซึมผ่านได้น้อย และวางตัวปิดหรือกั้นชั้นหินอุ้มน้ำ หรืออาจวางตัวอยู่ทั้งด้านบนและรองรับด้านล่างของชั้นหินอุ้มน้ำ

1) ชั้นหินกั้นน้ำ (Aquifuge) หมายถึง ชั้นหินเนื้อแน่นและไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (Impermeable) หรือปล่อยน้ำออกมา เนื่องจากไม่มีช่องว่างที่ต่อเนื่องกัน เช่น ชั้นหินแกรนิต

2) ชั้นหินซับน้ำ (Aquiclude) หมายถึง ชั้นหินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้าง (Semi impermeable) สามารถดูดซับน้ำและกักเก็บไว้ได้อย่างช้าๆ เนื่องจากช่องว่างที่มีอยู่มีขนาดเล็กมาก

3) ชั้นหินต้านน้ำ (Aquitard) หมายถึง ชั้นหินที่มีคุณสมบัติชะลอความเร็วของการไหลหรือต้านการไหลของน้ำใต้ดิน แต่ไม่ป้องกันการไหลผ่านของน้ำใต้ดินจากชั้นหินอุ้มน้ำหนึ่ง

ไปยังอีกชั้นหนึ่งที่อยู่ต่อเนื่องติดกันได้ โดยปกติหมายถึงชั้นหินกั้นน้ำที่อยู่ติดกับชั้นหินอุ้มน้ำเดี่ยว หรือชั้นหินอุ้มน้ำที่แทรกสลับกันหลายชั้น กล่าวคือน้ำใต้ดินสามารถไหลผ่านชั้นต้านน้ำนี้ได้แต่ด้วยอัตราที่ช้ามาก

4.3 คุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำ

คุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำเกี่ยวข้องกับขนาด รูปร่าง ปริมาณ การวางตัว และการติดต่อถึงกันและกันของช่องว่างในชั้นหินอุ้มน้ำ โดยมีคุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำที่สำคัญ ดังนี้

4.3.1 ความพรุน (Porosity; n) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของหินทั้งหมด

4.3.2 ประสิทธิภาพในการจ่ายน้ำ (Specific yield; S_y) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของน้ำที่จ่ายออกมาหรือถูกดึงออกมาจากหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก ต่อปริมาตรของหินทั้งหมด

4.3.3 ประสิทธิภาพในการดูดค้าง (Specific retention; S_r) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรของน้ำที่ตกค้างหรือดูดค้าง จากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงต่อปริมาตรของหินทั้งหมด

4.3.4 สัมประสิทธิ์ของการยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity; K) หมายถึง อัตราการไหลของน้ำผ่านวัตถุตัวกลางที่มีพื้นที่หน้าตัด หนึ่งหน่วย ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของน้ำ ภายใต้ลาดชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) หนึ่งหน่วย แสดงเป็นสมการดังนี้

$$K = \frac{Q}{A(dh/dl)} \quad (11)$$

เมื่อ

K	คือ สัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (L/T)
Q	คือ อัตราการไหล (L^3/T)
A	คือ พื้นที่ (L^2)
(dh/dl)	คือ ลาดชลศาสตร์ (L/L)

4.3.5 สัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำ (Transmissivity; T) หมายถึง อัตราการไหลของน้ำผ่านชั้นหินอุ้มน้ำที่มีพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย แสดงเป็นสมการดังนี้

$$T = Kb \quad (12)$$

เมื่อ

- T คือ สัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำ (L^2/T)
 K คือ สัมประสิทธิ์ของการยอมให้น้ำซึมผ่าน (L/T)
 b คือ ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ (L)

4.3.6 สัมประสิทธิ์ของการกักเก็บ (Storativity; S) หมายถึง ปริมาณของน้ำซึ่งชั้นหินอุ้มน้ำสามารถปล่อยออกมาหรือเก็บไว้ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย เมื่อระดับน้ำลดหรือเพิ่มหนึ่งหน่วย และการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage, S_s) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่ถูกปล่อยออกมาหรือกักเก็บเข้าไปต่อปริมาตรของชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

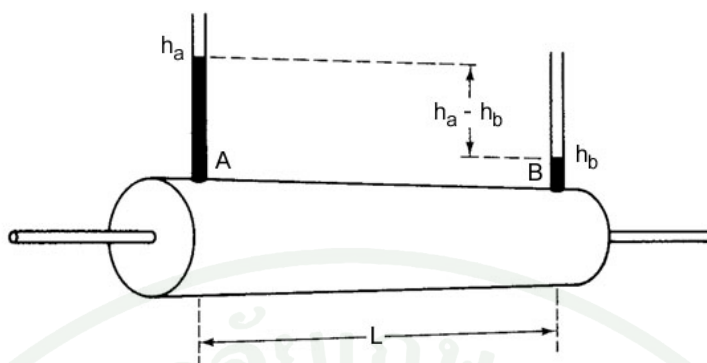
4.4 ทฤษฎีการไหลของน้ำใต้ดิน

ความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดินสามารถคำนวณได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) โดยกล่าวว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน จะแปรผกผันกับการลดลงของความดันชลศาสตร์ (Head loss) และแปรผันกับระยะทางหรือความยาวที่น้ำไหลผ่าน นอกจากนั้น ปริมาณการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic conductivity, K) ของวัสดุนั้นๆ แสดงเป็นสมการดังนี้

$$Q = -KA \left(\frac{h_a - h_b}{L} \right) = -KA \frac{\partial h}{\partial l} \quad (13)$$

เมื่อ

- Q คือ อัตราการไหล [LT^{-1}]
 K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน [LT^{-1}]
 A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล [L^2]
 $h_a - h_b$ คือ การลดลงของความดันชลศาสตร์ (Head loss) [L]
 L คือ ระยะทางของการไหล [L]
 $\frac{\partial h}{\partial l}$ คือ ค่าความแตกต่างของเฮดของน้ำต่อหน่วยระยะทาง (Hydraulic gradient,
 i) ระหว่างจุด 2 จุดที่น้ำไหลผ่าน



ภาพที่ 9 การทดลองตามกฎของดาร์ซี

ที่มา: Fetter, 2001

จากสมการดาร์ซีอาจเขียนรูปของอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่เป็นอัตราการไหลจำเพาะ หรือเรียกว่า ความเร็วดาร์ซี (Darcy velocity) ดังสมการ ความเร็วในการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความลาดชันชลศาสตร์ อย่างไรก็ตามความเร็วการไหลที่ได้จากสมการ ใช้ได้ ในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ หรือ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านหน้าตัดทั้งหมด ซึ่งในสภาพการ ไหลผ่านชั้นน้ำใต้ดินนั้นเป็นการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลางที่เป็นของแข็ง ดังนั้นความเร็วการไหล ของน้ำที่แท้จริง หรือ ความเร็วของการไหลซึม (Seepage velocity) สามารถคำนวณเป็นค่าความเร็ว เฉลี่ยที่ปริมาณน้ำทั้งหมดไหลผ่านช่องว่างของชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นรูพรุน ดังสมการ

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial l} \quad (14)$$

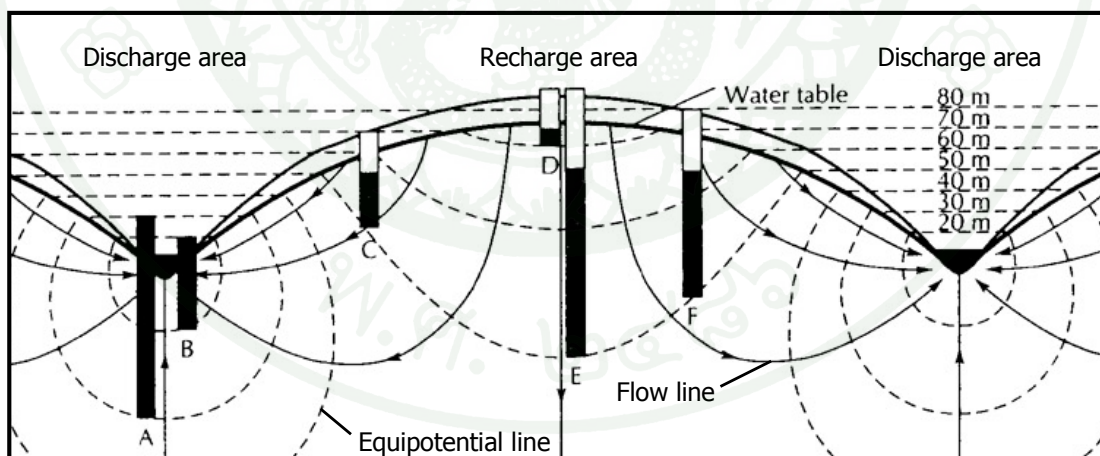
$$v = \frac{K}{n_e} \cdot \frac{\partial h}{\partial l} \quad (15)$$

เมื่อ

v	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในช่องว่าง [LT^{-1}]
K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน [LT^{-1}]
n_e	คือ	ความพรุนที่ต่อเนื่องในชั้นดิน
$\frac{\partial h}{\partial l}$	คือ	ค่าความแตกต่างของเฮดของน้ำต่อหน่วยระยะทาง (Hydraulic gradient, i) ระหว่างจุด 2 จุดที่น้ำไหลผ่าน

แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินผ่านตัวกลาง เรียกว่า ตาข่ายการไหล (Flow nets) ซึ่งประกอบด้วยเส้นสมมติ 2 เส้นประสานกันเป็นรูปตาข่าย คือ เส้นทิศทางการไหล (Flow lines) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านตัวกลาง และ เส้นระดับแรงดันเท่ากัน (Equipotential lines) แสดงบริเวณที่มีแรงดัน (Pressure head) เท่ากัน โดยตัดกับเส้นทิศทางการไหลเป็นมุมฉาก และพื้นที่ระหว่างเส้นทิศทางการไหล 2 เส้นที่อยู่ติดกัน เรียกว่า ช่องการไหล (Flow channel) ทั้งนี้ ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจะมีเคลื่อนที่จากพื้นที่รับน้ำ (Recharge area) ไปสู่พื้นที่จ่ายน้ำ (Discharge area)

รูปแบบการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำไม่มีแรงดันหรือน้ำใต้ดินระดับตื้นมีลักษณะ คือ พื้นที่รับน้ำเป็นพื้นที่ที่อยู่ในระดับสูง ส่วนพื้นที่จ่ายน้ำเป็นพื้นที่ที่อยู่ในระดับต่ำกว่า พื้นที่รับน้ำ มักมีเขตสัมผัสอากาศหนากว่าพื้นที่จ่ายน้ำ เส้นระดับน้ำใต้ดิน (Water table contour) จะมีลักษณะโค้งคว่ำ ส่วนพื้นที่จ่ายน้ำจะมีลักษณะโค้งหงาย ในชั้นหินอุ้มน้ำที่มีคุณสมบัติเหมือนเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous aquifer) ทิศทางการไหลในบริเวณพื้นที่รับน้ำมีทิศทางไหลลง ส่วนบริเวณพื้นที่จ่ายน้ำมีทิศทางไหลขึ้น โดยบริเวณกึ่งกลางหรือจุดสูงสุดของเส้นระดับน้ำใต้ดิน คือ สันปันน้ำบาดาล (Groundwater divide) ซึ่งเป็นบริเวณที่แบ่งแยกแอ่งน้ำใต้ดินทั้งสองออกจากกัน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ทิศทางการไหลและรูปแบบการไหลของน้ำใต้ดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Fetter, 2001

4.5 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

กระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินที่สำคัญ 3 กระบวนการ (Spitz and Moreno, 1996) ดังนี้

Advection เป็นกระบวนการพามวลสารไปพร้อมกับการเคลื่อนที่มวลน้ำ อันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับน้ำ โดยผ่านไปตามรูพรุนของชั้นหินที่มวลน้ำมีการไหลผ่าน โดยชั้นน้ำที่มีค่าการซึมผ่านได้สูง เช่น ทราย หรือ กรวด จะมีการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้เป็นกระบวนการหลัก

Dispersion เป็นกระบวนการที่มวลสารมีการแพร่กระจายไปในมวลน้ำ เคลื่อนที่แพร่กระจายไปในทิศทางเดียวกันและในแนวขวางของทิศทางการไหล ซึ่งเป็นผลจากความเร็วของการไหลของน้ำและการแพร่ (Diffusion) จากบริเวณที่ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ

Sorption มีความหมายรวมถึงกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และการคาย (Desorption) การดูดซับเป็นกระบวนการที่มวลสารถูกหน่วงเหนี่ยวให้เคลื่อนที่ช้าลง หรือลดความเข้มข้นลงด้วยการยึดติดของโมเลกุล หรือพันธะทางเคมี กับผิวของอนุภาคของชั้นหินให้น้ำ ส่วนการคายเป็นการเพิ่มขึ้นของมวลสารในน้ำเนื่องจากการสลายตัวจากสถานะที่เป็นของแข็ง ระดับการ Sorption ของทั้งสองกระบวนการที่เป็นผลจากกระบวนการทางธรณีเคมี เช่น pH อุณหภูมิ และสารองค์ประกอบอื่นๆ ของชั้นหินให้น้ำ

5. แบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน

แบบจำลองน้ำใต้ดินเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ แบบจำลองน้ำใต้ดินสำเร็จรูปประเภท MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model) ได้ถูกเขียนขึ้นและมีการพัฒนาโดย U.S Geological Survey (USGS) เพื่ออธิบายและทำนายพฤติกรรมของระบบน้ำใต้ดิน โดยโปรแกรมรุ่นแรก (Original version) ของ MODFLOW-88 หรือ MODFLOW-96 สามารถจำลองสภาพน้ำใต้ดินจากผลของบ่อ แม่น้ำ การระบายน้ำ การกำหนดขอบเขตความดันน้ำ (Head) สภาพการเติมน้ำ และการคายระเหยน้ำ ซึ่งนับจากมีการเผยแพร่โปรแกรมสู่สาธารณะก็มีการพัฒนาชุดคำสั่ง (Codes) ออกมากมาย และรวมแต่ละชุดคำสั่งเข้าด้วยกัน เรียก ชุดข้อมูล (Packages) ชุดข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาผนวกกัน เรียกว่า แบบจำลอง (Model) หรือโปรแกรม (Program) โดยชุดข้อมูลแต่ละชุดจะทำหน้าที่ข้อมูล ประมวลผลและแสดงลักษณะของแต่ละตัวแปรทางอุทกธรณีวิทยาที่กำหนดลงไป

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MODFLOW นั้นทำการคำนวณการไหลของน้ำ (Flow) และทำงานร่วมกับโปรแกรมชุดคำสั่งอื่นซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ โปรแกรมแบบชุดคำสั่งเดี่ยว และโปรแกรมแบบชุดคำสั่งรวม กล่าวคือ โปรแกรมแบบชุดคำสั่งเดี่ยวจะมีชุดข้อมูลแยกจาก MODFLOW แต่เชื่อมโยงกันด้วยไฟล์ข้อมูล ได้แก่ Advective transport model PMPATH, Solute transport model MT3D และ MT3DMS, Parameter estimation program PEST และ UCODE ส่วนโปรแกรมแบบชุดคำสั่งรวมที่ทำงานร่วมกับ MODFLOW ได้แก่ Solute transport model MOC3D และ Inverse model MODFLOWP เป็นต้น (Chang and Kinzelbach, 2001)

แบบจำลองน้ำใต้ดินเชิงคณิตศาสตร์ประเภท MODFLOW นั้นมีการคำนวณด้วยวิธีการประมาณค่าทางตัวเลขแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) ซึ่งสามารถจำแนกแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater flow model) และแบบจำลองการเคลื่อนของมวลสาร (Fate and transport model) โดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

5.1 แบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน

สมการหลัก (Governing equation) ที่แสดงการไหลของน้ำใต้ดินนั้นเป็นการประยุกต์ใช้สมการจากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านชั้นหินอุ้มน้ำ (ตัวกลางที่มีความพรุน) แบบ 3 มิติ ดังสมการที่ 16

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_s \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (16)$$

เมื่อ

K_x, K_y, K_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ในแนว x, y, z [$L T^{-1}$]

h คือ ค่าเฮดหรือระดับแรงดันของน้ำ (Hydraulic head) [L]

W คือ อัตราการสูบหรือสูญเสีย (Sinks, -) หรือ อัตราการเพิ่มเติม (Sources, +) ต่อระบบ [T^{-1}]

S_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (Specific storage) ในแนว x, y, z [$L T^{-1}$]

t คือ เวลา [T]

$\frac{\partial h}{\partial t}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของเฮดต่อเวลา [$L T^{-1}$]

5.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

สมการการเคลื่อนที่ของมวลสาร (Mass transport equation) ขึ้นอยู่กับผลของการจำลองการไหลของน้ำเป็นหลัก ร่วมกับการคำนวณลักษณะการแพร่และการกระจายของสารนั้น โดยอัตราความเข้มข้นของมวลสารที่เคลื่อนที่ในเวลาต่างๆ คำนวณจากสมการอนุพันธ์เชิงซ้อน (Partial differential equation) (Zheng, 1996) ดังสมการที่ 17

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) + \frac{q_s}{n} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (17)$$

เมื่อ

- C คือ ความเข้มข้นของมวลสารที่ละลายในน้ำ [ML^{-3}]
 t คือ เวลา [T]
 x_i คือ ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไปในแนวแกน x [L]
 D_{ij} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]
 V_i คือ ความเร็วเชิงเส้น (Linear pore water velocity) [LT^{-1}]
 q_s คือ อัตราของน้ำที่ไหลเข้า (Sources, +) หรือไหลออก (Sinks, -) ผ่านบ่อบาดาล ต่อหนึ่งหน่วยปริมาณของชั้นหินอุ้มน้ำ [T^{-1}]
 n คือ ความพรุนของวัตถุตัวกลาง
 C_i คือ ความเข้มข้นของมวลสาร ณ จุดที่เข้าสู่แหล่งน้ำ [ML^{-3}]
 R_k คือ มวลสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในขณะที่มีการเคลื่อนที่ [$\text{L}^{-3}\text{T}^{-1}$]

5.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน

การประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำใต้ดินเชิงคณิตศาสตร์สามารถจำแนกวัตถุประสงค์ของการจำลอง ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) ดังนี้

1) แบบจำลองใช้วิเคราะห์ระบบการไหลในกรณีสมมติในทางทฤษฎี (Hypothetical approach) เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการตรวจสอบแนวทางในการศึกษาของสภาพพื้นที่นั้นๆ ซึ่งไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบกับข้อมูลสนาม

2) แบบจำลองเพื่อใช้ศึกษาระบบโครงสร้างของพื้นที่ (Interpretive model) เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนระบบการเก็บข้อมูลวิเคราะห์ระบบ หรือความสัมพันธ์ของข้อมูลต่างๆ ของพื้นที่นั้นๆ ซึ่งไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบกับข้อมูลสนาม

3) แบบจำลองเพื่อใช้คาดคะเนหรือพยากรณ์ (Prediction model) เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อหวังผลในการคาดคะเน ถือเป็นการจำลองที่มีขั้นตอนยุ่งยากและต้องการข้อมูลที่สมบูรณ์ที่สุด เช่น การจำลองเพื่อคาดคะเนระดับน้ำ คุณภาพน้ำ ปริมาณน้ำ หรือการแพร่กระจาย

ของสารพิษในน้ำ ดังนั้นแบบจำลองชนิดนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับค่าตัวแปรต่างๆ และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลภาคสนาม

5.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน

แบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่ใช้คำนวณและจำลองสภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เพื่อประเมินสถานการณ์ปัจจุบันและคาดการณ์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคต การประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์น้ำใต้ดินได้ถูกใช้เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนที่แพร่กระจายของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินมากที่สุด โดยสรุปลำดับการพัฒนาแบบจำลองน้ำใต้ดินเป็น 9 ขั้นตอนดังนี้ (ทวิศักดิ์, 2546 และ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)

1) การกำหนดวัตถุประสงค์ของการจำลอง เป็นการกำหนดกรอบงานและคัดกรองความละเอียดถูกต้องของข้อมูล เช่น การจำลองสภาพน้ำใต้ดิน การคำนวณสมดุลน้ำใต้ดิน เนื่องจากการสูบใช้ การจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือและการแทรกหนูนของน้ำเค็ม การจำลองสภาพการไหลและการแพร่กระจายของสารมลพิษชั้นน้ำใต้ดิน หรือการจำลองเพื่อประเมินผลกระทบและความเสี่ยงจากสารปนเปื้อน เป็นต้น

2) การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เป็นการรวบรวมข้อมูลเพื่อแสดงแนวคิดรวบยอดของพื้นที่ที่ต้องการจำลอง โดยต้องมีการกำหนดขอบเขตของพื้นที่ศึกษา แสดงข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะอุทุนิยมและอุทกวิทยา ลักษณะทางธรณีและอุทกธรณีวิทยา และข้อมูลของการใช้น้ำใต้ดิน เป็นต้น

3) การเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถออกแบบ พัฒนาโปรแกรมเอง หรือใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มีการทดสอบและปรับแก้จากการเปรียบเทียบผลการทดลองอย่างเป็นที่น่าเชื่อถือ ลักษณะของโปรแกรมจะประกอบด้วย โปรแกรมการป้อนข้อมูล (Pre processing) และโปรแกรมแสดงผล (Post processing) ในการเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้น ผู้ใช้ควรเข้าใจในพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ วิธีคำนวณและข้อจำกัดของโปรแกรมนั้นๆ ควรต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของงาน ระดับความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ความสะดวกของการใช้งาน และราคาของโปรแกรมเป็นหลัก

4) การออกแบบแบบจำลอง เมื่อสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว ต้องทำการแปลงข้อมูลเชิงพื้นที่ออกเป็นหน่วยเล็กๆ (Discretization) ซึ่ง

สามารถทำได้ 2 รูปแบบตามวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลข คือ วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) ทำการแบ่งพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือกริด และ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ทำการแบ่งพื้นที่เป็นรูปสามเหลี่ยมหรือหลายเหลี่ยม จากนั้นกำหนดเงื่อนไขของชั้นเวลาและการคำนวณ (Time step) และสภาพเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ (Boundary conditions)

5) การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ความอ่อนไหว ผลการจำลองที่ได้ต้องนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากจุดสังเกตการณ์ในภาคสนามที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน หากผลการจำลองไม่ตรงกับค่าภาคสนามจะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแน่นอน เช่น สัมประสิทธิ์ของการซึมได้ ปริมาณการเพิ่มเติมน้ำบาดาล และสภาพขอบเขตของแบบจำลองที่เห็นว่าเหมาะสมกว่า การปรับแก้ข้อมูลจำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจระบบอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่เป็นอย่างดี และต้องมีการปรับค่าแบบ Trial and error และหากผลการจำลองมีความแตกต่างจากข้อมูลภาคสนามมาก อาจต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลภาคสนามแล้วจึงทำการปรับแก้ค่าอีกครั้งหนึ่ง

6) การตรวจสอบความถูกต้องและปรับปรุงแบบจำลอง ทำเพื่อแสดงว่าแบบจำลองนั้นสามารถเป็นตัวแทนของระบบอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาได้อย่างถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนามชุดใหม่ หากได้ผลการจำลองไม่แตกต่างมาก ก็ไม่จำเป็นต้องปรับแก้ค่าตัวแปรอีก และสามารถนำไปใช้คาดคะเนผลได้

7) การทำนายผลและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว เป็นการทำนายผลหรือคาดคะเนผลการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่อาจเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มเติมน้ำหรือการสูบน้ำ ถ้ามีการวางแผนการใช้ข้อมูลในอนาคตร่วมกับการทำนายผลและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบางชนิดจะทำให้ผลการจำลองเปลี่ยนไปมาก ซึ่งความอ่อนไหวของค่าตัวแปรในแบบจำลองเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละพื้นที่ ดังนั้น การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะทำให้ทราบถึงช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ และเป็นการตรวจสอบข้อมูลในการศึกษาและวิเคราะห์ในระยะยาว (Monitoring program)

8) แสดงผลจำลอง เพื่อใช้เป็นสื่อให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ที่มาของข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบ การปรับแก้ค่า การวิเคราะห์ความอ่อนไหว ผลการคำนวณเชิงตัวเลขและเชิงพื้นที่ ระดับความถูกต้องของผลการจำลอง ข้อจำกัดข้อเสนอแนะ และผลสรุปตามวัตถุประสงค์ของการจำลอง

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาแบบจำลอง คือ ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยแบบฝังกลบ เทศบาลตำบลแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี โดยทำการสำรวจและวิเคราะห์สภาพพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลทุติยภูมิจากโครงการประเมินศักยภาพด้านคุณภาพน้ำบาดาล วางระบบติดตามการปนเปื้อนและวางแผนรายละเอียดการฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2549) ดังนี้

1. ที่ตั้งและอาณาเขต

พิกัดที่ตั้งของจุดกำเนิดมลสารมีตำแหน่งพิกัด x คือ 719,700 เมตร UTME และ ตำแหน่งพิกัด y คือ 1,445,263 เมตร UTMN ตั้งอยู่ในพื้นที่ตำบลบึง อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยมีอาณาเขตใกล้เคียงกับพื้นที่หลุมฝังกลบ ดังนี้

ทิศเหนือ ติดต่อกับ ห้วยกระบก ห้วยบึง อ่างเก็บน้ำห้วยสะพาน

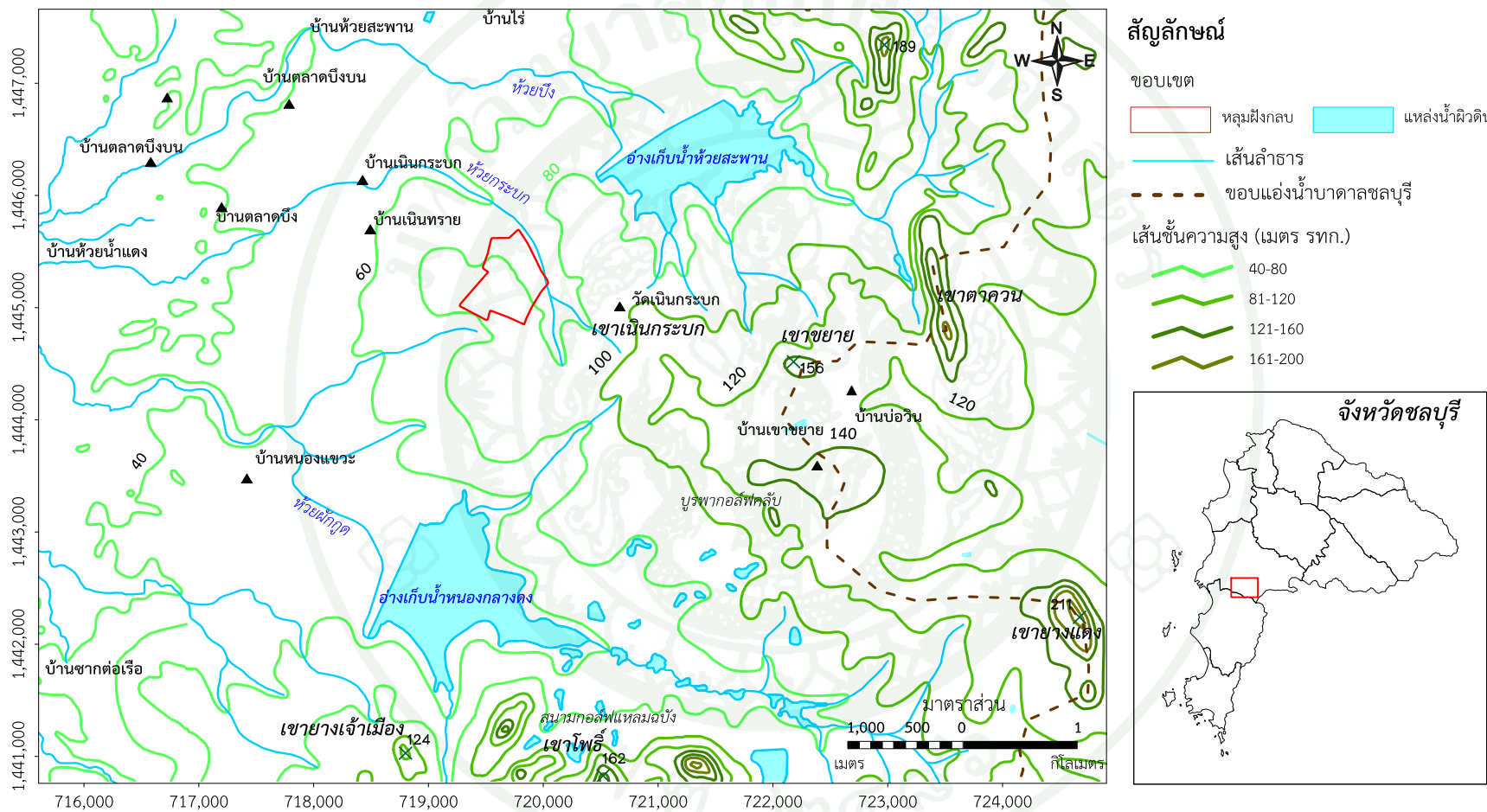
ทิศใต้ ติดต่อกับ ห้วยผักกูด อ่างเก็บน้ำหนองกลางดง หมู่บ้านหนองแขวะ

ทิศตะวันออก ติดต่อกับ เขาเนินกระบก วัดเนินกระบก

ทิศตะวันตก ติดต่อกับ หมู่บ้านเนินทราย หมู่บ้านเนินกระบก

2. ลักษณะภูมิประเทศ

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บนพื้นที่เนินเขาระดับความสูงประมาณ 70-80 เมตร รทก. (ระดับน้ำทะเลปานกลาง) โดยมีความลาดเทของพื้นที่ในแนวทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ทางทิศตะวันออกมีลักษณะเป็นพื้นที่ภูเขาที่มีระดับความสูงระหว่าง 120-200 เมตร รทก. ซึ่งวางตัวเป็นสันปันน้ำในแนวเหนือ-ใต้ มีจุดสูงสุดของพื้นที่เท่ากับ 212 เมตร รทก. ที่เขายายแดง ส่วนทางทิศตะวันตกเป็นที่ราบชายฝั่งทะเลไปจรดกับอ่าวบางละมุง ระดับความสูงพื้นที่ประมาณ 30-40 เมตร รทก.



