รูปแบบการกระจายของสารหนูในน้ำบาดาลโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ บริเวณพื้นที่ชุมชน ลุ่มน้ำห้วยข้าวสาร จังหวัดอุบลราชธานี

Distribution Patterns of Arsenic in Groundwater Using Spatial Autocorrelation in Rural Area at Huai Kao Sarn Watershed Ubon Rachathani Province

วัชรพงษ์ แสงนิล, จารุวรรณ์ วงบุตดี*, จุฑารัตน์ จิตติมณี และ สุวภรณ์ แดนดี

Wacharapong Saengnill, Jaruwan Wongbutdee*, Jutharat Jittimanee and Suwaporn Deandee

วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

College of medicine and public health Ubon Ratchathani University

Received : 6 December 2018

Revised : 7 January 2019

Accepted : 21 January 2019

บทคัดย่อ

สารหนู (Arsenic) สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อมทั่วไป และเป็นส่วนประกอบในสารกำจัดแมลง และสารกำจัดศัตรูพืช โดยเกษตรกรใช้สารกำจัดแมลง และสารกำจัดศัตรูพืชเพื่อป้องกันแมลงศัตรูข้าว ทำให้มีสารหนูปนเปื้อนในดินและน้ำบาดาล ถ้าประชาชนสัมผัส หายใจ หรือดื่มน้ำ จะส่งผลให้สารหนูเข้าสู่ร่างกายได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล และวิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่และรูปแบบการกระจายของปริมาณสารหนูในน้ำบาดาล โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจำนวน 31 บ่อ และเก็บตำแหน่งพิกัดด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก จากนั้นวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารหนูในตัวอย่างน้ำบาดาล ด้วยเทคนิคกราไฟต์ เฟอร์เนสอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Graphite Furnace Atomic Absorption) และวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสารหนูด้วยการวิเคราะห์การเป็นกลุ่มและส่วนที่อยู่นอกกลุ่ม และประมาณค่าของสารหนูด้วยวิธีคริกกิ้งแบบอินดิเคเตอร์ ผลการศึกษาพบว่าสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาลจำนวน 22 บ่อ การวิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ด้วย Moran's I พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่เป็นกลุ่มและกระจายเป็นกลุ่มมากในทางตอนใต้ของพื้นที่ศึกษา

คำสำคัญ : สารหนู, น้ำบาดาล, สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่

*Corresponding author. E-mail : jw_beer@yahoo.com

Abstract

Arsenic is found in the natural environment as it is used in insecticides and pesticides for protection of rice. As part of this process, it has contaminated soil and groundwater, exposing people to its effects by touch, breathing, and drinking. This study aimed to assess the arsenic in groundwater and analyze the spatial distribution patterns of arsenic contamination by using spatial autocorrelation in groundwater. Groundwater data were collected from 31 wells with global positioning system (GPS). Arsenic contamination of the groundwater analyzed by Graphite Furnace Atomic Absorption. Spatial autocorrelation statistics were analyzed by Anselin Local Moran's I for the patterns of distribution of arsenic contamination. In addition, groundwater of arsenic contamination was modeled by indicator kriging method. The Results showed that 22 groundwater sources were contaminated with arsenic. The application of spatial correlation statistics with Moran's I revealed a cluster spatial pattern with statistical significance of arsenic in groundwater especially in the south of the study area.

Keywords: arsenic, groundwater, spatial autocorrelation

บทนำ

การพัฒนาประเทศที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องในหลายปีที่ผ่านมา เป็นผลทำให้มีการใช้ทรัพยากร และสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การใช้ประโยชน์ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดินมีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา และสภาพการณ์ของมนุษย์และธรรมชาติที่เกิดขึ้นทำให้มีผลกระทบด้านอื่นๆ ตามมา ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในอดีตการทำการเกษตรนั้นต้องพึ่งพาอาศัยธรรมชาติ ต่อมาภายหลังได้มีการพัฒนาทางเทคโนโลยีที่ล้ำสมัย มีการนำวิวัฒนาการด้านการเกษตรจากต่างประเทศเข้ามามากขึ้น เป็นผลให้เกษตรกรส่วนใหญ่ได้นำเอาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทันสมัยมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น รถไถนา ปุ๋ยเคมี สารเคมีกำจัดศัตรูพืช เพื่อเพิ่มผลผลิตและตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคเป็นอย่างดี โดยเฉพาะสารเคมีจำกัดศัตรูพืชและแมลง จำพวกสารอนินทรีย์ (inorganic insecticide) ได้แก่ สารจำพวกกำมะถัน คอปเปอร์ซัลเฟต และสารหนู ซึ่งสารหนูเป็นสารกำจัดแมลงที่นิยมใช้ในการป้องกันกำจัดแมลงพวกปลวก แมลงสาบ ตัวหนอนผีเสื้อ และตั๊กแตน สารหนูเป็นอันตรายต่อแมลงน้อย แต่มีพิษต่อคนและสัตว์มาก สลายตัวได้ยากและมีพิษต่อพืชสูง ซึ่งหากเกษตรกรมีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมากจะทำให้มีสารหนูปนเปื้อนในดินและสะสมในนาข้าว เมื่อเกิดฝนตกทำให้มีการซึมของน้ำและปนเปื้อนลงสู่น้ำใต้ดินในพื้นที่ชุมชน และสิ่งแวดล้อม เมื่อประชาชนนำน้ำบาดาล หรือน้ำใต้ดินมาบริโภค หรือการใช้ประโยชน์ที่มีการสัมผัสที่ผิวหนัง หรือการหายใจเอาละอองฝุ่น หรือไอระเหยที่มีสารหนูปนเปื้อน จะทำให้ร่างกายมีการขับออกทางปัสสาวะภายใน 2 วัน แต่หากได้รับปริมาณมากจะทำให้ลำไส้และตับถูกทำลาย อาเจียนมีสีเขียวและเหลือง ท้องเสียอย่างรุนแรง มึนเมา และถึงแก่ชีวิตได้ สารหนูที่พบในน้ำบาดาลเป็นปัญหาที่สำคัญของหลายๆ ประเทศ เช่น บังกลาเทศ เวียดนาม กัมพูชา และเมียนมาร์ (Welch, 1988; Berg, 2001; Smedley, 2002) โดย Buschmann (2007) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำใต้ดิน เขตอำเภอตามลุ่มน้ำโขง ประเทศกัมพูชา เก็บตัวอย่าง 131 ตัวอย่าง ซึ่งปริมาณสารหนูที่ตรวจพบอยู่ในช่วง 1-1,340 ไมโครกรัมต่อลิตร และพบว่า 48% ของตัวอย่างมีปริมาณสารหนูมากกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังตรวจ

พบสารหนูในประชาชนจำนวน 350 คนต่อตารางกิโลเมตร และ Berg (2006) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำใต้ดินในเขตลุ่มแม่น้ำโขงตอนล่าง พบว่าประเทศกัมพูชามีปริมาณสารหนู 1-1,610 ไมโครกรัมต่อลิตร และอำเภอเขมราฐ จังหวัดอุบลราชธานีมีสารหนูปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานที่ WHO กำหนด (Pranee, 2012)

ปริมาณสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลยากที่จะเก็บข้อมูลเพื่อทำการตรวจปริมาณสารหนูได้ทุกพื้นที่ และยากที่จะกำหนดระยะทางและทิศทางของปริมาณน้ำบาดาล สิ่งที่สำคัญจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้ และการจัดกลุ่มของข้อมูล หรือการกระจายของข้อมูลมีรูปแบบอย่างไร เพื่อจะได้ทำนายและวางแผนเฝ้าระวังปริมาณสารหนูปนเปื้อนในบาดาล การศึกษาสถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของปริมาณสารหนูในน้ำบาดาล มีการใช้สถิติ Moran's I (Jaymie, 2008; Bekti, 2014) ซึ่งเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและค่าของข้อมูลไปพร้อมๆ กัน รวมถึงค่าน้ำหนักของระยะทางที่ใช้ในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ได้ และการใช้ Anselin Local Moran's I จะช่วยในการแสดงผลของแผนที่ตำแหน่งที่มีการจัดกลุ่ม หรือการกระจายของข้อมูล ทำให้เห็นข้อมูลที่ปะปนอยู่ในกลุ่มอื่นได้ เช่น ข้อมูลที่มีค่าสูงแต่มีตำแหน่งที่อยู่ปะปนกับตำแหน่งที่มีค่าต่ำ ทำให้มองเห็นข้อมูลที่ชัดเจนและแยกแยะปริมาณสารหนูในน้ำบาดาลได้ แต่ถ้าตำแหน่งของข้อมูลมีค่าใกล้เคียงและมีการจัดกลุ่มในค่าที่สูงจะทำให้ค่าบริเวณนั้นมีค่าสูงด้วย ทั้งนี้การทราบรูปแบบความสัมพันธ์ไม่เพียงพอจึงมีการประมาณค่าของข้อมูลในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่า โดยใช้ค่าน้ำหนักของข้อมูลที่ได้ทำนาย อาศัยความแปรปรวนของระยะทางของแต่ละคู่ที่มีความสัมพันธ์กัน สถิติที่ใช้ประมาณค่าเชิงพื้นที่ เช่น Ordinary Kriging, Universal Kriging, และ Indicator Kriging ซึ่งต้องมีการทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูล และข้อมูลที่ได้มาจากการสุ่ม ดังนั้นข้อมูลน้ำใต้ดินที่นำมาตรวจหาค่าพารามิเตอร์ เช่น สารหนู จึงกำหนดได้ยากมากที่จะมีการแจกแจงปกติ และตำแหน่งของน้ำบาดาลจะขึ้นกับหลังคาเรือนที่มีการขุดเจาะ เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ สถิติ Indicator Kriging ถูกใช้ในการประมาณค่าของโอกาสที่จะพบสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล (Liu, 2004; Goovaerts, 2005; Manzurul, 2011; Antunes, 2013) เพราะใช้กับข้อมูลนอนพาราเมตริกได้ และแบ่งข้อมูลออกเป็น binary data (0,1) เพื่อทำการทำนายพื้นที่ที่ไม่ทราบค่า ค่าที่ได้จะเป็นความน่าจะเป็น หรือโอกาสที่จะพบปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล

การศึกษาครั้งนี้ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ และระบบกำหนดพิกัดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positoning System: GPS) ของแหล่งน้ำบาดาลที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารหนู จากนั้นนำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยการแสดงผลรูปแบบการกระจายของระดับสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล โดยใช้ Moran's I และวิเคราะห์การเป็นกลุ่มและกลุ่มที่อยู่นอกกลุ่มด้วย Cluster and Outlier Analysis: Anselin Local Moran's I แสดงผลการกระจายของสารหนูในพื้นที่ด้วยการประมาณค่าจากสถิติ Indicator Kriging อันจะเป็นประโยชน์และข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสนับสนุนในการตัดสินใจ วางแผน ควบคุม และป้องกันโรคและพิษที่เกิดจากการปนเปื้อนของสารหนู

