

ลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยอง

นางสาววัลรัตน์ พลสิทธิ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ARSENIC CONTAMINATION CHARACTERISTIC
IN RAYONG GROUNDWATER BASIN

MissTawanrat Ponsit

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Academic Year 2016

หัวข้อโครงการ	ลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยะยง
โดย	นางสาวชวัลรัตน์ พลสิทธิ์
สาขาวิชา	ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม	-

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

ธวัชรรัตน์ พลสิทธิ์ : ลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยอง. (ARSENIC CONTAMINATION CHARACTERISTIC IN RAYONG GROUNDWATER BASIN) อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก : รศ.ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, 45 หน้า

แหล่งน้ำในแอ่งน้ำบาดาลระยองมีค่อนข้างจำกัด ในขณะที่ความต้องการใช้น้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการบริโภคของประชาชน หรือการเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมในพื้นที่ ส่งผลให้แหล่งน้ำบาดาลมีบทบาทสำคัญต่อความต้องการพื้นฐานและการพัฒนาในพื้นที่ ตามปกติสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลมี 2 รูปแบบหลัก คือ อาร์ซิไนท์ (Arsenite : As^{3+}) และ อาร์ซิเนท (Arsenate : As^{5+}) ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในชั้นหินให้น้ำ วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือศึกษารูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยอง และจัดทำแผนภาพตัดขวางแสดงลักษณะอุทกธรณีวิทยา อธิบายถึงการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาล ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารหนูที่ปนเปื้อนในแอ่งน้ำบาดาลระยองมีค่าตั้งแต่ 0.0002 - 0.1598 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ย 0.0188 มิลลิกรัมต่อลิตร (สูงเกินค่ามาตรฐานการปนเปื้อนในน้ำดื่ม: 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยการปนเปื้อนของสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบอาร์ซิไนท์ ภายใต้สภาวะรีดักชัน (ความต่างของศักย์ภาพ : ORP < 0) สอดคล้องกับชั้นหินให้น้ำระดับลึก (ชั้นหินให้น้ำหินแกรนิต)

ภาควิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก _____

ปีการศึกษา _____ 2559 _____ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม _____

5632717623 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : ARSENIC / ARSENITE / ARSENATE / CONTAMINATION IN GROUNDWATER /
RAYONG GROUNDWATER BASIN

TAWANRAT PONSIT : ARSENIC CONTAMINATION CHARACTERISTIC IN RAYONG
GROUNDWATER BASIN. ADVISOR : ASSOC.PROF. SRILERT CHOTPANTARAT,
Ph.D., 45 pp.

Water resources in Rayong groundwater basin are still limited, since water demand tends to increase following the increase of various activities, such as consumption of local people, agricultural and industrial areas. As a result, groundwater resources will significantly play an important role for basic needs and further development in this area. Generally, there are 2 main species of arsenic in groundwater, which are arsenite (As^{3+}) and arsenate (As^{5+}), depending upon their oxidation and reduction in aquifer. The objectives of this study were to investigate the species of arsenic contaminated in Rayong groundwater basin and to establish the hydrogeological cross-sections, which may further use to explain arsenic contamination. The arsenic concentrations in groundwater ranged from 0.0002 – 0.1598 mg/l with an average of 0.0188 mg/l (exceeding the drinking water standard: 0.01mg/l). The results showed that arsenic mainly exists in the form of arsenite (As^{3+}) under reducing condition ($ORP < 0$) corresponding to the deeper confined aquifer (Granite aquifer).

Department : _____ Geology _____ Student's Signature _____

Field of Study : _____ Geology _____ Advisor's Signature _____

Academic Year : _____ 2016 _____ Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยะนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จจากรองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท จีเอ็มที คอร์ปอเรชั่น จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการ รวมถึงการให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย

ขอขอบพระคุณนางสาวสาธิตา แก้วบุญวรรณ สำหรับความช่วยเหลือด้านข้อมูล และคำปรึกษาต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ บุคลากร ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ และชี้แนะแนวทางต่างๆ

ขอขอบพระคุณบุคลากร ณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการอนุเคราะห์สถานที่ในการทำปฏิบัติการในห้องทดลอง รวมถึงให้คำปรึกษาในส่วน of เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาธรณี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 57 รวมถึงรุ่นพี่และรุ่นน้อง ชมรมธรณีสัมพันธ์ ที่คอยให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือตลอดการทำโครงการครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระบิดา มารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัว ที่ได้อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจตลอดการทำโครงการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 พื้นที่ศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 วัตถุประสงค์.....	3
1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา.....	3
1.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย	
2.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น.....	11
2.2 สัมภาษณ์ภาคสนาม.....	11
2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	14
2.4 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....	17
2.5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ผลการศึกษา

3.1 ผลการศึกษาข้อมูลพื้นฐาน.....	19
3.2 ผลการสำรวจภาคสนาม.....	20
3.3 ผลการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล.....	21
3.4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล.....	21
3.5 การสร้างภาพตัดขวางเพื่อแสดงลักษณะอุทกธรณีวิทยา.....	24
3.6 การสร้างแผนภูมิเพื่อศึกษารูปแบบการปนเปื้อนของสารหนู.....	27

บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา.....	35
--------------------------------	----

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	37
--	----

เอกสารอ้างอิง.....	38
--------------------	----

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา ภายในแอ่งน้ำบาดาลระยอง จังหวัดระยอง.....2
รูปที่ 1.2	แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดระยอง.....5
รูปที่ 1.3	แผนที่แสดงปริมาณและคุณภาพน้ำบาดาลจังหวัดระยอง.....6
รูปที่ 1.4	วัฏจักรของสารหนู.....7
รูปที่ 1.5	สารหนูในชั้นหินให้น้ำบาดาล (ดัดแปลงจาก Roy P. and Saha A., 2002).....8
รูปที่ 2.1	A) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล.....12
	B) อุปกรณ์วัดค่าเคมีพื้นฐานของน้ำ.....12
รูปที่ 2.2	A) กระดาษกรองและกระบอกดูดสุญญากาศสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล.....13
	B) คาร์ทริดจ์.....13
รูปที่ 2.3	การเก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละจุดศึกษา.....13
รูปที่ 2.4	A) ปีเปต และถุงมือ.....14
	B) น้ำกลั่น ขวดรูปชมพู่ และอ่างควบคุมอุณหภูมิ.....14
รูปที่ 2.5	A) ขวดรูปชมพู่ที่ถูกปิดด้วยฝาครอบขวดรูปชมพู่.....16
	B) ขั้นตอนการกำจัดสารประกอบอินทรีย์สำหรับโลหะหนัก.....16
รูปที่ 3.1	แผนที่แสดงจุดศึกษาภายในแอ่งน้ำบาดาลระยอง.....19
รูปที่ 3.2	A) ตัวอย่างน้ำจากจุดศึกษาที่ 9 ก่อนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล.....21
	B) ตัวอย่างน้ำจากจุดศึกษาที่ 9 หลังขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล.....21
รูปที่ 3.3	แผนที่แสดงแนวตัดขวางและจุดที่ใช้อ้างอิงข้อมูลชั้นหินให้น้ำ.....24
รูปที่ 3.4	แผนภาพตัดขวางแนว A – A’.....25
รูปที่ 3.5	แผนภาพตัดขวางแนว B – B’.....25
รูปที่ 3.6	รูปแบบเคมีของน้ำบาดาลบนแผนภูมิไปเปอร์.....28
รูปที่ 3.7	แผนภูมิไปเปอร์แสดงรูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล.....29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8	แผนภูมิแสดงความเสถียรของสปีชีส์ (Eh-pH diagram).....30
รูปที่ 3.9	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูกับค่า ORP.....31
รูปที่ 3.10	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูกับค่า pH.....32
รูปที่ 3.11	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนู กับค่าความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-}).....33
รูปที่ 3.12	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนู กับค่าความเข้มข้นของไนเตรด (NO_3^-).....34
รูปที่ 4.1	แผนภาพตัดขวางแนว A – A’ พร้อมค่าความต่างของศักย์ภาพ (ORP), ค่าการปนเปื้อนของสารหนู.....36
รูปที่ 4.2	แผนภาพตัดขวางแนว B – B’ พร้อมค่าความต่างของศักย์ภาพ (ORP), ค่าการปนเปื้อนของสารหนู.....36

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	ตารางแสดงแผนการดำเนินงานภายในระยะเวลาดำเนินงาน.....3
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงขีดจำกัดของอุปกรณ์ สำหรับการปนเปื้อนของสารหนู.....16
ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงค่าเคมีพื้นฐานและระดับน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษา.....20
ตารางที่ 3.2	ตารางแสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในตัวอย่างน้ำบาดาล.....22
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงรายละเอียดชั้นหินให้น้ำในแต่ละจุดศึกษา.....33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

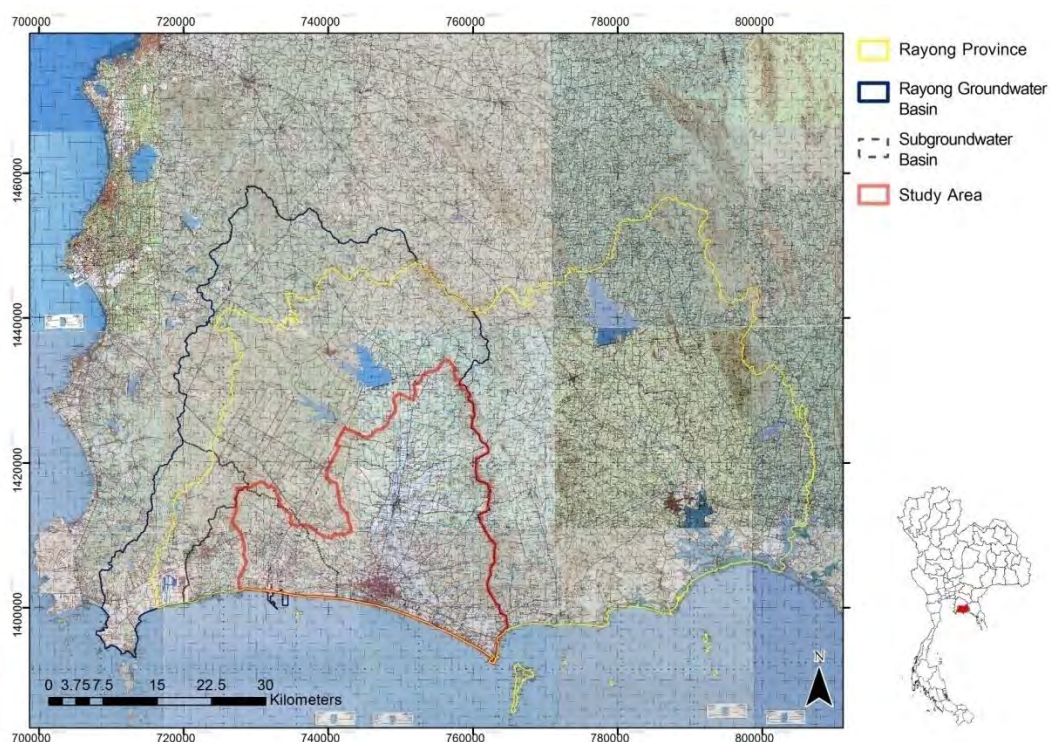
แอ่งน้ำบาดาลระยะของเป็น 1 ใน 27 แอ่งน้ำบาดาลของประเทศไทย (วิลาวัลย์และวันเพ็ญ, 2550) โดยจัดว่าเป็นแอ่งน้ำบาดาลที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลระยะของ ประกอบไปด้วยแหล่งอุตสาหกรรม แหล่งเกษตรกรรม รวมถึงแหล่งท่องเที่ยวต่างๆ ทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีความต้องการในการใช้น้ำในปริมาณมาก ประสบปัญหาปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ ดังนั้นจึงมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ซึ่งการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลและลักษณะอุทกธรณีเคมี รวมถึงอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารต่างๆเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล พบว่าสารหนูเป็นธาตุที่พบเป็นเป็นปัญหาการปนเปื้อนในน้ำบาดาลมากที่สุดธาตุหนึ่ง ซึ่งจากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในแอ่งน้ำบาดาลระยะของและแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555) พบว่า ในพื้นที่บางแห่งในแอ่งน้ำบาดาลระยะของมีค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลสูงเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำที่องค์การอนามัยโลกกำหนด) (คู่มือคุณภาพน้ำดื่ม, องค์การอนามัยโลกกำหนด, 2011.) นอกจากนี้จังหวัดระยองยังมีแหล่งฝังกลบขยะซึ่งอาจจะเป็นแหล่งของการปนเปื้อนของสารหนูลงสู่แหล่งน้ำบาดาลได้เช่นกัน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555)

สารหนูเป็นองค์ประกอบหลักของแร่ที่มีอยู่ในชั้นหินใต้น้ำ ซึ่งสารหนูในธรรมชาติที่พบละลายอยู่ในน้ำบาดาลมี 2 รูปแบบหลัก คือ As^{3+} และ As^{5+} การกระจายตัวของสารหนูทั้งสองรูปแบบ มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในชั้นหินใต้น้ำ รวมถึงสัมพันธ์กับลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาและอุทกธรณีเคมีของน้ำ พบว่า As^{3+} สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า และส่งผลต่อสภาวะความเป็นพิษในร่างกายได้มากกว่า As^{5+} (Petrick et al., 2000) โดยการใช้งานน้ำบาดาลที่มีการปนเปื้อนของสารหนูเป็นเวลานาน อาจส่งผลต่อปัญหาสุขภาพ เกิดเป็นโรครื้อรังต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโรคมิวหนัง โรคเกี่ยวกับทางเดินปัสสาวะ โรคมะเร็ง และโรคพิษสารหนูเรื้อรังหรือโรคไข้ดำ (Black foot disease) เป็นต้น (Rahman, M. Tauhid Ur et al. 2015) ดังนั้นการศึกษาลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสาร

หนูในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลระยองจึงมีความสำคัญในการวางแผนในการบริหารจัดการการใช้น้ำบาดาล และการฟื้นฟูอย่างเหมาะสม

1.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทย บริเวณแอ่งน้ำบาดาลระยอง พื้นที่อำเภอเมืองระยอง และอำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง ครอบคลุมแอ่งน้ำบาดาลย่อยคลองใหญ่ และแอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉาง พื้นที่ทั้งหมด 781.5 ตารางกิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนที่พื้นที่ศึกษา ภายในแอ่งน้ำบาดาลระยอง จังหวัดระยอง

1.3 สมมติฐาน

รูปแบบของสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในชั้นน้ำบาดาลของแอ่งระยอง มีความสอดคล้องกับอุทกธรณีเคมี (Hydrochemistry) และอุทกธรณีวิทยา (Hydrogeology) ในพื้นที่

1.4 วัตถุประสงค์

เพื่หารูปแบบของสารหนูที่ปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาลแอ่งระยอง และจัดทำแผนภาพตัดขวาง ลักษณะอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษาแสดงถึงความสัมพันธ์การปนเปื้อนของสารหนู

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 ดังแสดงในตารางที่ 1.1

รวมระยะเวลาประมาณ 7 เดือน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงานภายในระยะเวลาดำเนินงาน

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน	พ.ศ. 2559			พ.ศ. 2560			
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	พ.ค.
1	ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น							
2	สำรวจภาคสนาม							
3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ							
4	รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล							
5	อภิปรายและสรุปผลการศึกษา							

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบความสัมพันธ์ของรูปแบบการกระจายตัวของสารหนูกับลักษณะอุทกเคมี และอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่