ภาพที่ 12 ที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศบริเวณพื้นที่ศึกษา

3. ลักษณะอุตุนิยมวิทยา

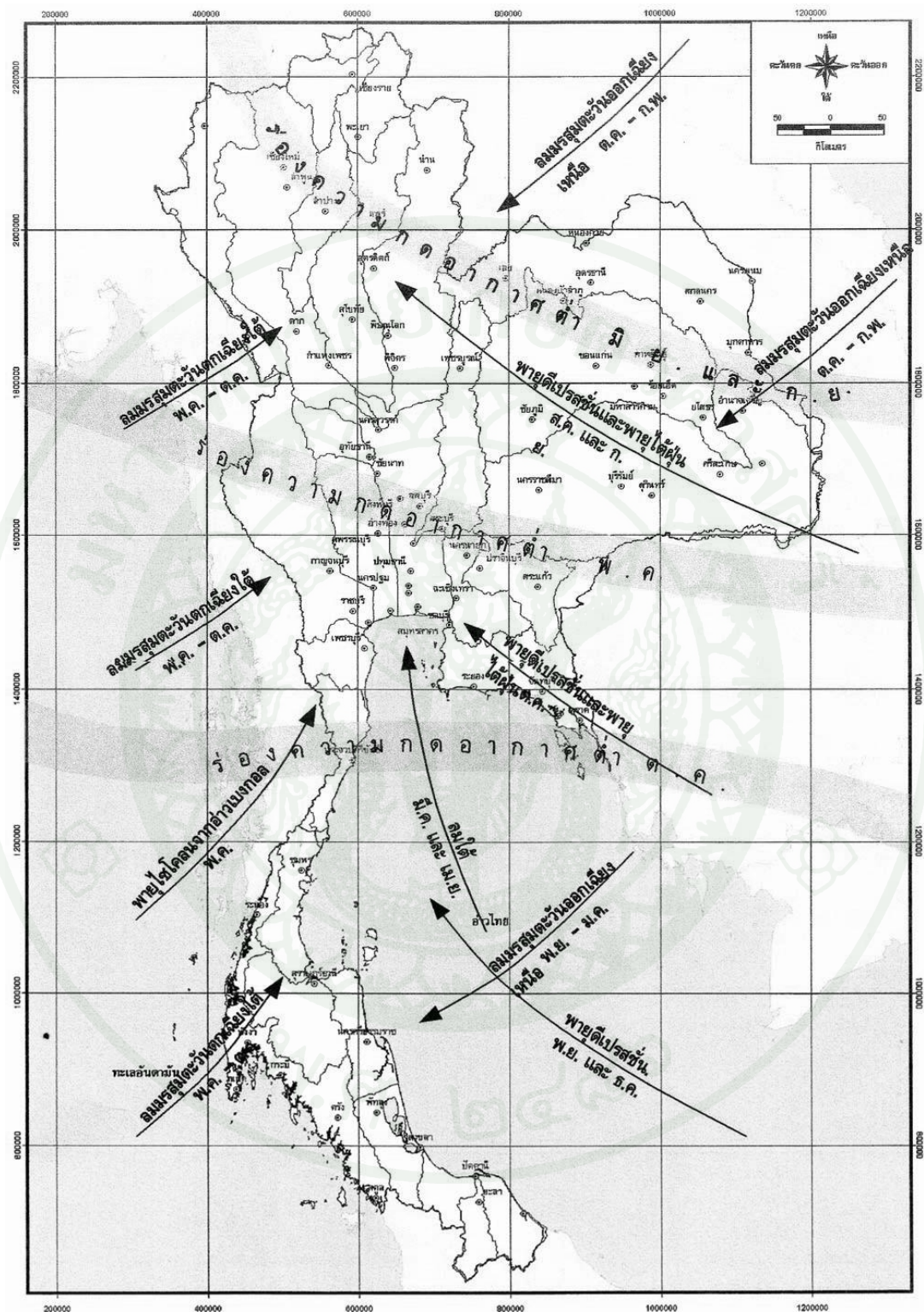
พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในภูมิภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม จะได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดพาความชื้นจากมหาสมุทรอินเดีย และพัดผ่านอ่าวไทยที่ทำให้เกิดฝนตก และในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์จะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดพาความกดอากาศเย็นจากประเทศจีนลงมา และในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน เป็นช่วงเปลี่ยนมรสุม จะมีหย่อมความกดอากาศต่ำที่ทำภูมิภาคประเทศไทยตอนมีอากาศร้อน สลับกับการเกิดพายุฤดูร้อน นอกจากนี้อิทธิพลของพายุและดีเปรสชันที่เคลื่อนตัวมาจากทะเลจีนใต้ ในช่วงเดือนตุลาคมนั้นจะทำให้เกิดฝนหนักในพื้นที่ ดังแสดงผังสรุปอิทธิพลของสภาวะอากาศภูมิภาคของประเทศไทยตามภาพที่ 13

3.1 สภาพภูมิอากาศเฉลี่ยในคาบ 30 ปี

สถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งครอบคลุมพื้นที่ศึกษามีทั้งสิ้น 6 สถานี คือ สถานีตรวจอากาศชลบุรี สถานีตรวจอากาศเกาะสีชัง สถานีตรวจอากาศพัทยา สถานีตรวจอากาศสัตหีบ สถานีตรวจอากาศแหลมฉบัง และสถานีตรวจอากาศระยอง โดยสรุปลักษณะสภาพอากาศในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2514-2543) ดังตารางที่ 7 และอัตราการระเหยออกจากแหล่งน้ำผิวดินในคาบ 30 ปี ในบางสถานีที่ทำการบันทึก ดังตารางที่ 8

3.2 การกระจายปริมาณฝนเชิงพื้นที่

การวิเคราะห์การกระจายปริมาณฝนเชิงพื้นที่ คือ การสร้างเส้นชั้นปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย พบว่า บริเวณครอบคลุมพื้นที่ศึกษามีปริมาณฝนประมาณ 1,100-1,200 มิลลิเมตรต่อปี แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 อิทธิพลของสภาวะอากาศระดับภูมิภาคตามฤดูกาลของประเทศไทย

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2549)

ตารางที่ 7 ข้อมูลสภาพอากาศเฉลี่ยในคาบ 30 ปี

ดัชนีตรวจวัด		สถานี					
		ชลบุรี (48459)	เกาะสีชัง (48460)	พทยา (48461)	สัตหีบ (48463)	แหลมฉบัง (48477)	ระยอง (48478)
ปริมาณฝน (มม.)	สูงสุด	281.7 (ก.ย.)	289.4 (ก.ย.)	240.8 (ต.ค.)	273.3 (ต.ค.)	283.8 (ก.ย.)	263.1 (ต.ค.)
	ต่ำสุด	4.7 (ธ.ค.)	7.5 (ธ.ค.)	6.4 (ธ.ค.)	8.6 (ธ.ค.)	2.7 (ธ.ค.)	4.6 (ธ.ค.)
	รายปีเฉลี่ย	1,298.8	1,254.2	1,123.8	1,286.0	1,199.5	1,401.3
ปริมาณการระเหย จากผิวน้ำ (มม.)	สูงสุด	178.8 (มี.ค.)	-	178.8 (มี.ค.)	-	-	170.8 (มี.ค.)
	ต่ำสุด	127.6 (ต.ค.)		114.9 (ต.ค.)			115.2 (ก.ย.)
	รายปีเฉลี่ย	1,808.0		1,800.7			1,732.5
อุณหภูมิ (ซ)	สูงสุด	29.9 (เม.ย.)	29.7 (เม.ย.)	29.2 (เม.ย.)	29.9 (เม.ย.)	34.0 (เม.ย.)	29.9 (เม.ย.)
	ต่ำสุด	25.9 (ธ.ค.)	26.0 (ธ.ค.)	25.6 (ธ.ค.)	25.5 (ธ.ค.)	31.0 (ธ.ค.)	25.8 (ธ.ค.)
	รายปีเฉลี่ย	28.1	28.1	27.7	27.9	32.3	28.2
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	สูงสุด	80.0 (ก.ย.)	81.0 (ก.ย.)	84.0 (ต.ค.)	82.0 (ต.ค.)	-	83.0 (ก.ย.)
	ต่ำสุด	64.0 (ธ.ค.)	66.0 (ธ.ค.)	70.0 (ธ.ค.)	69.0 (ธ.ค.)		69.0 (ธ.ค.)
	รายปีเฉลี่ย	73.0	75.0	77.0	76.0		77.0
ความเร็วลม (นอต)	สูงสุด	3.6 (มี.ค.)	6.1 (ธ.ค.)	6.5 (ธ.ค.)	6.0 (มี.ย.)	-	6.9 (ส.ค.)
	ต่ำสุด	2.2 (ก.ย.)	3.2 (ก.ย.)	3.9 (ก.ย.)	3.6 (ต.ค.)		2.3 (ต.ค.)

ตารางที่ 7 (ต่อ)

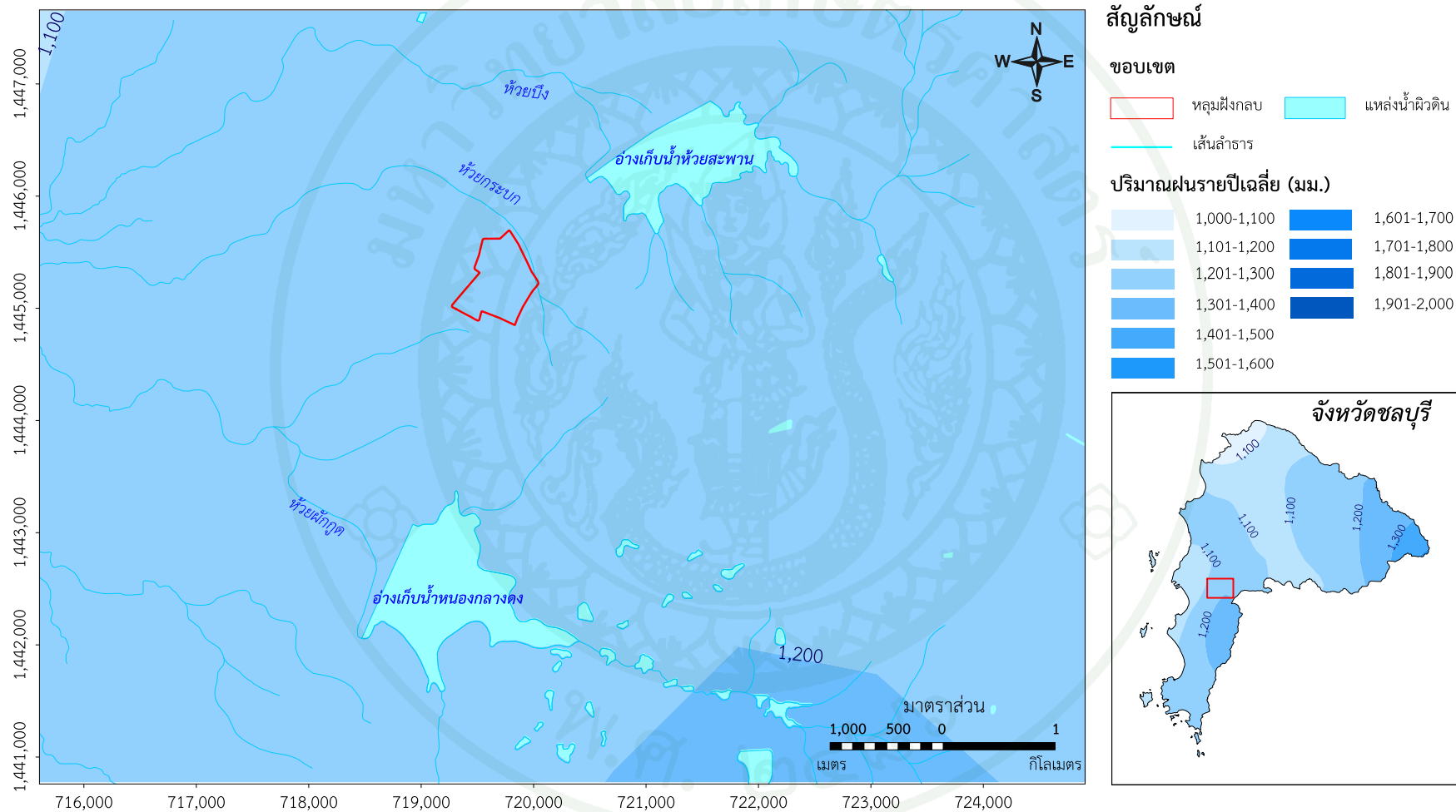
ดัชนีตรวจวัด		สถานี					
		ชลบุรี	เกาะสีชัง	พทยา	สัตหีบ	แหลมฉบัง	ระยอง
		(48459)	(48460)	(48461)	(48463)	(48477)	(48478)
ความเค็ม (1-10)	สูงสุด	8.2	8.3	8.3	8.7	-	8.4
		(ส.ค.)	(ส.ค.)	(ส.ค.)	(ส.ค.)		(ส.ค.)
	ต่ำสุด	3.3	3.6	3.6	4.9		3.4
		(ธ.ค.)	(ม.ค.)	(ธ.ค.)	(ม.ค.)		(ธ.ค.)
รายปีเฉลี่ย		5.7	6.0	6.0	6.9		6.1

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2549)

ตารางที่ 8 อัตราการระเหยออกจากแหล่งน้ำผิวดินในคาบ 30 ปี

เดือน	อัตราการระเหยออกจากแหล่งน้ำผิวดิน (มม.)		
	ชลบุรี	พทยา	ระยอง
มกราคม	100.2	96.53	97.9
กุมภาพันธ์	99.5	100.59	98.3
มีนาคม	125.2	125.16	119.6
เมษายน	122.6	121.87	118.7
พฤษภาคม	113.6	115.29	104.0
มิถุนายน	107.2	113.26	99.2
กรกฎาคม	107.4	111.93	103.3
สิงหาคม	107.0	112.28	102.4
กันยายน	93.2	91.77	80.6
ตุลาคม	89.3	80.43	84.0
พฤศจิกายน	95.1	90.37	98.5
ธันวาคม	105.4	101.01	106.3
รายปี	1,265.6	1,260.5	1,212.8

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2549)



ภาพที่ 14 การกระจายปริมาณฝนเชิงพื้นที่บริเวณพื้นที่ศึกษา

4. ลักษณะอุทกวิทยา

4.1 ระบบลุ่มน้ำ

พื้นที่ศึกษามีที่ตั้งติดต่อกันใกล้เคียงกับพื้นที่ 2 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำบางปะกง และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ซึ่งสามารถแบ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยตามการจำนวน 25 ลุ่มน้ำของประเทศไทย (กรมชลประทาน, 2546) ได้ดังนี้

4.1.1 ลุ่มน้ำบางปะกง มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 7,978 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดนครนายก ชลบุรี ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และสระบุรี โดยมีขอบเขตลุ่มน้ำย่อยที่ติดต่อกันใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา ดังภาพที่ 15 ได้แก่

1) ลุ่มน้ำย่อยที่ราบแม่น้ำบางปะกง (รหัสลุ่มน้ำ 16.02) มีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 2,606 ตารางกิโลเมตร

2) ลุ่มน้ำย่อยคลองหลวง (รหัสลุ่มน้ำ 16.04) มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 779 ตารางกิโลเมตร

4.1.2 ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก มีพื้นที่รวมทั้งสิ้นประมาณ 13,829 ตารางกิโลเมตร วางตัวตามแนวทิศตะวันตก-ตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด โดยมีขอบเขตลุ่มน้ำย่อยที่ติดต่อกันใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา ดังภาพที่ 16 ได้แก่

1) ลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำประแสร์ (รหัสลุ่มน้ำ 18.05) มีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 2,139 ตารางกิโลเมตร

2) ลุ่มน้ำย่อยคลองใหญ่ (จังหวัดระยอง) (รหัสลุ่มน้ำ 18.06) มีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 1,621 ตารางกิโลเมตร

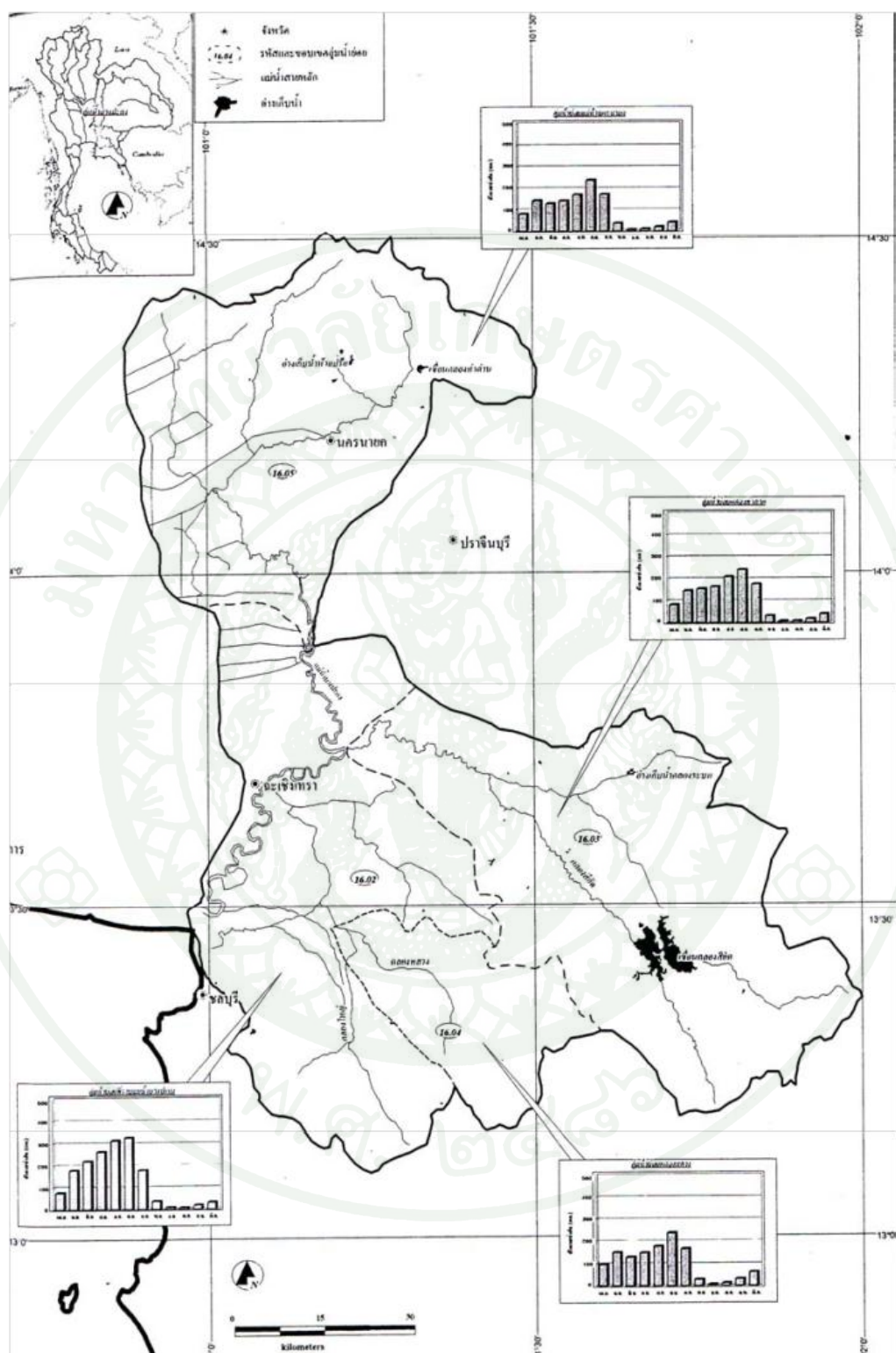
4.2 ปริมาณน้ำท่า

ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยในแต่ละลุ่มน้ำย่อยแสดงดังตารางที่ 9 และจากการวิเคราะห์ของกรมชลประทาน ได้ผลวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำต่อพื้นที่ คือ ลุ่มน้ำบางปะกง มีอัตราการให้ปริมาณน้ำรายปีเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 13.29 ลิตร/วินาที/ตารางกิโลเมตร และลุ่มน้ำชายฝั่งตะวันออก เป็นลุ่มน้ำที่มีอัตราการให้ปริมาณน้ำรายปีเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 29.76 ลิตร/วินาที/ตารางกิโลเมตร

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำย่อย

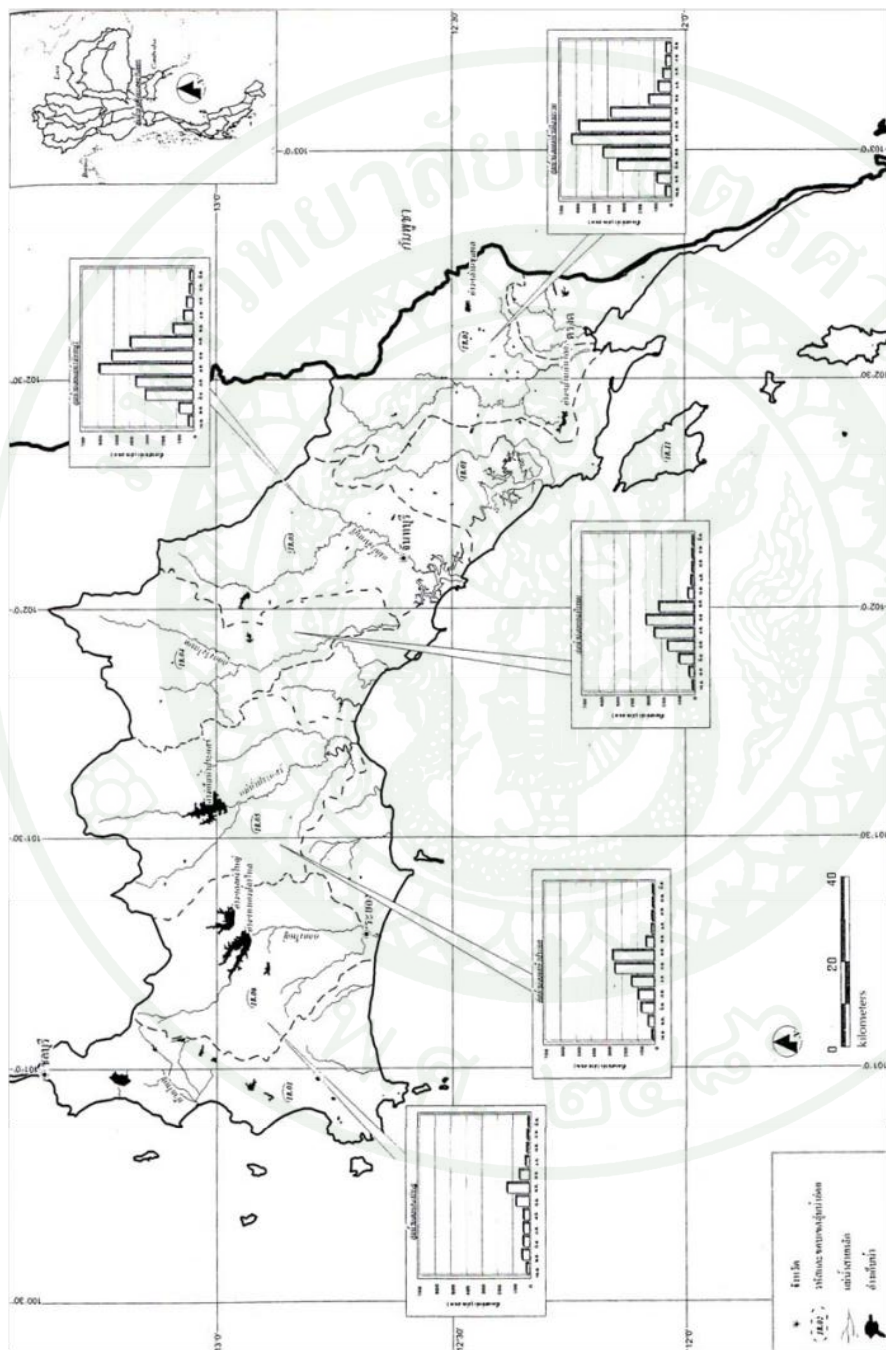
เดือน	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย (ล้านลูกบาศก์เมตร)			
	ลุ่มน้ำย่อย ที่ราบแม่น้ำบางปะกง	ลุ่มน้ำย่อย คลองหลวง	ลุ่มน้ำย่อย แม่น้ำประแสร์	ลุ่มน้ำย่อย คลองใหญ่
มกราคม	13.8	5.7	10.9	12.5
กุมภาพันธ์	33.6	17.6	5.5	5.4
มีนาคม	65.0	30.9	4.8	4.9
เมษายน	98.1	75.5	9.6	19.0
พฤษภาคม	154.6	178.7	33.7	43.3
มิถุนายน	133.5	218.6	79.8	35.2
กรกฎาคม	154.1	262.2	102.0	34.7
สิงหาคม	182.1	312.6	148.3	34.1
กันยายน	241.3	325.6	257.9	79.6
ตุลาคม	168.1	179.0	270.0	138.6
พฤศจิกายน	29.9	37.0	53.6	57.4
ธันวาคม	8.7	7.3	18.6	16.7
รายปี	1,282.8	1,650.6	994.6	481.3