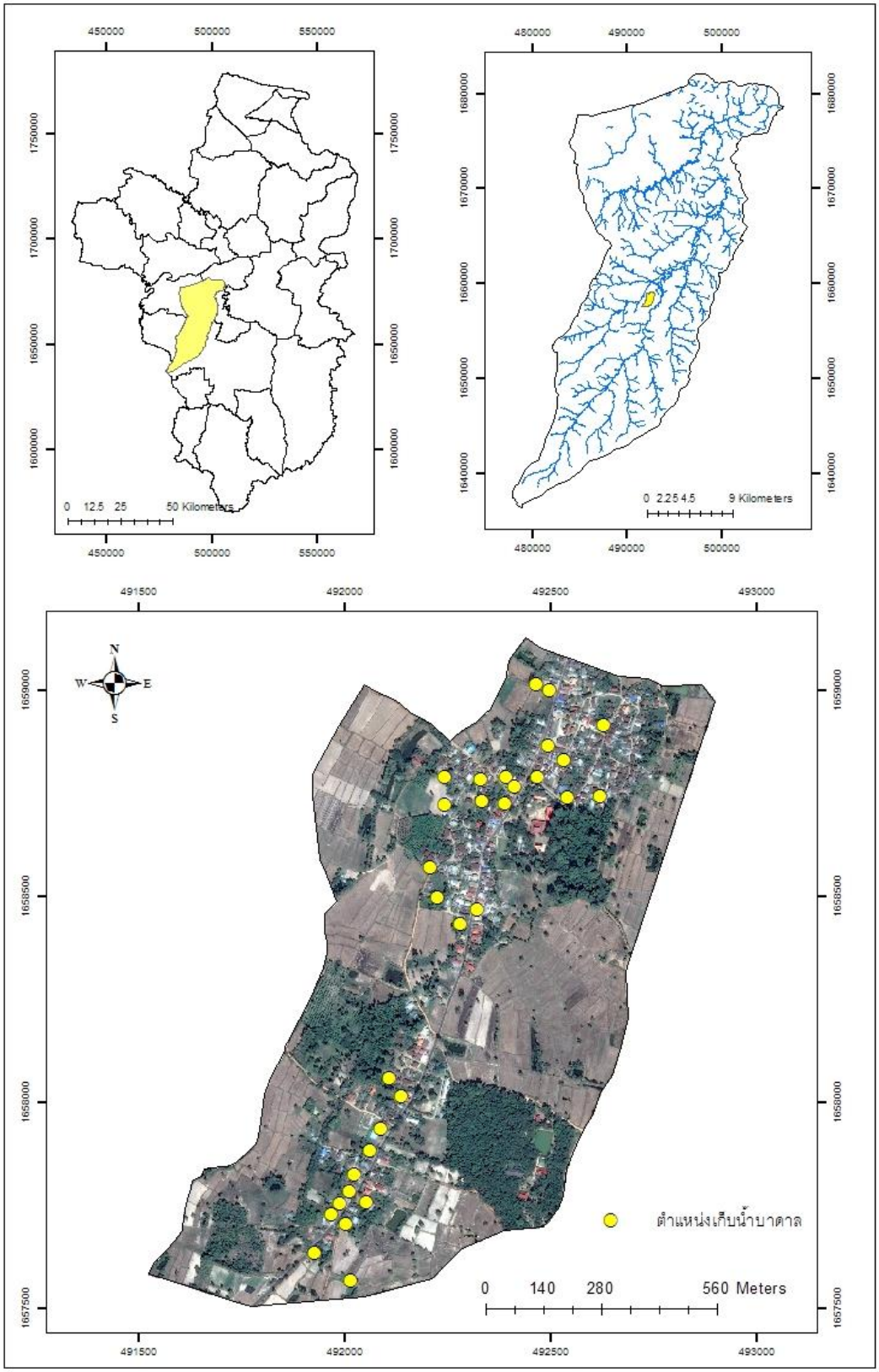
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประเมินปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล
2. เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสารหนูและประมาณค่าสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ หมู่บ้านโนนยาง ตำบลสระสมิง อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี อยู่ในพื้นที่ตอนกลางของลุ่มน้ำห้วยข้าวสาร มีขนาดพื้นที่ 1.20 ตารางกิโลเมตร (ภาพที่ 1) จากการสอบถามอาสาสมัครประจำหมู่บ้านและการสำรวจพื้นที่ศึกษาของคณะวิจัยพบว่า ส่วนใหญ่ประชาชนประกอบอาชีพเกษตรกรรม ได้แก่ ปลูกข้าว ปลูกมันสำปะหลัง พืชผักสวนครัว และมีพื้นที่ป่าชุมชน มีการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำเพื่อการเกษตร อุปโภคและบริโภค โดยอาศัยแหล่งน้ำตามธรรมชาติและขุดเจาะน้ำบาดาล (Thaveevouthti, 2010)



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาบริเวณตอนกลางของลุ่มน้ำห้วยข้าวสาร จังหวัดอุบลราชธานี

การเก็บตัวอย่างสารหนูในน้ำบาดาล

1) เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในทุกหลังคาเรือนที่ได้ทำการขุดเจาะไว้เพื่อการเกษตร หรือใช้ในชีวิตประจำวัน โดยอาสาสมัครประจำหมู่บ้าน จำนวน 2 คน รวบรวมได้ทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา จำนวน 31 บ่อ และเก็บตำแหน่งพิกัดด้วยเครื่อง GPS

2) เปิดน้ำทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อไล่น้ำที่ค้างท่อออก และปรับระดับน้ำให้ไหลสม่ำเสมอ เก็บน้ำบาดาลใส่ขวดพลาสติกชนิด High density polyethylene ปริมาณน้ำตัวอย่าง 1,000 มิลลิลิตร ส่งตรวจวิเคราะห์สารหนูทางห้องปฏิบัติการทางเคมี ด้วย Graphite furnace atomic absorption spectrometry โดยอาศัยกระบวนการแตกตัวเป็นอะตอมเสรีของธาตุด้วยความร้อนจากไฟฟ้า ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ 1. ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าจะถ่ายเทให้สารตัวอย่างเพื่อระเหยตัวทำระเหยให้หมดไป 2. สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ถูกกำจัดโดยแตกสลายออกไป เหลือแต่สารอนินทรีย์ที่เสถียรเท่านั้น และ 3. สารที่เหลือจะถูกเผาที่อุณหภูมิสูงมากเพื่อให้สลายเป็นอะตอมเสรี (APHA, 2012)

3) การแปลผลปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 พ.ศ. 2543 ต้องไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่

เชื่อมโยงข้อมูลด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ระหว่างผลการตรวจปริมาณสารหนูในน้ำบาดาล (Attribute data) กับตำแหน่งพิกัดเก็บตัวอย่างน้ำ (Spatial data) จากเครื่อง GPS และทำการวิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ เพื่อทำการวัดระดับการกระจายเชิงพื้นที่และทำนายความน่าจะเป็นของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล โดยใช้โปรแกรม ArcGIS for Desktop 10.5.1 จากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล มีขั้นตอนดังนี้

1. วิเคราะห์รูปแบบการกระจายของปริมาณสารหนูปนเปื้อน โดยใช้สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ Moran's I (สมการที่ 1) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและค่าของข้อมูล attribute ไปพร้อมๆ กัน เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่หนึ่งๆ ซึ่งพื้นที่ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกันจะทำให้ค่าของสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่สูง ผลของการวัดค่าจะมี 3 รูปแบบ คือ แบบกลุ่ม (cluster), แบบกระจาย (disperse), และ แบบสุ่ม (random) (สมการที่ 1)

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \quad (1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของตัวแปร ของ i, j

X คือ ปริมาณสารหนู

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารหนู

ω_{ij} คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่ง i และ j

ผลที่ได้จะให้ค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางเดียวกัน ถ้าค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่ามีสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางตรงข้าม และค่า 0 แสดงว่ามีการกระจายตัวแบบสุ่มหรือไม่มีรูปแบบแน่นอน โดยค่า I ที่มีค่าน้อยกว่า 0 มีรูปแบบการจัดตัวแบบกระจายตัว และค่า I ที่มีค่ามากกว่า 0 มีรูปแบบการจัดตัวแบบเป็น

กลุ่ม โดยการทดสอบสมมุติฐาน (Null Hypothesis) จะใช้การคำนวณค่ามาตรฐาน Z score และค่า P-value ในการทดสอบสมมุติฐาน (ESRI, 2008) โดยที่สมมุติฐานของการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของ Moran's I คือตัวแปรอิสระมีรูปแบบกระจายตัวแบบสุ่ม หรือไม่มีรูปแบบแน่นอน ซึ่งมีค่าคะแนนมาตรฐานของมอแรน (Z) จะอยู่ระหว่าง 1.68 ถึง -1.68 หรือมีค่าวิกฤติ P-value มากกว่า 0.10