1.7 ธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา

1.7.1 ธรณีวิทยา

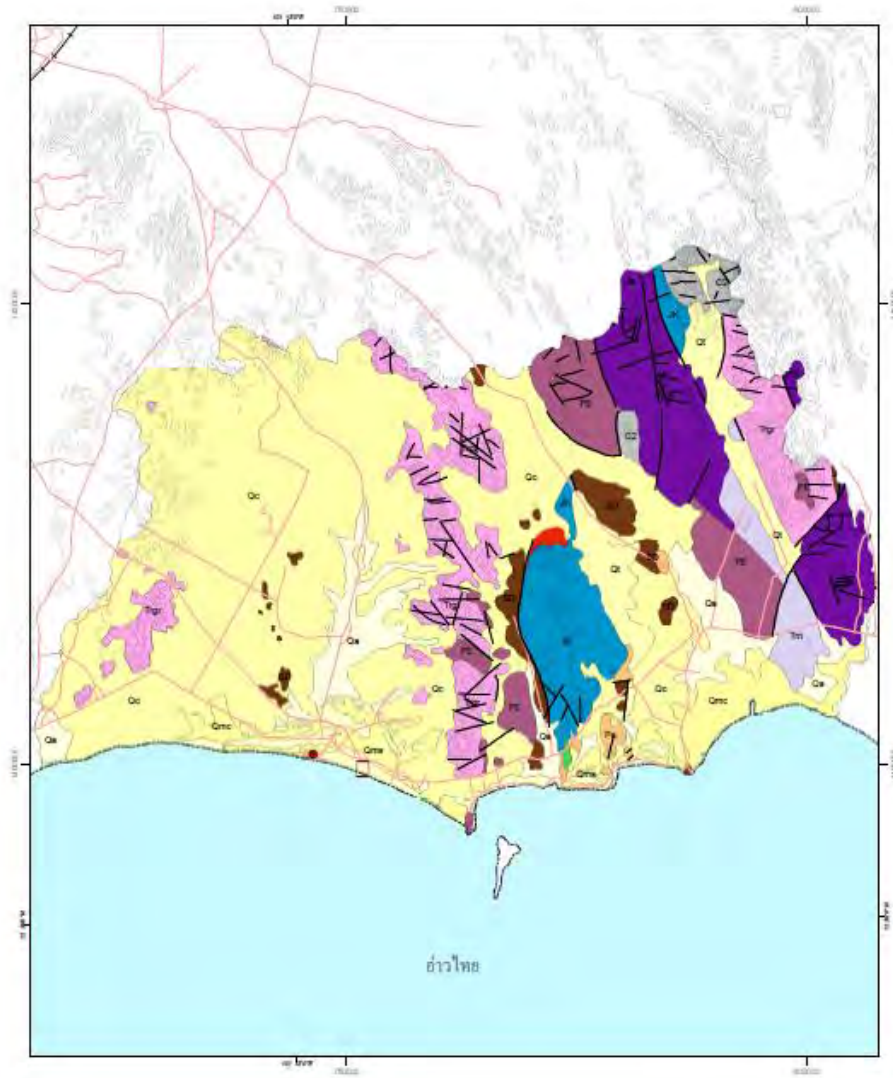
ในการศึกษาธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้เลือกใช้แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:1,000,000 ซึ่งกรมทรัพยากรธรณีได้พิมพ์เผยแพร่ในรูปของดิจิทัลใน พ.ศ.2549 ร่วมกับข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดระยอง มาตราส่วน 1: 250,000 เป็นแนวทางหลักในการกำหนดหน่วยหิน พบว่าในพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วยหิน 2 กลุ่มหลักคือ กลุ่มหินแข็ง และกลุ่มหินร่วนและตะกอน

1. หินแข็ง จะพบปรากฏในลักษณะของแนวเทือกเขาสูง ภูเขา เนินเขา และตามชายหาด กลุ่มหินแข็งที่โผล่ให้เห็นเหล่านี้จำแนกออกได้เป็น 3 หน่วย ดังนี้ หินแปรยุคไซลูเรียน-ดีโวเนียน (SD), หินตะกอนและหินแปรยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน (CP), หินอัคนียุคไทรแอสซิก (TRgr)
2. หินร่วนและตะกอน จะพบปรากฏมากในพื้นที่ศึกษา ในรูปแบบภูมิสัณฐานต่างๆ ดังนี้ ตะกอนน้ำพา (Qa), ตะกอนเศษหินเชิงเขา และตะกอนผุอยู่กับที่ (Qc), ตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง, ตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลคลื่น (Qms)

1.7.2 อูทธรณีวิทยา

จากการศึกษาแผนที่น้ำบาดาลจังหวัดระยอง (กทธ., 2538) พบว่าพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลระยอง ประกอบไปด้วยแอ่งน้ำบาดาลย่อย 3 แอ่ง ได้แก่ แอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉาง, แอ่งน้ำบาดาลย่อยคลองใหญ่ และแอ่งน้ำบาดาลย่อยสำนักท้อน โดยในพื้นที่ศึกษา อยู่ภายในบริเวณแอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉาง และแอ่งน้ำบาดาลย่อยคลองใหญ่เท่านั้น ประกอบด้วยหน่วยหินทางอุทกธรณีและสามารถจำแนกชั้นน้ำบาดาล ได้ดังนี้

1. ตะกอนน้ำพา (Alluvial aquifer : Qa) เป็นชั้นน้ำบาดาลตะกอนร่วน ประกอบไปด้วย ตะกอนจากการพัดพามาสะสมของแม่น้ำ จำพวกตะกอนกรวด ตะกอนทราย และ ตะกอนทรายแป้ง ที่มีการคัดขนาดที่ดี แทรกสลับกันเป็นชั้นๆ
2. ตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนผุอยู่กับที่ (Colluvial aquifer : Qcl) เป็นชั้นน้ำบาดาลตะกอนร่วน ประกอบไปด้วย ตะกอนจากการผุพังอยู่กับที่ (weatering) หรือ ตะกอนจากการกร่อน (erosion) จำพวก กรวด ทราย เศษหิน ที่มีการคัดขนาดไม่ดี
3. หินแกรนิต (Granite aquifer : Gr) เป็นชั้นน้ำบาดาลหินแข็ง โดยน้ำบาดาลอยู่ในรอยแตกหรือหินผุ มักในน้ำบาดาลปริมาณน้อย



แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดระยอง



กรมทรัพยากรธรณี
อภิชาติ ชวเจริญพันธ์ อธิบดี
สำนักธรณีวิทยา
เบญจวรรณ จรุงกฤษ ผู้อำนวยการสำนัก

แผนภาพแสดงตำแหน่งที่ตั้ง



**คำอธิบาย
EXPLANATION**

**หินตะกอนและหินแปร
Sedimentary and Metamorphic rocks**

- Qa** หินทรายน้ำพา กรวด หินทรายแป้ง และหินทรายละเอียด
เศษหิน หินดินเหนียว และถ่านหิน
- Qc** หินทรายน้ำพา หินทรายและหินทรายละเอียด
หินทรายละเอียด
- Qt** หินทรายน้ำพา หินทรายแป้ง หินทรายละเอียด และหินทราย
หยาบ
- Qs** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
- Qm** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
- Jbk** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
(เบญจวรรณ)
- Tm** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
- Pm** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
- Pp-1** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ
- Dc** หินทรายน้ำพา หินทรายละเอียด และหินทรายหยาบ

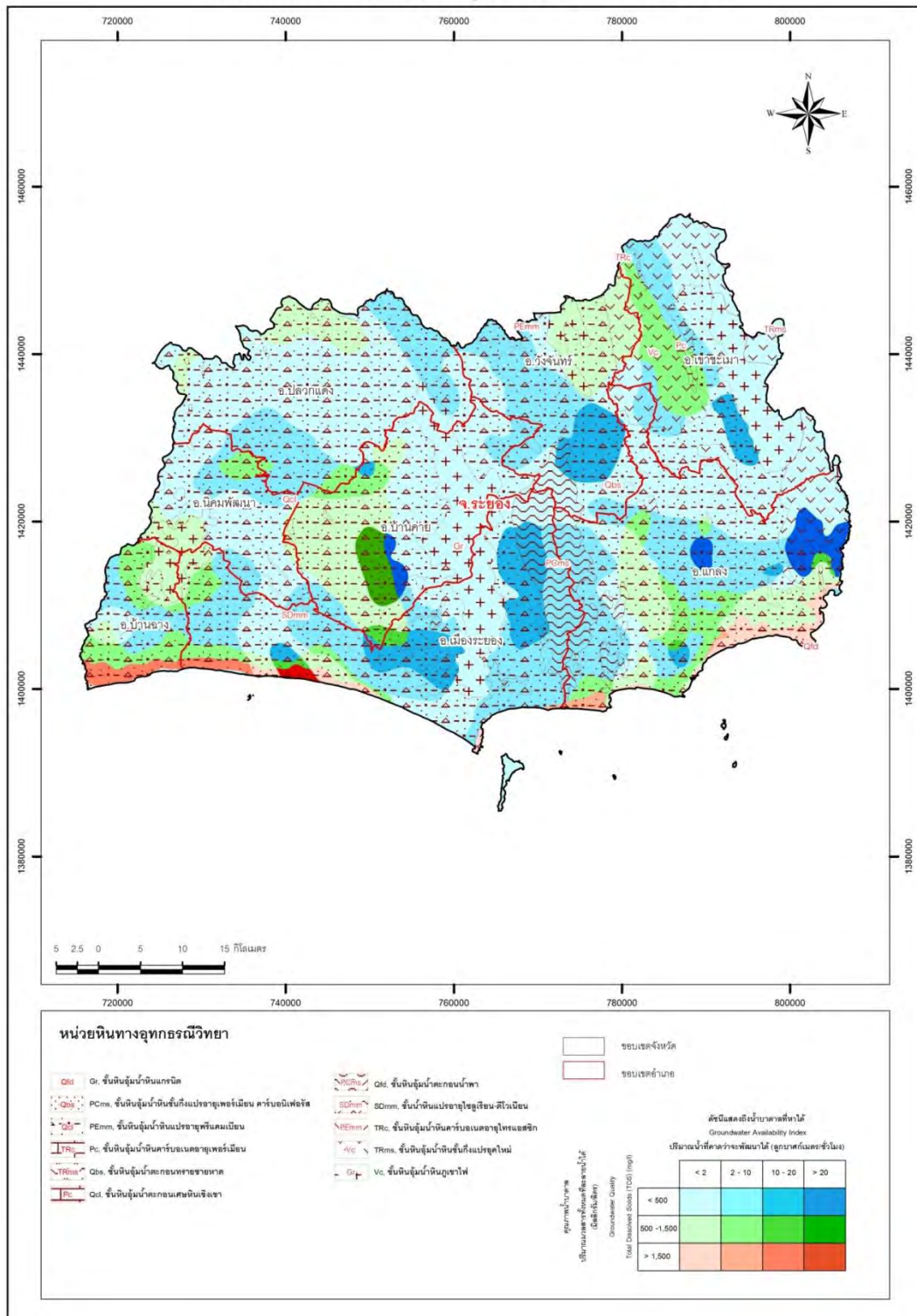
**หินอัคนี
Igneous rocks**

- Gbc** หินอัคนีน้ำพา หินอัคนีภูเขาไฟ และหินอัคนีภูเขาไฟ
- Tgr** หินอัคนีน้ำพา หินอัคนีภูเขาไฟ และหินอัคนีภูเขาไฟ
- Pbn** หินอัคนีน้ำพา หินอัคนีภูเขาไฟ และหินอัคนีภูเขาไฟ
- Pbn** หินอัคนีน้ำพา หินอัคนีภูเขาไฟ และหินอัคนีภูเขาไฟ
- Pn** หินอัคนีน้ำพา หินอัคนีภูเขาไฟ และหินอัคนีภูเขาไฟ

รูปที่ 1.2 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดระยอง

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี, 2550

แผนที่แสดงปริมาณและคุณภาพน้ำจังหวัดระยอง

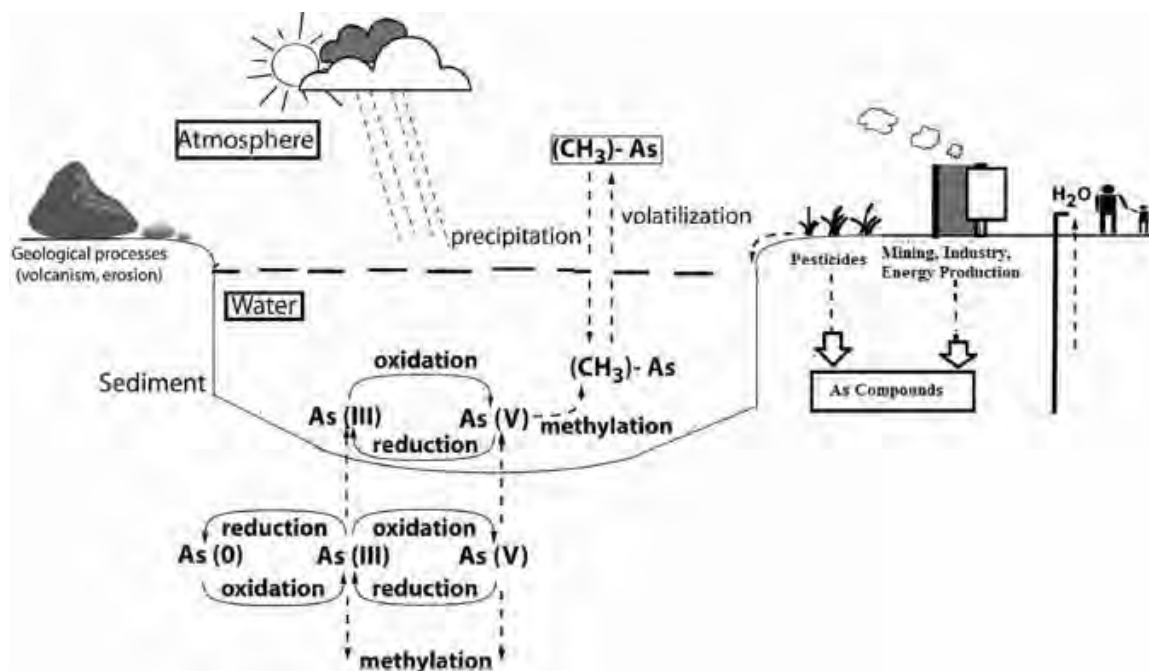


รูปที่ 1.3 แผนที่แสดงปริมาณและคุณภาพน้ำบาดาลจังหวัดระยอง

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2538

1.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

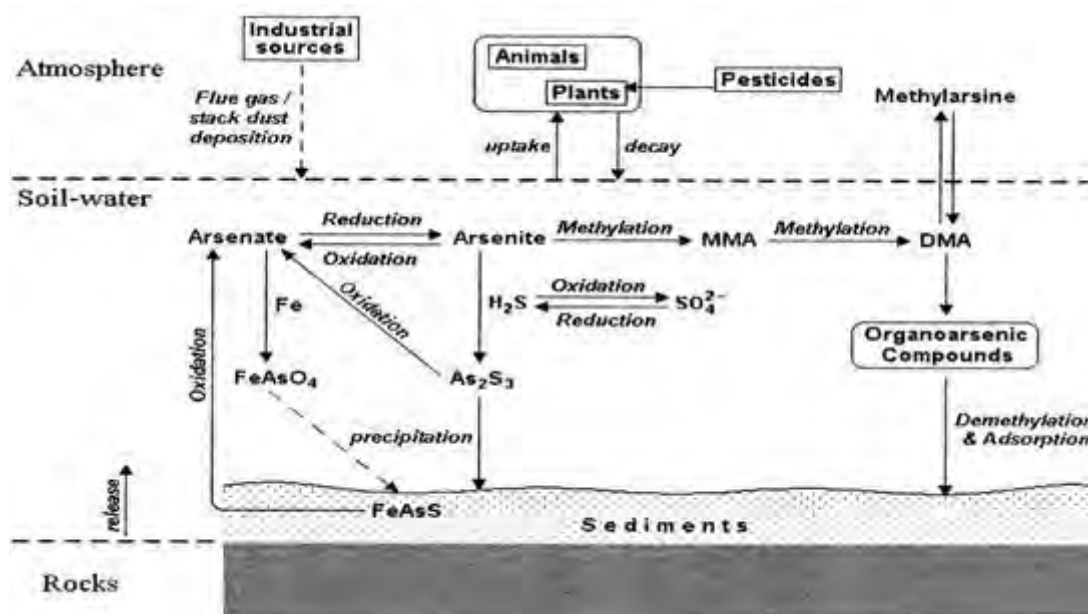
สารหนู(As) ที่พบละลายปนเปื้อนในน้ำบาดาลสามารถเกิดได้เองในธรรมชาติ จากกระบวนการผุพังของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบในชั้นหินให้น้ำ (weathering, erosion) หรือเกิดจากกระทำของมนุษย์ก็ได้ โดยพบสารหนูละลายปนเปื้อนในน้ำบาดาลในสถานะออกซิเดชัน 2 รูปแบบหลักคือ As^{3+} : Aresenite และ As^{5+} : Arsenate ซึ่งการกระจายตัวของรูปแบบของสารหนูในน้ำบาดาลจะสอดคล้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในชั้นหินให้น้ำ ส่วนมากแล้วในสภาวะรีดิวซ์จะพบสารหนูในรูปของ As^{3+} อย่างเด่นชัด แต่ในทางกลับกัน หากในสภาวะออกซิไดซ์จะพบสารหนูในรูปของ As^{5+} โดยเมื่อพิจารณาถึงสภาวะทางธรณีเคมี พบว่าในน้ำบาดาลอาจมีความเข้มข้นของสารหนูสูงได้ในหลายสภาวะ พบว่าสารหนูจะถูกปลดปล่อยออกมาจากชั้นหินให้น้ำในรูปแบบ As^{5+} จากนั้นสามารถถูกดูดซับกับเหล็กแล้วตกสะสมตัว หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงในสภาวะรีดิวซ์เป็น As^{3+} นอกจากนี้พบว่า การปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลยังมีความสัมพันธ์กับแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในชั้นหินให้น้ำด้วย