ที่มา: กรมชลประทาน (2546)



ภาพที่ 15 ขอบเขตลุ่มน้ำบางปะกงและปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย

ที่มา: กรมชลประทาน (2546)



ภาพที่ 16 ขอบเขตลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออกและปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย

ที่มา: กรมชลประทาน (2546)

5. ลักษณะธรณีวิทยา

จังหวัดชลบุรี ตั้งอยู่บนพื้นที่ส่วนหนึ่งของหินฐานธรณีฐาน-ไทย (Shan-Thai Craton) ประกอบขึ้นด้วยหินหรือกลุ่มหินต่างๆ ที่มีอายุตั้งแต่ยุคพรีแคมเบรียนจนถึงปัจจุบัน และมีโครงสร้างทางธรณีวิทยาอันได้แก่รอยเลื่อน (Fault) ซึ่งมีทิศขนานกับแนวคดโค้ง ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และมีแนวรอยเลื่อนที่ต่อจากแนวรอยเลื่อนแม่ปิงในแนวตะวันออก-ตะวันตก บริเวณจังหวัดสระแก้ว รายละเอียดของหินหรือกลุ่มหินต่างๆ ดังกล่าวได้จากการศึกษาข้อมูลแผนที่ธรณีประเทศไทย มาตราส่วน 1:1,000,000 โดยเรียงลำดับอายุจากแก่สุดไปหาอ่อนสุด มีดังต่อไปนี้

1) หินอายุพรีแคมเบรียน (Precambrian, PE) ประกอบด้วย หินแปรเกรดสูง (High grade metamorphic rocks) ได้แก่ หิน ไนส์ (Gneiss) หินแอมฟิโบลิต (amphibolite) หินชีสต์ (schist) หินแคลซิลิเกต (calc-silicate rock) และ หินไบโอไทต์มาเบิล (biotite marble) พบแพร่กระจายตัวอยู่บริเวณ อำเภอบ่อทอง และอำเภอนองใหญ่

2) หินอายุไซลูเรียน-ดีโวเนียน (Silurian-Devonian Rock, SD) ประกอบด้วย หินแปรเกรดต่ำ (Low grade metamorphic rocks) หลายชนิด ได้แก่ หินควอร์ตไซต์ หินฟิลไลต์ หินชีสต์ พบแพร่กระจายตัวอยู่บริเวณอำเภอนองใหญ่ และอำเภอบ้านบึง

3) หินอายุคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous Rock, C) ประกอบด้วย หินทราย หินโคลน ปนเม็ดกรวด หินเชิร์ต หินดินดาน หินกรวดมน ส่วนใหญ่มีสีเทา เทาอมเขียว สีแดง พบทั่วไปทั้งทางด้านตะวันออกและตะวันตก โดยแพร่กระจายตัวในพื้นที่ อำเภอสัตหีบ และอำเภอศรีราชา

4) หินอายุเพอร์เมียน (Permian Rock, P) ประกอบด้วย หินปูนเนื้อหนา บางบริเวณมีหินดินดานแทรกสลับ พบแพร่กระจายตัวในพื้นที่อำเภอบ่อทอง และอำเภอเกาะจันทร์

5) ตะกอนร่วนยุคควอเตอร์นารี (Quaternary Deposits) ประกอบขึ้นด้วย ตะกอนทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว กรวดและเศษหินขนาดต่างๆ

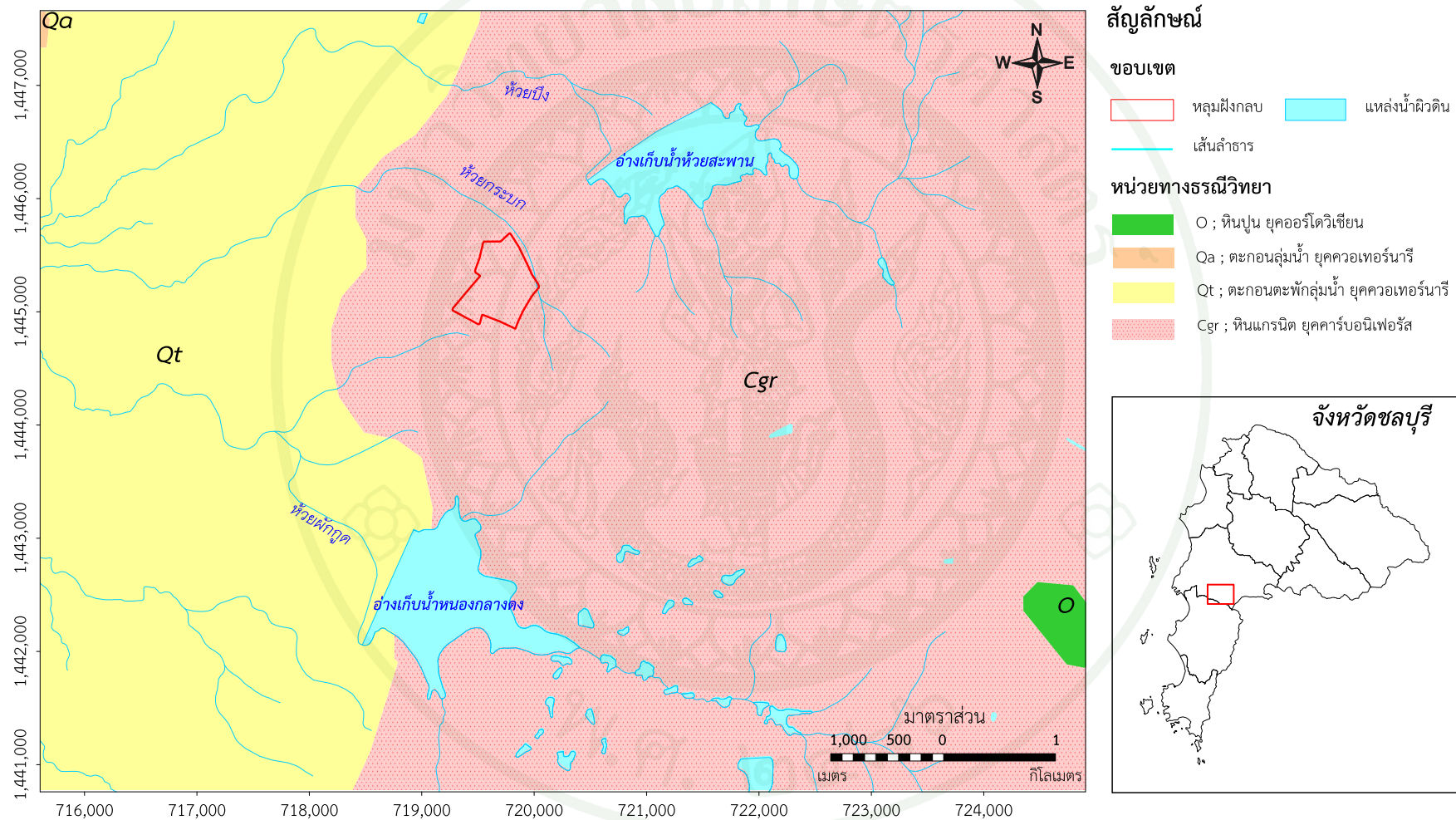
ตะกอนตะพักลำน้ำ (Terrace Deposits, Qt) มีอายุการตกสะสมตัวระหว่าง 1.6 ล้านปี ถึงประมาณ 100,000 ปีที่ผ่านมา ประกอบด้วย ตะกอนทรายปนกรวดปนดินเหนียว และทรายแป้ง สะสมตัวภายใต้สภาพตะกอนน้ำพา และตะกอนรูปพัด (Fluvial and Alluvial Fan Environments)

ตั้งแต่สมัยไพลโอซีนตอนปลายถึงสมัยโอโลซีน พบในภูมิภาคประเทศเป็นตะพักระดับสูง พบทั้งด้าน ตะวันออกและด้านตะวันตก ในเขตพื้นที่ อำเภอสัตหีบ อำเภอสรีราชา และอำเภอเมืองชลบุรี

ตะกอนน้ำพา (Flood-plain Deposits, Qa) ได้แก่ ตะกอนที่มีการสะสมตัวประมาณ 10,000 ปีที่ผ่านมา ประกอบด้วยชั้นตะกอนทราย กรวด ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งสะสมตัว ตามบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงและลำน้ำ (Flood Plain, Channels) และบริเวณเนินตะกอนรูปพัด (Alluvial Fan) หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของทางน้ำจากหุบเขาชันลงสู่ที่ราบ ตะกอนชุด นี้มีการสะสมตัวตั้งแต่สมัยโอโลซีนถึงปัจจุบัน ตะกอนน้ำพาแผ่ขยายตัวอยู่ทางด้านตะวันตกของพื้นที่ ได้แก่ อำเภอเมืองชลบุรี อำเภอเมืองศรีราชา อำเภอบางละมุง อำเภอพานทอง และอำเภอนนทบุรี

6) หินอัคนี (Igneous Rock) ประกอบด้วย หินแกรนิตยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous Granite, Cgr) ส่วนใหญ่เป็นหินเนื้อแกรโนไดโอไรต์ เนื้อไดโอไรต์แกบโบร พบโผล่บริเวณ บริเวณ อำเภอบ่อทอง และอำเภอหนองใหญ่

ลักษณะทางธรณีวิทยาที่พบในขอบเขตของแบบจำลอง ปรากฏหน่วยทางธรณีวิทยา 4 กลุ่ม โดยหน่วยหินหลักที่พบ คือ ตะกอนตะพักกลุ่มน้ำ ในยุคควอเทอร์นารี (Qt) และ หินแกรนิต ในยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Cgr) ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ลักษณะทางธรณีวิทยาบบริเวณพื้นที่ศึกษา

6. ลักษณะอุทกธรณีวิทยา

ปริมาณน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาล ในภูมิภาคต่างๆ มีส่วนสัมพันธ์โดยใกล้ชิดกับ ชนิดของหินกักเก็บน้ำบาดาลในภูมิภาคนั้นๆ ดังนั้นการศึกษาถึงสภาพแหล่งน้ำบาดาลในท้องที่ต่างๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาสภาพอุทกธรณีวิทยาทั้งผิวดินและใต้ผิวดิน โดยทำการจากศึกษา ชนิดของหิน คุณสมบัติความเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล หรือ Reservoir properties ของหินชนิดต่างๆ ตามหลักเกณฑ์ทางอุทกธรณีวิทยา โดยสามารถแบ่งประเภทของหินกักเก็บน้ำบาดาลในบริเวณ พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยออกเป็น 2 ประเภท คือ หินร่วน และหินแข็ง มีรายละเอียดดังนี้

1) ตะกอนหินร่วน หรือ Unconsolidated Rocks ประกอบด้วยตะกอนที่มีการสะสมตัวแบบต่างๆ ดังนี้

ตะกอนน้ำพา (Floodplain Deposits, Qfd) ประกอบด้วย ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว และกรวด เกิดจากการสะสมตัวโดยทางน้ำที่พัดพาตะกอนที่เกิดจากการกัดกร่อนและผุพังของหิน ในบริเวณภูเขาทางด้านเหนือ ตะกอนเหล่านี้จะถูกพัดพาไปสู่บริเวณที่ราบตอนกลางในลักษณะของตะกอนน้ำพา โดยตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะตกอยู่ใกล้บริเวณภูเขาและลาดเขา ส่วนตะกอนขนาดเล็ก เช่น กรวด ทราย ดินเหนียว จะถูกพัดพาไปไกลกว่าและแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้างตามพลังงานในการพัดพาของทางน้ำ ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นหลายครั้ง จึงทำให้เกิดตะกอนกรวด ทราย และดินเหนียว สลับกันเป็นชั้น พบบริเวณตำบลหนองปลาไหล ตำบลนาเกลือ เมืองพัทยา ตำบลบางละมุง ตำบลห้วยใหญ่ ตำบลนาจอมเทียน ของอำเภอบางละมุง บริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของตำบลทุ่งสุขลา บริเวณทิศตะวันตกเฉียงเหนือของตำบลบางพระ ตำบลบึง ของอำเภอสัตร์ราชา และบริเวณตำบลหนองข้างคอก ของอำเภอมือเมืองชลบุรี

ตะกอนทรายชายหาด (Beach Sand Deposits, Qbs) ประกอบด้วยทรายขนาดต่างๆ เกิดจากการพัดพาตะกอนทรายมาสะสมตัวของน้ำทะเล โดยมักพบอยู่ตามที่ราบชายฝั่งทะเล พบบริเวณแนวยาวตลอดชายหาดทางด้านตะวันตกของอำเภอบางละมุง บริเวณตำบลนาเกลือ เมืองพัทยา ตำบลนาจอมเทียน ตำบลบางละมุง อำเภอบางละมุง บริเวณแนวยาวตลอดชายหาดทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ของอำเภอสัตร์ราชา บริเวณทิศตะวันตกของตำบลบางพระ และบริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตร์ราชาบริเวณแนวยาวตลอดชายหาดทางด้านตะวันตกของเทศบาลตำบลแสนสุข และตำบลเหมือง อำเภอมือเมืองชลบุรี

ตะกอนเชิงเขาและตะกอนตะพักลำน้ำ (Colluvial Deposits, Qcl and Terrace Deposits) ประกอบด้วย ดินลูกรัง เศษหินในชั้นทรายที่มีโคลนปน และชั้นกรวด สามารถพบได้ทั่วไปตามที่ราบเชิงเขา ได้แก่บริเวณเมืองพัทธยา ตำบลนาเกลือ ตำบลหนองปรือ ตำบลห้วยใหญ่ ตำบลบางละมุง ของอำเภอบางละมุงบริเวณตอนกลางไปจนถึงทิศตะวันตกของตำบลบางพระ ตำบลหนองขาม ตำบลสุรศักดิ์ ตำบลทุ่งสุขลา ตำบลบึง ของอำเภอศรีราชา กระจายตัวอยู่หมดทั้งพื้นที่อำเภอเมืองชลบุรียกเว้นเทศบาลแสนสุข ของอำเภอเมืองชลบุรี คุณภาพน้ำส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ดี คือ มีค่า TDS น้อยกว่า 500 mg/l ปริมาณน้ำส่วนใหญ่มีน้อยกว่า 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ยกเว้นบริเวณตำบลบางละมุง และตำบลนาเกลือ มีปริมาณน้ำ 2-10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง มีค่า TDS อยู่ในช่วง 500-1,500 mg/l

2) หินแข็ง (Consolidated Rocks) หินแข็งในพื้นที่ ประกอบด้วยหินชุดต่างๆ ดังต่อไปนี้

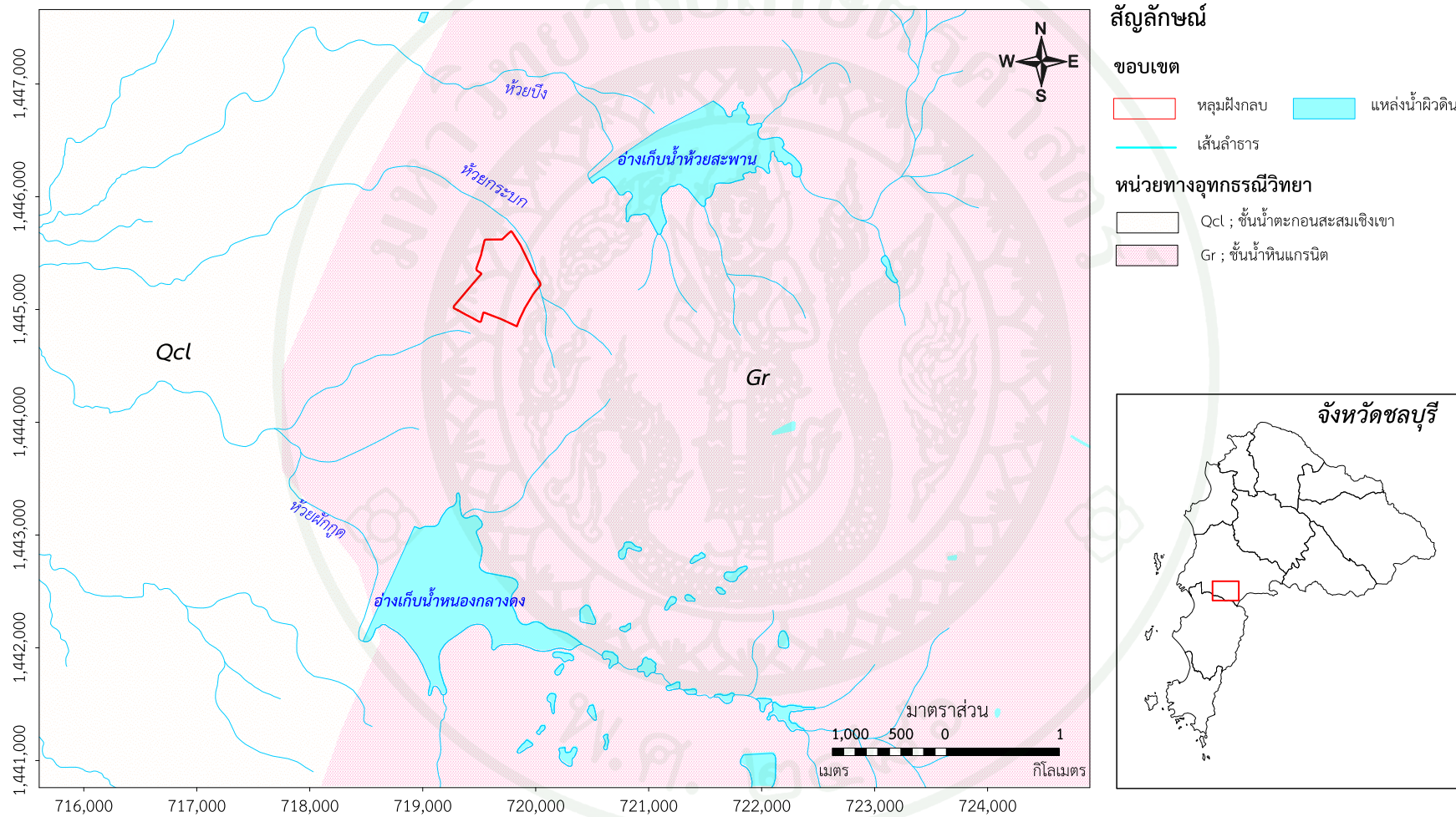
หินแกรนิต (Granite, Gr) หินแกรนิตเป็นหินอัคนีที่แข็งตัวใต้เปลือกโลก (Intrusive Igneous Rock) เกิดจากการแข็งตัวของหินหลอมเหลว (Magma) จากบริเวณใจกลางโลก (Core) และเกิดการแข็งตัวใต้เปลือกโลก ต่อมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโลก หินแกรนิตถูกดันตัวสูงขึ้นมาเหนือเปลือกโลก โผล่ให้เห็นเป็นเทือกเขาแกรนิตที่เห็นในปัจจุบัน หินแกรนิตส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบหลัก เป็นแร่ 2 ชนิด คือ แร่ Quartz และ Feldspar แร่ Quartz จะคงทนต่อการผุพัง ส่วนแร่ Feldspar จะผุพังได้ง่าย ดังนั้น บริเวณส่วนผิวของหินแกรนิต มักพบหินแกรนิตผุ (Weathered granite) มีความหนาแน่น ซึ่งชั้นแกรนิตผุนี้ มักจะประกอบด้วย ชั้นดินเหนียว ซึ่งผุพังจากแร่ Feldspar และเม็ดทรายซึ่งเป็นแร่ Quartz เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านบริเวณที่เป็นแกรนิตผุ ชั้นดินเหนียวจะถูกชะล้างออกไป เหลือไว้เพียงชั้นทรายซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บน้ำที่ดี

แหล่งน้ำบาดาลในหินแกรนิตอีกประเภทหนึ่งได้แก่ ชั้นน้ำตามรอยแตกในชั้นหินแกรนิต (Fracture granite) แต่มักจะไม่ค่อยพบมากนักโดยเฉพาะหินแกรนิตที่มีอายุน้อย บริเวณที่พบหินแกรนิต ได้แก่ บริเวณตำบลตะเคียนเตี้ย ตำบลเขาไม้แก้ว ตำบลหนองปลาไหล ตำบลหนองปรือ ตำบลโป่ง ตำบลห้วยใหญ่ ของอำเภอบางละมุง บริเวณด้านทิศตะวันออกของพื้นที่อำเภอศรีราชา ได้แก่ ตำบลบางพระ ตำบลหนองขาม ตำบลเขาจันทร์ทอง ตำบลบ่อวิน ตำบลบึง บริเวณด้านตอนเหนือของพื้นที่อำเภอเมืองชลบุรี ได้แก่ ตำบลหนองไม้แดง ตำบลนาป่า ตำบลบ้านสวน และทิศตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่อำเภอเมืองชลบุรี ได้แก่ ตำบลหนองรี และตำบลหนองข้างคอก ความลึกของชั้นน้ำบาดาลประมาณ 15-30 เมตร ในบางบริเวณอาจลึกถึง 40-60 เมตร คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี

หินปูน (Permian Limestone, Pms) มีลักษณะเป็นหินปูนปนเม็ดทราย และดินเหนียวสีเทาเข้ม สลับกันหินควอร์ตไซต์ พบบริเวณตำบลหนองปรือ และเมืองพัทยา อำเภอบางละมุง ทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตำบลบางพระ ทิศตะวันตกของตำบลสุรศักดิ์ และตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ พบบริเวณทิศตะวันออกของตำบลห้วยกะปิ ทิศตะวันตกของตำบลหนองข้างคอก และทิศตะวันออกเฉียงใต้ของตำบลเหมือง อำเภอมือทองชลบุรี คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ให้น้ำบาดาลในปริมาณน้อยกว่า 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีค่า TDS น้อยกว่า 500 mg/l

หินแปร (Metamorphic rocks) เป็นกลุ่มหินแข็ง หินตะกอนและหินอัคนีที่ผ่านกระบวนการแปรเปลี่ยน หรือ Metamorphism การบีบอัด และความร้อนใต้พิภพ โดยหินดินดานจะแปรเปลี่ยนสภาพเป็นหินฟิลไลต์และหินชีสต์ หินแกรนิตจะแปรสภาพเป็นหินไนส์ สำหรับหินฟิลไลต์และหินชีสต์ จะเกิดจากการที่หินดินดาน ถูกอัดตัวและถูกความร้อน ทำให้มีการเรียงตัวของเม็ดตะกอนและเม็ดแร่เป็นชั้นๆ ทำให้แนวแตกเป็นผิวหน้าเรียบ (Surface Cleavage) ได้ง่าย จึงมักเป็นแหล่งระดับน้ำบาดาลที่ดี ในส่วนของหินไนส์นั้นถึงแม้จะมีการเรียงตัวของแร่บางชนิด แต่เนื่องจากสภาพมาจากหินแกรนิต ที่ ความร้อนและแรงบีบอัดสูงจึงทำให้แร่บางชนิดตกผลึกใหม่ และแข็งตัว ทำให้หินชนิดนี้มีเนื้อแน่นแข็ง โอกาสที่จะพบแหล่งน้ำบาดาลในหินชนิดนี้จึงมีน้อย นอกเสียจากเจาะพบบริเวณที่มีรอยแตก หินแปรในจังหวัดชลบุรีมีการแผ่กระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณขอบตะวันออก ตั้งแต่ อำเภอกะฉันทร์ อำเภอบ่อทอง อำเภอหนองใหญ่ ปริมาณน้ำโดยเฉลี่ยที่เจาะได้ในหินฟิลไลต์และหินชีสต์ อยู่ระหว่าง 2-5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในบางบริเวณซึ่งมีแนวรอยเลื่อนพาดผ่าน อาจจะได้ปริมาณมากถึง 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี-ดีมาก

ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาที่พบในขอบเขตพื้นที่แบบจำลอง คือ ชั้นน้ำตะกอนเชิงเขาและตะกอนตะกั่ว (Qcl) และ ชั้นน้ำแกรนิต (Gr) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา

7. ลักษณะปฐพีวิทยา

ลักษณะปฐพีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา จำแนกสภาพดินตามกลุ่มชุดดิน ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานของกรมพัฒนาที่ดินที่พัฒนาระบบขึ้นจากการรวมชุดดินที่มีลักษณะ สมบัติ และศักยภาพในการเพาะปลูก รวมถึงการจัดการดินที่คล้ายคลึงกัน มาไว้เป็นกลุ่มเดียวกัน สามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มชุดดินที่พบในพื้นที่ลุ่ม และกลุ่มชุดดินที่พบในพื้นที่ดอน โดยมีกลุ่มชุดดินที่ปรากฏบริเวณพื้นที่ศึกษาดังภาพที่ 19 มีรายละเอียดดังนี้

1) กลุ่มชุดดินที่พบในพื้นที่ลุ่ม

กลุ่มชุดดินที่ 59 ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อนที่มีการระบายน้ำเลว (AC-pd : Alluvial Complex, poorly drained) มีลักษณะเป็นเนื้อดินร่วนหยาบหรือดินร่วนละเอียดที่เกิดจากดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน ชั้นดินมีลักษณะเป็นชั้นสลับ เนื้อดินไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับตะกอนที่มาทับถม ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดถึงเป็นกลาง การระบายน้ำเลวถึงค่อนข้างเลว ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