2. วิเคราะห์การเป็นกลุ่มและส่วนที่อยู่นอกกลุ่ม (Cluster and Outlier Analysis: Anselin Local Moran's I)

การใช้ค่า Moran's I อย่างเดียวไม่เพียงพอ เนื่องจากจะแสดงผลลัพธ์ของการจัดกลุ่มของข้อมูลเท่านั้น ซึ่งไม่แสดงถึงตำแหน่งของข้อมูลหรือ กลุ่มของข้อมูลว่ามีการจัดกลุ่มอยู่ที่ใด การใช้สถิติ Cluster and Outlier Analysis: Anselin Local Moran's I (สมการที่ 2 และ 3) เป็นการวัดค่ารูปแบบความแตกต่างของการเป็นกลุ่มที่แสดงความสูงต่ำของข้อมูลได้ ซึ่งจะให้ค่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้กันให้ค่าที่สูง และตำแหน่งที่อยู่ไกลออกไปให้ค่าต่ำ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกทดสอบสมมุติฐานจากค่า Z score และอยู่ระหว่าง 1.68 ถึง -1.68 (สมการที่ 2 และ 3)

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \omega_{ij}(x_i - \bar{x}) \qquad (2)$$

เมื่อ I_i = เป็นค่าความสัมพันธ์แอนซิลินโลคัลของมอแรน

x_i = เป็นปริมาณสารหนู

$\bar{x}$ = เป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณสารหนู

ω_{ij} = เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่ง i และ j

n = เป็นจำนวนตัวแปรอิสระ

โดยที่

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}}{(n-1)} - \bar{x}^2 \qquad (3)$$

การแปลผลในรูปของแผนที่การจัดกลุ่ม หรืออยู่นอกกลุ่ม ผลการวิเคราะห์จะแสดงตำแหน่งที่มีการจัดกลุ่มสูงจะเป็นสัญลักษณ์ ซึ่งมี 4 ลักษณะดังนี้

HH	มีรูปแบบการจัดกลุ่มสูง
HL	มีรูปแบบเป็นค่าของข้อมูลสูงที่อยู่นอกกลุ่ม แต่อยู่ปะปนในกลุ่มที่มีค่าต่ำ
LL	มีรูปแบบการจัดกลุ่มต่ำ หรือมีกระจายของข้อมูล
LH	มีรูปแบบเป็นค่าของข้อมูลต่ำที่อยู่นอกกลุ่ม แต่อยู่ปะปนในกลุ่มที่มีค่าสูง

3. การทำนายความน่าจะเป็นของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาลใช้สมการเซมิวาริโอแกรมคำนวณระยะทางระหว่างตำแหน่งที่เก็บน้ำบาดาล การแสดงผลจะให้ค่า Rand คือ ระยะทางที่มีความสัมพันธ์กัน หรือระยะทางของตำแหน่งที่เริ่มเป็นอิสระกัน Sill คือ ความแปรปรวนของระยะทางคงที่และไม่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ Nugget คือ ความผิดพลาดของระยะห่างของตำแหน่งเก็บตัวอย่าง (สมการที่ 4)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}[As(x) - As(x+h)]^2 \quad (4)$$

$\gamma(\mathrm{h})$ = เซมิวาริโอแกรม

As(x) = ค่าข้อมูลปริมาณสารหนูที่ตำแหน่ง X

As(x+h) = ค่าข้อมูลปริมาณสารหนูที่ตำแหน่ง X กับระยะห่างของคู่ที่สนใจ

4. เนื่องจากข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติจากการทดสอบ Shapiro-Wilk normality test (p-value < 0.001) จึงใช้ฟังชั่น Indicator kriging ในการทำนายความน่าจะเป็นของปริมาณสารหนู โดยอาศัยการวัดระยะห่างของตำแหน่งข้อมูลทุกคู่ (Pairs of sample point) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันเชิงพื้นที่ (Spatial autocorrelation) ข้อมูลที่ใช้จะเป็น Binary data โดยให้ค่า 1 คือ ตำแหน่งที่ตรวจพบปริมาณสารหนูมากกว่า 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า 0 คือตำแหน่งที่พบปริมาณสารหนูไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร (As_k) (สมการที่ 5) แบ่งระดับการทำนายความน่าจะเป็นที่จะพบสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล 5 ระดับ ตามการศึกษาของ Antunes I.M.H.R. (2013)

$$I(x_i: As_k = \begin{cases} 1, & if\ As(x) > As_k \\ 0\ if\ As(x) \leq As_k \end{cases} \quad (5)$$

5. ประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วย Mena Error (ME) ค่าที่เข้าใกล้ 0 จะมีความคลาดเคลื่อนน้อย (สมการที่ 6) และ Root Mean Square Standard Error (RMSSE) ค่าเข้าใกล้ 1 จะมีความน่าเชื่อถือมาก (สมการที่ 7)

$$\text{ME} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i) \quad (6)$$

$$\text{RMSSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(y_i - \hat{y}_i)/\sigma(y_i)]^2} \quad (7)$$

โดยที่ n = จำนวนตัวอย่างที่ใช้ประมาณค่าในแบบจำลอง

Y_i = ค่าประมาณจากแบบจำลองค่าข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์

$\hat{y}_i$ = ค่าที่แท้จริงที่ได้จากการคำนวณ

ผลการวิจัย

ปริมาณสารหนู

ผลการตรวจปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล จำนวน 31 ตัวอย่าง พบว่ามีสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล จำนวน 22 ตำแหน่ง โดยมีค่าสูงสุด 0.0184 มิลลิกรัม/ลิตร (ค่าเฉลี่ย 0.0051, S.D. 0.0056) (ตารางที่ 1 และภาพที่ 2) ซึ่งพบว่าปริมาณสารหนูเกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 ที่กำหนดไว้ จำนวน 7 ตำแหน่ง (มากกว่า 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร) และไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ จำนวน 15 ตำแหน่ง (ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร) และไม่พบสารหนูเลย จำนวน 9 ตำแหน่ง (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล

ID	พิกัด X	พิกัด Y	ลักษณะน้ำ	ปริมาณสานหนู mg/L
1	492392	1658791	ใส ไม่มีตะกอน	0.003
2	492413	1658769	ใส ไม่มีตะกอน	0.004
3	492469	1658792	ใส ไม่มีตะกอน	0.009
4	492542	1658742	ใส ไม่มีตะกอน	0.010
5	492533	1658833	ใส ไม่มีตะกอน	0.004
6	492108	1658059	ใสมีตะกอนมาก	0.003
7	492012	1657786	ใส ไม่มีตะกอน	0.018
8	492025	1657825	ใส ไม่มีตะกอน	0.004
9	491988	1657755	ใส ไม่มีตะกอน	0.001
10	491969	1657728	ใส ไม่มีตะกอน	0.006
11	492004	1657705	ใส ไม่มีตะกอน กลิ่นเหม็น	0.006
12	492138	1658015	ใส ไม่มีตะกอน	0.011
13	492088	1657937	ใส ไม่มีตะกอน	0.017
14	492062	1657884	ใส ไม่มีตะกอน	0.016
15	492016	1657568	ใส ไม่มีตะกอน	0.011
16	492054	1657758	ใส ไม่มีตะกอน	0.001
17	491927	1657636	ใส ไม่มีตะกอน	0.014
18	492497	1658868	ใส ไม่มีตะกอน	0.012
19	492467	1659017	ใส ไม่มีตะกอน	0.002
20	492500	1659002	ใส ไม่มีตะกอน	0.003
21	492629	1658917	ใส ไม่มีตะกอน	0.003
22	492621	1658743	ใส ไม่มีตะกอน	0.004
23	492335	1658733	เหลืองใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
24	492331	1658786	เหลืองใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
25	492243	1658791	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
26	492245	1658724	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
27	492210	1658573	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000

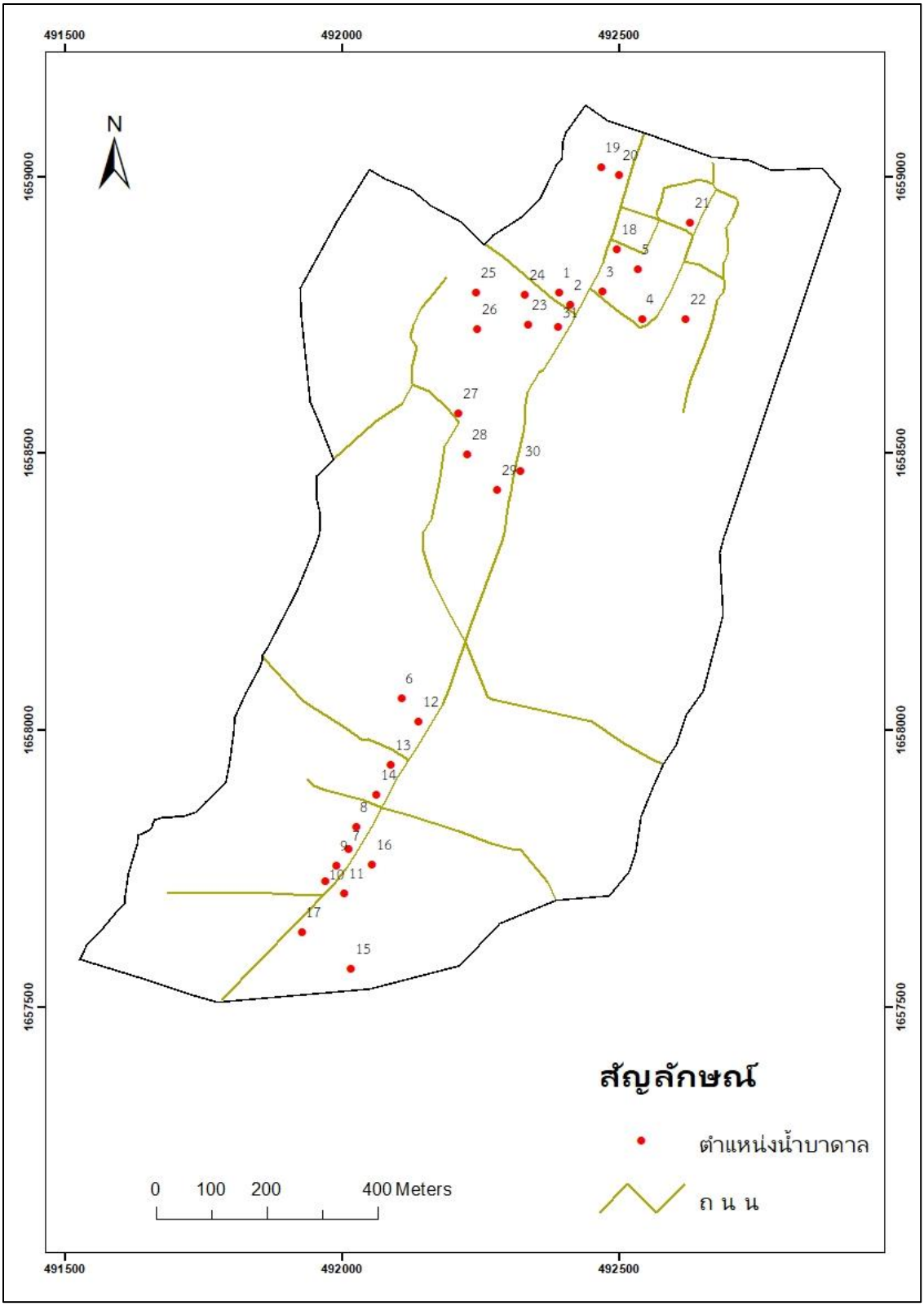
ตารางที่ 1 (ต่อ) ปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล

ID	**พิกัด X**	**พิกัด Y**	**ลักษณะน้ำ**	**ปริมาณสานหนู** mg/L
28	492226	1658497	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
29	492281	1658435	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
30	492322	1658468	ใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000
31	492390	1658728	เหลืองใส มีตะกอนเล็กน้อย	0.000

Mean = 0.00518, S.D. = 0.005709

ตารางที่ 2 จำนวนและร้อยละของตำแหน่งที่พบและไม่พบสารหนู

ปริมาณสารหนู	**จำนวน**	**ร้อยละ**
เกินค่ามาตรฐาน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร	7	22.58
ไม่เกินค่ามาตราฐาน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร	15	48.39
ไม่พบสารหนู	9	29.03
รวม	**31**	**100.00**