รูปที่ 1.4 วัฏจักรของสารหนู (ดัดแปลงจาก Mukhopadhyay et al., 2002)

ที่มา : Arsenic pollution in environment, Sultana et.at, 2015

สภาวะออกซิไดซ์จะพบสารหนูในรูปแบบของ As^{5+} โดยการดูดซับสารหนูบนโลหะออกไซด์ ใดๆ เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในการจำกัดการเคลื่อนที่ของธาตุในน้ำได้มากที่สุด โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ที่มีความสามารถในการดูดซับสารหนูได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลาย ประการที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู เช่น หากมีความเข้มข้นของฟอสเฟต (PO_4^-) จะสามารถ แทนที่ As^{5+} และจำกัดการดูดซับของสารหนูบนเหล็กออกไซด์ทำให้มีความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ บาดาลสูง



รูปที่ 1.5 สารหนูในชั้นหินให้น้ำบาดาล (ดัดแปลงจาก Roy P. and Saha A., 2002)

ที่มา : Arsenic Contamination In Groundwater In Bangladesh

สภาวะทางธรณีเคมีในน้ำบาดาลอาจที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสารหนู ประกอบไปด้วย หลายสภาวะ เช่น การออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ทำให้มีการปล่อยสารหนูออกมาสู่น้ำบาดาล หรือการ ย่อยสลายแร่ธาตุโดยเฉพาะการทำเหมืองแร่ จะมีผลกระทบต่อความอ่อนไหวในการเคลื่อนที่ของสาร- หนู เมื่อสารหนูถูกปล่อยออกมาสู่น้ำบาดาลแล้วจะมีความเป็นไปได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเฉพาะที่ ส่วนมากจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกดูดซับไว้ นอกจากนี้ยังสามารถพบสารหนู ในน้ำบาดาลที่อยู่ในชั้นหินให้น้ำบาดาลที่เป็นหินตะกอนได้มากกว่า เนื่องจากสารหนูที่ถูกดูดซับไว้เกิด การเคลื่อนที่โดยปฏิกิริยาการชะละลายของสารจากเหล็กออกไซด์ จะถูกปล่อยออกมาภายใต้สภาวะ

รีดิคซ์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสารหนูลงสู่ น้ำบาดาลโดยตรงจากกิจกรรมในการพัฒนาของมนุษย์อีกด้วย เช่น การทำเหมืองแร่ กิจกรรมด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เป็นต้น

ลักษณะธรณีเคมีและกระบวนการทางชีววิทยาจะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารหนู พบว่าที่ pH 6.5-8.5 เป็นสภาวะที่มักทำให้เกิดการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของสารหนู ไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะออกซิเดชันหรือรีดักชัน

กระบวนการปลดปล่อยสารหนูเข้าสู่ น้ำบาดาล

กระบวนการปลดปล่อยสารหนูในชั้นหินให้น้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาล ซึ่งนอกจาก pH, สภาวะรีดอกซ์, ปริมาณแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ และความเข้มข้นของฟอสเฟตแล้ว ยังมีกระบวนการทางธรณีเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นการปลดปล่อยสารหนูเข้าสู่ชั้นหินให้น้ำที่ทำให้มีการปนเปื้อนของสารหนูเพิ่มมากขึ้นในน้ำบาดาล ดังนี้

1. กระบวนการละลายเหล็กออกไซด์ที่ให้สารหนู (Reductive dissolution)
2. การบวนการสลายตัวของธาตุแอลคาไล (Alkali Desorption)
3. กระบวนการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ (Sulfide Oxidation)
4. กระบวนการความร้อนใต้พิภพ (Geothermal process)

พบว่ากระบวนการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์และกระบวนการละลายของเหล็กออกไซด์ที่ให้สารหนูในชั้นหินให้น้ำ เป็นกระบวนการหลักที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยของสารหนูเข้าสู่ชั้นให้น้ำบาดาล

กระบวนการควบคุมการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารหนู

การดูดซับคือกระบวนการที่โดดเด่นที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารหนูในน้ำบาดาลซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารหนูและผิวของแร่ที่ไม่ละลายอยู่ในน้ำบาดาล โดยการดูดซับขึ้นอยู่กับ pH, Eh หรือ ORP, ความเข้มข้นของสารหนู, ความซับซ้อนของไอออน และรูปแบบของสารหนู

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของพื้นผิวออกไซด์ของพวกเหล็กแมงกานีส และอะลูมิเนียม เป็นแหล่งที่สำคัญสำหรับการดูดซับของสารหนู ซึ่งประสิทธิภาพของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับกลุ่มของไฮดรอกไซด์ (OH) ที่อยู่บนพื้นผิวแร่ต่างๆ โดยการดูดซับสารหนูในน้ำบาดาลมีทั้งหมด 4 ประเภทดังนี้

1. การดูดซับของสารหนุบนเหล็กออกไซด์

ความสามารถในการละลายของสารหนุมีอิทธิพลต่อการดูดซับบน Fe(OH)_3 พบว่าสารหนุในรูปแบบ As^{3+} และ As^{5+} สามารถเกิดร่วมกับ Fe(OH)_3 ตามปัจจัยต่างๆ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณาการดูดซับของสารหนุบนเหล็กออกไซด์คือ pH โดยจะดูดซับ As^{5+} ได้ดีเมื่อมีค่า pH ต่ำ (pH 3-6) และจะดูดซับได้น้อยลงเมื่อมี pH มากกว่า 6

2. การดูดซับของสารหนุบนอะลูมิเนียมออกไซด์

3. การดูดซับของสารหนุบนแมงกานีสออกไซด์

4. การดูดซับของสารหนุบนแร่ดินเหนียว

จากการศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล จากโครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล แอ่งน้ำบาดาลชลบุรีและแอ่งน้ำบาดาลระยอง กรมทรัพยากรธรณี, 2550 พบว่าค่าพื้นฐานของการปนเปื้อนของสารหนุในน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลระยอง มีค่าดังนี้

1. ชั้นน้ำบาดาลในหินร่วน แอ่งน้ำบาดาลระยอง พบการปนเปื้อนของสารหนุในน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0141 mg/l ช่วงพิสัยตั้งแต่ 0.0014-0.4975 mg/l ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.1258 mg/l ส่วนค่าสูงสุดของค่าพื้นฐานของสารหนุมีค่าเท่ากับ 0.0200 mg/l และมีช่วงค่าพื้นฐานตั้งแต่ <0.0028-0.0200 mg/l

2. ชั้นน้ำบาดาลในหินร่วนแอ่งคลองใหญ่ พบการปนเปื้อนของสารหนุในน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0161 mg/l ช่วงพิสัยตั้งแต่ 0.0014-0.4975 mg/l ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.0052 mg/l ส่วนค่าสูงสุดของค่าพื้นฐานของ As มีค่าเท่ากับ 0.0200 mg/l และมีช่วงค่าพื้นฐานตั้งแต่ <0.0028-0.0200 mg/l

3. ชั้นน้ำบาดาลในหินแข็ง พบการปนเปื้อนของสารหนุในน้ำบาดาลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0159 mg/l ช่วงพิสัยตั้งแต่ 0.0014-0.2588 mg/l ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.0387 mg/l ส่วนค่าสูงสุดของค่าพื้นฐานของ As มีค่าเท่ากับ 0.0240 mg/l และมีช่วงค่าพื้นฐานตั้งแต่ <0.0028-0.0240 mg/l

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินโครงการครั้งนี้ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น, สํารวจภาคสนาม, ขั้นตอนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ, รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายและสรุปผลการศึกษา

2.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

ศึกษาข้อมูลอุทกธรณี อุทกธรณีเคมี ข้อมูลธรณีวิทยาทั่วไปในพื้นที่ศึกษา รวมถึงข้อมูลบ่อน้ำบาดาลภายในพื้นที่ศึกษา อ้างอิงข้อมูลบ่อน้ำบาดาลจากระบบฐานข้อมูลทรัพยากรน้ำบาดาล (พสุธารา) และอ้างอิงข้อมูลพื้นที่การปนเปื้อนของสารหนูจากรายงานโครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล แอ่งน้ำบาดาลระยองและแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล โดยทำการเลือกจุดศึกษาเพื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อน้ำบาดาลที่พบการรายงานการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลสูงเกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (มากกว่า 0.01 mg/l) หลังจากนั้นทำการวางแผนการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษา รวบรวมข้อมูล และจัดเตรียมอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในการออกภาคสนาม เช่น แผนที่ภูมิประเทศ, อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล และสารเคมีที่ต้องใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล เป็นต้น

2.2 สํารวจภาคสนาม

การสำรวจภาคสนาม คือวิธีการดำเนินงานเพื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล สํารับนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณการปนเปื้อนของสารหนู รวมถึงทำการวัดค่าเคมีพื้นฐานของน้ำบาดาล ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าแสดงความเป็นกรดเป็นเบส (pH), อุณหภูมิ, ค่าปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในน้ำ (ORP), ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)

การออกภาคสนามในโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ครั้งนี้ ได้ออกแบบการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล โดยกำหนดให้มีการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจุดศึกษาละ 3 ตัวอย่าง รายละเอียดดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลโดยตรง ใส่ภาชนะขนาด 200 มิลลิลิตร (ml) สันนิษฐานว่าสารหนูที่ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำบาดาลอยู่ในรูปแบบสารหนูไม่ละลายน้ำหรืออนุภาค (Particulates) และรูปแบบที่ละลายน้ำ (Soluble) ที่ประกอบไปด้วย As^{3+} และ As^{5+}

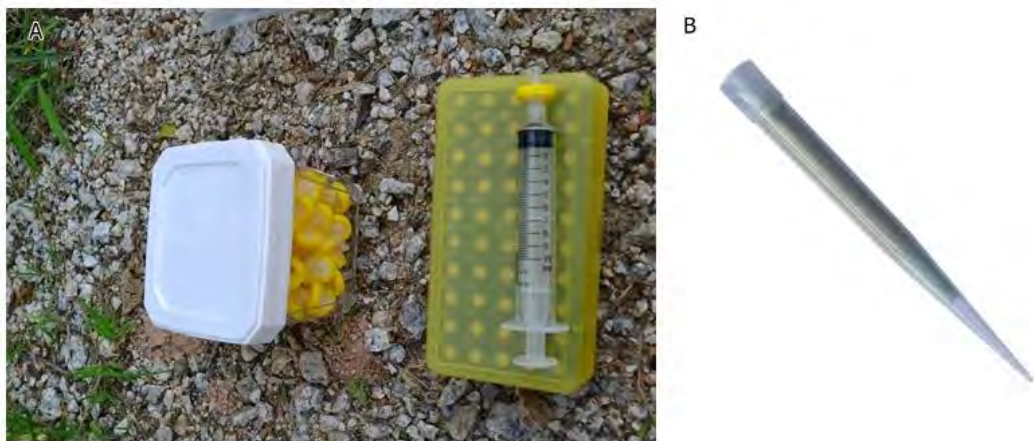
ตัวอย่างที่ 2 ทำการเก็บน้ำบาดาลใส่ภาชนะขนาด 200 มิลลิลิตร (ml) โดยเก็บผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร (μm) โดยใช้กระบอกดูดสุญญากาศ (Syringe) ขนาด 50 มิลลิลิตร (ml) ในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล สันนิษฐานว่าตัวอย่างน้ำบาดาลมีการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบละลายน้ำ (Soluble) ที่ประกอบไปด้วย As^{3+} และ As^{5+} ซึ่งไม่พบสารหนูในรูปแบบอนุภาค (Particulates) เนื่องจากสารหนูดังกล่าว ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้

ตัวอย่างที่ 3 ทำการเก็บน้ำบาดาลใส่ภาชนะขนาด 200 มิลลิลิตร (ml) โดยเก็บผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร (μm) และผ่านอุปกรณ์ที่มีชื่อว่าคาร์ทริดจ์ (Cartridge) โดยใช้กระบอกดูดสุญญากาศ (Syringe) ขนาด 50 มิลลิลิตร (ml) ในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล สันนิษฐานว่าตัวอย่างน้ำบาดาลนี้ มีการปนเปื้อนของสารหนูที่ละลายน้ำ (Soluble) ในรูปแบบ As^{3+} เท่านั้น เนื่องจากสารหนูในรูปแบบอนุภาค (Particulates) และสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ไม่สามารถผ่านกระดาษกรอง และคาร์ทริดจ์ (Cartridge) ได้ ตามลำดับ

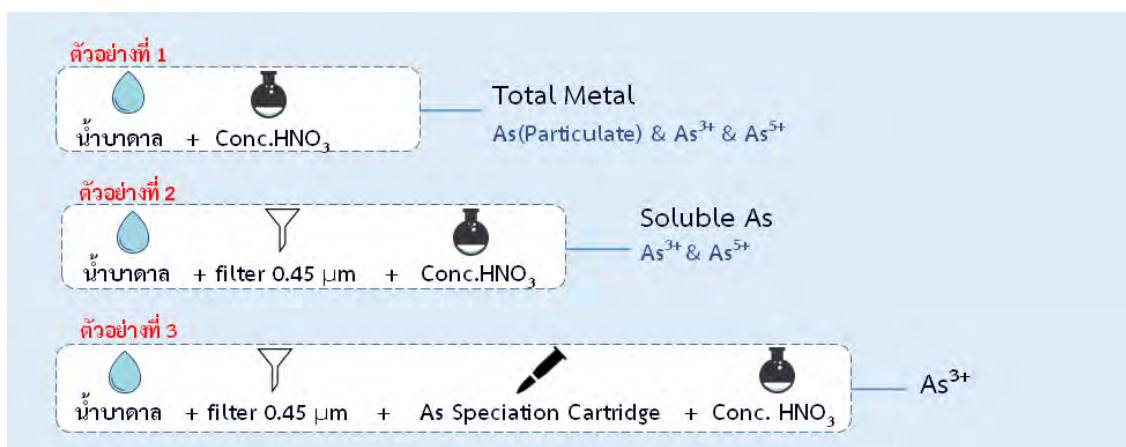


รูปที่ 2.1 A) การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล B) อุปกรณ์วัดค่าเคมีพื้นฐานของน้ำ