2) กลุ่มชุดดินที่พบในพื้นที่ดอน

กลุ่มชุดดินที่ 35 กลุ่มดินร่วนละเอียดลึกถึงลึกมากที่เกิดจากตะกอนลำน้ำหรือวัตถุต้นกำเนิดดินเนื้อหยาบ ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดมาก การระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ชุดดินที่พบ คือ ชุดดินมาบบอน (Mb) และชุดดินสติก กรวดมาจากหินแกรนิต (Suk-granitic derive)

กลุ่มชุดดินที่ 40 กลุ่มดินร่วนหยาบลึกถึงลึกมากที่เกิดจากตะกอนลำน้ำหรือวัตถุต้นกำเนิดเนื้อหยาบ ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดหรือเป็นกลาง การระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ชุดดินที่พบ คือ ชุดดินหุบกระพง (Hg)

กลุ่มชุดดินที่ 43 กลุ่มดินทรายลึกถึงลึกมากที่เกิดจากตะกอนลำน้ำหรือสัทรายชายทะเล ปฏิกริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นด่าง การระบายน้ำค่อนข้างมาก ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ชุดดินที่พบ คือ ชุดดินสัดหีบ (Sh)

กลุ่มชุดดินที่ 62 พื้นที่ลาดชันเชิงซ้อน (Sc) เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่บริเวณนี้ยังไม่มีการศึกษา สำรวจและจำแนกดิน เนื่องจากสภาพพื้นที่มีความลาดชันสูง ลักษณะเนื้อดินและความอุดมสมบูรณ์แตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของหินต้นกำเนิด มักมีลักษณะเป็นพื้นที่ที่มีเศษหิน ก้อนหิน หรือ หินโผล่ กระจายกระจายทั่วไป และส่วนใหญ่ยังปกคลุมด้วยป่าไม้ประเภทต่างๆ

8. ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน

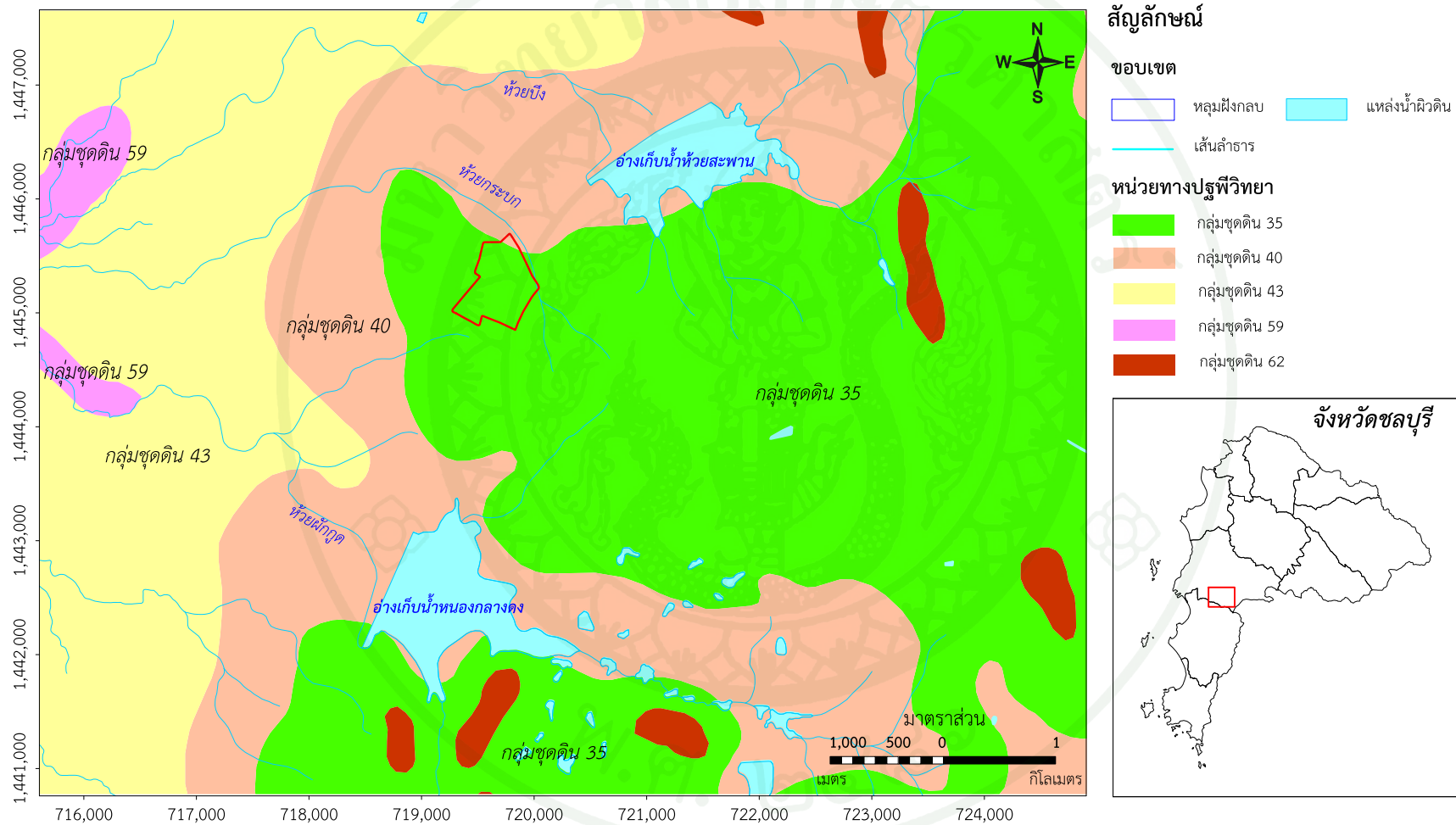
การใช้ประโยชน์ที่ดินวิเคราะห์จากแผนที่การใช้ที่ดินระดับจังหวัด ปี พ.ศ. 2544 มาตราส่วน 1:850,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน ทั้งนี้พบว่าบริเวณโดยรอบส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชุมชนเกษตรเป็นหลัก ได้แก่ การปลูกพืชไร่ เช่น มันสำปะหลัง มะพร้าว และยูคาลิปตัส เป็นต้น บางแห่งเป็นพื้นที่ทุ่งหญ้า และสิ่งปลูกสร้าง เช่น โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แสดงดังภาพที่ 20

9. การเจาะสำรวจชั้นดินชั้นหิน

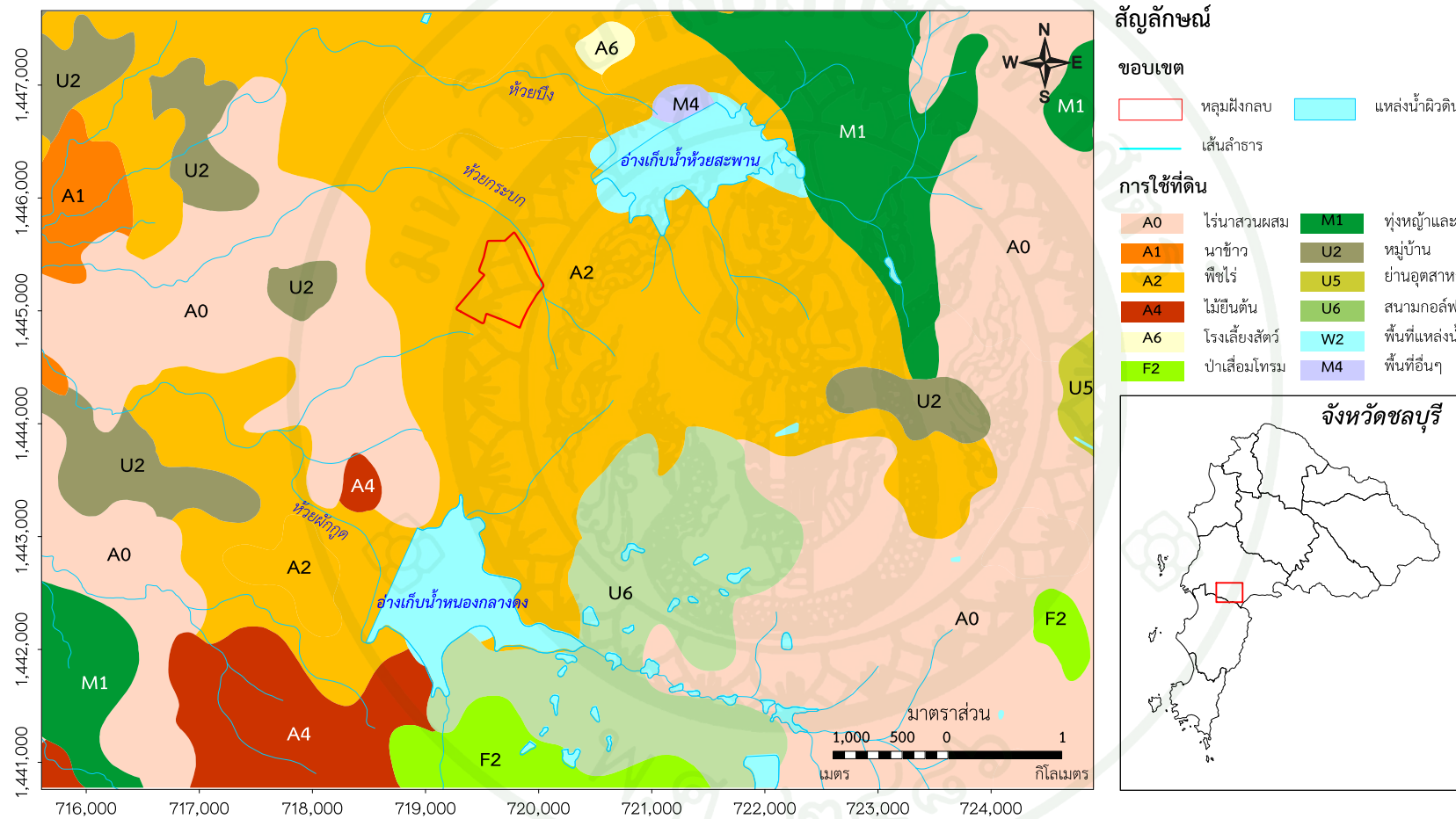
ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจรวบรวมได้จากฐานข้อมูลพสุธาราของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และผลเจาะสำรวจชั้นดินชั้นหินจากการศึกษาครั้งที่ผ่านมา ครอบคลุมขอบเขตพื้นที่แบบจำลอง จำนวน 46 หลุม มีการเจาะสำรวจชั้นดินชั้นหินที่ความลึกจากระดับพื้นผิวดินระหว่าง 16.5–91.5 เมตร พบว่า ชั้นน้ำใต้ดินวางตัวอยู่บนชั้นหินแกรนิต (Gr) ประกอบด้วย ตะกอนกรวดทราย ทรายหยาบถึง ทรายละเอียด ทรายปนทรายแป้ง ทรายปนดินเหนียว มีความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำระหว่าง 1.5–42.6 เมตร แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะดังภาพที่ 21 และแสดงรายละเอียดของข้อมูลหลุมเจาะในภาคผนวก ก

10. ผลการตรวจวัดบ่อสังเกตการณ์

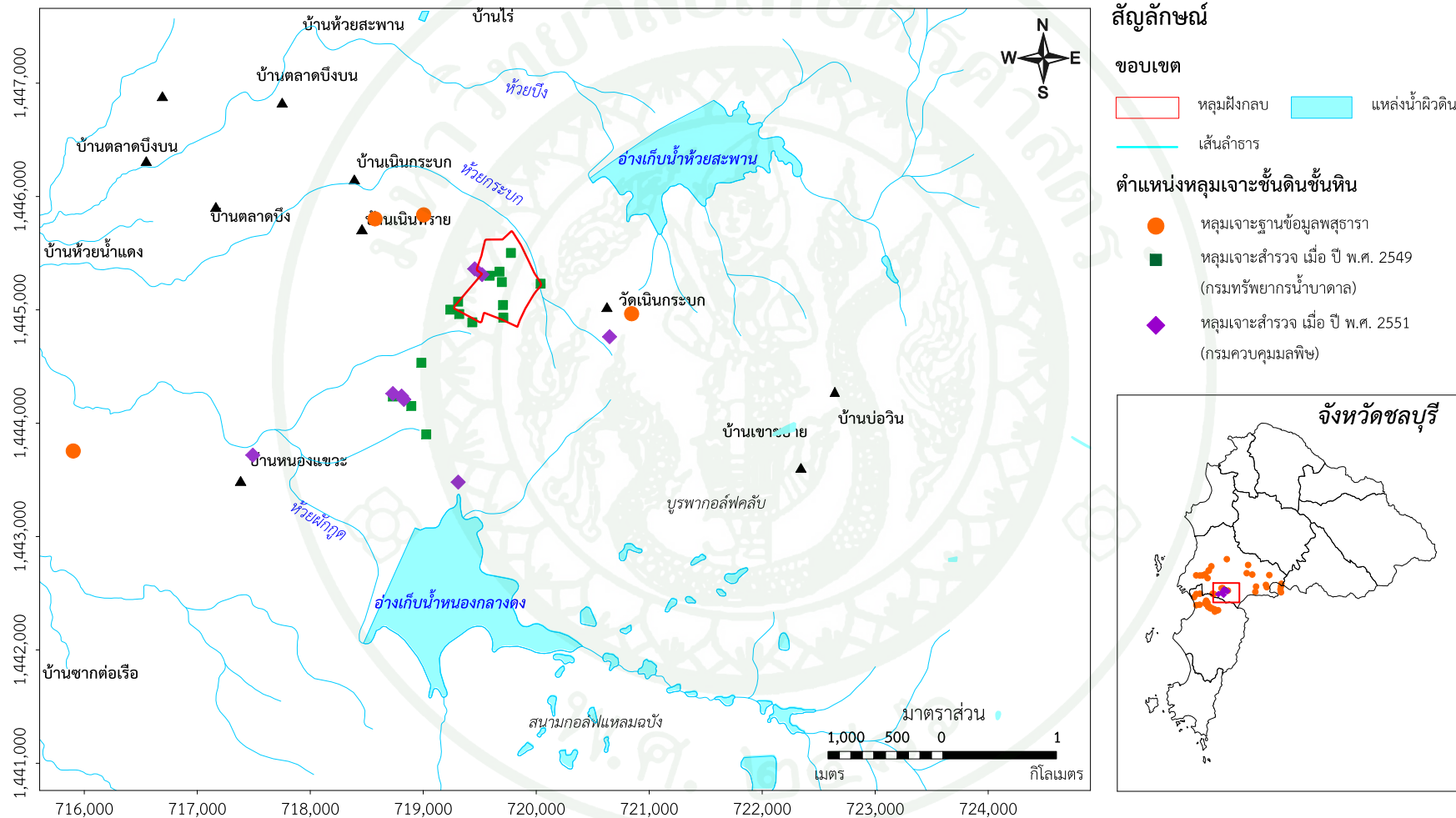
ผลการตรวจวัดทางเคมีของน้ำใต้ดินและดินบริเวณพื้นที่ศึกษาจากการศึกษาครั้งที่ผ่านมา พบว่า ตัวอย่างทั้งในน้ำใต้ดินและดินมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักบางชนิดสูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 10



ภาพที่ 19 ลักษณะทางปฐพีวิทยาบบริเวณพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 20 ลักษณะการใช้ที่ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 21 ตำแหน่งของหลุมเจาะชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 10 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา

พารามิเตอร์	DGR 2008	PCD 2009	ค่ามาตรฐาน ¹	
			เหมาะสม	อนุโลม
pH	3.71-9.00	6.0-6.5	7.0-8.5	6.5-9.2
Total Organic Carbon (mg/l)	0.6-2,212	-		
Conductivity (micromhos/cm)	171-7,610	181-2,100		
Total Dissolved Solid (mg/l)	110-5,967	103-1,394	≤ 600	1200
Chloride (mg/l)	7-1,073	108-281.1	≤ 250	600
Sulfate (mg/l)	5-194	6.5-255.9	≤ 200	250
Nitrate (mg/l)	0.11-43	13-27.9	≤ 45	45
Total Hardness (mg/l as CaCO ₃)	12-1,822	-	≤ 300	500
Calcium (mg/l as CaCO ₃)	8-891	-		
Manganese (mg/l as CaCO ₃)	4-931	-		
Non-Carbonate Hardness (mg/l as CaCO ₃)	1-345	-	≤ 200	250
Carbonate (mg/l as CaCO ₃)	44	-		
Bicarbonate (mg/l as CaCO ₃)	2-2,245	-		
Cyanide (mg/l)	0.003-0.021	-	ต้องไม่มี	0.1
Fluoride (mg/l)	0.1-5.8	-	≤ 0.7	1
Total Iron (mg/l)	0.12-565	0.7-644	≤ 0.5	1
Manganese (mg/l)	0.01-13.8	0.27-1.61	≤ 0.3	0.5
Copper (mg/l)	0.01-0.35	0.31	≤ 1	1.5
Arsenic (mg/l)	0.001-0.0998	0.006-0.67	ต้องไม่มี	0.05
Lead (mg/l)	0.0012-0.2668	0.015-1.92	ต้องไม่มี	0.05
Mercury (mg/l)	0.0005-0.0014	-	ต้องไม่มี	0.001
Cadmium (mg/l)	0.0001-0.0051	0.0003-0.0096	ต้องไม่มี	0.01
Selenium (mg/l)	0.0002-0.0103	0.001	ต้องไม่มี	0.01
Zinc (mg/l)	0.004-3	0.07	≤ 5	15
Potassium (mg/l)	3.2-373	-		
Sodium (mg/l)	8-639	-		

หมายเหตุ ¹⁾ มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2542

- หมายถึง ไม่ทำการตรวจวัด/ ตรวจวัดไม่พบ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. โปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน Visual Modflow
2. โปรแกรมจัดการข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc GIS
3. โปรแกรมสร้างเส้นชั้นข้อมูลและแผนที่พื้นผิว 3 มิติ Sufer9
4. ข้อมูลทุติยภูมิจากโครงการประเมินศักยภาพด้านคุณภาพน้ำบาดาล วางระบบติดตามการปนเปื้อนและวางแผนรายละเอียดการฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
5. ข้อมูลทุติยภูมิจากโครงการศึกษาแนวทาง มาตรการและวิธีการดำเนินการในการฟื้นฟูและประเมินความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ

วิธีการ

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิของพื้นที่ศึกษา

รวบรวมข้อมูลทุติยภูมิของพื้นที่ศึกษาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง นำมาวิเคราะห์ และตรวจสอบความถูกต้อง หรือ เพิ่มเติมข้อมูลจากข้อมูลที่ได้รับจากโครงการประเมินศักยภาพด้านคุณภาพน้ำบาดาลฯ วางระบบติดตามการปนเปื้อนและวางแผนรายละเอียดการฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และโครงการศึกษาแนวทาง มาตรการและวิธีการดำเนินการในการฟื้นฟูและประเมินความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ มีรายการดังนี้

1.1 ลักษณะภูมิประเทศ จากแผนที่ภูมิประเทศประเทศไทย มาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ลำดับชุด L7018 ระวาง 5135 II และ 5235 II

1.2 ลักษณะอุตุนิยมวิทยา จากข้อมูลสภาพภูมิอากาศ 30 ปี ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2522-2551 ของสถานีตรวจวัดอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา

1.3 ลักษณะอุทกวิทยา จากข้อมูลปริมาณฝนและปริมาณน้ำท่า ของศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กรมชลประทาน ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา

1.4 ลักษณะธรณีวิทยาและธรณีสัณฐาน จากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 ระวัง ND47-12 และแผนที่ธรณีวิทยารายจังหวัดชลบุรี โดยกองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี

1.5 ลักษณะอุทกธรณีวิทยา จากรายงานการสำรวจและแผนที่อุทกธรณีวิทยา จังหวัดชลบุรี กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

1.6 ลักษณะปฐพีวิทยา จากรายงานการสำรวจดิน และแผนที่ดิน มาตราส่วน 1:25,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา

1.7 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน

1.8 ข้อมูลหลุมเจาะชั้นดินชั้นหิน จากระบบฐานข้อมูลพสุธารา กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และฐานข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินทั่วประเทศ กรมโยธาธิการและผังเมือง

2. การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดิน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์น้ำใต้ดินเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาแหล่งน้ำใต้ดินทั้งในเชิงปริมาณ และคุณภาพ โดยมีลำดับขั้นตอนของการพัฒนาแบบจำลองน้ำใต้ดินตามระเบียบวิธีจาก กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551) แสดงดังภาพที่ 11 มีรายละเอียดดังนี้

2.1 การกำหนดวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองน้ำใต้ดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างแบบจำลอง การไหลของน้ำใต้ดิน และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ระบบน้ำบาดาลในกรณีสมมติในทางทฤษฎี (Hypothetical approach) จากข้อมูลทุติยภูมิและค่ากำหนดในทางทฤษฎี โดยกำหนดให้เป็นการสร้างแบบจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady-State condition) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและประเมินขอบเขตพื้นที่ชั้นน้ำแบบอ็อกซิก และแอน็อกซิกสำหรับการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน มีวัตถุประสงค์ของแบบจำลองดังนี้

1) เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินและแสดงพลูมการเคลื่อนที่แพร่กระจายจากสารปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากแหล่งกำเนิด โดยกำหนดพารามิเตอร์ความเข้มข้นของมลสาร คือ BOD ในน้ำชะขยะ

2) เพื่อแสดงขอบเขตของชั้นน้ำอ็อกซิกและแอน็อกซิก สำหรับใช้ในการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเมื่อมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์อาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินในสถานการณ์สมมติ

2.2 การสร้างแบบจำลองเชิงมนิททัศน์

การสร้างแบบจำลองเชิงมนิททัศน์เป็นการอธิบายคุณลักษณะของระบบน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา โดยวิเคราะห์และสรุปลักษณะของระบบน้ำบาดาลได้จากข้อมูลทุติยภูมิของพื้นที่ทั้งบนผิวดินและใต้ผิวดินในขอบเขตพื้นที่ศึกษา ซึ่งรายละเอียดและความซับซ้อนของระบบน้ำบาดาลในแบบจำลองขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลอง และความละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ระบบชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นชั้นน้ำไม่มีแรงดัน (Unconfined Aquifer) จำนวน 1 ชั้นน้ำ เป็นชั้นตะกอนของดินเหนียวปนทราย ทรายแป้ง ทรายละเอียด แทรกสลับกัน ที่วางอยู่บนชั้นหินแกรนิตที่วางตัวอยู่ที่ระดับความสูงฐานเฉลี่ยที่ 14.82 เมตร รทก. มีทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจากแนวขอบแอ่งน้ำบาดาลชลบุรีในทางทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ตามลักษณะความลาดเทของภูมิประเทศ และระบบลำรางธรรมชาติ ในขอบเขตแบบจำลองมีพื้นที่อ่างเก็บน้ำ 2 แห่ง คือ อ่างเก็บน้ำห้วยสะพานอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และอ่างเก็บน้ำหนองกลางตงอยู่ทางทิศใต้ของพื้นที่หลุมฝังกลบขยะมูลฝอย

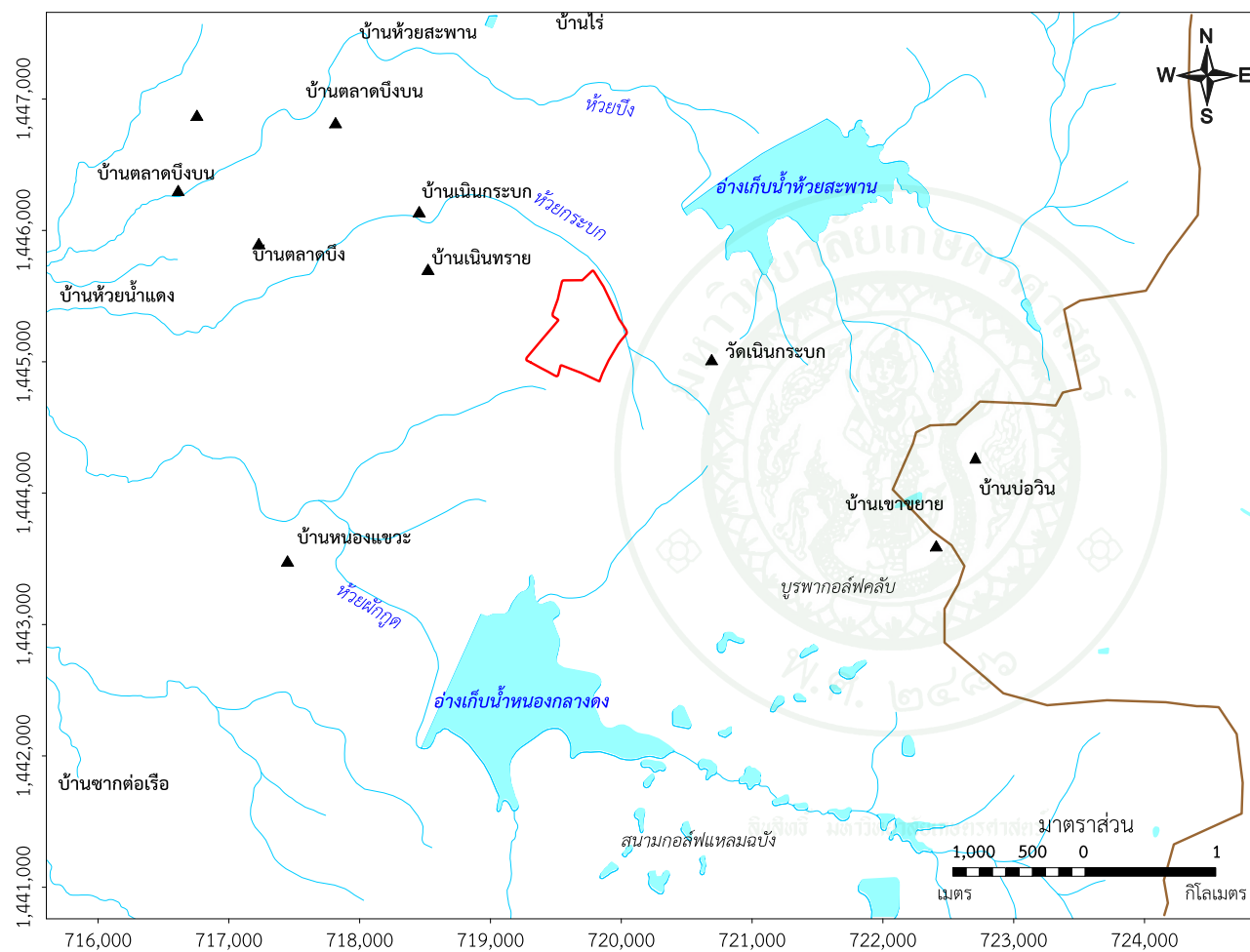
2.3 การเลือกโปรแกรมแบบจำลอง

การศึกษารั้วนี้เลือกใช้โปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดินสำเร็จรูป คือ Visual MODFLOW ซึ่งเป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบ Finite Difference ที่ประกอบประกอบด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ ที่ติดตั้งมาพร้อมกันในแบบจำลอง โดยกำหนดโปรแกรมคำนวณการไหลของน้ำใต้ดิน คือ USGS MODFLOW-2000 (WHI) และโปรแกรมคำนวณการเคลื่อนที่มวลสาร คือ MT3DMS (A Modular 3-Dimensional Multi-Species Transport Model) เลือกใช้ระเบียบวิธี Method of Characteristics (MOC) ในการคำนวณ Advection-Dispersion และเลือกใช้โปรแกรมย่อยในส่วนคำนวณ Reaction แบบ First-order irreversible decay