ภาพที่ 2 ตำแหน่งที่พบสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล

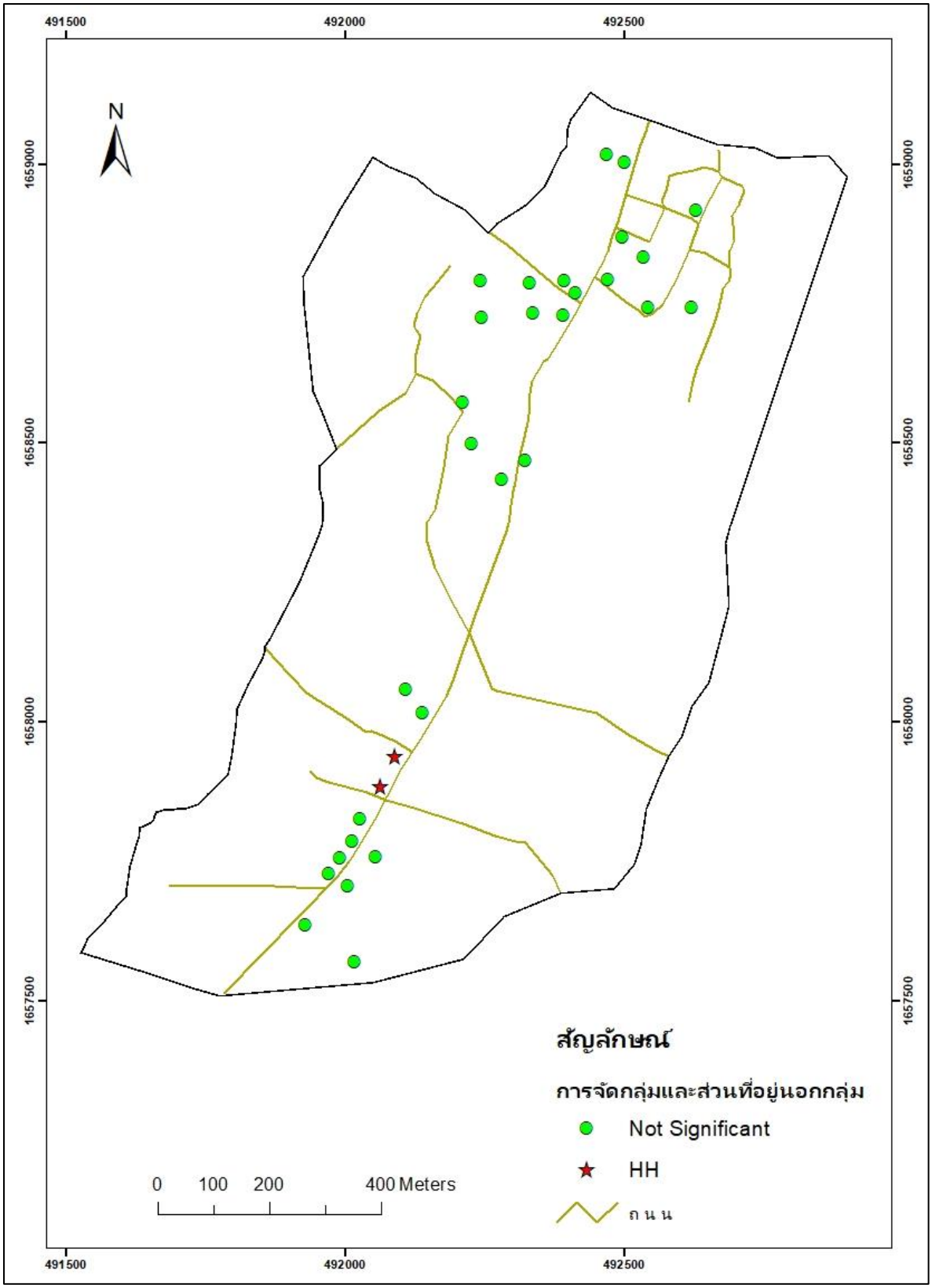
ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของปริมาณสารหนู

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของมอแรน เพื่อทดสอบปริมาณของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล พบว่ามีการจัดกลุ่มหรือมีการกระจาย โดยใช้วิธีคิดระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) ซึ่งค่ามอแรนเท่ากับ 0.2344 แสดงว่ามีความสัมพันธ์โดยมีรูปแบบเป็นกลุ่ม โดยค่า Z-score เท่ากับ 2.0380 (ตารางที่ 3) ผลการวิเคราะห์การเป็นกลุ่มและส่วนที่อยู่นอกกลุ่ม เป็นการวัดค่ารูปแบบความแตกต่างของการเป็นกลุ่มที่แสดงความสูงหรือต่ำของข้อมูล พบว่าตำแหน่งที่เป็นจุดสีแดงอยู่ใกล้กันโดยให้ค่าการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มที่สูง (HH) ส่วนตำแหน่งอื่นๆ พบว่าไม่มีรูปแบบจัดกลุ่ม หรือมีรูปแบบสุ่ม (Random) (ภาพที่ 3)

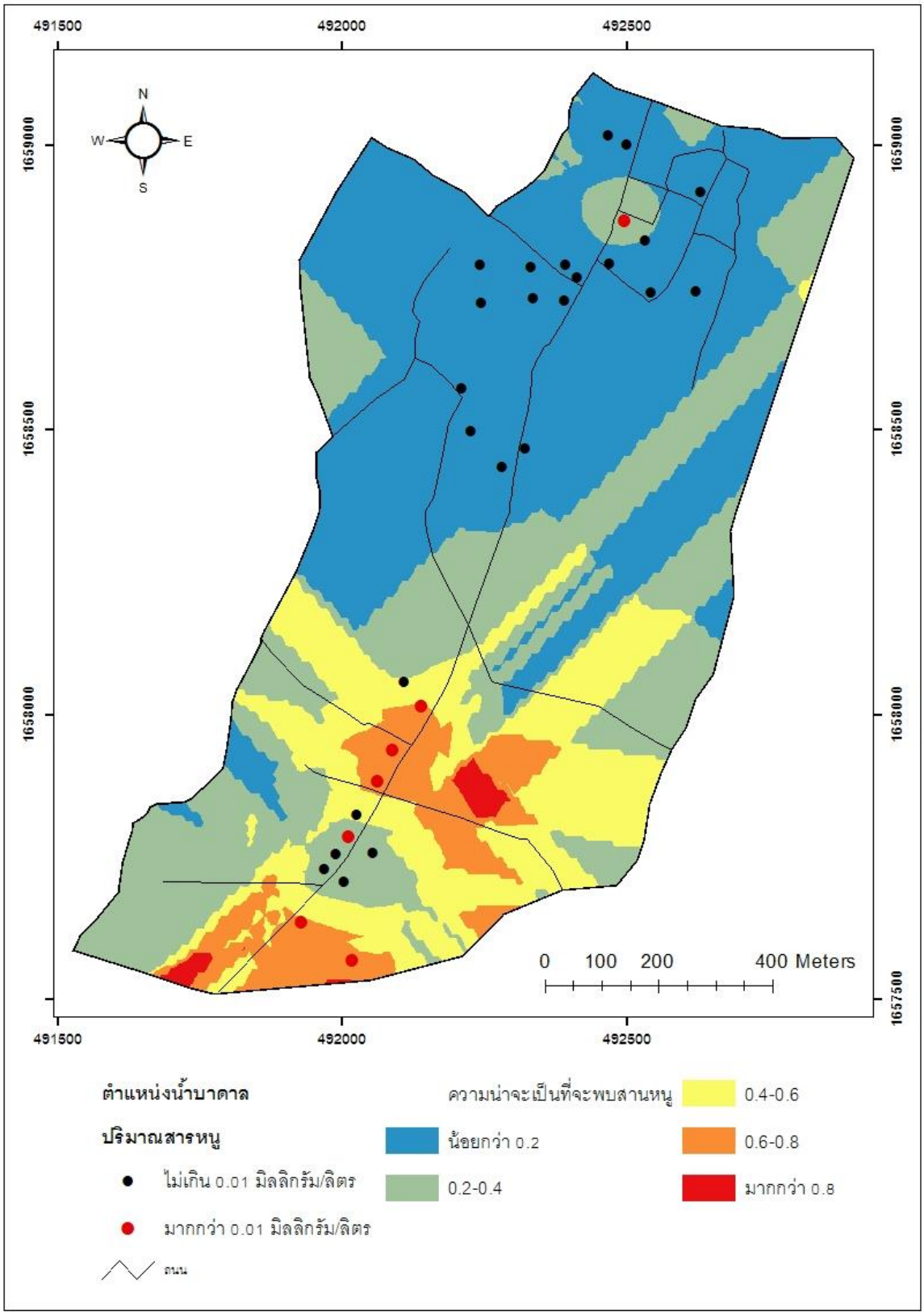
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของมอแรน (Moran's I)