เมื่อดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลทั้ง 3 ตัวอย่างใส่ภาชนะบรรจุเรียบร้อยแล้ว ทำการเติมกรดไนตริกความเข้มข้นสูง (Conc. HNO_3) ลงในตัวอย่างน้ำบาดาล จนกระทั่งตัวอย่างน้ำบาดาลมีความเป็นกรดน้อยกว่า 2 ($\text{pH} < 2$) จากนั้นปิดภาชนะบรรจุให้แน่น โดยปิดทับภาชนะด้วยแผ่นพาราฟิล์ม (Parafilm) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของตัวอย่างน้ำบาดาล แล้วนำภาชนะบรรจุตัวอย่างน้ำบาดาลไปเก็บไว้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เพื่อเป็นการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำบาดาลก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการปนเปื้อนของสารหนู อ้างอิงจาก EPA-600/4-79-020 การรักษาตัวอย่างสำหรับกระบวนการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างน้ำของสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมสหรัฐ



รูปที่ 2.2 A) ภาชนะกรองและกระบอกดูดสุญญากาศสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล B) คาร์ทริดจ์



รูปที่ 2.3 การเก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละจุดศึกษา

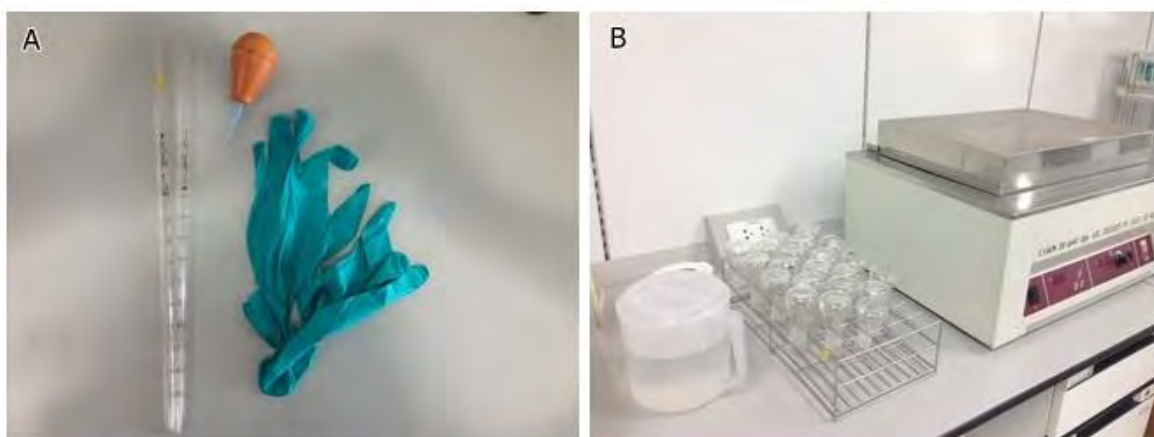
2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล

ตัวอย่างน้ำบาดาลที่ 1 ของแต่ละจุดศึกษา เป็นตัวอย่างน้ำบาดาลที่เก็บโดยตรง ไม่ผ่านตัวกรองใดๆ ทำให้อาจมีองค์ประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ในตัวอย่างน้ำบาดาล โดยองค์ประกอบอินทรีย์เหล่านี้ อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกำจัดองค์ประกอบอินทรีย์หรือการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาลก่อนการส่งตัวอย่างน้ำบาดาลไปวิเคราะห์ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาลในที่นี้ อ้างอิงจาก US EPA Method 200.2 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์สำหรับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำของสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมสหรัฐ รายละเอียดดังนี้

อุปกรณ์เครื่องมือ

1. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) หรือเครื่องมือให้ความร้อนอื่นๆ
2. เครื่องจ่ายกรด (Acid dispenser) ได้แก่ ปิเปต (Pipette)
3. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
4. ฝาครอบขวดรูปชมพู่ (Vapour refluxing cover)
5. ถุงมือ



รูปที่ 2.4 A) ปิเปต และถุงมือ B) น้ำกลั่น ขวดรูปชมพู่ และอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ตัวทำละลาย

1. กรดไนตริกความเข้มข้นสูง (Conc. HNO₃)
2. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นสูง (Conc. HCl)
3. น้ำกลั่น (Water, de-ionized)

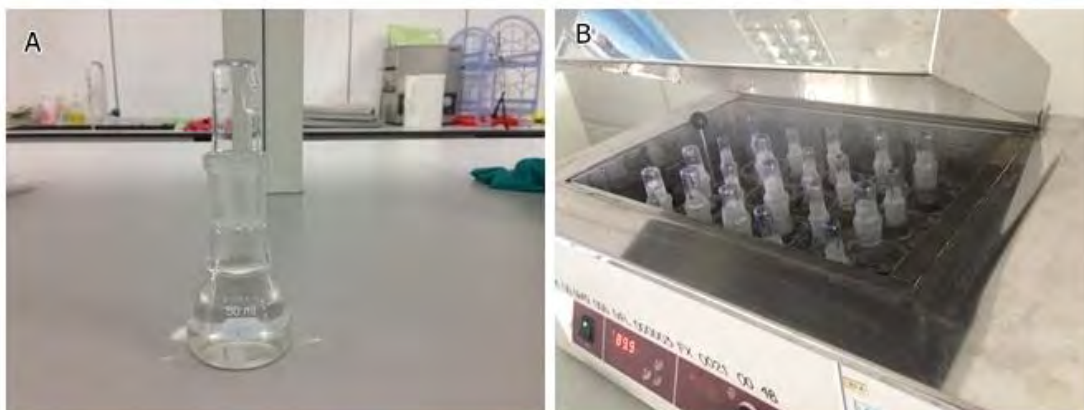
ความปลอดภัย

สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ได้แก่ เสื้อโค้ทในห้องปฏิบัติการ แว่นตานิรภัย และถุงมือ โดยเมื่ออยู่ในขั้นตอนที่มีการใช้กรด ให้ใช้กรดภายใต้ตู้ดูดควันทุกครั้ง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล

1. เตรียมอ่างควบคุมอุณหภูมิให้พร้อมใช้งาน (ตั้งค่าให้มีอุณหภูมิ 95 ± 5 องศาเซลเซียส)
2. นำตัวอย่างน้ำบาดาลใส่ในขวดรูปชมพู่ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. เติมกรดไนตริกความเข้มข้นสูงลงไป 1.0 ± 0.1 ml และเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปอีก 0.50 ± 0.005 ml เขย่าให้เข้ากัน
4. เตรียมแบลนด์ของวิธีทดสอบ (Method blank) เพื่อการควบคุมคุณภาพภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ น้ำกลั่น ปริมาตร 50 ml จากนั้นเติมกรดไนตริกความเข้มข้นสูง 1.0 ± 0.1 ml และเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.50 ± 0.005 ml (เปรียบน้ำกลั่นเสมือนตัวอย่างน้ำบาดาล)
5. ปิดขวดรูปชมพู่ด้วยฝาครอบขวดรูปชมพู่ (Vapour refluxing cover) เพื่อป้องกันการระเหยของตัวอย่างน้ำบาดาลแล้วนำไปเข้าสู่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.0 – 2.5 ชั่วโมง
6. หลังจากให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำบาดาลเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างน้ำบาดาลออกจากแหล่งให้ความร้อน แล้วปล่อยให้ตัวอย่างน้ำบาดาลเย็นตัวลงประมาณ 30 นาที
7. นำเอาฝาครอบขวดรูปชมพู่ออก แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปให้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำบาดาลมีขนาดเท่ากับ 50 มิลลิลิตร เหมือนเดิม

8. นำตัวอย่างน้ำบาดาล บรรจุลงในภาชนะ แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมนำไปส่งตรวจวิเคราะห์หาการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาล ด้วย ICP-MS



รูปที่ 2.5 A) ขวดรูปชมพู่ที่ถูกปิดด้วยฝาครอบขวดรูปชมพู่ B) ขั้นตอนการกำจัดสารประกอบอินทรีย์สำหรับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยนำขวดรูปชมพู่ไปใส่อ่างควบคุมอุณหภูมิ

2.3.2 วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล

วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อหาปริมาณสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำบาดาล อาศัยเครื่องมือ Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการของอะตอมมิสเปกโทรสโกปี (Atomic Spectroscopy) โดยเป็นวิธีตรวจสอบค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลได้ละเอียดที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบที่ใช้หลักการของอะตอมมิสเปกโทรสโกปีอื่นๆ ได้แก่ Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES), Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy (GFAA) และ Flame Atomic Absorption Spectroscopy (Flame AA) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงขีดจำกัดของอุปกรณ์ (Detection Limits) สำหรับการปนเปื้อนของสารหนู

	Flame AA	GFAA	ICP - OES	ICP-MS
As (mg/l)	150	0.05	1	0.0004

2.4 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

2.4.1 รวบรวมข้อมูลบ่อน้ำบาดาลของจุดศึกษาแต่ละจุดศึกษา

ทำการรวบรวมข้อมูลชั้นดินชั้นหิน เพื่อหาชั้นหินให้น้ำ (Aquifer) รวมถึงข้อมูลระดับความลึก และข้อมูลระยะเขาระ่อง เพื่อหาทิศทางการไหลของน้ำบาดาล จากข้อมูลบ่อน้ำบาดาลจากระบบฐานข้อมูลทรัพยากรน้ำบาดาล, กรมทรัพยากรธรณี (พสุธารา) ซึ่งนอกจากข้อมูลในแต่ละจุดศึกษาแล้ว ยังต้องทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของบ่อน้ำบาดาลใกล้เคียง เพื่อให้ได้ข้อมูลชั้นดินชั้นหินที่มีความละเอียด สามารถนำไปใช้ทำแผนภาพตัดขวางได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.4.2 รวบรวมข้อมูลผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารหนู

หลังจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล (2.3.1) และขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล (2.3.2) ทำการรวบรวมผลค่าการปนเปื้อนของสารหนู โดยบันทึกค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ใส่ในตาราง พร้อมทั้งบันทึกค่าเคมีพื้นฐานของน้ำบาดาลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามลงไปด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการนำเอาตารางข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาต่อไป

2.4.3 วิเคราะห์ข้อมูล

สร้างแผนภาพตัดขวางแสดงลักษณะอุทกธรณีจากโปรแกรม Adobe Photoshop CS4 โดยนำข้อมูลข้อมูลชั้นดินชั้นหิน ข้อมูลระดับความลึกบ่อน้ำบาดาล และข้อมูลระยะเขาระ่องบ่อน้ำบาดาล ไปใส่ในโครงร่างภาพตัดขวางที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม ArcMap 10.2.2 ซึ่งโครงร่างภาพตัดขวางดังกล่าว ได้จากแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) จากการประมวลผลโดยใช้ข้อมูลเส้นชั้นความสูง และข้อมูลจุดความสูงภายในพื้นที่ศึกษา

นำข้อมูลค่าการปนเปื้อนของสารหนู และค่าเคมีพื้นฐานที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลในขั้นตอนที่ 2.4.2 มาสร้างแผนภาพไปเปอร์ (Piper diagram) ตามแนวการศึกษาของ Galloway และ Kaiser (1980) เพื่อศึกษารูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล (Hydrochemical facies) และสร้างแผนภาพแสดงความเสถียรของสปิซีในลักษณะความสามารถในการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (pH) และอีออนอิเล็กตรอน (Eh) เพื่อศึกษารูปแบบการปนเปื้อนของสารหนู โดยใช้โปรแกรม Geochemis's Workbench Student Edition 11.0 ในการสร้างแผนภาพทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว

2.5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

ขั้นตอนอภิปรายและสรุปผลการศึกษา คือการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง น้ำบาดาล และผลการศึกษาทั้งหมด มาอภิปรายลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยอง โดยวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาความสัมพันธ์การปนเปื้อนของสารหนูกับลักษณะอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา

บทที่ 3

ผลการศึกษา

3.1 ผลการศึกษาข้อมูลพื้นฐาน

หลังจากศึกษาข้อมูลพื้นที่การปนเปื้อนของสารหนูจากรายงานโครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล แอ่งน้ำบาดาลระยองและแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี, กรมทรัพยากรธรณี ทำให้สามารถเลือกจุดศึกษาภายในพื้นที่ศึกษาได้ทั้งหมด 19 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเป็นจุดที่พบรายงานการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลเกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (มากกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเป็นจุดที่ตั้งอยู่บนโครงสร้างธรณีที่น่าสนใจ รวมทั้งจุดที่มีการใช้พื้นที่ (Landfill) ด้วย



รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงจุดศึกษาภายในแอ่งน้ำบาดาลระยอง

3.2 ผลการสำรวจภาคสนาม

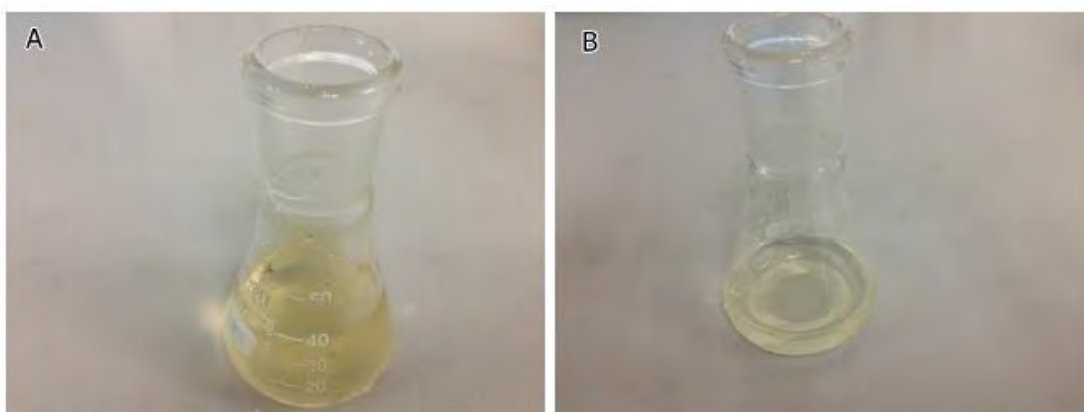
ค่าเคมีพื้นฐานของน้ำบาดาลรวมถึงระดับน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษาที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม แสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าเคมีพื้นฐานและระดับน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษา

Id	X	Y	Water level (m)	ความลึกบ่อ (m.)	pH	ORP (mV)	TDS (ppm)	EC (μ s/cm)	DO (mg/l)	TC (mg/l)
1	757559	1427343	14.0	24.0	5.3	263.9	194.6	304.0	3.6	10.5
2	751190	1425456	5.6	18.0	7.1	215.0	139.5	218.0	4.0	8.2
3	751168	1420902	3.6	85.0	7.9	196.1	317.4	496.0	6.5	23.8
4	748274	1418358	14.2	20.0	5.5	-87.3	77.8	121.6	1.6	29.4
5	749780	1416856	3.0	93.0	6.0	3.1	239.4	374.0	3.4	21.3
6	749846	1413222	2.3	42.0	6.4	-84.0	214.4	335.0	2.0	23.9
7	751004	1411222	3.0	98.0	6.2	175.0	20.3	31.7	2.9	25.6
8	747773	1409375	6.8	42.0	6.7	-47.7	269.4	421.0	7.9	14.5
9	752258	1406816	1.4	3.2	6.6	149.2	230.4	360.0	4.3	16.9
10	749614	1404654	2.1	62.0	6.9	12.4	8000.0	12500.0	3.3	82.9
11	749352	1400811	4.6	20.0	6.7	38.3	8940.8	13970.0	3.5	57.2
12	744383	1401277	2.6	16.0	7.3	-380.7	25024.0	39100.0	0.0	98.2
13	744267	1401561	4.9	16.0	7.1	153.5	25920.0	40500.0	3.2	94.4
14	744194	1401885	3.8	16.0	7.3	149.3	31360.0	49000.0	4.4	59.9
15	735552	1402735	2.8	9.0	3.5	424.5	670.1	1047.0	5.8	4.6
16	734981	1408683	0.0	2.2	7.1	182.8	306.6	479.0	8.9	5.1
17	736865	1410247	5.2	N/A	7.5	138.4	4217.6	6590.0	4.0	29.2
18	729209	1409750	2.1	7.1	6.7	161.8	415.4	694.0	4.3	13.0
19	729604	1412944	5.2	38.0	7.4	-49.5	432.0	675.0	3.3	20.5
ค่าเฉลี่ย			4.6	32.2	6.6	85.0	5631.0	8800.9	4.0	33.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			3.7	30.8	1.0	173.3	10116.1	15805.2	2.1	29.9