2.4 การออกแบบจำลอง

2.4.1 ขอบเขตของแบบจำลอง

ขอบเขตพื้นที่แบบจำลองมีพิกัดระนาบ x ระหว่าง 715,605-724,905 m UTME และพิกัดระนาบ y ระหว่าง 1,440,760-1,447,660 m UTMN คิดเป็นพื้นที่ของแบบจำลองเท่ากับ 64.17 ตารางกิโลเมตร โดยกำหนดขอบเขตของแบบจำลองตามองค์ประกอบทางอุทกวิทยา คือ ครอบคลุมแนวสันปันน้ำ (ขอบแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี) ระบบลำรางธรรมชาติ และแหล่งน้ำผิวดิน และครอบคลุมข้อมูลหน่วยดินและหินทางอุทกธรณีวิทยาที่ได้จากหลุมเจาะสำรวจ บ่อสังเกตการณ์ และพื้นที่ชุมชนใกล้เคียงพื้นที่หลุมฝังกลบ แสดงดังภาพที่ 22



สัญลักษณ์

ขอบเขต

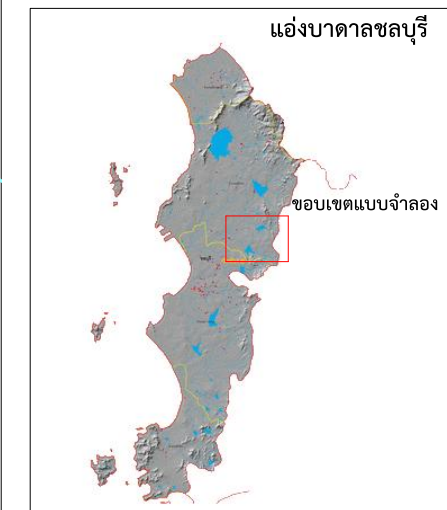
หลุมฝังกลบ

แหล่งน้ำผิวดิน

เส้นลำธาร

ขอบแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี

▲ ชุมชน



ที่มา: ศูนย์ปฏิบัติการและติดตามสถานการณ์น้ำบาดาล
กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

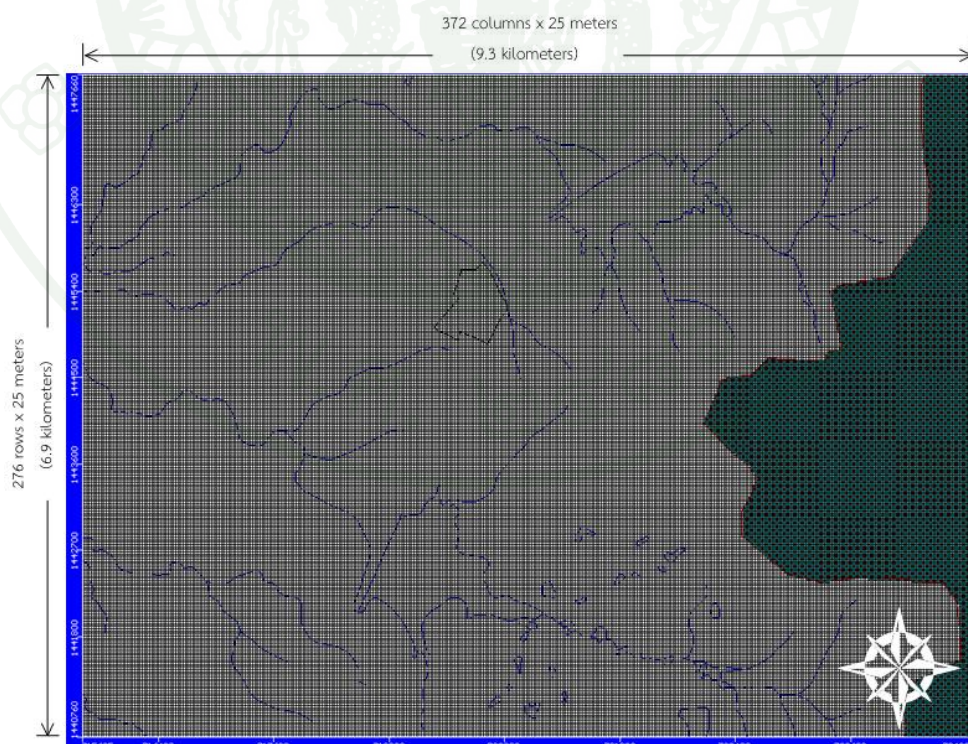
ภาพที่ 22 ขอบเขตของแบบจำลอง

2.4.2 การกำหนดขอบเขตเวลา

การสร้างแบบจำลองครั้งนี้ทำการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่สภาวะคงที่ (Steady-State condition) เท่านั้น โดยมีสภาวะคงที่ ณ ปี พ.ศ. 2552 ตามผลการตรวจวัดค่าระดับน้ำสังเกตการณ์ ส่วนผลของการจำลองการเคลื่อนที่ของมลสารจะทำนายผลเพื่อดูพลูมความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เวลาวันที่ 3,650 ในแบบจำลอง หรือ ในคาบเวลา 10 ปีข้างหน้า

2.4.3 การออกแบบกริด

การออกแบบกริดในแบบจำลองกำหนดให้มีขนาดของกริดเท่ากับ 25x25 เมตร คิดเป็นจำนวนแถวเท่ากับ 276 แถว และจำนวนสดมภ์เท่ากับ 372 สดมภ์ หรือรวมคิดเป็นจำนวนกริดเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 102,672 เซลล์ โดยในแบบจำลองได้มีการกำหนดเซลล์ที่ไม่ใช้คำนวณ (Inactive cell) ให้กับแบบจำลองในพื้นที่หลังสันปันน้ำใต้ดิน (แนวขอบแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี) ที่วางตัวอยู่ทางทิศตะวันออก คิดเป็นจำนวนกริดเซลล์เท่ากับ 14,058 เซลล์ หรือ คิดเป็นจำนวนกริดเซลล์ที่ใช้คำนวณ (Active cell) เท่ากับ 88,614 เซลล์ แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การออกแบบกริดในแบบจำลอง

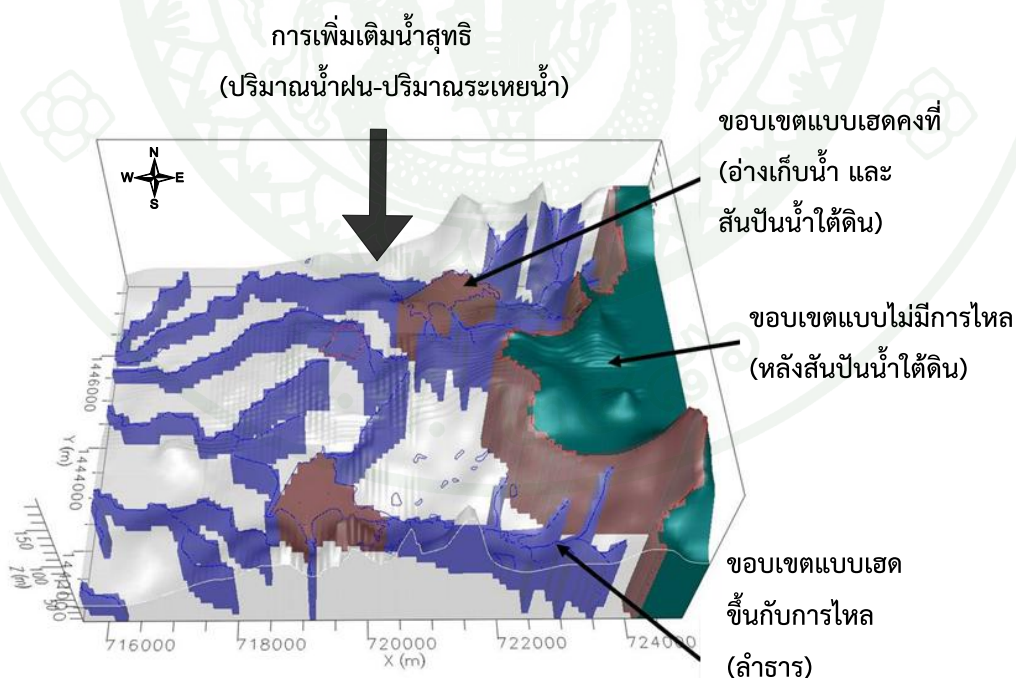
2.5 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข

แบบจำลอง Visual MODFLOW ณ ที่ขอบเขตของแบบจำลองจะถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตที่ไม่มีการไหลผ่าน (No Flow Boundary) โดยตัวโปรแกรมเอง แต่ในการออกแบบจำลองนั้นต้องมีการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขให้กับแบบจำลองอย่างน้อย 1 เงื่อนไขเพื่อใช้ในการคำนวณ โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดขอบเขตเงื่อนไขให้กับแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 24 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ด้านบน กำหนดให้เป็นขอบเขตพื้นที่ที่รับการเติมน้ำจากบรรยากาศ จากอัตราการเติมน้ำสุทธิ (ปริมาณน้ำฝน-ปริมาณการระเหยน้ำ)

ทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก กำหนดให้ขอบของแบบจำลองและแนวสันปันน้ำใต้ดินเป็นขอบเขตไม่มีการไหลผ่านของน้ำ

ด้านล่าง กำหนดให้เป็นขอบเขตไม่มีการไหลผ่านของน้ำ จากชั้นน้ำล่างสู่ชั้นหินแข็งที่ระดับความสูงฐานเฉลี่ย



ภาพที่ 24 ขอบเขตเงื่อนไขในแบบจำลอง

2.5.1 ขอบเขตแบบเฮดคองที่

ก. ค่าเฮดคองที่บริเวณสันปันน้ำใต้ดิน กำหนดให้มีค่าเฮดต่ำกว่าระดับความสูงพื้นดินเท่ากับ 4.46 เมตร ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของค่าระดับน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ในบริเวณพื้นที่ศึกษา และข้างเคียง ที่มีหน่วยทางอุทกธรณีวิทยาใกล้เคียงกัน ที่บันทึกตามฐานข้อมูลพสุธาราของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลจากข้อมูลทั้งสิ้น 24 บ่อ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522-2548

ข. ค่าเฮดคองที่บริเวณแหล่งน้ำผิวดิน (อ่างเก็บน้ำ) มีค่าเฮดคองที่เท่ากับค่าระดับน้ำรายวันเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2552 โดยในแบบจำลองปรากฏแหล่งน้ำผิวดิน 2 แห่ง คือ อ่างเก็บน้ำห้วยสะพาน มีค่าเฮดคองที่เท่ากับ 72.6 เมตร รทก. และเขื่อนหนองกลางดงกลางดง มีค่าเฮดคองที่เท่ากับ 59.41 เมตร รทก. ดังภาคผนวก ข

2.5.2 ขอบเขตแบบกำหนดการไหล

กำหนดให้พื้นที่หลังสันปันน้ำใต้ดิน (แนวขอบแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี) เป็นขอบเขตที่ไม่มีการไหลผ่านของน้ำ และไม่ถูกใช้คำนวณในแบบจำลอง

2.5.3 ขอบเขตแบบเฮดขึ้นกับการไหล

กำหนดขอบเขตประเภทนี้เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีภูมิประเทศลอนลาดถึงเนินเขา และมีลำธารเส้นเล็กๆ ที่มีทิศทางการไหลจากพื้นที่ต้นน้ำทางทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ซึ่งระดับน้ำในลำธารที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีผลต่อระดับการเปลี่ยนแปลงเฮดในพื้นที่ศึกษา การกำหนดค่าเฮดในลำธารด้วยวิธีปรับแก้ย้อนกลับ (Inverse calibration) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไปในส่วนของการนำเข้าข้อมูลแม่น้ำในแบบจำลอง

2.6 การนำเข้าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการไหล

2.6.1 ระดับความสูงขอบเขตด้านบน-ล่าง

ระดับความสูงขอบเขตด้านบน คือ ระดับความสูงของพื้นผิวดิน ซึ่งนำเข้าข้อมูลเส้นชั้นความสูงจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ลำดับชุด L7018

ระหว่าง 5135 II และ 5235 II ซึ่งมีเส้นชั้นความสูงระหว่าง 40-200 เมตร รทก. ส่วนระดับความสูงขอบเขตล่างนั้น กำหนดให้เป็นระดับฐานที่มีค่าคงที่ (Base specific elevation) ให้มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 14.85 เมตร รทก. ซึ่งเป็นค่าระดับรอยต่อโดยประมาณระหว่างชั้นหินอุ้มน้ำที่สนใจกับชั้นน้ำแกรนิตที่รองรับอยู่ด้านล่าง

2.6.2 ชนิดของชั้นน้ำ

กำหนดให้เป็นชั้นน้ำแบบไม่มีแรงดัน Unconfined ซึ่งเป็นหน่วยชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นตะกอนกรวดทราย ทรายหยาบถึงทรายละเอียด ทรายปนทรายแป้ง และทรายปนดินเหนียว

2.6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (K_x) ได้จากผลการสุบทดสอบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551) ในทุกหน่วยหินครอบคลุมพื้นที่ศึกษาสามารถจำแนกเป็นค่า K_x ในชั้นน้ำแกรนิต (Gr) มีค่าในช่วง 0.2-1.3 เมตรต่อวัน และชั้นน้ำตะกอนเชิงเขา (Qcl) 8.1-191.8 เมตรต่อวัน ใกล้เคียงกับค่าประเมินจากงานศึกษาของ Spitz and Moreno (1996) ที่กำหนดช่วงค่า K_x ให้กับชั้นน้ำ Gr และ Qcl ในช่วง 0.29-1.40 เมตรต่อวัน และ 8-200 เมตรต่อวันตามลำดับ และกรมควบคุมมลพิษ (2552) ได้ทำการเจาะสำรวจและทดสอบค่า K_x บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษาพบว่า มีค่าในช่วง 0.1-0.6 เมตรต่อวัน ในพื้นที่ชั้นตะกอนแบบดินทรายปนทรายแป้ง (Silty sand) และดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand) ดังภาคผนวก ค

2.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นน้ำใต้ดินนั้น กรณีที่มีการคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady-State) จะไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ โดยแบบจำลองนั้นต้องการค่านำเข้า 2 ค่า คือ ค่าการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage; S_s) และ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Specific yield; S_y) โดยในกรณีชั้นน้ำแบบ Unconfined แบบจำลองจากคำนวณค่า S เท่ากับค่า S_y ที่กำหนดให้กับแบบจำลอง ส่วนชั้นน้ำแบบ Confined แบบจำลองจากคำนวณค่า S จากค่า S_s คูณด้วยความหนาของชั้น (Thickness) ที่กริดเซลล์นั้น

เนื่องจากเป็นจำลองเฉพาะที่สภาวะคงที่ ค่า S_s และ S_y จึงกำหนดเป็นค่าเริ่มต้นของแบบจำลองให้มีค่าเท่ากับ 2×10^{-4} เมตร⁻¹ และ 0.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณสำหรับตัวกลางที่เป็นทราย ทรายแป้ง ถึง ดินเหนียว (Spitz and Moreno, 1996)

2.6.5 ความพรุน

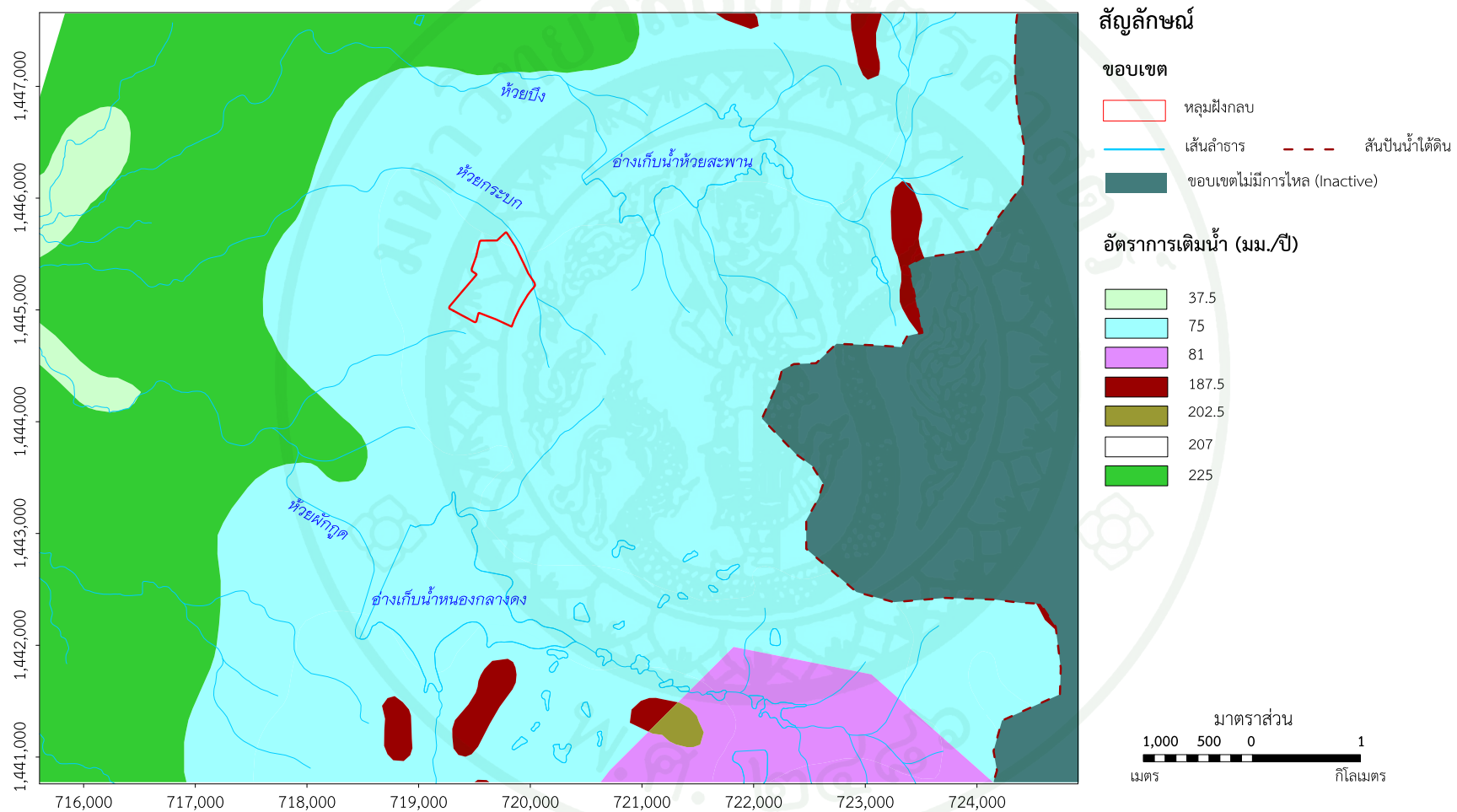
แบบจำลองต้องกำหนดค่าความพรุนทั้ง 2 ค่า คือ Total porosity (Tot. Por) และ Effective porosity (Eff. Por) ค่าความพรุนทั้งสองนั้นไม่มีความจำเป็นในการคำนวณของแบบจำลองการไหล (Flow model) แต่ค่า Eff. Por นั้นจะถูกนำไปใช้ในโปรแกรมย่อย MODPATH เพื่อใช้หาค่าเร็วเฉลี่ย (Average linear groundwater velocities) ตามแนวเคลื่อนที่ (Pathline) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-dependent) ส่วนค่า Tot. Por นั้นจะถูกนำไปใช้ในโปรแกรมย่อย MODPATH และ MT3D โดย MT3D นั้นเป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของมลสาร (Solute-transport Model) ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดค่า Tot. Por และ Eff. Por เท่ากับ 0.32 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของตัวกลางที่เป็นตะกอนหินร่วน-หินแกรนิตผุ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551)

2.6.6 ระดับเฮดเริ่มต้น

ค่าระดับเฮดเริ่มต้นเป็นค่ากำหนดตั้งต้นเพื่อใช้คำนวณค่าเฮดที่เกิดขึ้นตามขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด และจะมีความสำคัญเพื่อใช้คำนวณหาค่า Drawdown ซึ่งในการจำลองครั้งนี้ไม่ได้ให้ความสนใจจึงกำหนดเป็นเริ่มต้นตามแบบจำลองไว้ที่ 80 เมตร รทก.

2.6.7 อัตราการเติมน้ำ

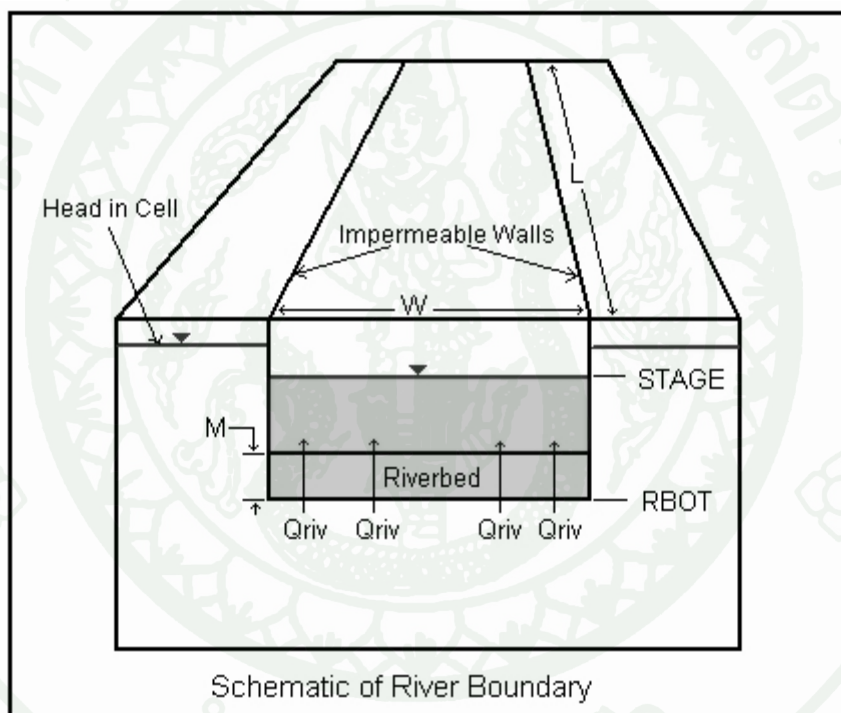
พื้นที่การเติมน้ำสุทธิ (Net recharge area) ได้จากการประเมินตามพื้นที่ ได้แก่ ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีวิทยา ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา และลักษณะการใช้ที่ดิน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) โดยอัตราการเพิ่มเติมน้ำคำนวณได้จากปริมาณฝนเฉลี่ย และปริมาณการระเหยน้ำ จากสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดระยองและชลบุรี ในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2514-2543) มีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีที่ 1,350 มิลลิเมตรต่อปี โดยอัตราการเติมน้ำนั้นกำหนดให้มีค่าในช่วงร้อยละ 0-3 ของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีสำหรับชั้นน้ำหินแกรนิต (Gr) และมีค่าในช่วงร้อยละ 3-18 ของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีสำหรับชั้นตะกอนน้ำพา (Qcp) และชั้นตะกอนที่ราบเชิงเขา (Qcl) แสดงพื้นที่เติมน้ำได้ดิน ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 พื้นที่การเติมน้ำใต้ดินในแบบจำลอง

2.6.8 แม่น้ำ

กำหนดขอบเขตของเส้นแม่น้ำในแบบจำลองตามแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ลำดับชุด L7018 ระหว่าง 5135 II และ 5235 II และในการกำหนดสภาพแม่น้ำในแบบจำลองเลือกใช้ได้จากโปรแกรมย่อยของ Visual MODFLOW ที่เรียกว่า River Package (RIV) ซึ่งการกำหนดแม่น้ำให้กับแบบจำลองนั้นจะหมายถึงการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขแบบเอตขึ้นกับการไหลในแบบจำลอง ซึ่งความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์กำหนดแสดงดังภาพที่ 26 และมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 26 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้กับโปรแกรมย่อย RIV ในแบบจำลอง Visual MODFLOW

ก. River Stage (STAGE) คือ ค่าระดับน้ำในแม่น้ำหรือลำธาร ซึ่งในสภาพธรรมชาติระดับเขตของแม่น้ำจะเป็น Discharge หรือ Streamline ของระบบน้ำบาดาล

ข. Riverbed Bottom (RBOT) คือ ค่าระดับความสูงของท้องน้ำ หรือ ชั้น Seepage layer ของแม่น้ำ

ค. Conductance เป็นค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของตะกอนท้องน้ำ (M) กับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้ง (Vertical hydraulic conductivity; Kz) ของตัวกลางที่เป็นตะกอนท้องน้ำ สรุปดังสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{Kz \times L \times W}{M} \quad (18)$$

จากการสำรวจพื้นที่ศึกษาแล้วพบว่าลำห้วยที่ปรากฏตามแผนที่ภูมิประเทศพบใกล้กับพื้นที่หลุมฝังกลบประมาณ 500 เมตร แต่ระดับน้ำในลำธารนั้นไม่ได้มีปริมาณน้ำในลำธารไหลต่อเนื่องตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตามในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ระบบน้ำบาดาลในกรณีสมมติในทางทฤษฎี ดังนั้นในการกำหนดสภาพแม่น้ำจึงอาศัยเทคนิคการคำนวณแบบย้อนกลับ (Inverse technique) โดยค่ากำหนดที่ให้ในแบบจำลองสอดคล้องกับระบบอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ กำหนดให้ระดับน้ำในแม่น้ำ (STAGE) มีค่าต่ำกว่าระดับพื้นดิน 0.1 เมตร ระดับความสูงของท้องน้ำ (RBOT) มีค่าต่ำกว่าระดับพื้นดิน 1 เมตร ความหนาของตะกอนท้องน้ำ (M) เท่ากับ 0.5 เมตร และค่า Kz เท่ากับ 0.864 เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นค่าตามเกณฑ์ตัวกลางที่เป็นตะกอนทรายละเอียด หรือ ทรายแป้ง หรือ ทรายปนทรายแป้ง (Spitz and Moreno, 1996)

3. การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำชะขยะในชั้นน้ำใต้ดิน

โปรแกรมคำนวณการเคลื่อนที่มวลสารในการศึกษาครั้งนี้ คือ MT3DMS v. 5.1 (Public Domain) ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยในแบบจำลอง Visual MODFLOW ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของมวลสารในระบบน้ำใต้ดินในเทอมของ Advection, Dispersion และ Chemical reaction