Moran's Index:	0.2344
Expected Index:	-0.0033
Variance:	0.0172
z-score:	2.0380
p-value:	0.0415

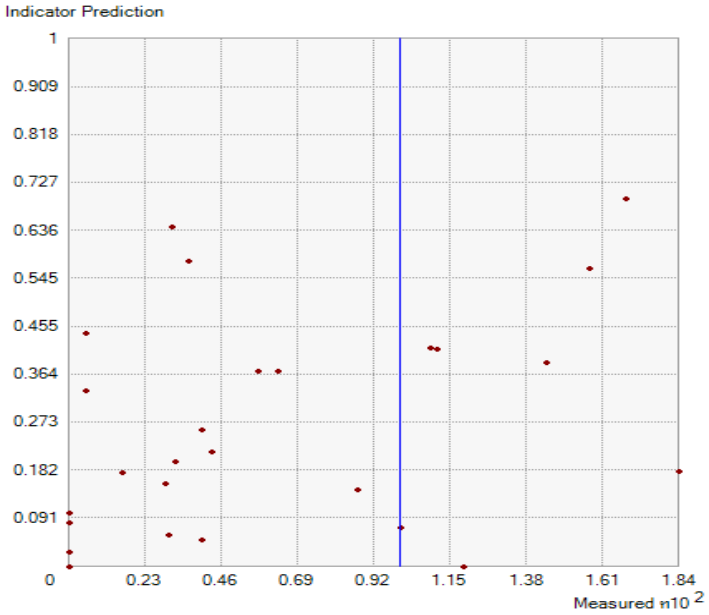
ผลการใช้โมเดลของเซมิวาริโอแกรม เพื่อดูลักษณะความแปรปรวนเชิงพื้นที่ บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของระยะทางและทิศทางต่างๆ พบว่าระยะทางที่ข้อมูลเริ่มหมดความสัมพันธ์กันเท่ากับ 180.23 เมตร (Nugget= 0.114, Sill = 0.051) สำหรับการทำนายค่าความน่าจะเป็นของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล โดยใช้ค่า cut point ที่ระดับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าส่วนใหญ่พื้นที่ทางตอนใต้มีโอกาสที่จะพบปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาลเกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพที่ 4) ส่วนผลตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการประมาณค่าสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาลได้ค่า Mean Standard error 0.003 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 0 และ Root Mean Square Standard มีค่าเท่ากับ 0.95 (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 3 การเป็นกลุ่มและส่วนที่อยู่นอกกลุ่ม Anselin Local Moran's I



ภาพที่ 4 ประมาณค่าเชิงพื้นที่ของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล



ภาพที่ 5 ความน่าเชื่อถือ Root Mean Square Standard 0.95

วิจารณ์ผลการวิจัย

ปริมาณสารหนูในน้ำบาดาลเกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร มี 7 ตำแหน่ง และจำนวน 15 ตำแหน่งพบการปนเปื้อนของสารหนูแต่ไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร) ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 แต่ผลการศึกษาพบปริมาณสารหนูปนเปื้อนทั้งหมด จำนวน 22 ตำแหน่ง ถือได้ว่าในพื้นที่ชุมชนที่ทำการศึกษามีขนาด 1.20 ตารางกิโลเมตร ซึ่งพื้นที่ไม่ใหญ่มากแต่พบปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาลหลายตำแหน่ง หากมีการสะสมจะทำให้มีโอกาสเพิ่มปริมาณสารหนูได้ การปนเปื้อนสารหนูในน้ำบาดาลทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพประชาชน การได้รับสารหนูมากเกินไปและสะสมเป็นเวลานานจากการบริโภคน้ำจะทำให้เกิดโรคพิษสารหนูเรื้อรังหรืออาร์ซินิโคซิส (Arsenicosis) ทำให้มีความผิดปกติที่ระบบประสาทมีอาการสูญเสียความรู้สึกแบบสวมถุงมือถุงเท้า (glove and stocking anesthesia) มีความผิดปกติของผิวหนังโดยทำให้เกิดการสร้างเม็ดสีมากเกินไป (hyperpigmentation) สลับกับการสร้างเม็ดสีน้อยเกินไป (hypopigmentation) ที่บริเวณฝ่ามือและฝ่าเท้า มีการหนาตัวขึ้นของฝ่ามือฝ่าเท้า (hyperkeratosis) และอาจเกิดมะเร็งผิวหนังได้ นอกจากนี้สารหนูยังทำให้เกิดอันตรายต่อระบบหัวใจและหลอดเลือดโดยตรง รวมทั้งมีผลต่อการเกิดมะเร็งปอด มะเร็งตับและมะเร็งไตและมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (Suda, 2006; Berg, 2006; Shiv, 2014)

ผลจากการใช้ Moran's I วิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ เพื่อทดสอบปริมาณของสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล พบว่ามีความสัมพันธ์โดยมีรูปแบบเป็นกลุ่ม ทำให้ง่ายต่อการเฝ้าระวังปริมาณสารหนูได้ โดยการให้ข้อมูลข่าวสาร หรือประชาสัมพันธ์ให้กลุ่มเป้าหมายให้เข้าใจและรู้วิธีป้องกันได้ แต่การใช้มอแรนไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารหนูกับพื้นที่การกระจาย ดังนั้นจึงมีการใช้สถิติ Anselin Local Moran's I ซึ่งผลการศึกษาพบว่าจุดที่เป็นกลุ่มและมีแนวโน้มของการกระจายของปริมาณสารหนูมากอยู่ทางตอนใต้ของพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ปลูกข้าว และปลูกพืชผักสวนครัว (Thaveevouthti, 2010) และจากการลงพื้นที่ของคณะวิจัยยังพบว่ามีการปลูกมันสำปะหลัง ตามบริเวณบ้านในช่วง