3.3 ผลการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล

หลังจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ตามขั้นตอนที่ 2.3.1 พบว่าหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทั้งหมด ตัวอย่างน้ำบาดาลมีความใสเพิ่มขึ้น และตะกอนที่พบแขวนลอยอยู่ในน้ำได้หายไป คาดว่าเกิดจากองค์ประกอบอินทรีย์ได้ถูกกำจัดไปจากกระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล



รูปที่ 3.2 A) ตัวอย่างน้ำจากจุดศึกษาที่ 9 ก่อนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล
B) ตัวอย่างน้ำจากจุดศึกษาที่ 9 หลังขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล

3.4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล

หลังจากที่ได้รับผลการวิเคราะห์หาปริมาณการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลเรียบร้อยแล้ว ต้องคำนวณหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างที่ 1 ของแต่ละจุดศึกษาใหม่ เนื่องจากในกระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาล มีการเติมกรดเพิ่มลงไป ส่งผลให้ความเข้มข้นของการปนเปื้อนของสารหนูมีการเปลี่ยนแปลง

$$\text{อาศัยหลักการ} \quad C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นสารละลายก่อนเจือจาง (mg/l)

C_2 คือ ความเข้มข้นสารละลายหลังเจือจาง (mg/l)

V_1 คือ ปริมาตรสารละลายก่อนเจือจาง (l)

V_2 คือ ปริมาตรสารละลายหลังเจือจาง (l)

สรุปค่าปริมาณการปนเปื้อนของสารหนูได้ แสดงในตารางที่ 3.2 มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในตัวอย่างน้ำบาดาล

Id	As (mg/l)	Total As (mg/l)	As ³⁺ (mg/l)	As ⁵⁺ (mg/l)	dominant species	% dominant
1	0.0011	0.0010	0.0001	0.0009	5	90.00
2	0.0030	0.0019	0.0001	0.0018	5	94.74
3	0.0470	0.0628	0.0001	0.0627	5	99.84
4	0.0215	0.0223	0.0194	0.0029	3	87.00
5	0.0076	0.0233	0.0207	0.0026	3	88.84
6	0.3302	0.1598	0.1465	0.0133	3	91.68
7	0.0026	0.0006	0.0003	0.0003	3	50.00
8	0.0021	0.0023	0.0022	0.0001	3	95.65
9	0.0020	0.0004	0.0003	0.0001	3	75.00
10	0.0031	0.0009	0.0006	0.0003	3	66.67
11	0.0007	0.0005	0.0004	0.0001	3	80.00
12	0.0008	0.0007	0.0006	0.0001	3	85.71
13	0.0128	0.0143	0.0008	0.0135	5	94.41
14	0.0010	0.0007	0.0006	0.0001	3	85.71
15	0.0017	0.0002	0.0003	-0.0001	3	150.00
16	0.0009	0.0006	0.0003	0.0003	5	50.00
17	0.0012	0.0008	0.0005	0.0003	3	62.50
18	0.0064	0.0075	0.0003	0.0072	5	96.00
19	0.0508	0.0565	0.0388	0.0177	3	68.67
ค่าเฉลี่ย	0.0261	0.0188	0.0123	0.0065		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0751	0.0389	0.0341	0.0147		

เมื่อ	As (mg/L)	คือ ค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 1 ในแต่ละจุดศึกษา
	Total As (mg/L)	คือ ค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 2 ในแต่ละจุดศึกษา
	As ³⁺ (mg/L)	คือ ค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 3 ในแต่ละจุดศึกษา
	As ⁵⁺ (mg/L)	คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง Total As (µg/L) และ As ³⁺ (Total As - As ³⁺ = As ⁵⁺)

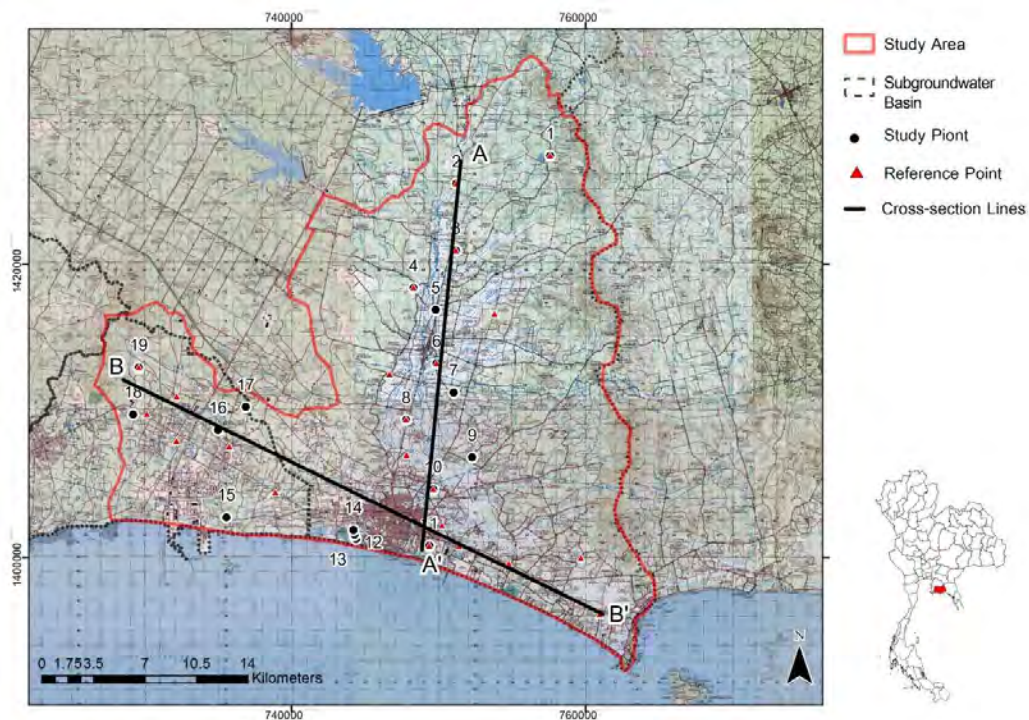
หมายเหตุ ความเข้มข้นของสารหนูที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ICP-MS อยู่ในหน่วยไมโครกรัมต่อลิตร (µg/L) แต่เพื่อการแปลผลในแนวทางสากลและง่ายต่อการวิเคราะห์ผล จึงทำการแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปแบบมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ทั้งนี้ทั้งนั้นการวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนโดยใช้เครื่องมือดังกล่าว อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในกรณีที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในปริมาณน้อยมาก จัดเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุปกรณ์

จากตารางที่ 3.1 พบว่า ค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 1 ซึ่งสันนิษฐานว่าประกอบไปด้วยสารหนูในรูปแบบอนุภาค (Particulates) และรูปแบบที่ละลายน้ำ (Soluble) ใน 7 จุดศึกษา มีค่าการปนเปื้อนน้อยกว่าค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 2 ซึ่งสันนิษฐานว่าประกอบไปด้วยสารหนูในรูปแบบที่ละลายน้ำ (Soluble) เท่านั้น ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีและหลักการที่ควรจะเป็น สามารถคาดได้ว่าน่าจะเกิดความผิดพลาดในกระบวนการกำจัดองค์ประกอบอินทรีย์จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำบาดาลก่อนส่งวิเคราะห์ ดังนั้น การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูในแอ่งน้ำบาดาลระยองในโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ครั้งนี้ จะพิจารณาค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ของแต่ละจุดศึกษาเป็นหลัก โดยใช้ค่าการปนเปื้อนของสารหนูจากตัวอย่างที่ 1 ในการอธิบายเพิ่มเติมเท่านั้น

จากตารางที่ 3.1 พบว่า มี 6 จุดศึกษา ที่มีการปนเปื้อนของสารหนูมากกว่าค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (มากกว่า 0.001 mg/L) คิดเป็น 31.6% ของจุดศึกษาทั้งหมด พบว่าค่าการปนเปื้อนของสารหนูมีค่ามากที่สุดคือ 0.3302 mg/L มีค่าน้อยที่สุดคือ 0.0007 mg/L และมีค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนของสารหนูคือ 0.0188 mg/L โดยเมื่อทำการพิจารณาปริมาณสารหนูในรูปแบบ As³⁺ และ As⁵⁺ ที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาล พบว่าการปนเปื้อนของสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ As³⁺ พบทั้งหมด 13 จุดศึกษา คิดเป็น 68.4% ของจุดศึกษาทั้งหมด

3.5 การสร้างภาพตัดขวางเพื่อแสดงลักษณะอุทกธรณีวิทยา

หลังจากรวบรวมข้อมูลชั้นดินชั้นหิน ข้อมูลระดับความลึกบ่อบาดาล และข้อมูลระยะเขาระหว่างบ่อบาดาล ของบ่อน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษา รวมถึงบ่อบาดาลในบริเวณข้างเคียงตามขั้นตอนที่ 2.4.1 เรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลทั้งหมดไปใส่ในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นทำการเปิดข้อมูลดังกล่าวในโปรแกรม ArcMap 10.2.2 แล้วสร้างแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) และสร้างเส้นแนวตัดขวางที่ต้องการสร้างแผนภาพตัดขวางขึ้นมา เพื่อหาโครงสร้างภูมิประเทศของพื้นที่ตัดขวางดังกล่าว โดยพยายามสร้างแนวตัดขวางให้ครอบคลุมจุดศึกษามากที่สุดได้แนวภาพตัดขวาง 2 แนวคือ แนว A – A' และ แนว B – B' ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนที่แสดงแนวตัดขวางและจุดที่ใช้อ้างอิงข้อมูลชั้นหินให้น้ำ

เมื่อกำหนดแนวภาพตัดขวางเรียบร้อยแล้ว ทำการสร้างโครงสร้างภูมิประเทศของพื้นที่ตัดขวางจากคำสั่ง Interpolate Line ในโปรแกรม ArcMap 10.2.2 แล้วนำข้อมูลเส้นโครงที่ได้ไปแก้ไขลักษณะภาพตัดขวางในโปรแกรม Adobe Photoshop CS4 โดยกำหนดสีของชั้นหินให้น้ำตามการอ้างอิงจากกรมสำรวจธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Geological Survey : USGS) ได้ผลลัพธ์ภาพตัดขวางดังนี้

เมื่อ	Gr	คือ	ชั้นหินให้น้ำหินแกรนิต
	Qc	คือ	ชั้นหินให้น้ำตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนผูกอยู่กับที่
	Qa	คือ	ชั้นหินให้น้ำตะกอนน้ำพา
	Qmc	คือ	ชั้นหินให้น้ำตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลน้ำขึ้นและน้ำลง
	Qms	คือ	ชั้นหินให้น้ำตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลคลื่น

โดยกำหนดให้ชั้นหินให้น้ำหินแกรนิตเป็นชั้นหินให้น้ำหินแข็ง ส่วนชั้นหินให้น้ำตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนผูกอยู่กับที่, ชั้นหินให้น้ำตะกอนน้ำพา, ชั้นหินให้น้ำตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลน้ำขึ้นและน้ำลง และชั้นหินให้น้ำตะกอนชายฝั่งทะเลโดยอิทธิพลคลื่น เป็นชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน

จากรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณาระยะท่อเจาะร่องของบ่อน้ำบาดาลแต่ละจุดศึกษา พบว่ามี 6 จุดศึกษา ที่มีชั้นหินให้น้ำอยู่ในชั้นหินให้น้ำหินแข็ง ได้แก่ จุดศึกษาที่ 3, จุดศึกษาที่ 5, จุดศึกษาที่ 6, จุดศึกษาที่ 7 และจุดศึกษาที่ 8 ส่วนจุดศึกษาที่เหลืออยู่ในชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วนสามารถสรุปข้อมูลของชั้นหินให้น้ำได้ดังตารางที่ 3.3

พิจารณาการไหลของน้ำบาดาล พบว่าบริเวณแอ่งน้ำบาดาลย่อยคลองใหญ่ในชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน มีทิศทางการไหลของน้ำบาดาลเข้าสู่บริเวณคลองใหญ่และไหลจากทิศเหนือไปทิศใต้ เช่นเดียวกับการไหลของน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำแข็ง ส่วนในแอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉางพบว่าชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน มีการไหลของน้ำบาดาลจากทิศตะวันตกไปทางทิศตะวันออก กล่าวคือน้ำบาดาลมีการไหลเข้าสู่คลองใหญ่ ซึ่งส่วนการไหลของน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำหินแข็งนั้น ในโครงการครั้งนี้ไม่มีข้อมูลระดับน้ำของชั้นหินให้น้ำหินแข็งในแอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉาง ทำให้ไม่สามารถบอกทิศทางการไหลของชั้นหินให้น้ำหินแข็งในแอ่งน้ำบาดาลย่อยบ้านฉาง คาดว่าการไหลของน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำหินแข็งมีความสอดคล้องกันกับชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงรายละเอียดชั้นหินให้น้ำในแต่ละจุดศึกษา

ID	X	Y	Water level (m)	ความสูงปากบ่อ (m)	Elevation (m)	ความลึกบ่อ(m.)	ชั้นหินให้น้ำ
1	757559	1427343	14	0.95	79	24	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
2	751190	1425456	5.58	0.71	34	18	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
3	751168	1420902	3.64	0.7	30	85	ชั้นหินให้น้ำหินแข็ง
4	748274	1418358	14.18	0.28	29	20	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
5	749780	1416856	3	0.35	20	93	ชั้นหินให้น้ำหินแข็ง
6	749846	1413222	2.32	0.12	13	42	ชั้นหินให้น้ำหินแข็ง
7	751004	1411222	3.04	0.7	7	98	ชั้นหินให้น้ำหินแข็ง
8	747773	1409375	6.83	0.3	18	42	ชั้นหินให้น้ำหินแข็ง
9	752258	1406816	1.4	0.76	3	3.2	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
10	749614	1404654	2.1	0.8	13	62	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
11	749352	1400811	4.6	0.7	10	20	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
12	744383	1401277	2.58	0.88	(-4)	16	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
13	744267	1401561	4.85	0.97	3	16	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
14	744194	1401885	3.8	1	7	16	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
15	735552	1402735	2.76	0.89	4	9	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
16	734981	1408683	0	0	0	2.15	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
17	736865	1410247	5.2	0.88	57	N/A	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
18	729209	1409750	2.07	0.9	48	7.09	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน
19	729604	1412944	5.2	0.5	0.71	38	ชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วน