3.1 ชนิดของมลสารและความเข้มข้นเริ่มต้น

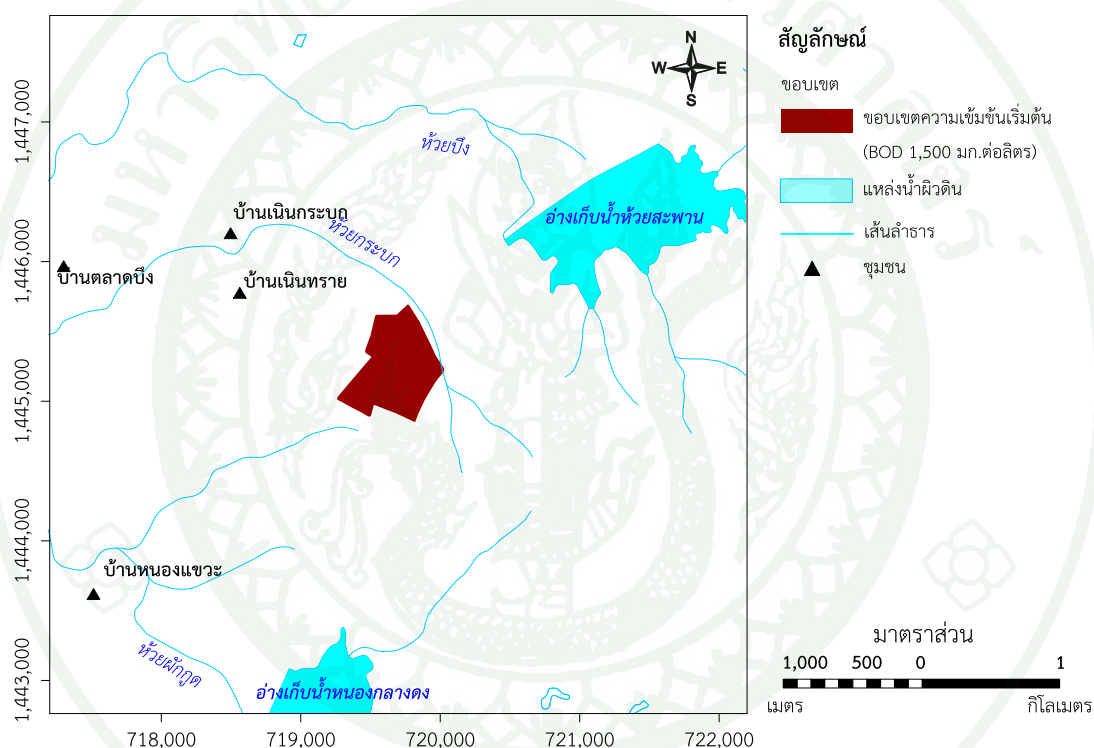
พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ คือ ค่าบีโอดี (BOD) กำหนดค่าความเข้มข้นคงที่ (Constant concentration) เท่ากับ 1,500 mg/l ซึ่งเป็นอยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นที่ได้จากผลการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2551 ดังตารางที่ 11 ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่มีการปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่อง โดยมีขอบเขตของแหล่งกำเนิดดังภาพที่ 27

ตารางที่ 11 ผลการตรวจวัดทางเคมีของน้ำชะขยะบริเวณพื้นที่ศึกษา

พารามิเตอร์	ผลการตรวจวัดรายเดือน ปี พ.ศ. 2551				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
pH	9.0	8.2	8.2	8.3	8.7
SS (mg/l)	532	2,650	401	1,368	2,553
TDS (mg/l)	8,710	4,545	9,500	4,895	9,025
COD (mg/l)	2,490	5,115	2,690	2,330	3,850
BOD (mg/l)	361	1,658	154	587	184
NO ₃ -N (mg/l)	2	1	9	-	-
PO ₄ -P (mg/l)	10.6	0.4	-	-	-

3.2 ระเบียบวิธีการหาผลเฉลย (Solution method)

ระเบียบวิธีการหาผลเฉลยที่เลือกใช้ในรูปแบบจำลอง คือ ระเบียบวิธี Method of Characteristics (MOC) ซึ่งใช้ในการคำนวณเทอมของ Advection ด้วยเทคนิค Particle tracking based on a mixed Eulerian-Lagrangian method โดยใช้ค่ากำหนดตามค่า default ในแบบจำลอง ส่วนในเทอมของ Dispersion, Sink/source mixing and Chemical reaction จะถูกคำนวณหาด้วยระเบียบวิธี Finite difference



ภาพที่ 27 การกำหนดขอบเขตค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมลสาร

3.3.1 เทอม Dispersion

แบบจำลอง Visual MODFLOW ต้องกำหนดค่า Longitudinal dispersivity (α_L) เพื่อคำนวณการแพร่กระจายของมลสารผ่านตัวกลางในชั้นน้ำ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะตัวกลาง ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดค่า α_L เป็นค่า default ในแบบจำลอง เท่ากับ 10 เมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าของตัวกลางที่เป็นตะกอนกรวดทราย ปนทรายแป้ง ปนดินเหนียว (Spitz and Moreno, 1996)

3.3.2 เทอม Chemical reaction

เทอม Chemical reaction ใน Visual MODFLOW สามารถจำแนกออกเป็น 2 โปรแกรมย่อย คือ ส่วนของปฏิกิริยาดูดติดผิว (Sorption reaction) และปฏิกิริยาย่อยสลาย (Decay reaction) โดยในการศึกษาครั้งนี้จะวิเคราะห์เพียงเทอมของปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ (ค่า BOD) ที่เคลื่อนที่ในชั้นน้ำใต้ดินเท่านั้น โดยเลือกโปรแกรม Reaction แบบ First-order irreversible decay ซึ่งในกรณีที่ไม่มีการจำลองผลของปฏิกิริยาดูดติดผิว พารามิเตอร์ที่ต้องการคือ ค่าคงที่ปฏิกิริยา K_1 หรือ First-order reaction rate for dissolved (or mobile) phase (RC1 หรือ K_Mobile) เท่ากับ 0.05 ต่อวัน ซึ่งเป็นค่าคงที่ต่ำที่สุดที่พบในแหล่งน้ำผิว หรือคำนวณเป็นค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของการย่อยสลาย เท่ากับ 13.86 วัน ($T_{1/2} = \ln 2/0.05$)

4. การประเมินขอบเขตพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน

การเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพรีดอกซ์ในชั้นน้ำใต้ดิน และเนื่องจากค่า Eh นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน (ภาพที่ 6) ในการศึกษาครั้งนี้จึงอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวมาประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์อาร์เซนิกจากขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอนอ็อกซิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ ซึ่งถือว่าการจำลองในสถานการณ์สมมติ โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

4.1 การคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ไป (Oxygen deficit, D)

การคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ไป (D) ในการศึกษาครั้งนี้อาศัยโปรแกรมในแบบจำลอง Visual MODFLOW จำลองผลการเคลื่อนที่ของความเข้มข้น BOD ในน้ำชะขยะ ใน 2 สถานการณ์เพื่อคำนวณค่า D ดังนี้

สถานการณ์ที่ 1 การจำลองพลุมความเข้มข้นของน้ำชะขยะในเทอม Advection-Dispersion เป็นการจำลองเพื่อหาขอบเขตของพลุมที่เกิดจากการพัดพาและการแพร่กระจายในชั้นน้ำใต้ดิน หรือ เรียกว่าเป็นจำลองสถานะ Tracer ของระบบน้ำใต้ดิน ในช่วงคาบเวลาที่กำหนด (Stress-period) 10 ปีข้างหน้า ที่แสดงให้เห็นว่าน้ำมีการเคลื่อนที่พัดพาไปในชั้นน้ำใต้ดินได้ไกลเท่าใด

สถานการณ์ที่ 2 การจำลองพลุมความเข้มข้นของน้ำชะขยะในเทอม Advection-Dispersion-Reaction (Decay) เป็นการจำลองเพื่อหาขอบเขตของพลุมที่เกิดจากการพัดพา การแพร่กระจาย และการย่อยสลายตัวของค่า BOD ของระบบน้ำใต้ดิน ในช่วงคาบเวลาที่กำหนด (Stress-period) 10 ปีข้างหน้า ที่แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์เมื่อเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพในชั้นน้ำใต้ดิน

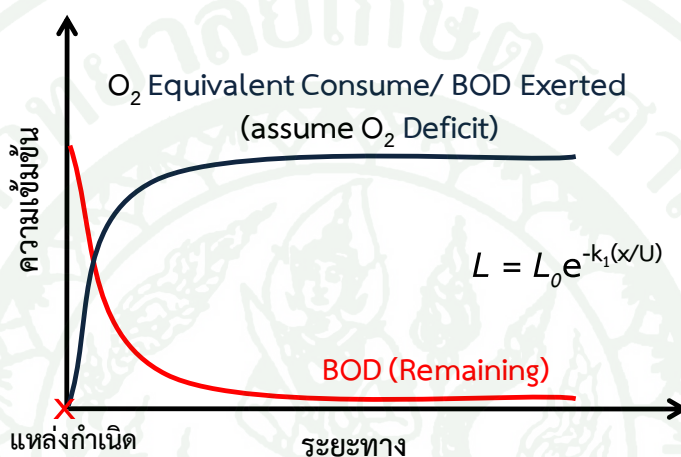
นำผลการจำลองใน 2 สถานการณ์ มาคำนวณหาค่า D โดยการซ้อนข้อมูล (Overlay) ค่าที่ตำแหน่งกริดเดียวกัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่า BOD ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่สมมูลกับปริมาณความต้องการของออกซิเจนในปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (BOD Exerted or Oxygen Equivalent Consume) แสดงดังภาพที่ 28

$$D = BOD_{(Adv,Dis)} - BOD_{(Adv,Dis,Rea)} \quad (19)$$

เมื่อ

$BOD_{(Adv,Dis)}$ ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการจำลองด้วยเทอม Advection-Dispersion

$BOD_{(Adv,Dis,Rea)}$ ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการจำลองด้วยเทอม Advection-Dispersion-Reaction



ภาพที่ 28 ปริมาณสารอินทรีย์ที่สมมูลกับปริมาณความต้องการของออกซิเจนในปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่แปรผันตามระยะทาง

4.2 การประเมินขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก

การคำนวณเพื่อหาขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก อาศัยความสัมพันธ์จากแนวคิดของแบบจำลอง Oxygen sag curve ของ Streeter-Phelps โดยคำนวณหาปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ที่ปรากฏของระบบน้ำใต้ดิน ในช่วงคาบเวลาที่กำหนด (Stress-period) 10 ปี ข้างหน้า จากการซ้อนทับข้อมูลค่า D และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้น (Initial dissolved oxygen) ให้กับระบบน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา จากนั้นทำการสร้างเส้นชั้นความเข้มข้นของค่า DO ที่ 0.5 mg/l เพื่อแสดงขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก

ผลและวิจารณ์

1. การจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดิน

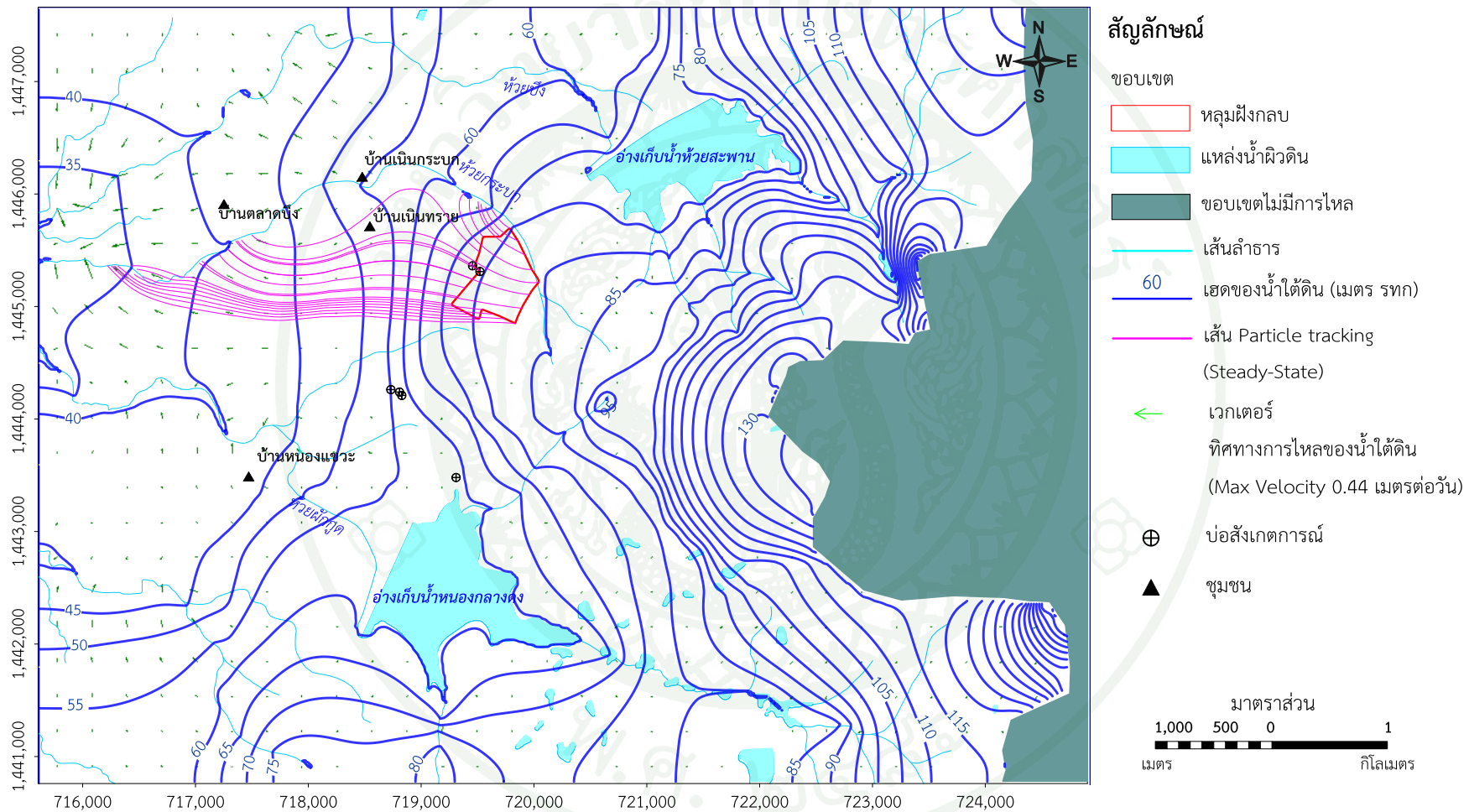
1.1 ระบบการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา

ผลการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่สภาวะคงที่ (Steady-State condition) พบว่า ทิศทางการไหลของระบบน้ำใต้ดินผ่านพื้นที่หลุมฝังกลบมีทิศทางจากตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ตามแนวลักษณะลำรางธรรมชาติ ระดับเขตของน้ำใต้ดิน ณ แหล่งกำเนิดมีค่าอยู่ในช่วง 75-80 เมตร รทก. และจากการจำลองเส้น Partical tracking ด้วยโปรแกรมย่อย MODPATH เพื่อแสดงแนวโน้มการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากแหล่งกำเนิดในเทอมของ Advection-Dispersion ที่สภาวะคงที่ (Steady-State condition) พบว่า อนุภาคจากแหล่งกำเนิดจะถูกพัดพาและแพร่กระจายไปทางทิศตะวันตก ผ่านพื้นที่หมู่บ้านเนินทราย แล้วระบายออกไปตามแนวลำห้วยกระบก แสดงดังภาพที่ 29

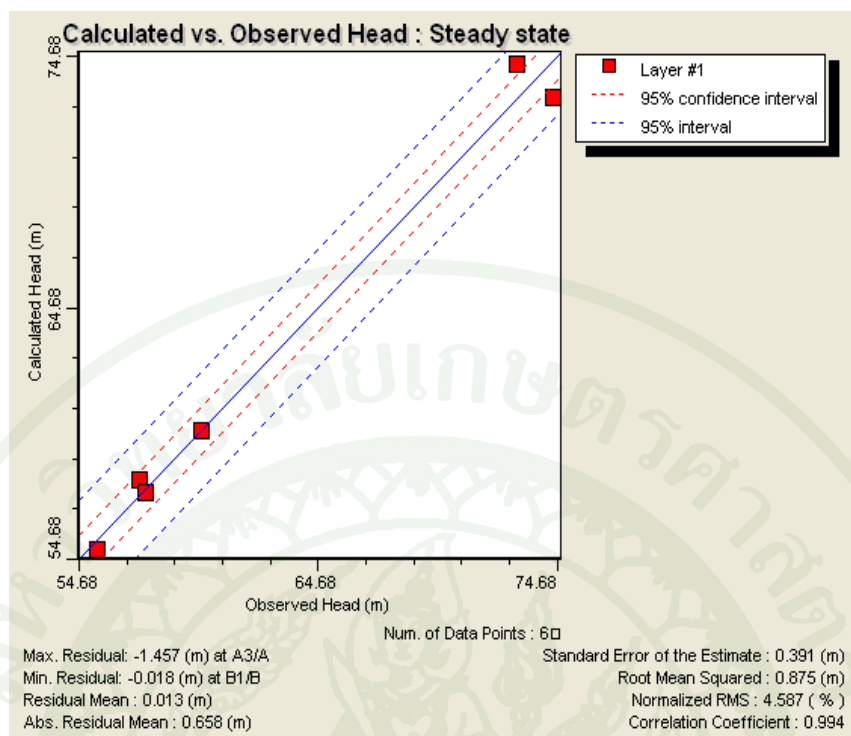
1.2 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady-State) ปรับแก้จากค่าสัมประสิทธิ์การให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (K_x) ตามช่วงค่าที่กำหนดตามลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของชั้นน้ำใต้ดิน โดยกำหนดให้ผลคำนวณค่าเฮดที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างจากค่าเฮดสังเกตการณ์ไม่เกิน 1.5 เมตร ระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลองนี้ มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Residual mean) 0.013 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (Absolute residual mean) 0.658 เมตร มีค่ารากกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean squared) 0.875 เมตร ผลคำนวณสอดคล้องตามแนวเส้นทแยงมุม (Diagonal Line) และอยู่ภายในเส้นความเชื่อมั่น 95% แสดงดังภาพที่ 30

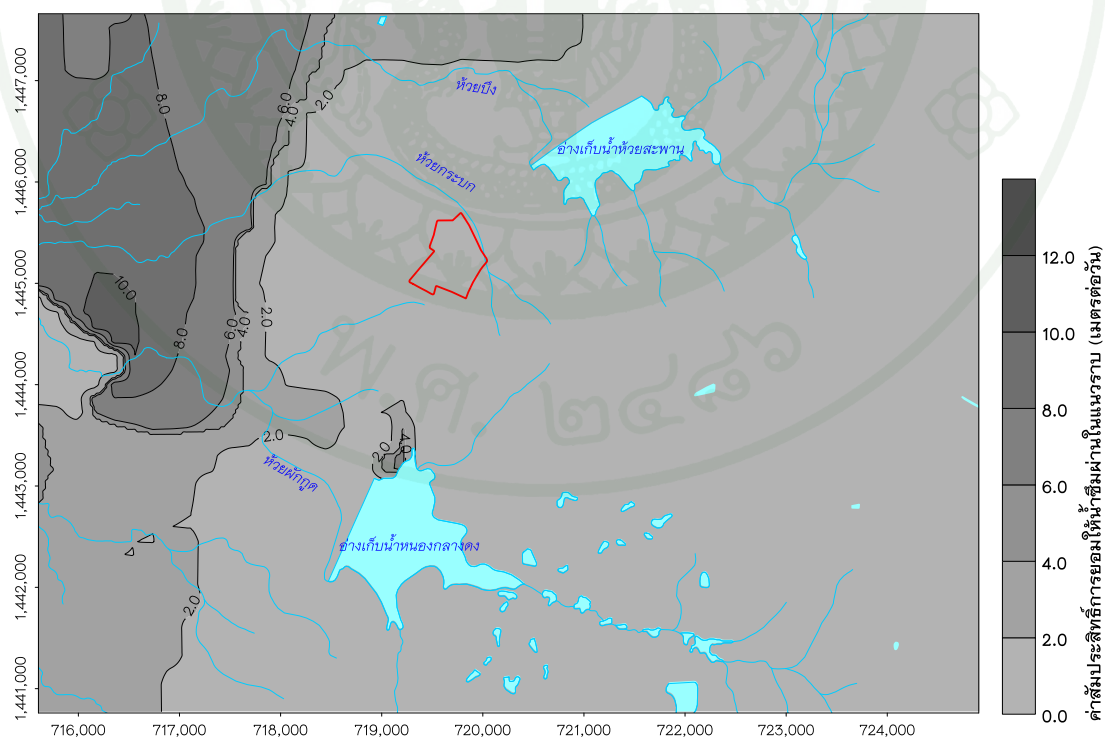
ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (K_x) ที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลอง พบว่า ชั้นน้ำแกรนิต (Gr) ที่เป็นชั้นทรายปนดินเหนียวถึงทรายแป้งมีค่า K_x ในช่วง 0.01–2.26 เมตรต่อวัน ส่วนชั้นน้ำตะกอนเชิงเขา (Qcl) ที่เป็นชั้นทรายปนทรายแป้งถึงชั้นกรวดทรายมีค่า K_x ในช่วง 0.02–11.03 เมตรต่อวัน แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 29 ผลการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่สภาวะคงที่ (Steady-State)



ภาพที่ 30 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady-State)

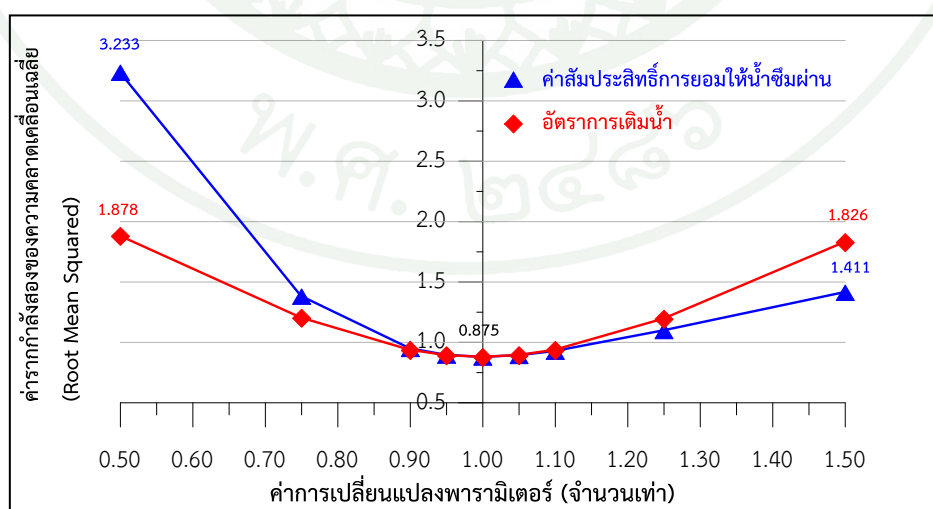


ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (Kx)

จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2551) นั้นพบว่า ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินผ่านพื้นที่แหล่งกำเนิดหลุมฝังกลบมีลักษณะสอดคล้องกัน โดยผลการเปรียบเทียบผล Visual MODFLOW ของการศึกษาที่ผ่านมา มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำมีค่าเท่ากับ 0.07 เมตรต่อวัน ค่าอัตราการเพิ่มเติมน้ำลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินคิดเป็นร้อยละ 0.01 ของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย ส่วนผลในการเปรียบเทียบของการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำมีค่าเท่ากับ 0.01–11.0.3 เมตรต่อวัน และมีอัตราการเพิ่มเติมน้ำลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินจำแนกตามขอบเขตของชั้นน้ำ Gr และ Qcl ในแบบจำลองคิดเป็นร้อยละ 0.06 และ 0.16 ของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ย

1.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองซ้ำ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองหลังจากได้มีการปรับแก้ค่าแล้ว โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหว คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และอัตราการเติมน้ำ โดยทำการเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจากค่าที่ทำปรับแก้สมบูรณ์แล้วในแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบกับค่ารากกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean squared) โดยพบว่าการลดค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านให้กับแบบจำลองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของเฮดที่ได้จากการคำนวณไปจากค่าสังเกตการณ์ ถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่อ่อนไหวกว่าอัตราการเติมน้ำ และจากผลทดสอบ พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านลดลง 0.5 เท่า ดังภาพที่ 32



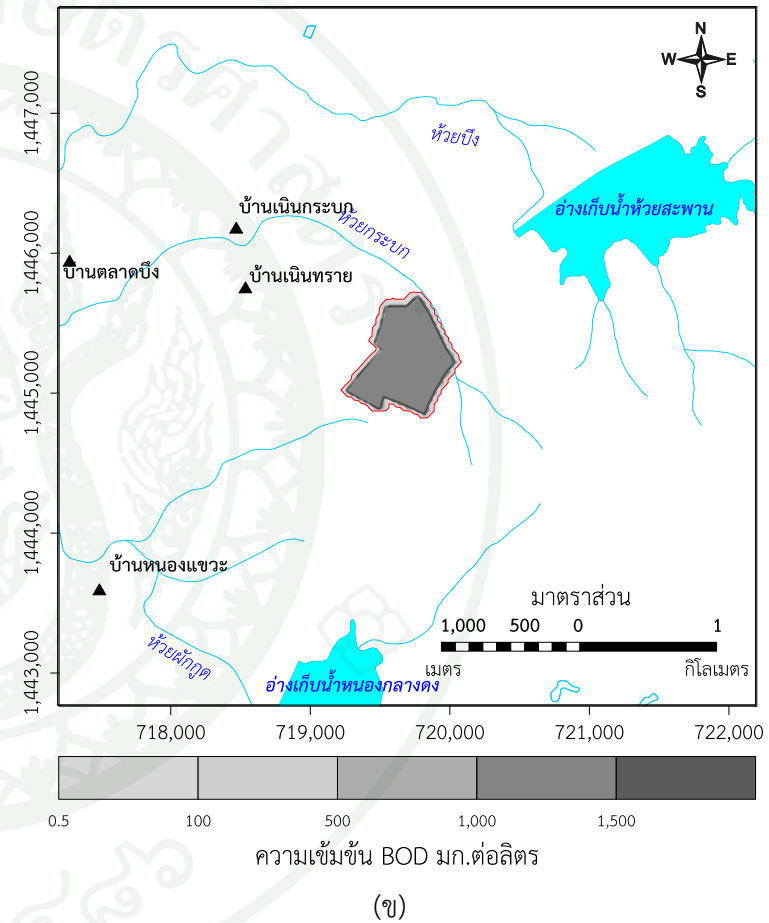
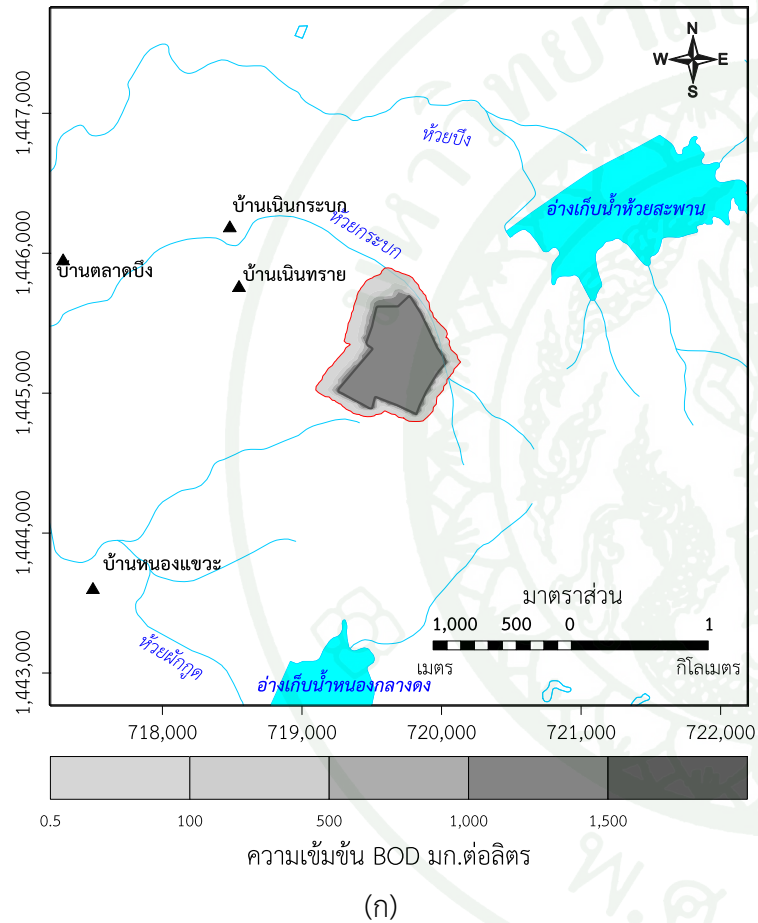
ภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

2. การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำชะขยะในชั้นน้ำใต้ดิน

การจำลองการเคลื่อนที่ของพหุคูณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชั้นน้ำใต้ดิน กำหนดเป็นค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะ โดยจำลองให้มีความเข้มข้นคงที่ 1,500 mg/l เป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง โดยทำนายพหุคูณการเคลื่อนที่ในเวลา 10 ปีข้างหน้า จากสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่สถานะคงที่ แสดงผลการจำลองโดยเปรียบเทียบกันระหว่างพหุคูณความเข้มข้นของค่า BOD ในน้ำชะขยะ ในเทอมของ Advection-Dispersion กับ Advection-Dispersion-Reaction ดังภาพที่ 33 (ก) และ (ข)

จากภาพที่ 33 (ก) พบว่า พหุคูณความเข้มข้นของค่า BOD ในเทอมของ Advection-Dispersion สามารถเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นระยะทางสูงประมาณ 300 เมตร (กำหนดขอบเขตพหุคูณที่เส้นชั้นความเข้มข้น 0.5 mg/l) ณ เวลา 10 ปีข้างหน้า และจากภาพที่ 33 (ข) เมื่อคำนวณเทอมของ Advection-Dispersion-Reaction ที่มีการเพิ่มเติมฟังก์ชันของปฏิกิริยาสลายตัวในแบบจำลอง โดยกำหนดค่า K_1 เท่ากับ 0.05 ต่อวัน หรือ มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 13.86 วัน พบว่า ขอบเขตค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะที่แพร่กระจายในชั้นน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษา ลดขอบเขตลงอย่างมาก สามารถเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่ระยะประมาณ 100 เมตร (กำหนดขอบเขตพหุคูณที่เส้นชั้นความเข้มข้น 0.5 mg/l) ณ เวลา 10 ปีข้างหน้า ทั้งนี้เนื่องจากระบบน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาในขอบเขตทางอุทกธรณีวิทยาแบบชั้นน้ำแกรนิตมีตะกอนชั้นดินชั้นหินค่อนข้างทึบน้ำ ค่า K_x อยู่ในช่วง 0.01–2.26 เมตรต่อวัน และพบว่ามีความเร็วของการไหลผ่านชั้นหินอุ้มน้ำประมาณ 0.001-0.030 เมตรต่อวัน

จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในเวลา 10 ปีข้างหน้า มวลน้ำใต้ดินที่เคลื่อนที่ผ่านแหล่งกำเนิดหลุมฝังกลบสามารถพัดพาน้ำชะขยะให้เคลื่อนที่ไปได้ไกลสุดประมาณ 300 เมตร แต่ภายใต้สภาวะที่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ หรือ BOD นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลสุดไม่เกิน 100 เมตร ซึ่งมีลักษณะการแพร่กระจายของพหุคูณดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาครั้งที่ผ่านมา (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2551) จากสภาวะของชั้นน้ำใต้ดินเช่นนี้ แสดงว่า หากมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากแหล่งกำเนิดหลุมฝังกลบในพื้นที่ศึกษา ขอบเขตพื้นที่ปนเปื้อนดังกล่าวจะมีผลกระทบไม่ไกลจากแหล่งกำเนิด

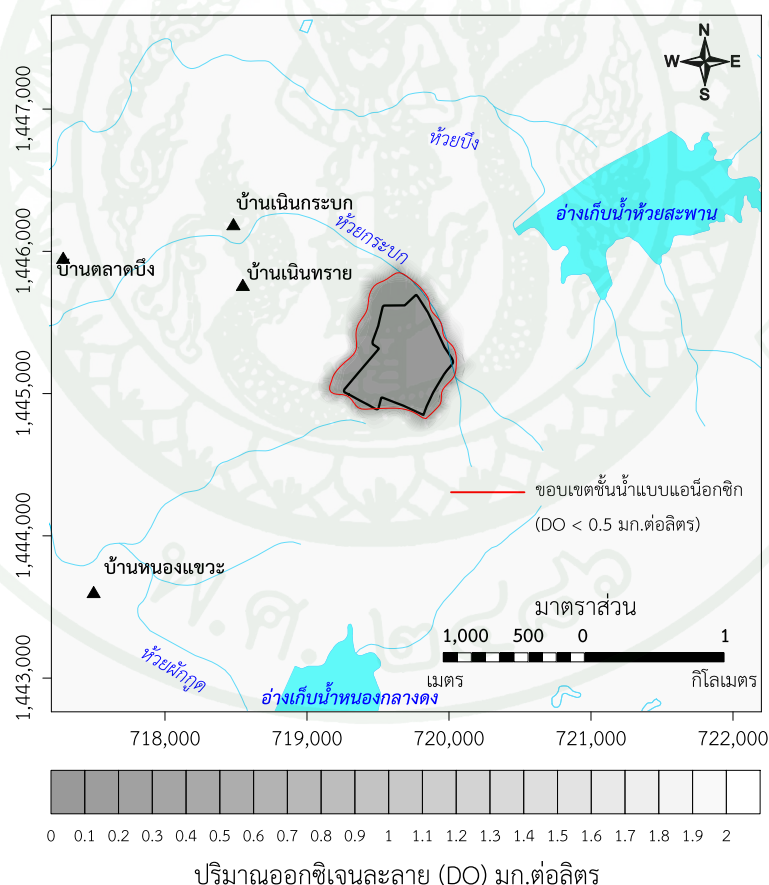


ภาพที่ 33 พลุุมความเข้มข้น BOD ในน้ำชะขยะที่สภาวะคงที่ในคาบเวลา 10 ปีข้างหน้า

(ก) เทอมของ Advection-Dispersion (ข) เทอมของ Advection-Dispersion-Reaction

3. ขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก

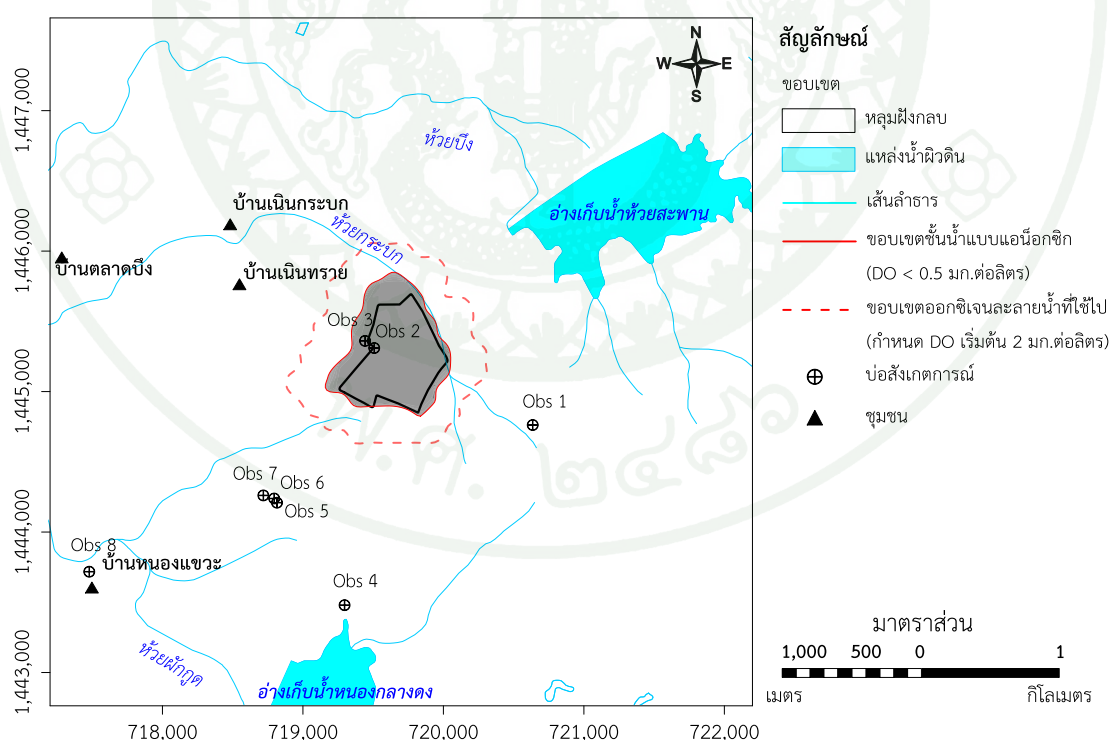
จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะ สามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ไปในปฏิกิริยาย่อยสลาย (ค่า D) ได้จากการซ้อนทับข้อมูล (Overlay) โดยในการแสดงขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิกในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการประเมินในกรณีสมมติ ซึ่งกำหนดให้ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษามีค่าออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้น (Initial DO) ในน้ำใต้ดิน เท่ากับ 2.0 mg/l และไม่คำนึงถึงผลของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสถานะไม่มีออกซิเจนและปฏิกิริยาการเติมอากาศลงสู่ น้ำใต้ดิน จึงสามารถแสดงขอบเขตของชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิกของบริเวณพื้นที่ศึกษาในกรณีที่พื้นที่หลุมฝังกลบมีการรั่วไหลของน้ำชะขยะอย่างต่อเนื่อง ในคาบเวลา 10 ปีข้างหน้า โดยอิทธิพลจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์จากน้ำชะขยะ มีแนวโน้มทำให้เกิดชั้นน้ำแอน็อกซิกที่ระยะห่างประมาณ 200 เมตรจากแหล่งกำเนิด ได้ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ขอบเขตชั้นน้ำแอน็อกซิก (เมื่อกำหนดปริมาณ DO เริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/l)

4. การประเมินการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก

การประเมินการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกในพื้นที่ศึกษานั้น ดำเนินการศึกษาในกรณีสมมติที่เลวร้ายที่สุด (Worst case scenario) กรณีมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์จากน้ำชะขยะต่อเนื่องใน 10 ข้างหน้า จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาในปี พ.ศ. 2552 พบว่าน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษามีค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 6.0-6.5 และพบความเข้มข้นของอาร์เซนิกอยู่ในช่วงระหว่าง 0.001-0.670 mg/l (ค่าสูงสุดที่ บ่อ Obs 3) โดยจากผลการวิเคราะห์หาขอบเขตของชั้นน้ำแอน็อกซิก ตามภาพที่ 35 แสดงแนวโน้มได้ว่าในบริเวณขอบเขตพื้นที่ดังกล่าวอาจปรากฏสปีชีส์ของอาร์เซนิก คือ As(III) ในกลุ่ม H_3AsO_3 เป็นตัวหลักเนื่องจากน้ำใต้ดินมีค่า pH 6.0-6.5 ส่วนขอบเขตพื้นที่ถัดมา คือ ระหว่างขอบเขตแอน็อกซิกถึงขอบเขตเส้นประ ซึ่งแสดงถึงขอบเขตที่มีการใช้ออกซิเจนไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์ อาจกล่าวได้ว่าเป็นพื้นที่บัพเพอร์ที่จะได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำชะขยะต่อการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก ส่วนพื้นที่นอกเส้นประนั้นแสดงถึงพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำชะขยะ ซึ่งในกรณีอาจปรากฏสปีชีส์ของอาร์เซนิก As(V) ในกลุ่ม $H_2AsO_4^-$ ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.001-0.140 mg/l



ภาพที่ 35 ขอบเขตพื้นที่ที่มีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก จากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ลงสู่ดิน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์น้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาได้มีการทบทวนและปรับปรุงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ไปจากการศึกษาครั้งก่อน ซึ่งสามารถยอมรับความถูกต้องตามลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ ทั้งนี้แบบจำลองได้อาศัยข้อมูลทุติยภูมิของการศึกษาแบบจำลองในครั้งก่อนหน้า แต่ได้ทำการเพิ่มเติมและตรวจสอบข้อมูลทุติยภูมิ และใช้ผลการตรวจวัดค่าระดับน้ำสังเกตการณ์ในปีล่าสุด (ปี พ.ศ. 2552) พบว่า ทิศทางการไหลของระบบน้ำใต้ดินผ่านพื้นที่หลุมฝังกลบมีทิศทางจากตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ตามแนวลักษณะลำรางธรรมชาติ สอดคล้องกับการศึกษาครั้งก่อน โดยผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Residual mean) 0.013 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (Absolute residual mean) 0.658 เมตร มีค่ารากกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean squared) 0.875 เมตร ผลคำนวณสอดคล้องตามแนวเส้นทแยงมุม (Diagonal Line) และอยู่ภายในเส้นความเชื่อมั่น 95% โดยพารามิเตอร์ที่มีค่าอ่อนไหวในแบบจำลอง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อลดค่าลง 0.5 เท่า

2. การเคลื่อนที่ของพหุคูณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะ กำหนดสถานการณ์ให้มีการปนเปื้อนความเข้มข้นของสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง มีความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะเท่ากับ 1,500 mg/l และจำลองในสถานะที่มีการย่อยสลายทางชีวภาพที่กำหนดให้มีความคงที่ปฏิกิริยาสลายตัว K_1 เท่ากับ 0.05 ต่อวัน หรือ มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 13.86 วัน พบว่า จากผลการจำลองในเทอม Advection-Dispersion แสดงให้เห็นว่าน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ผ่านหลุมฝังกลบได้ระยะทางไกลสุดประมาณ 300 เมตร จากแหล่งกำเนิด ทั้งนี้เนื่องจากระบบน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาในขอบเขตทางอุทกธรณีวิทยาแบบชั้นน้ำแกรนิต (Gr) มีตะกอนชั้นดินชั้นหินค่อนข้างที่บ้น้ำ มีลักษณะเป็นตะกอนดินทรายปนทรายแป้ง ถึงทรายแป้งปนดินเหนียว โดยแบบจำลองมีค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในแนวราบ (K_x) บริเวณพื้นที่ชั้นน้ำ Gr อยู่ในช่วง 0.01–2.26 เมตรต่อวัน ความเร็วของการไหลผ่านชั้นหินอุ้มน้ำที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 0.001–0.030 เมตรต่อวัน และเมื่อจำลองในเทอม Advection-Dispersion-Reaction พบว่า พหุคูณความเข้มข้นของ BOD ในน้ำชะขยะสามารถเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดและแพร่กระจายในชั้นน้ำใต้ดินโดยเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดได้ระยะทางไกลสุดประมาณ 100 เมตร (กำหนดขอบเขตพหุคูณที่เส้นชั้น

ความเข้มข้น 0.5 mg/l) ณ เวลา 10 ปีข้างหน้า จึงพบว่าเมื่อน้ำชะขยะปนเปื้อนออกมาจากแหล่งกำเนิด สารอินทรีย์จะถูกละลายและมีพหุคูณความเข้มข้นเคลื่อนที่ได้ไม่ไกลจากแหล่งกำเนิด

3. การประเมินขอบเขตชั้นน้ำแบบอ็อกซิกและแอน็อกซิก เมื่อกำหนดค่าออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้น (Initial DO) ในน้ำใต้ดิน เท่ากับ 2.0 mg/l โดยไม่คำนึงถึงผลของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสถานะไม่มีออกซิเจนและปฏิกิริยาการเติมอากาศลงสู่น้ำใต้ดิน ในกรณีที่พื้นที่หลุมฝังกลบมีการรั่วไหลของน้ำชะขยะอย่างต่อเนื่องในคาบเวลา 10 ปีข้างหน้า ผลกระทบจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์จากน้ำชะขยะ มีแนวโน้มทำให้เกิดสภาพของชั้นน้ำแอน็อกซิกที่ระยะห่างประมาณ 200 เมตรจากแหล่งกำเนิด

4. จากผลกระทบของการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะต่อสถานะของน้ำใต้ดิน ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนละลายในชั้นน้ำใต้ดิน จำแนกออกเป็นขอบเขตของชั้นน้ำอ็อกซิกและแอน็อกซิก โดยผลกระทบจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะอย่างต่อเนื่อง ณ เวลา 10 ปีข้างหน้า สามารถคาดการณ์แนวโน้มของขอบเขตพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิก จำแนกออกเป็น 3 พื้นที่ ดังนี้

1) ขอบเขตพื้นที่ได้รับผลกระทบ หมายถึง ขอบเขตชั้นน้ำแบบแอน็อกซิก (มีระยะทางไกลสุดประมาณ 200 เมตร จากหลุมฝังกลบ) สปีชีส์ของอาร์เซนิกที่พบมีแนวโน้มเป็น As(III) ในกลุ่ม H_3AsO_3 เนื่องจากน้ำใต้ดินมีค่า pH 6.0-6.5 ในพื้นที่ดังกล่าวจึงเป็นพื้นที่เสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบจากความเป็นพิษของอาร์เซนิกอย่างรุนแรง เนื่องจากพบว่ามีค่าความเข้มข้น Total As อยู่ในช่วง 0.001-0.670 ซึ่งมีค่าสูงเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 0.01 mg/l

2) ขอบเขตพื้นที่บัฟเฟอร์ หมายถึง พื้นที่ชั้นน้ำแบบอ็อกซิกที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกอย่างไม่แน่ชัด เนื่องจากการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดิน แต่ไม่ถึงกับทำให้เกิดสภาพรีดักชัน โดยในการจะระบุถึงสปีชีส์ได้นั้นต้องทำนายจากผลการตรวจวัดค่า Eh หรือ ORP ในน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามพื้นที่นี้ยังไม่ครอบคลุมถึงชุมชนใกล้เคียง

3) ขอบเขตพื้นที่ไม่ได้รับผลกระทบ หมายถึง พื้นที่ชั้นน้ำแบบอ็อกซิกที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะจากแหล่งกำเนิด ในกรณีที่พื้นที่ดังกล่าวอาจพบ As(V) ในกลุ่ม $H_2AsO_4^-$ ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.001-0.140 mg/l

ข้อเสนอแนะ

แนวทางการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาด้วยแบบจำลองเพื่อประเมินขอบเขตพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบเนื่องจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะต่อสปีชีส์ของอาร์เซนิกและการเคลื่อนที่ โดยอาศัยข้อมูลหัตถภูมิและค่ากำหนดจากเอกสารและรายงานการวิจัยต่างๆ ควรได้รับการเพิ่มเติมผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในน้ำใต้ดิน เพื่อแสดงแนวโน้มและจำลองการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของอาร์เซนิกได้ถูกต้องตามทฤษฎีมากขึ้น และสามารถเพิ่มเติมผลการศึกษาของพารามิเตอร์บางประการ เช่น ค่าคงที่ปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดิน โดยสร้างแบบจำลองกายภาพหรือตรวจวัดในภาคสนาม ค่าคงที่การเติมอากาศในน้ำใต้ดิน หรือศึกษาสภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ควบคุมการปลดปล่อยอาร์เซนิกในพื้นที่ศึกษา เพื่อสามารถแสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงได้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในพื้นที่ศึกษามากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2552. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนพิเศษ 85 ง ลงวันที่ 21 พฤษภาคม 2552

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2521. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางการจัดการการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยเทศบาลในพื้นที่ภาคเหนือและภาคกลาง. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

_____. 2543. โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแนวทางการจัดการการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยที่ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินบริเวณสถานที่กำจัดมูลฝอยเทศบาลในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

_____. 2552. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). แหล่งที่มา: ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ, <http://msds.pcd.go.th/>, 22 พฤศจิกายน 2552.

กรมทรัพยากรธรณี. 2550. ธรณีวิทยาประเทศไทย. ครั้งที่ 2. กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2551. โครงการประเมินศักยภาพด้านคุณภาพน้ำบาดาล วางระบบ
ติดตามการปนเปื้อนและวางแผนรายละเอียดการฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาลในพื้นที่
จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี. กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

_____. 2551. ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล. ใน:
โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจ และพัฒนาระบบน้ำบาดาล เล่มที่ 4/10. กรม
ทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

_____. 2551. ชุดคู่มือการปฏิบัติงานด้านการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล. ใน: โครงการ
จัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจ และพัฒนาระบบน้ำบาดาล เล่มที่ 5/10. กรมทรัพยากรน้ำ
บาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

จตุพร วงษ์จาด. 2542. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสปีอาร์ ที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ชนิด
ผง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2537. ปัญหาพิษสารหนู อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช.
สถาบันวิจัยสาธารณสุขไทย มูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ

ธิดารัตน์ ก้องวิวัฒน์สกุล. 2543. การระเหยน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ก๊าซที่เกิดจากหลุมฝังกลบขยะ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เบกพล ก้านสังวร. 2542. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยแบบโคเมตาบอลิคด้วยระบบยูเอเอสบี. วิทยา
นิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปาริชาติ จุลพันธุ์. 2544. การบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอย โดยวิธีการตกตะกอนด้วยเบนโทไนด์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปิยะ พานิชปฐม. 2544. การศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิ
พนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์. 2546. **น้ำบาดาล**. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ศักดิ์ ชนาเกียรติ. 2544. **การตรวจสอบการแพร่กระจายของสารหนูในน้ำ ณ บ่อฝังกลบากแร่ สารหนูที่เทือกเขาร่อนนา-สรวงจันทร์ หมู่ที่ 2 และพื้นที่ใกล้เคียง ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช**. สำนักทรัพยากรธรณี 1 สงขลา, กรมทรัพยากรธรณี

สัญญา สิริวิทยาปกรณ์. 2550. **แนวทางปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน**. ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2537. **ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537**

_____. 2543. **ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 117 ตอนพิเศษ 95 ง ลงวันที่ 15 กันยายน 2543**

สำนักชลประทานที่ 9. 2552 **สถานการณ์น้ำของอ่างเก็บน้ำต่างๆ ในเขตสำนักชลประทานที่ 9**. แหล่งที่มา: ศูนย์ข้อมูลสถานการณ์น้ำ ส่วนจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา สำนักชลประทานที่ 9, <http://www.rid9.com/>, มกราคม 2553.

อนุชิต สวัสดิ์. 2547. **การลดอัตราการแพร่ระบาดของก๊าซมีเทนจากพื้นที่กำจัดมูลฝอย โดยใช้ หน้าดินที่มีการปลูกพืช**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Abbene, I.J., 2010. **Shallow Groundwater Quality in the Village of Patchogue, Suffolk County, New York**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5132

- Bendoricchio G. and S.E. Jorgensen. 2001. Dynamic Biogeochemical Model In; *Fundamentals of Ecological Modelling*, Third Edition [Chapter 7] ; ELSEVIER
- Bhattacharya, P., Frisbie, S.H., Smith, E., Naidu, R., Jacks G., and B. Sarkar. 2002. Arsenic in the Environment: A Global Perspective. In. *Handbook of Heavy Metals in the Environment*. Sarkar, B. (Ed) Marcell Dekker Inc., New York, 145–215.
- Brookins, D. G., 1988. **Eh-pH Diagrams for Geochemistry** Berlin, Springer.
- Chapra, S.C. 1997. **Surface Water-Quality Modeling**. McGraw-Hill, New York.
- Chiang, W. and W. Kinzelbach. 2001. **3D-Groundwater Modeling with PMWIN**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Fetter, C.W. 1999. **Contaminant Hydrogeology**. 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Fetter, C.W. 2001. **Applied Hydrogeology**. 4th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Keimowitz, A.R., Simpson, H.J., Stute, M, Datta, S., Chillrud, S.N., Ross, J. and M. Tsang. 2005. Naturally occurring arsenic: Mobilization at a Landfill in Maine and Implications for Remediation. **Applied Geochemistry**. 20: 1985-2002.
- Lee. M.K., Saunders, J.A., Wilkin, R.T., and M. Shahnewaz. 2005 **Geochemical Modeling of Arsenic Speciation and Mobilization: Implications for Bioremediation**. In. *Advances in Arsenic Research: Integration of Experimental and Observational Studies and Implications for Mitigation*. Vol. 915 O'Day, P.A., Vlassopoulos, D., Meng, X. and L.G. Benning. American Chemical Society Symposium Series. Washington, DC, pp. 191-205.

- Rose, S. and A. Long 1988. Dissolved Oxygen Systematics in the Tucson Basin Aquifer. **Water Resour. Res.** 24(1): 127–136
- Saunders, J.A., Pritchett, M.A., and R.B. Cook. 1997. Geochemistry of Biogenic Pyrite and Ferromanganese Stream Coatings: A Bacterial Connection? **Geomicrobial. J.**, 14: 203-217.
- _____, Mohammad, S., Korte, N.E., Lee. M.K., Fayek, M., Castle, D., and M.O. Barnett. 2005. **Groundwater Geochemistry, Microbiology, and Mineralogy of Two Arsenic-bearing Holocene Alluvial Aquifers from the USA.** In. *Advances in Arsenic Research: Integration of Experimental and Observational Studies and Implications for Mitigation*. Vol. 915 O'Day, P.A., Vlassopoulos, D., Meng, X. and L.G. Benning. (Ed) American Chemical Society Symposium Series. Washington, DC, pp. 191-205.
- Smedley, P.L. and D.G. Kinniburgh. 2002. A Review of the Source, Behavior and Distribution of Arsenic in Natural Waters. *Appl. Geochem.*, 17, 517-568
- Spitz, Karheinz and J. Moreno. 1996. **A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling.** John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 1995. **Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters.** 3rd ed., Wiley, New York
- Tchobanoglous, G. and E.D. Schroeder. 1985. **Water Quality, Characteristics, Modeling, Modification.** Addison-Wesley.
- _____. Theisen, H. and S. Vigil. 1993 **Integrated Solid Waste Management : Engineering Principles and Management Issues.** McGraw-Hill, New York.