ฤดูที่ไม่มีการทำนาอีกด้วย สำหรับการประมาณค่าเชิงพื้นที่โดยใช้โมเดล Indicator Kriging เพื่อประมาณการความน่าจะเป็นของปริมาณสารหนู โดยใช้ค่า cut point ตามเกณฑ์มาตรฐานที่ยอบรับได้ที่ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร มีโอกาสพบปริมาณสารหนูเกินค่ามาตรฐานมากที่สุด ร้อยละ 83.00 และระหว่างร้อยละ 60.00 ถึงร้อยละ 80.00 จะอยู่ทางตอนใต้ของพื้นที่ดังแสดงในภาพที่ 4 ทั้งนี้ช่วงที่มีความสัมพันธ์ของระยะทางของความน่าจะเป็นในการพบปริมาณสารหนูเกินค่ามาตราฐานจะอยู่ในระยะประมาณ 180 เมตร และระยะทางที่ไกลออกไปกว่านี้จะทำให้โอกาสของปริมาณสารหนูในน้ำบาดาลพบน้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งทำให้ทราบขอบเขต และแนวโน้มของการกระจายปริมาณสารหนูในพื้นที่ ดังนั้นการวิเคราะห์ Indicator Kriging และ Anselin Local Moran's ร่วมกันเพื่อคาดการณ์พื้นที่ที่มีความเสี่ยงของการปนเปื้อนสารหนู จะเป็นแนวคิดและการชี้ชัดรูปแบบการกระจายและทิศทางของปริมาณสารหนูปนเปื้อนในน้ำบาดาล อันจะเป็นประโยชน์ในการวางแผน และเป็นแนวทางในการควบคุมการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชและแมลงในพื้นที่

สรุปผลการวิจัย

การใช้ Indicator Kriging และการวิเคราะห์ด้วย Anselin Local Moran's เป็นการวิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่โดยอาศัยระยะทาง และทิศทางของตำแหน่งของข้อมูลและค่าน้ำหนักของปริมาณสารหนูที่ตรวจพบในน้ำบาดาล นำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารหนูมีรูปแบบการจัดกลุ่มมากน้อยเพียงใด ซึ่งพบว่ามีรูปแบบการจัดกลุ่มและจะอยู่ในพื้นที่ตอนใต้ของพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นแผนที่ของการคาดการณ์ความน่าจะเป็นของปริมาณสารหนูที่มีโอกาสจะเกินค่ามาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 กำหนดไว้ ซึ่งเป็นแนวทางประเมินความเสี่ยงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในพื้นที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

Antunes, I.M.H.R., Albuquerque, M.T.D. (2013). Using indicator kriging for the evaluation of arsenic potential contamination in an abandoned mining area (Portugal). Science of the Total Environment, 442: 545-552.

APHA, AWWA, and WEF. (2012). Standard Method for the Examination of Water and Westewater. 22nd. Washington. American Public Health Association.

Bekti, R.B., Tanty, H., Herlina, T., Solihudin. (2014). Spatial Autocorrelation of Inorganic Compound in Groundwater. *IOSR Journal of Mathematics, 10*(6), 1-5.

Berg, M., Giger, W., Tram, H. C., Viet, P. H., Trang, P. T. K., and Schertenleib, R. (2006). Extent and severity of arsenic pollution in Vietnam and Cambodia In. Naidu R., E. Smith, G. Owens, P. Bhattacharya, P. Nadebaum (eds.). Managing arsenic in the environment: from soil to human health. CSIRO Publishing. Melbourne.

Berg, M., Tran, H.C., Nguyen, T.C., Pham, H.V., Schertenleib, R., and Giger, W. (2001). Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat. *Environ Sci Technol, 35*(13), 2621-2626.EARRyU

Buschmann, J., Berg, M., Stengel, C., and Sampson, M.L. (2007). Arsenic and manganese contamination of drinking water resources in Cambodia: coincidence of risk areas with relief topography. *Environ Sci Technol, 41*(7), 2146-2152.

ESRI. ArcGIS 9.2 Desktop Help. 2008. Retrieved December 4, 2018, from http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicName=welcome.

Goovaerts P., AvRuskin G., Meliker J., Slotnick M., Jacquez G., Nriage J. (2005). Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan. *Water Resources Research, 41*, 1-19.

Jaymie R, R.M. Gillian A.A. Melissa J.S., Pierre G., David S., Geoffrey M.J., Jerome O.N. (2008). *Validity of Spatial Models of Arsenic Concentrations in Private Well Water, 106*(1), 42-50.

Liu C.W., Jang C.S., Liao C.M. (2004). Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Science of the Total Environment, 321*, 173-188.

Manzurul H.M., and Atkins P.J. (2011). Application of Geostatistics with Indicator Kriging for analyzing spatial variability of groundwater arsenic concentrations in Southwest Bangladesh. *Environmental Science and Health a Toxic Hazardous Substances&Environmental Engineering*, *46*(11), 1185-96.

National Environment Board. (2018). Retrieved December 4, 2018, from http://www.reo4.go.th/upload/REO4-202.pdf

Pranee, P. and Piyada, S. (2012). Groundwater Quality and Arsenic Contamination in Amphoe Khemmarat, Ubon Ratchathani, Thailand. *Journal of Environmental Science and Engineering, 1*(2A), 133-141.

Resource Center. (2018). *Arsenic and environmental*. Retrieved December 4, 2018, from http://elib.fda.moph.go.th/2008/default.asp?page2=subdetail&id_L1=27&id_L2=15589&id_L3=597.

Shiv, S., Uma, S., and Shikha. (2014). Arsenic Contamination of Groundwater: A review of sources, Prevalence, Health Risks, and Strategies for Mitigation. The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 304524, 18 page. http://dx.doi.org/10.1155/2014/304524.

Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry, 17*(5), 517-568.

Suda, V. (2006). Arsenic Poisoning. *P&D Information bulletin, 14*(3), 27 – 36. (in Thai)

Welch, A.H., Lico, M.S., Hughes, J.L. (1988). Arsenic in groundwater of the western United States. *Ground Water, 26*(3), 333-347.

Thaveevouthti, T., Sriworamas, K., Sriworamas, R. (2010). Water Shortage Map of Haui Kao San, Ubon Ratchathani. National Convention on Civil Engineering 15th. 12-14 May 2010. Ubonratchathani.