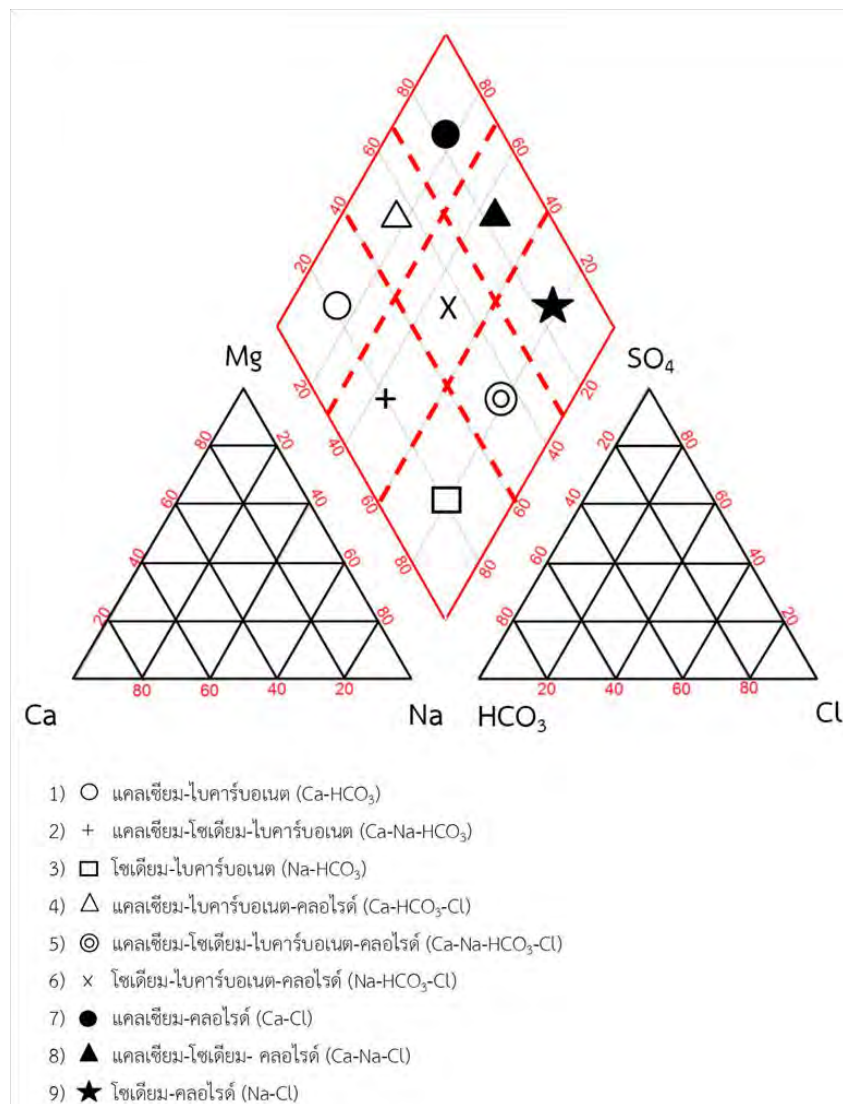
3.6 การสร้างแผนภูมิเพื่อศึกษารูปแบบการปนเปื้อนของสารหนู

3.6.1 แผนภูมิไปเปอร์ (Piper diagram)

แปรข้อมูลแผนภูมิไปเปอร์ ตามแนวการศึกษาของ Galloway และ Kaiser,1980 อ้างอิงจากอ้างอิงจาก "โครงการประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาลโดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณการสูบน้ำที่เหมาะสมของชั้นน้ำบาดาลตะกอนหินร่วน (safe yield) เป็นรายจังหวัด พื้นที่ลุ่มน้ำทำนุ

เพื่อศึกษารูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล (Hydrochemical facies) สามารถจำแนกรูปแบบของน้ำบาดาลในแต่ละจุดศึกษาออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

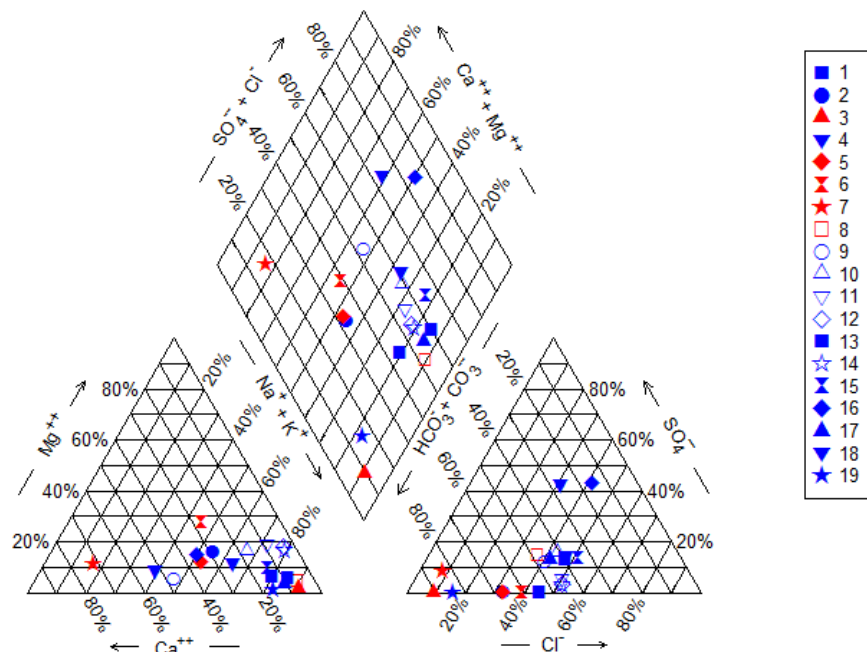
1. กลุ่มหลัก แคลเซียม-ไบคาร์บอเนต (Ca-HCO_3) โซเดียม-ไบคาร์บอเนต (Na-HCO_3) และ แคลเซียม-โซเดียม-ไบคาร์บอเนต (Ca-Na-HCO_3) : พื้นที่รับน้ำ
2. กลุ่มหลัก แคลเซียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ ($\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$) และแคลเซียม-โซเดียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ ($\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$) : พื้นที่น้ำบาดาลเริ่มมีการเคลื่อนตัวจากพื้นที่รับน้ำ
3. กลุ่มหลัก แคลเซียม-คลอไรด์ (Ca-Cl) โซเดียม-คลอไรด์ (Na-Cl) และ แคลเซียม-โซเดียม-คลอไรด์ (Ca-Na-Cl) : พื้นที่สูญเสียน้ำ



รูปที่ 3.6 รูปแบบเคมีของน้ำบาดาลบนแผนภูมิไปเปอร์ตามวิธีของ Galloway and Kaiser, 1980

รูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาลเหล่านี้ สามารถบอกได้ถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำและพื้นที่รับ หรือสูญเสียน้ำ โดยอาศัยหลักการที่ว่ารูปแบบทางเคมีของน้ำมักเปลี่ยนแปลงตามการไหลของน้ำ เมื่อน้ำบาดาลมีการเติมเข้าสู่ระบบจากน้ำฝน ที่มีการสภาวะเป็นกรดอ่อนๆจากการละลายก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้น้ำมีองค์ประกอบหลักในกลุ่มไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) จากนั้นน้ำฝน จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินเข้าสู่ชั้นหินให้น้ำ โดยละลายสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ใน รูปเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้น้ำมีองค์ประกอบในกลุ่มไบคาร์บอเนต-ซัลเฟต ($\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$) จากนั้น เมื่อน้ำไหลไปเรื่อยๆตามชั้นดินและชั้นหิน น้ำจะมารวมตัวกับน้ำที่อยู่ก่อนหน้าเกิดวิวัฒนาการเป็น กลุ่มซัลเฟต-คลอไรด์ ($\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$)

เมื่อนำค่าการปนเปื้อนของน้ำบาดาลต่างๆในแต่ละจุดศึกษา ที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปใส่ใน โปรแกรม Geochemis's Workbench Student Edition 11.0 แล้วทำการสร้างแผนภูมิไปเปอร์ โดยกำหนดให้สัญลักษณ์สีน้ำเงินแทนชั้นให้น้ำตะกอนร่วน สัญลักษณ์สีแดงแทนชั้นหินให้น้ำหินแข็ง จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.7

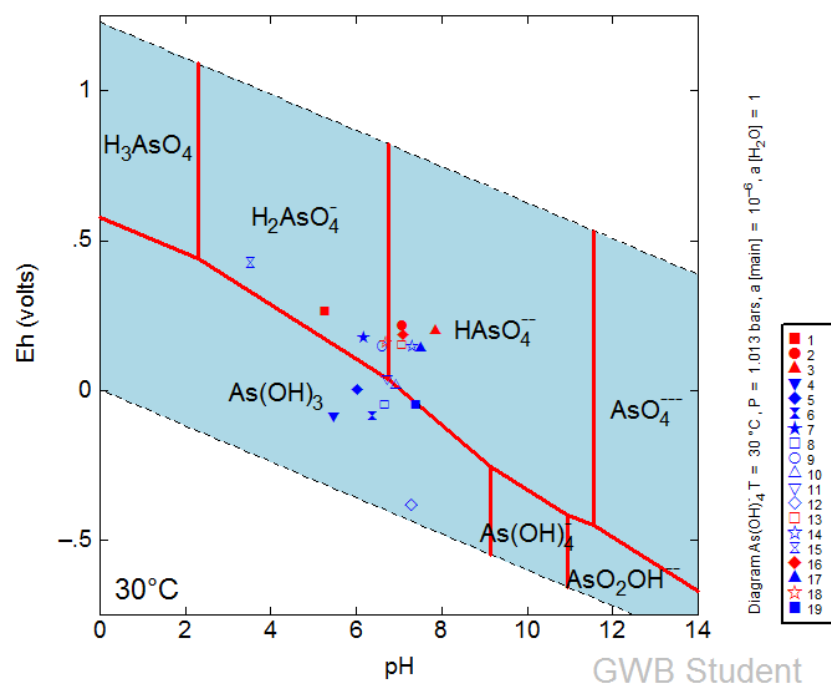


รูปที่ 3.7 แผนภูมิไปเปอร์ (Piper diagram) แสดงรูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล

จากรูปที่ 3.7 พบว่าจุดศึกษาส่วนใหญ่ในน้ำบาดาลมีการเคลื่อนตัวจากพื้นที่รับน้ำ โดยจุดศึกษาที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินแข็ง พบว่ารูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาลอยู่ในพื้นที่รับน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีพื้นที่รับน้ำ

3.6.2 แผนภูมิแสดงความเสถียรของสปีชีส์ (Eh-pH Diagram)

เมื่อนำค่าการปนเปื้อนของน้ำบาดาลต่างๆในแต่ละจุดศึกษา ที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปใส่ในโปรแกรม Geochemis's Workbench Student Edition 11.0 แล้วทำการสร้างแผนภูมิในลักษณะความสามารถในการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน และอ็อกซิเดชันรีดักชัน (Eh-pH Diagram) ในรูปแบบ $\text{As}(\text{OH})_4$ ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1.013 บาร์ เพื่อดูรูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาล โดยกำหนดให้จุดศึกษาที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} เด่น แทนด้วยสัญลักษณ์สีน้ำเงิน และจุดศึกษาที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} เด่น แทนด้วยสัญลักษณ์สีแดง จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภูมิแสดงความเสถียรของสปีชีส์ (Eh-pH diagram)

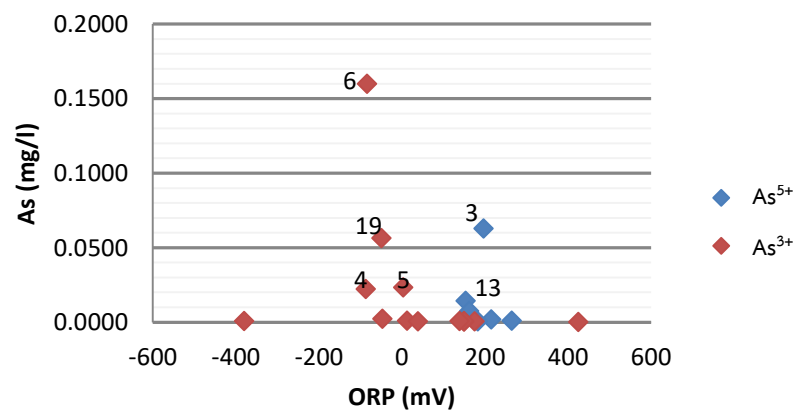
จากรูปที่ 3.8 จะสังเกตได้ว่า มีทั้งหมด 5 จุดศึกษาที่ผลข้อมูลจากการวิเคราะห์และผลข้อมูล

จากแผนภูมิออกมาไม่ตรงกัน กล่าวคือ บางจุดศึกษาที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} เด่น แต่ในแผนภูมิตามรูปที่ 3.8 กลับพบว่าควรมีการปนเปื้อนของสารหนูในอีกรูปแบบหนึ่ง คาดว่าความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นบนแผนภูมิแสดงความเสถียรของสปีชีส์นั้น เกิดจากธรรมชาติมีความซับซ้อน นอกจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน และไอออนอิเล็กตรอน ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของสารหนูในน้ำบาดาล

3.6.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลกับค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP)

รูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลจะสอดคล้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในชั้นหินให้น้ำ ตามที่ได้กล่าวไปในทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 1 โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP) กล่าวได้ว่า ORP คือชนิดของดัชนีที่แสดงถึงระดับความสามารถในการเกิดออกซิเดชันและการเกิดรีดักชัน หากความสามารถในการรีดักชันมีค่าสูง จะให้ค่า ORP ลดลง (เป็นลบ) แต่หากความสามารถในการออกซิเดชันมีค่าสูง จะให้ค่า ORP สูงขึ้น (เป็นบวก)

นำค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมาหาความสัมพันธ์กับค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP) โดยกำหนดให้การปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} เด่น แทนด้วยสัญลักษณ์สีแดง และจุดศึกษาที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} เด่น แทนด้วยสัญลักษณ์สีน้ำเงิน ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.9

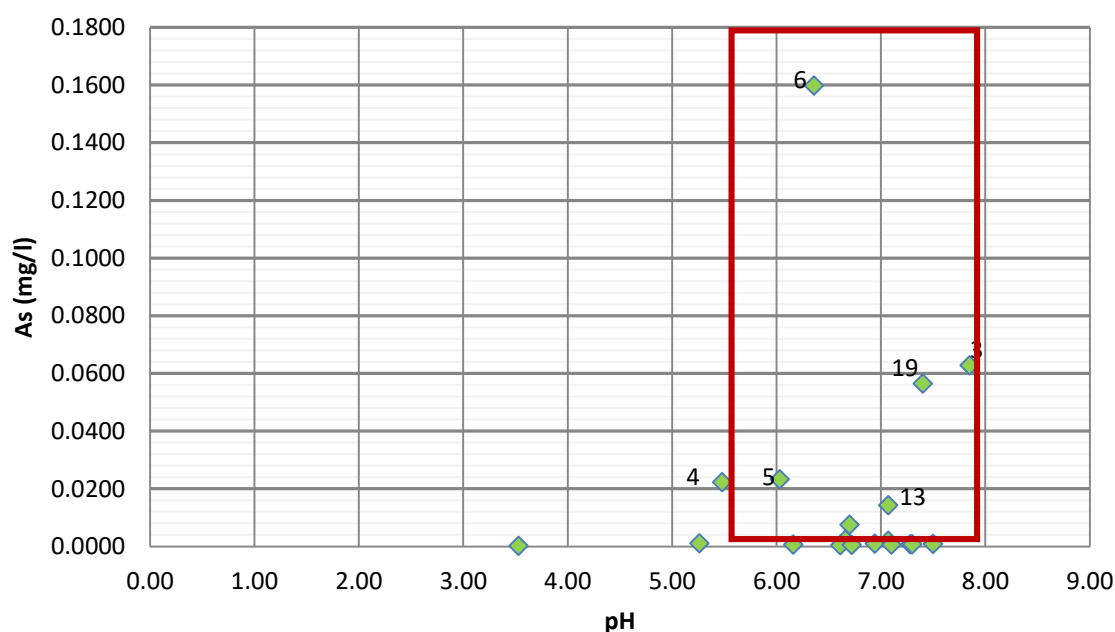


รูปที่ 3.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูกับค่า ORP

จากรูปที่ 3.9 พบว่าการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} ในน้ำบาดาล พบในสถานะที่มีค่าความต่างของศักย์ไฟฟ้าต่ำ ส่วนการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ในน้ำบาดาล ส่วนใหญ่พบในสถานะที่มีค่าความต่างของศักย์ไฟฟ้าสูง