- Wang, Y. and Y. Deng. 2009. **Environmental Geochemistry of High-Arsenic Aquifer Systems.** In: *Heavy metals in the Environment*, [Chapter5.] Wang, L. K., Chen, J. P., Hung, Y. and Shamas, N. K. (Ed) CRC Press., Boca Raton.
- Watts, R.J. 1998. **Hazardous Wastes: Sources, Pathways, Receptors.** John Wiley & Sons, Inc.,
- Wen-Fu Chen and Tsung-Kwei Liu, 2003. Dissolved oxygen and intrate of groundwater in Choshui Fan-Delta, western Taiwan. **Environmental Geology**, 44. 731–737
- Winograd, I.J. and F.N. Robertson. 1982. Deep Oxygenated Groundwater: Anomaly or Common Occurrence. **Science**, 216: 1227–1230
- Zheng, C. 1996. **A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems (MT3D) Reference Manual.** Waterloo Hydrogeologic, SS. Papadopoulos & Associate, Inc. Rockville, Maryland 20852.





ภาคผนวก ก
ผลเจาะสำรวจชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษา

ตารางผนวกที่ ก1 ลักษณะชั้นดินชั้นหินบริเวณพื้นที่ศึกษาจากฐานข้อมูลพสุธา กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
1	DH22	709590	1450400	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านวังล่าง	30	0	1.5	Sand
									1.5	6	Clay
									6	18.2	Gravel/Sand
									18.2	24.3	Clay/Rock
									24.3	30.4	Clay/Rock
2	DH23	715400	1443840	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองแขวะ	33	0	12.1	Sand
									12.1	13.7	Gravel
									13.7	18.2	Sand
									18.2	19.8	Gravel
									19.8	22.8	Sand
									22.8	25.9	Gravel
									25.9	33.5	Granite
3	DH24	710900	1450340	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองตาก้อง	30	0	3	Sand
									3	10.6	Sand
									10.6	15.2	Clay/Sand
									15.2	21.3	Granite
									21.3	27.4	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
4	DH25	711900	1450400	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านกลาง	18	27.4	30.4	Granite
									0	7.6	Sand
									7.6	9.1	Clay
									9.1	10.6	Gravel/Sand
									10.6	12.1	Gravel/Sand
									12.1	15.2	Granite
									15.2	16.7	Granite
5	DH26	710790	1439940	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองบน	24	16.7	18.2	Granite
									0	3	Sand
									3	10.6	Clay/Sand
									10.6	13.7	Granite
									13.7	15.2	Granite
									15.2	18.2	Granite
									18.2	21.3	Granite
6	DH27	715900	1443750	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองแขวะ	22.5	21.3	24.3	Granite
									0	1.5	Sand
									1.5	4.5	Clay/Sand

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
7	DH28	719000	1445840	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองหว่า	18	4.5	15.2	Gravel
									15.2	21.3	Granite
									21.3	22.8	Granite
									0	3	Sand
									3	9.1	Sand/Clay
									9.1	12.1	Granite
									12.1	13.7	Granite
									13.7	16.7	Granite
8	DH29	708900	1449190	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านเนินทราย	21	16.7	18.2	Granite
									0	3	Sand
									3	10.6	Rock/Clay
									10.6	12.1	Granite
									12.1	15.2	Granite
									15.2	18.2	Granite
									18.2	19.8	Granite
									19.8	21.3	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
9	DH109	726248	1436646	ชลบุรี	ศรีราชา	บ่อวิน	วัดเนินจะบก	90	0	6.1	Sand/Gravel
									6.1	91.4	Granite
10	DH0010	712900	1440690	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	โรงเรียนบ้านโป่งสะเก็ด	60	0	9.1	Clay/Gravel
									9.1	18.2	Granite
									18.2	25.9	Granite
									25.9	33.5	Granite
									33.5	41.1	Granite
									41.1	48.7	Granite
									48.7	56.4	Granite
									56.4	60.9	Granite
11	DH0021	713590	1440650	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านตะเคียนเตี้ย	30	0	1.5	Sand
									1.5	25.9	Gravel
									25.9	30.4	Granite
12	DH0050	714040	1452150	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	โรงเรียนวัดหนองขาม	33	0	3	Granite
									3	6	Granite
									6	33.5	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
13	DH0051	712840	1450800	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	โรงเรียนบ้านเขาติน	25.5	0	3	Laterite
									3	15.2	Rock
									15.2	21.3	Granite
14	DH0052	728000	1454090	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	บ้านหินกอง	37.5	0	3	Sand/Gravel
									3	4.5	Clay
									4.5	6	Granite
									6	12.1	Granite
									12.1	19.8	Granite
									19.8	27.4	Granite
									27.4	35	Granite
									35	38.1	Granite
15	DH0068	739790	1447400	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	วัดระเรังรังสรรค์	21	0	4.5	Sand
									4.5	18.2	Granite
									18.2	21.3	Granite
16	DH0069	735500	1450500	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	วัดเขาคันทรง	43.5	0	3	Sand
									3	4.5	Clay
									4.5	19.8	Rock

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
17	DH0101	716090	1438300	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านนาวัง	34.5	19.8	32	Granite
									32	44.2	Granite
									0	18.2	Gravel/Sand
									18.2	25.9	Gravel/Sand
									25.9	27.4	Granite
18	DH0104	714040	1452050	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	วัดหนองขาม	37.5	27.4	35	Granite
									0	3	Sand
									3	13.7	Granite
									13.7	15.2	Granite
									15.2	22.8	Granite
19	DH0127	730551	1444511	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	โรงเรียนบ้านหุบหอน	27.9	22.8	30.4	Granite
									30.4	38.1	Granite
									0	1.5	Sand
									1.5	3	Clay/Sand
									3	9.1	Gravel/Sand
									9.1	12.1	Granite
									12.1	15.2	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
20	DH0135	720450	1456150	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	บ้านหนองแล้ง	25.5	15.2	18.2	Granite
									18.2	21.3	Granite
									21.3	24.3	Granite
									24.3	27.4	Granite
21	DH0163	713133	1441396	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	ชมรมผู้เลี้ยงโค บ้านต้นกระรอก	24	0	4.5	Sand
									4.5	9.1	Clay/Sand
									9.1	18.2	Sand
									18.2	19.8	Granite
22	DH0181	-	-	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	โรงเรียนบริษัทไทยกลีกรสงเคราะห์	48	19.8	25.9	Granite
									0	1.3	Sand
									1.3	2.2	Granite/Clay
									2.2	5.4	Granite
									5.4	7.3	Granite
									0	0.4	Sand
									0.4	1.3	Clay
									1.3	3.6	Sand/Clay
									3.6	7.3	Gravel/Sand

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
23	DH0182	730814	1446401	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	โรงเรียนมาบเอียง	36	7.3	10.9	Rock
									10.9	12.8	Granite
									12.8	14.6	Granite
									0	12	Clay
									12	18	Gravel/Sand
									18	24	Rock
24	DH0372	739641	1444362	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านมาบแสนสุข	36	24	36	Granite
									0	1.8	Clay/Laterite
									1.8	3.6	Laterite/Rock
25	DH0374	734303	1447004	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านห้วยตาเกล้า(บ่อที่2)	42	3.6	10.9	Rock
									0	3	Clay/Laterite
									3	6	Gravel/Sand
26	DH0375	739653	1446496	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านเจ้าพระยา	36	6	42	Gravel/Sand
									0	4.5	Clay/Laterite
									4.5	12	Laterite/Rock
									12	36	Rock

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
27	DH0376	729465	1450686	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านห้วยตาเกล้า(บ่อที่3)	42	0	6	Clay/Sand
									6	15	Gravel/Rock
									15	42	Rock
28	DH0377	739452	1445392	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านระเวิง	36	0	4.5	Clay
									4.5	12	Clay/Sand
									12	15	Gravel/Rock
									15	36	Rock
29	DH0416	727495	1451170	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านหนองไก่อปถ้อย	60	0	9	Sand
									9	11	Sand/Granite
									11	35	Granite
									35	60	Granite
30	DH0417	713633	1449395	ชลบุรี	ศรีราชา	บึง	บ้านหนองกลางดง	30	0	3	Sand
									3	9.1	Granite
31	DH0429	715311	1438599	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านโรงหีบ	43.5	0	18	Clay/Rock
									18	19.5	Rock/Granite
									19.5	43.5	Rock/Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
32	DH0431	714963	1453621	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	วัดบ้านหนองข้อม	43.5	0	9	Sand
									9	16.5	Sand/Rock
									16.5	18	Rock
									18	42.5	Rock
33	DMR0002	709650	1443750	ชลบุรี	บางละมุง	บางละมุง	วัดศรีธรรมมาราม	33	0	1.5	Sand
									1.5	12.1	Sand
									12.1	18.2	Sand
									18.2	24.3	Sand/Clay
									24.3	27.4	Sand
									27.4	33.5	Granite
34	DMR0158	712790	1440440	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านตะเคียนเตี้ย	33	0	1.5	Laterite
									1.5	7.6	Sand
									7.6	10.6	Clay/Sand
									10.6	15.2	Sand
									15.2	16.7	Clay/Sand
									16.7	18.2	Clay/Rock
									18.2	24.3	Rock

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
35	DMR0166	713150	1440150	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	โรงเรียนบ้านตะเคียนเตี้ย	39	24.3	30.4	Rock
									30.4	33.5	Rock
									0	3	Laterite/Sand
									3	9.1	Clay/Sand
									9.1	15.2	Rock
									15.2	21.3	Rock
									21.3	24.3	Rock
									24.3	30.4	Rock
									30.4	33.5	Clay/Rock
									33.5	38.1	Rock
36	MA0032	708840	1442650	ชลบุรี	บางละมุง	บางละมุง	-	45	38.1	39.6	Rock
									0	3	Gravel/Clay
									3	4.5	Silt/Clay
									4.5	7.6	Gravel
									7.6	12.1	Silt/Clay
									12.1	16.7	Sand/Clay
									16.7	18.2	Gravel

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
37	TD0195	734599	1446190	ชลบุรี	ศรีราชา	เขาคันทรง	บ้านสุรศักดิ์มนตรี	67.5	18.2	21.3	Quartz
									21.3	42.6	Sand/Clay
									42.6	48.7	Granite
									0	1.5	Clay/Granite
									1.5	9	Granite
									9	16.5	Granite
38	TD0196	714432	1439135	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านตะเคียนเตี้ย	33	16.5	37.5	Granite
									37.5	67.5	Granite
									0	1.5	Sand
39	TD0197	710935	1443861	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านสังกะเบี้ยว	31.5	1.5	9	Clay/Sand
									9	33	Granite
									0	18	Sand
									18	24	Clay/Sand
40	TD0198	714632	1438653	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	สภาพตำบลบ้านหนองพลับ	54	24	27	Sand
									27	31.5	Granite
									0	15	Sand
									15	61.5	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
41	TD0289	-	-	ชลบุรี	ศรีราชา	หนองขาม	วัดหนองยายบู่	91.5	0	1.5	Clay/Sand
									1.5	3	Clay/Sand
									3	15	Clay/Granite
									15	18	Granite
									18	55.5	Granite
									55.5	91.5	Granite
42	X0572	713840	1439150	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	วัดเวฬุวรรณาราม	16.5	0	1.5	Top Soil
									1.5	4.5	Laterite
									4.5	6	Clay
									6	10.6	Clay/Gravel
									10.6	12.1	Granite
									12.1	16.7	Granite
44	X0599	709650	1439800	ชลบุรี	บางละมุง	บางละมุง	-	57	0	1.5	Sand
									1.5	9.1	Sand/Gravel
									9.1	33.5	Granite
									33.5	57.9	Granite

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

WELL NO.	WELL NAME	UTME	UTMN	PROVINCE	AMPHOR	TUMBOL	VILLNAME	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	LITHO
44	X0647	716200	1437500	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	วัดตันกระรอก(บ.นาวัง)	30	0	1.5	Sand
									1.5	15.2	Sand
									15.2	27.4	Granite
									27.4	30.4	Granite
45	X0648	717350	1438000	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	วัดวังทองเจริญธรรม	30	0	12.1	Gravel
									12.1	13.7	Clay
									13.7	16.7	Gravel
									16.7	30.4	Granite
46	X0649	713290	1440800	ชลบุรี	บางละมุง	ตะเคียนเตี้ย	บ้านตะเคียนเตี้ย	21	0	4.5	Sand
									4.5	7.6	Sand
									7.6	9.1	Gravel
									9.1	12.1	Sand/Clay
									12.1	21.3	Granite

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการสำรวจลักษณะชั้นดินชั้นหินจากกรรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2551

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
1	LC04-L-1	719584	1445301	0	1		Sandy silty clay
				1	2		Clayey silty sand
				2	3		Silty sand
				3	4		Same as above
				4	5		Same as above
				5	6		Rock
2	LC04-L-2	719692	1445245	0	1		Clayey silty sand
				1	2		Same as above
				2	3		Sand
				3	4		Same as above
				4	5		Same as above
				5	6		Sand with fine gravel
				6	7		Same as above
				7	8		Rock
3	LC04-L-3	719652	1445158	0	1		Silty sand
				1	2		Same as above
				2	3		Clayey silty sand
				3	4		Sand
				4	5		Same as above
4	LC04-L-4	719702	1445042	0	1		Clayey silty sand
				1	2		Sand
				2	3		Same as above
				3	4		Sand
				4	5		Same as above
				5	6		Rock
				6	7		Same as above
				7	8		Same as above
5	LC04-L-5	719815	1445177	0	1		Silty clay
				1	2		Silty sand
				2	3		Same as above
				3	4		Silty sand
				4	5		decompose rock
							Same as above

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
					5	6	Same as above
6	LC04-L-6	719928	1445140		0	1	Sand
					1	2	Silty sand
					2	3	Clayey silty sand
					3	4	Silty sand
					4	5	Sand
					5	6	Sand
7	LC04-L-7	720035	1445231		0	1	Silty sand
					1	2	Silty sand
					2	3	Same as above
					3	4	Sand
					4	5	Same as above
					5	6	Clayey silty sand
					6	7	Silty sand
					7	8	Same as above
					8	9	Rock
8	LC04-L-8	719495	1445342		0	1	Silty sand
					1	2	Silty sand
					2	3	Same as above
					3	4	Silty sand and laterite
					4	5	Silty sand
					5	6	Silty sand
					6	7	Silty sand and decompose rock
9	LC04-L-9	719783	1445693		0	1	Silty sand
					1	2	Clayey silty sand
					2	3	Sand
					3	4	Sand
					4	5	Same as above
					5	6	Same as above
					6	7	Clayey silty sand

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
10	LC04-L-10	719772	1445503		7	8	Clayey silty sand
					0	1	Sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above
					3	4	Silty sand
					4	5	Sand
					5	6	Silty sand
					6	7	Same as above
					7	8	Silty sand
					8	9	Silty sand
11	LC04-L-11	719305	1445072		9	10	Rock
					0	1	Silty sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above
					3	4	Clayey silty sand
					4	5	Silty sand
					5	6	Rock
					0	1	Silty sand
					1	2	Silty sand
					2	3	Silty sand
12	LC04-L-12	719236	1445001		3	4	Clayey silty sand
					4	5	Clayey silty sand
					5	6	Rock
					0	1	Clayey sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above
					3	4	decomposed rock
					4	5	Clayey silty sand
					5	6	Same as above
					6		Clayey sand
13	LC04-L-13	719315	1444962		0	1	Clayey sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above
					3	4	decomposed rock
					4	5	Clayey silty sand
					5	6	Same as above
					6		Clayey sand
					0	1	Clayey sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
					6	7	No recovery (decomposed rock)
					7	8	Rock
14	LC04-L-14	719431	1444889	0	1		Silty sand
				1	2		Same as above
				2	3		Clayey silty sand
				3	4		Clayey sand
				4	5		Rock
15	LC04-L-15	719505	1444893	0	1		Silty sand
				1	2		Same as above
				2	3		Clayey silty sand
				3	4		Sand
				4	5		Silty sand
				5	6		Clayey sand
				6	7		Silty sand
				7	8		Clayey silty sand
				8	9		Same as above
				9	10		Same as above
16	LC04-L-16	719526	1444953	0	1		Sandy silty clay
				1	2		Same as above
				2	3		Clayey silty sand
				3	4		Clayey silty sand
				4	5		Sandy silty clay
				5	6		Sandy silty clay
				6	7		Sandy silty clay
				7	8		Sandy silty clay
				8	9		Same as above
				9	10		Same as above
17	LC04-L-17	719705	1444931	0	1		Silty sand
				1	2		Silty sand

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
					2	3	Silty sand and decomposed rock
					3	4	Rock
18	LC04-L-18	719846	1444925	0	1	1	Clayey silty sand
				1	2	2	Clayey silty sand
				2	3	3	Clayey silty sand and decomposed rock
				3	4	4	Clayey silty sand and decomposed rock
19	LC04-V-1			0	1	1	Clayey silty sand
				1	2	2	Silty sand
				2	3	3	Silty sand
				3	4	4	No recovery
20	LC04-V-2			0	1	1	Clayey silty sand
				1	2	2	Same as above
				2	3	3	Silty sand
				3	4	4	Same as above decomposed rock
				4	5	5	Rock
21	LC04-V-3			0	1	1	Silty sand
				1	2	2	Same as above
				2	3	3	Clayey silty sand
				3	4	4	Silty sand (decomposed rock)
				4	5	5	Same as above
				5	6	6	Silty sand (decomposed rock)
22	LC04-V-4			0	1	1	Silty sand
				1	2	2	Same as above
				2	3	3	Sand
				3	4	4	Same as above

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
					4	5	Silty sand
					5	6	Silty sand
					6	7	No recovery (decomposed rock)
23	LC11-L-1	719023	1443897	0	1		Silty sand
				1	2		Same as above
				2	3		Sand
				3	4		Same as above
				4	5		Clayey silty sand
				5	6		Same as above
				6	7		Same as above
				7	8		Silty sandy clay (high to low plasticity)
				8	9		Silty sandy clay (high to low plasticity)
				9	10		Same as above
24	LC11-L-2	718980	1444031	0	1		Sand
				1	2		Same as above
				2	3		Silty sandy clay (low plasticity)
				3	4		Same as above
				4	5		Same as above
				5	6		Same as above
				6	7		Same as above
				7	8		Silty sandy clay (high plasticity)
				8	9		Same as above
				9	10		Same as above

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Description
25	LC11-L-3	718891	1444148		0	1	Silty sand
					1	2	Same as above
					2	3	Clayey silty sand
					3	4	Same as above
					4	5	Same as above
					5	6	Silty sand clay (high to low plasticity)
					6	7	Same as above
					7	8	Same as above
					8	9	Clayey silty sand
					9	10	Same as above
26	LC11-L-4	718728	1444232		0	1	Sand
					1	2	Same as above
					2	3	Same as above
					3	4	Same as above
					4	5	Silty sand clay (high to low plasticity)
					5	6	Same as above
					6	7	Same as above
					7	8	Same as above
					8	9	Clayey silty sand
					9	10	Same as above

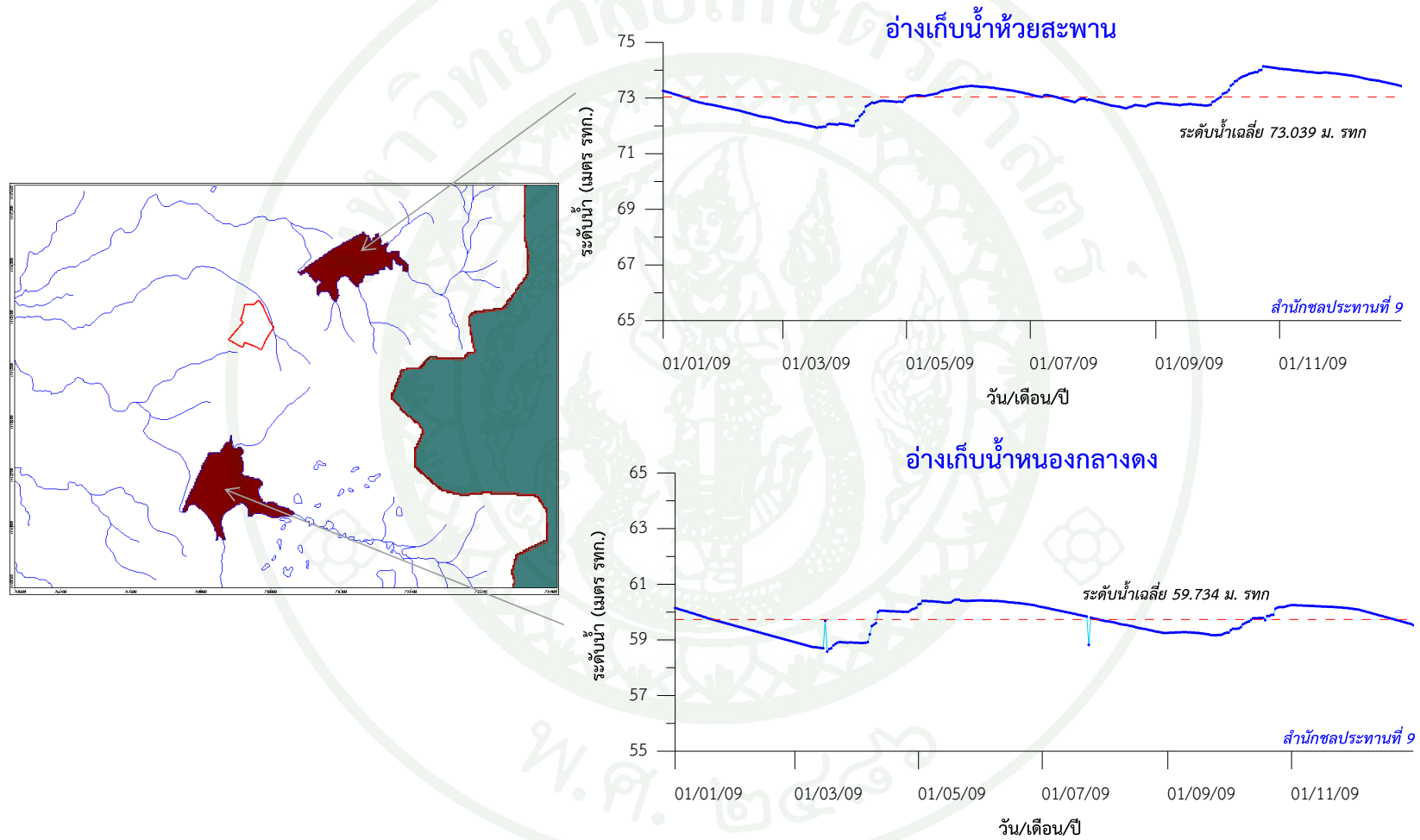
ตารางผนวกที่ ก3 ผลการสำรวจลักษณะชั้นดินชั้นหินจากกรรมควบคุมมลพิษกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2552

BH No.	Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	USCS Group	Description
1	A-1	720645	1444761	4.95	0.00	2.50	SM	Medium dense silty sand
					2.50	4.95	SC	Very dense clayey sand
2	A-2	719517	1445311	10.95	0.00	2.50	SM	Loose silty sand
					2.50	5.50	SM,SC	Medium dense silty sand, Clayey sand
					5.50	10.95	SC	Very dense clayey sand
3	A-3	719452	1445362	9.45	0.00	4.00	SM,SP-SM	Loose to medium dense silty sand, poorly grade sand with silt
					4.00	9.45	SC	Dense to very dense clayey sand
4	B-1	719306	1443474	10.95	0.00	4.00	SM,SC	Loose silty sand, clayey sand
					4.00	10.95	SC,SP-SM	Loose to medium dense silty sand, poorly grade sand with silt
5	B-2	718825	1444206	10.95	0.00	5.50	SC	Loose to medium dense clayey sand
					5.50	10.95	SC	Dense to very dense clayey sand
6	B-3	718805	1444236	15.45	0.00	2.50	SM	Loose silty sand
					2.50	5.50	SM,SM-SC	Dense to very dense silty clayey sand, silty sand
					5.50	7.00	SC	Medium dense clayey sand
					7.00	15.45	SC	Dense to very dense clayey sand

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

BH No.	Name	UTME	UTMN	Depth Drill (m)	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	USCS Group	Description
7	B-4	718728	1444258	12.45	0.00	7.00	SM,SC	Loose tp medium dense silty sand, clayey sand
					7.00	12.45	SC	Dense to very dense clayey sand
8	C-1	717489	1443713	16.70	0.00	4.00	SM,SC	Medium dense silty sand, Clayey sand
					4.00	15.50	SC	Very dense clayey sand
					15.50	16.70	Granite	Granite





ภาพผนวกที่ ข1 ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำในขอบเขตพื้นที่แบบจำลอง



ตารางผนวกที่ ค1 ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจากกรมควบคุมมลพิษ
ปี พ.ศ. 2552

BH No.	BH Name	UTME	UTMN	Depth (m)	Test No.	Test Depth (m)	Avg. K (cm/sec)	Avg. K (m/day)
1	A-1	720645	1444761	4.95	1	3.0	5.77E-04	0.4985
2	A-3	719452	1445362	10.95	1	3.0	2.47E-04	0.2134
					2	6.0	5.67E-05	0.0490
					3	9.0	1.62E-04	0.1400
							Average	0.1341
3	B-1	719306	1443474	10.95	1	3.0	1.62E-03	1.3997
					2	6.0	4.06E-04	0.3508
					3	9.0	1.20E-04	0.1037
							Average	0.6180
4	B-2	718825	1444206	12.45	1	3.0	1.14E-04	0.0985
					2	6.0	4.69E-05	0.0405
					3	9.0	5.74E-05	0.0496
					4	12.0	1.02E-04	0.0881
							Average	0.0594
5	B-3	718805	1444236	15.45	1	3.0	1.25E-03	1.0800
					2	6.0	1.08E-04	0.0933
					3	9.0	2.73E-05	0.0236
					4	12.0	3.29E-06	0.0028
					5	15.0	8.62E-06	0.0074
							Average	0.0113
6	B-4	718728	1444258	12.45	1	3.0	5.92E-04	0.5115
					2	6.0	1.04E-04	0.0899
					3	9.0	2.76E-04	0.2385
					4	12.0	1.74E-05	0.0150
							Average	0.1145

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายเมธี โอภาสเสถียร
เกิดวันที่	22 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์) สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หน่วยวิจัยเทคโนโลยีธรณีสิ่งแวดล้อมและพิบัติภัย ธรรมชาติ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์