3.6.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลกับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำบาดาล (pH)

นำค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมาหาความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำบาดาล (pH) เพื่อหาความช่วงของค่าความเป็นกรดต่างที่มักพบการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.10

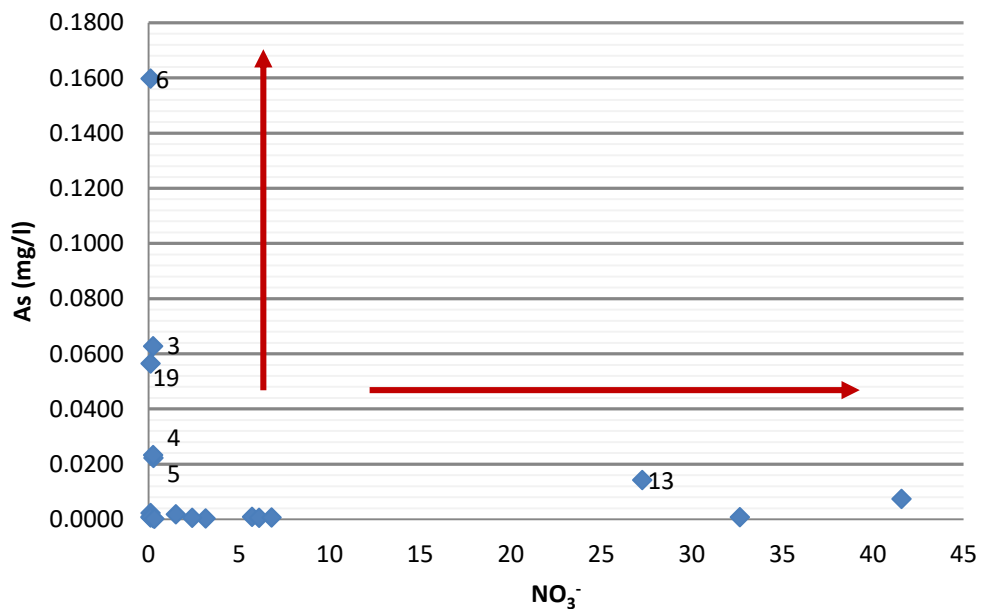


รูปที่ 3.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูกับค่า pH
จากรูปที่ 3.10 พบว่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานในช่วงค่าความเป็นกรดต่างของน้ำบาดาล (pH) ประมาณ 5.5 – 8 สามารถกล่าวได้ว่าจะพบการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลที่มีความเป็นกรดอ่อนหรือเบสอ่อน

3.6.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลกับค่าความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์

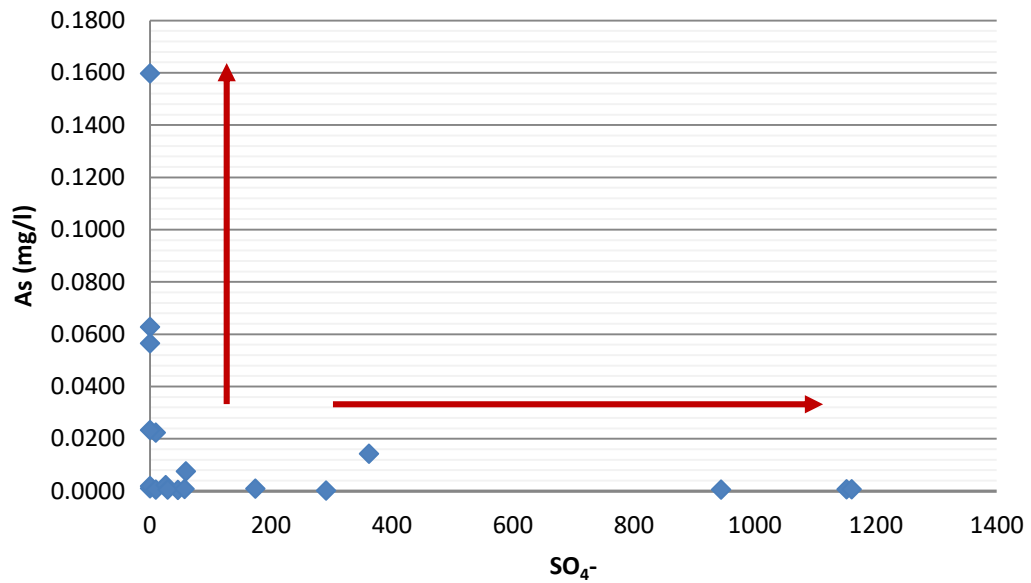
รูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลจะสอดคล้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในชั้นหินให้น้ำ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน คือปฏิกิริยาที่มีการให้และรับอิเล็กตรอนตามลำดับ พบว่าออกซิเจน (O_2) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในธรรมชาติ (ปฏิกิริยารีดักชัน) จากนั้นเมื่อในระบบใช้ออกซิเจน (O_2) หมดไป ระบบจะทำการใช้ออกซิเจนจากสารประกอบออกไซด์ตัวอื่น เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือไนเตรด (NO_3^-) เป็นต้น

นำค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมาหาความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์ เช่นซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือไนเตรด (NO_3^-) เพื่อดูว่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมีความสัมพันธ์กับรูปแบบปฏิกิริยาใด ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12



รูป 3.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนูกับค่าความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-})

จากรูปที่ 3.11 พบว่าค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมีค่าแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-}) เมื่อมีการปนเปื้อนของสารหนูมาก ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-}) น้อย และอาจกล่าวได้ว่าการปนเปื้อนของสารหนูเกิดมีความสัมพันธ์กับสภาวะรีดักชัน



รูปที่ 3.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสารหนู
กับค่าความเข้มข้นของไนเตรด (NO₃⁻)

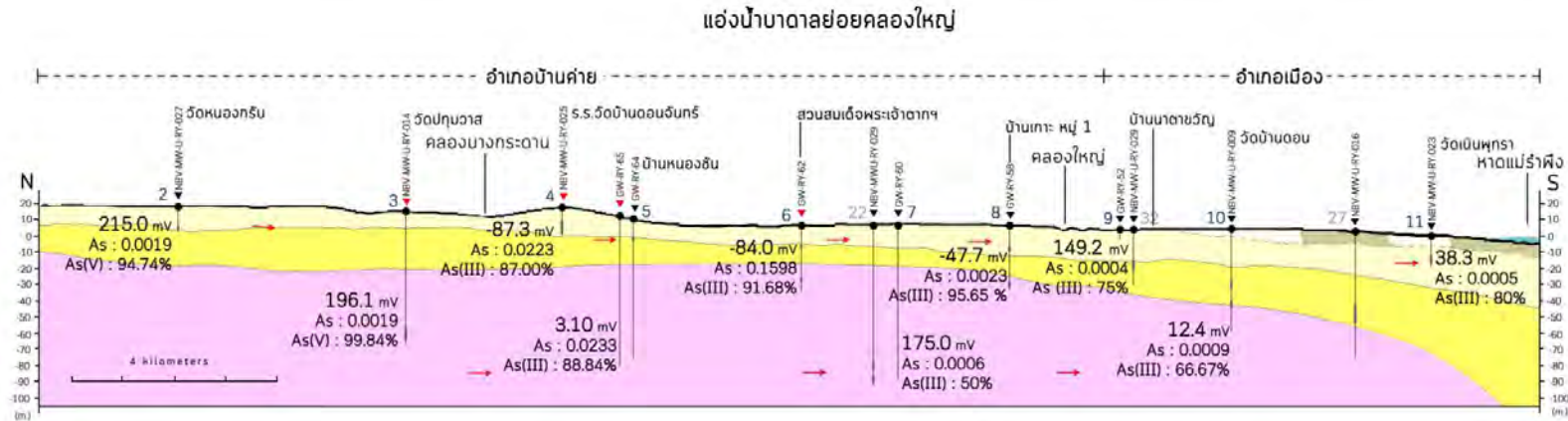
จากรูปที่ 3.12 พบว่าค่าการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลมีค่าแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของไนเตรด (NO₃⁻) เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำบาดาลกับค่าความเข้มข้นของซัลเฟต (SO₄²⁻) อาจกล่าวได้ว่าการปนเปื้อนของสารหนูเกิดมีความสัมพันธ์กับสภาวะรีดักชัน

บทที่ 4

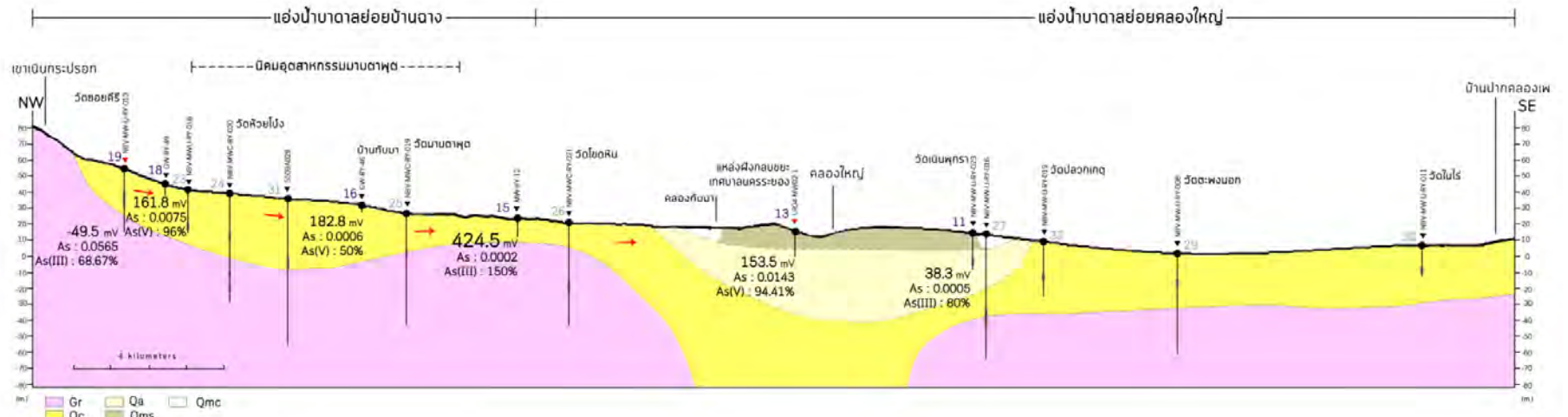
อภิปรายผลการศึกษา

นำค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP), ค่าการปนเปื้อนของสารหนู และเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของสารหนูรูปแบบเด่นในแต่ละจุดศึกษา ไปใส่ในแผนภาพตัดขวาง เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์แนวโน้มความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนของสารหนูกับลักษณะอุทธรณี รวมถึงลักษณะอุกเคมีของน้ำบาดาล ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความลึกของบ่อบาดาล ร่วมกับค่าความต่างของศักย์ภาพ (ORP) และค่าการปนเปื้อนของสารหนู สังเกตได้ว่าบ่อบาดาลที่มีระดับลึก มักพบมีค่าความต่างของศักย์ภาพต่ำหรือติดลบ เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่งผลให้พบการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} ดังจะเห็นได้จากจุดศึกษาที่ 5, จุดศึกษาที่ 6, จุดศึกษาที่ 7, จุดศึกษาที่ 8, จุดศึกษาที่ 10 และจุดศึกษาที่ 19 ยกเว้นจุดศึกษาที่ 3 ที่เป็นบ่อบาดาลที่มีระดับความลึก แต่มีความต่างของศักย์ภาพสูง และพบการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ทั้งนี้เมื่อพิจารณาแผนภูมิไปเปอร์ (Piper diagram) พบว่าจุดศึกษาที่ 3 เป็นจุดศึกษาที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำ น้ำบาดาลจึงมีออกซิเจนอยู่มาก ส่งผลให้มีความต่างของศักย์ภาพสูง และสามารถคาดการณ์ได้ว่าน้ำบาดาลในจุดศึกษานี้ เป็นน้ำบาดาลที่ยังไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน จึงพบการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ในทางกลับกันจะสังเกตได้ว่าบ่อบาดาลที่มีระดับตื้นมักพบมีค่าความต่างของศักย์ภาพสูง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้พบการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ดังจะเห็นได้จากจุดศึกษาที่ 5, จุดศึกษาที่ 13, จุดศึกษาที่ 16 และจุดศึกษาที่ 18 ยกเว้นจุดศึกษาที่ 15 ที่เป็นบ่อบาดาลที่มีระดับความตื้น แต่มีความต่างของศักย์ภาพสูง และพบการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{3+} ซึ่งจุดศึกษาดังกล่าว เป็นจุดศึกษาที่คาดว่าจะเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง เนื่องจากค่าการปนเปื้อนของสารหนูในรูปแบบ As^{5+} ที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะติดลบ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่ารูปแบบการปนเปื้อนของสารหนูมีความสัมพันธ์กับลักษณะอุทกธรณี โดยส่วนใหญ่สารหนูมักปนเปื้อนในรูปแบบ As^{3+} ภายใต้สภาวะรีดักชัน



รูปที่ 4.1 แผนภาพตัดขวางแนว A – A' พร้อมค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP), ค่าการปนเปื้อนของสารหนู



รูปที่ 4.2 แผนภาพตัดขวางแนว B – B' พร้อมค่าความต่างของศักย์ภาพ (Oxidation Reduction Potential : ORP), ค่าการปนเปื้อนของสารหนู

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาหารูปแบบของสารหนูที่ปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาลแอ่งระยองพบว่า น้ำบาดาลส่วนใหญ่ในพื้นที่ศึกษาเป็นน้ำบาดาลกลุ่มแคลเซียม-โซเดียม-ไบคาร์บอเนต-คลอไรด์ (Ca-Na- HCO₃-Cl) แสดงว่าน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่ เป็นน้ำบาดาลที่มีการเคลื่อนตัว พบว่าการไหลของน้ำในพื้นที่ศึกษาจะมีลักษณะไหลเข้าสู่คลองใหญ่ จากนั้นจะไหลออกทะเล (ทิศเหนือสู่ทิศใต้) โดยทิศทางการไหลของน้ำในชั้นหินให้น้ำตะกอนร่วนและชั้นหินให้น้ำหินแข็งมีทิศทางเดียวกัน สารหนูส่วนใหญ่ปนเปื้อนในรูปแบบ As³⁺ ภายใต้สภาวะรีดักชัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับชั้นหินให้น้ำหินแกรนิต (ชั้นหินให้น้ำหินให้น้ำระดับลึก)

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ถือว่าประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์โครงการ ในเรื่องการหารูปแบบของสารหนูที่ปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาลแอ่งระยอง และจัดทำแผนภาพตัดขวางลักษณะอุทกธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษาแสดงถึงความสัมพันธ์การปนเปื้อนของสารหนู อย่างไรก็ตามการ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการบริหารและจัดการน้ำบาดาลในอนาคต จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดยิ่งขึ้น ดังข้อเสนอแนะต่อไปนี้

1. กำหนดพื้นที่ศึกษาและทำการเลือกจุดศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลระยองทั้งหมด ไม่เพียงแค่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง
2. ควรทำการศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในตะกอนดิน และน้ำผิวดินด้วย เพื่อการวิเคราะห์ผล ตลอดจนการตีความหมาย ที่ครอบคลุม
3. สร้างแบบจำลองสามมิติดูการปนเปื้อน เพื่อการศึกษารูปแบบการปนเปื้อนได้อย่างละเอียดยิ่งขึ้น
4. ฯลฯ

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดระยอง. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา:
http://www.dmr.go.th/download/pdf/Central_East/rayong.pdf [2 ธันวาคม 2559]
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในแอ่งน้ำบาดาลระยองและแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร, 2555.
- กองน้ำบาดาล. 2552. ฐานข้อมูลพสุธารา [ข้อมูลดิจิทัล]: กองน้ำบาดาลกรมทรัพยากรธรณี.
- Alam, M. G. M. et al. "Arsenic Contamination In Bangladesh Groundwater: A Major Environmental And Social Disaster". *International Journal of Environmental Health Research* 12.3 (2002): 235-253.
- Giovanni Bidoglio and Werner Stumm. Chemistry Of Aquatic Systems: Local And Global Perspectives. Chemical and environmental science volume 5. 1st ed. Dordrecht: Springer, 1994
- Guidelines For Drinking-Water Quality. Geneva: World health organization, 2011.
- Herath, Indika et al. "Natural Arsenic In Global Groundwaters: Distribution And Geochemical Triggers For Mobilization". *Curr Pollution Rep* 2.1 (2016): 68-89.
- Hossain, Shahadat et al. "Redox Processes And Occurrence Of Arsenic In A Volcanic Aquifer System Of Kumamoto Area, Japan". *Environmental Earth Sciences* 75.9 (2016)
- MetalSoft Center. Arsenic Speciation Procedure With Disposable Cartridge [Online]. Availble from : <http://www.metalsoftcenter.com/> [2016,Oct 22]

- Petrick JS, Ayala-Fierro F, Cullen WR, Carter DE, Vasken Aposhian H. Monomethylarsonous Acid ((MMA)(III)) Is More Toxic Than Arsenite in Chang Human Hepatocytes. *Toxicol Appl Pharmacol* 2000;163:203-7
- Rahman, M. Tauhid Ur et al. "Mobilization Of High Arsenic In The Shallow Groundwater Of Kalaroa, South-Western Bangladesh". *Exposure and Health* 8.2 (2015): 159-175.
- Sracek, Ondra et al. "Behavior Of Arsenic And Geochemical Modeling Of Arsenic Enrichment In Aqueous Environments". *Applied Geochemistry* 19.2 (2004): 169-180.
- Sultana, Munawar, Santonu Kumar Sanyal, and Mohammed Anwar Hossain. "Arsenic Pollution In The Environment:". *Handbook of Research on Uncovering New Methods for Ecosystem Management through Bioremediation* 92-119.
- US EPA Method 200.2, Sample Preparation Procedure for Spectrochemistry Determination of Total Recoverable Element, National Exposure Research Laboratory, office of water, US EPA, Cincinnati, OH, October 1999.
- Voice, Thomas C. et al. "Field Deployable Method For Arsenic Speciation In Water". *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36.9-11 (2011): 436-441.
- Xie, Xianjun et al. "Geochemistry Of Redox-Sensitive Elements And Sulfur Isotopes In The High Arsenic Groundwater System Of Datong Basin, China". *Science of The Total Environment* 407.12 (2009): 3823-3835.

ภาคผนวก

ตารางแสดงรายละเอียดจุดศึกษา

ID	Ref.	X	Y	Location
1	NBV-MW-U-RY-004	757559	1427343	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลคลองขนุน
2	NBV-MW-U-RY-027	751190	1425456	วัดหนองกรับ
3	NBV-MW-U-RY-014	751168	1420902	วัดปทุมवास
4	NBV-MW-U-RY-025	748274	1418358	โรงเรียนวัดดอนจันทน์
5	GW-RY-65	749780	1416856	คุณประจักษ์ ลำพะเยาว์
6	GW-RY-62	749846	1413222	สวนสมเด็จพระเจ้าตากสินมหาราช
7	GW-RY-60	751004	1411222	โรงเรียนชุมชนวัดหนองคอกหมู
8	GW-RY-58	747773	1409375	ระบบประปาชุมชนบ้านเกาะ หมู่ 1
9	GW-RY-52	752258	1406816	คุณประนอม เงินน้อย
10	NBV-MW-U-RY-009	749614	1404654	วัดบ้านดอน
11	NBV-MW-U-RY-023	749352	1400811	วัดเนินพุทรา
12	LR04-MW04-1	744383	1401277	แหล่งฝังกลบขยะเทศบาลนครระยอง
13	LR04-MW02-1	744267	1401561	แหล่งฝังกลบขยะเทศบาลนครระยอง
14	LR04-MW03-1	744194	1401885	แหล่งฝังกลบขยะเทศบาลนครระยอง
15	MW-RY-12	735552	1402735	นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
16	GW-RY-46	734981	1408683	คุณทองหล่อ มหาวิทยาลัย
17	LR01-MW02-1	736865	1410247	บ้านเนินพยอม
18	GW-RY-49	729209	1409750	คุณเสมอ อาศัย
19	NBV-MW-U-RY-013	729604	1412944	วัดชอยคีรี

ตารางแสดงค่าไอออนต่างๆ

ID	pH	ORP (mV)	TDS (ppm)	EC (µs/cm)	DO (mg/l)	TC (mg/l)	HCO3- (mg/l)	Cl (mg/l)	Nitrate (mg/l)	SO4- (mg/l)	PO3 (mg/l)	Ca (mg/l)	Fe (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	K (mg/l)	Na (mg/l)	As (mg/l)	Total As (mg/l)	As3+ (mg/l)	As5+ (mg/l)
1	5.26	263.90	194.56	304.00	3.59	10.45	20.89	9.90	5.71	0.10	0.07	1.70	0.02	0.46	0.03	3.66	8.92	0.0011	0.0010	0.0001	0.0009
2	7.07	215.00	139.52	218.00	4.01	8.18	79.49	22.57	1.50	0.10	0.15	11.84	0.01	3.91	0.01	4.38	22.85	0.0030	0.0019	0.0001	0.0018
3	7.85	196.10	317.44	496.00	6.48	23.83	121.32	7.39	0.25	0.10	0.27	6.78	0.01	0.82	0.00	2.08	98.00	0.0470	0.0628	0.0001	0.0627
4	5.48	-87.30	77.82	121.60	1.56	29.37	35.77	25.23	0.26	10.00	1.10	5.18	0.00	1.46	0.15	4.86	12.67	0.0215	0.0223	0.0194	0.0029
5	6.03	3.10	239.36	374.00	3.37	21.25	95.65	27.15	0.25	0.10	0.10	15.62	0.03	3.24	0.00	9.83	21.44	0.0076	0.0233	0.0207	0.0026
6	6.36	-84.00	214.40	335.00	1.99	23.92	133.87	49.77	0.10	0.10	0.10	15.57	0.03	9.64	0.01	9.98	24.04	0.3302	0.1598	0.1465	0.0133
7	6.16	175.00	20.29	31.70	2.85	25.61	121.85	7.05	6.10	10.00	0.10	56.90	0.00	5.43	0.06	2.65	13.60	0.0026	0.0006	0.0003	0.0003
8	6.66	-47.70	269.44	421.00	7.91	14.45	107.79	49.08	0.10	26.03	0.05	5.59	0.00	2.34	0.11	8.51	86.55	0.0021	0.0023	0.0022	0.0001
9	6.61	149.20	230.40	360.00	4.29	16.90	231.89	116.78	3.15	46.23	0.03	63.83	0.02	4.07	0.08	7.15	67.87	0.0020	0.0004	0.0003	0.0001
10	6.94	12.40	8000.00	12500.00	3.32	82.89	567.22	350.84	0.10	174.44	0.10	71.76	0.16	43.26	0.42	18.87	316.94	0.0031	0.0009	0.0006	0.0003
11	6.72	38.30	8940.80	13970.00	3.48	57.21	11197.32	7292.77	0.25	944.13	0.03	423.24	0.01	517.21	0.01	124.57	3793.40	0.0007	0.0005	0.0004	0.0001
12	7.28	-380.70	25024.00	39100.00	0.00	98.18	19835.31	13058.01	0.10	1151.75	6.32	312.69	0.04	806.44	0.00	253.50	6627.03	0.0008	0.0007	0.0006	0.0001
13	7.07	153.50	25920.00	40500.00	3.15	94.39	1419.46	987.97	27.26	362.33	6.90	75.18	0.05	30.13	0.12	267.69	706.78	0.0128	0.0143	0.0008	0.0135
14	7.30	149.30	31360.00	49000.00	4.43	59.94	23475.64	15250.77	6.79	1160.35	0.10	362.87	0.00	877.55	0.00	269.11	7849.38	0.0010	0.0007	0.0006	0.0001
15	3.53	424.50	670.08	1047.00	5.76	4.58	962.94	816.00	0.31	291.06	0.01	76.46	0.18	32.36	0.00	28.59	483.13	0.0017	0.0002	0.0003	-0.0001
16	7.10	182.80	306.56	479.00	8.90	5.10	13.55	21.34	2.41	29.52	0.03	11.99	0.01	3.06	0.06	9.09	14.50	0.0009	0.0006	0.0003	0.0003
17	7.50	138.40	4217.60	6590.00	4.00	29.20	250.21	137.97	32.64	57.51	0.11	20.24	0.02	4.08	0.08	71.10	140.97	0.0012	0.0008	0.0005	0.0003
18	6.70	161.80	415.36	694.00	4.34	12.99	46.60	32.57	41.58	59.69	0.62	55.50	0.01	5.55	0.05	13.09	39.83	0.0064	0.0075	0.0003	0.0072
19	7.40	-49.50	432.00	675.00	3.26	20.47	187.33	20.35	0.10	0.10	0.10	20.71	0.17	0.89	0.15	3.75	120.82	0.0508	0.0565	0.0388	0.0177
	6.58	84.95	5631.03	8800.86	4.04	33.63	3100.22	2014.92	6.79	227.56	0.86	84.93	0.04	123.78	0.07	58.55	1076.25	26.11	0.0188	0.0123	0.0065

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไอออน

	Temp	ORP	pH	EC	TDS	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Mn	K ⁺	Fe	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂	NO ₃ ⁻	NH ₃	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	TC	AsP	As	As ³⁺	As ⁵⁺	
Temp	1																							
ORP	.258	1																						
pH	-.386	-.361	1																					
EC (µS/cm)	.024	-.266	.327	1																				
TDS (mg/l)	.024	-.266	.327	1.000**	1																			
Ca ²⁺ (mg/l)	-.023	-.263	.169	.707**	.707**	1																		
Na ⁺ (mg/l)	-.072	-.352	.242	.827**	.827**	.903**	1																	
Mg ²⁺ (mg/l)	-.097	-.383	.240	.792**	.792**	.923**	.996**	1																
Mn (mg/l)	-.291	-.174	.123	-.027	-.027	-.228	-.272	-.276	1															
K ⁺ (mg/l)	.085	-.257	.291	.977**	.977**	.728**	.813**	.784**	-.159	1														
Fe (mg/l)	.114	.083	-.290	-.041	-.041	-.094	-.130	-.144	.484*	-.099	1													
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	-.082	-.359	.244	.815**	.815**	.900**	1.000**	.996**	-.282	.802**	-.145	1												
Cl ⁻ (mg/l)	-.078	-.357	.235	.817**	.817**	.900**	1.000**	.997**	-.284	.804**	-.140	1.000**	1											
NO ₂ (mg/l)	.245	.122	.211	.429	.429	-.072	-.079	-.122	.117	.498*	-.020	-.098	-.095	1										
NO ₃ ⁻ (mg/l)	-.045	.242	.199	.158	.157	-.093	-.110	-.136	.000	.214	-.195	-.117	-.116	.594**	1									
NH ₃ (mg/l)	.035	-.431	.193	.682**	.682**	.306	.407	.392	-.059	.734**	.008	.395	.402	.549*	.163	1								
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	.035	-.431	.193	.682**	.682**	.306	.407	.392	-.059	.734**	.008	.395	.402	.549*	.163	1.000**	1							
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	-.004	-.311	.167	.838**	.838**	.958**	.964**	.968**	-.228	.851**	-.048	.958**	.961**	.028	-.073	.483*	.483*	1						
TC (mg/l)	-.065	-.493*	.359	.833**	.833**	.595**	.603**	.598**	.324	.797**	.103	.589**	.591**	.434	.073	.731**	.731**	.682**	1					
As particulate	.000	-.254	.004	-.165	-.165	-.186	-.154	-.147	-.132	-.162	.009	-.148	-.150	-.076	-.155	-.066	-.066	-.193	-.097	1				
As (µg/l)	.015	-.262	.090	-.211	-.211	-.258	-.209	-.207	-.128	-.211	.054	-.204	-.208	-.077	-.186	-.082	-.082	-.262	-.125	.953**	1			
As ³⁺ (µg/l)	.014	-.332	-.052	-.192	-.191	-.195	-.160	-.152	-.094	-.188	.068	-.152	-.155	-.113	-.195	-.095	-.095	-.207	-.120	.973**	.928**	1		
As ⁵⁺ (µg/l)	.008	.077	.361	-.115	-.115	-.232	-.184	-.197	-.122	-.123	-.014	-.187	-.191	.058	-.041	.004	.004	-.215	-.052	.267	.497*	.137	1	

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

การหาค่าไบคาร์บอเนต (Bicarbonate)

เนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในขั้นตอนการสำรวจภาคสนาม ผู้ทำการศึกษาได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น (Cont. HNO₃) เพื่อเป็นการเก็บรักษาสภาพตัวอย่างน้ำบาดาลก่อนทำการส่งตรวจวิเคราะห์หาโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาล ส่งผลให้ตัวอย่างน้ำบาดาลดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้หาค่าความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ได้ ซึ่งค่าไบคาร์บอเนตมีความสำคัญในการใช้สร้างแผนภูมิไปเปอร์ (Piper diagram) สำหรับศึกษารูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาล (Hydrochemical facies)

ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate : HCO₃⁻) คือหนึ่งในสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งค่าอัลคาไลน์ (Alkalinity; Alk) เป็นการวัดความสามารถของสารละลายในการเปลี่ยนสภาพกรดให้เข้าสู่จุดสะเทินของคาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนต ดังนั้นจึงสามารถทำการหาค่าไบคาร์บอเนตจากการคำนวณกลับของค่าอัลคาไลน์

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ [Alk]} &= [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] - [\text{Cl}^-] - 2[\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^-] \\ &= [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \end{aligned}$$

(อ้างอิงจาก : Chemistry of Aquatic System : Local and Global Perspectives)

และกำหนดในขั้นหินให้น้ำมีคุณสมบัติเหมือนชั้นดิน จากนั้นอ้างอิงสมการคาร์บอเนตจากคุณสมบัติเคมีของดิน (Carbonate Equilibrium of soil chemistry) ในระบบเปิด (CO₂ – H₂O open system) เมื่อรู้ค่าความเป็นกรดของน้ำ (pH) จะได้

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/l)} = 50000 \frac{2\text{Alk} - 10^{-14} + \text{pH}}{1 + 2K_2 10^{\text{pH}}}$$

$$\text{กำหนดให้ } K_2 = \frac{(\text{H}^+)(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{HCO}_3^-)} = 10^{-10.3}$$

ตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการหาค่าไบคาร์บอเนตจากสมการทั้งหมด โดยการนำค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ จากข้อมูลในรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและศึกษาค่าพื้นฐานโลหะหนักในแอ่งน้ำบาดาลระยองและแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555 มาแทนค่าใน

สมการทั้งหมดเพื่อหาค่าไบคาร์บอเนตที่ได้จากการคำนวณ เปรียบเทียบกับค่าไบคาร์บอเนตที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล พบว่าค่าที่ได้เปรียบเทียบกับกันมีความคลาดเคลื่อน (%Error) = 42% แต่เมื่อนำค่าไบคาร์บอเนตจากการคำนวณและจากการวิเคราะห์ไปสร้างแผนภูมิไปเปอร์ พบว่าแผนภูมิที่ได้ทั้ง 2 แผนภูมิ สามารถแปลผลรูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาลได้เหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าไบคาร์บอเนตที่ได้จากการคำนวณมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปสร้างแผนภูมิไปเปอร์ และสามารถแปลรูปแบบทางเคมีของน้ำบาดาลได้