

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

สารหนูหากมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากเกินไปจนเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ อาจก่อให้เกิดพิษต่อมนุษย์ ทั้งโดยตรงและทางอ้อม ดังเช่น บริเวณ ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุก ทำให้มีเศษแร่อาร์เซโนไพไรต์ (arsenopyrite) ปะปนในดินและแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในดินบริเวณเหมืองแร่และบริเวณที่เคยทิ้งกากแร่มีการเคลื่อนที่สู่ผิวดินและสามารถปนเปื้อนไปสู่อากาศโดยรอบในรูปของฝุ่นละออง เนื่องจากพื้นที่เหล่านั้นไม่มีพืชหรือสิ่งปกคลุมพื้นผิวดินในช่วงฤดูแล้ง เมื่อผิวดินแห้งและมีลมพัดผ่าน อนุภาคดินที่มีสารหนูปนเปื้อนเหล่านี้จะถูกลมพัดพาและฟุ้งกระจายไปทั่ว บางส่วนสามารถตกลงบนหลังคา และเมื่อฝนตก ฝุ่นสารหนูที่สะสมอยู่บนหลังคาจะถูกชะล้างลงมายังภาชนะเก็บน้ำฝน ทำให้น้ำฝนมีการปนเปื้อนสารหนูด้วย และสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ ดิน และน้ำฝน สามารถแพร่เข้าสู่ร่างกายประชาชนในบริเวณ ต.ร่อนพิบูลย์ รวมถึงอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งได้ ซึ่งความเสี่ยงต่อการได้รับสารหนูเหล่านี้ เกิดจากการทำกิจกรรมในบริเวณที่มีฝุ่นสารหนู การสัมผัสดินโดยตรงและการดื่มน้ำฝนที่มีสารหนูปนเปื้อน (กิตติยา รัชชวงค์, 2542) โดยการปนเปื้อนของสารหนูดังกล่าว มีแหล่งที่มาที่สามารถระบุได้ 2 บริเวณ คือ (1) พื้นที่ที่ผ่านการทำเหมืองแร่ดีบุกบนเขาร่อนนา-สรวงจันทร์ และโรงแต่งแร่ซึ่งมีกองกากแร่สารหนู ที่เกิดจากการแยกแร่จะมีสารหนูเจือปนสูง 1-30 % กองกากแร่เหล่านี้ถูกทิ้งไว้ใน 7 บริเวณ คิดเป็นปริมาณรวมประมาณ 2,500 ลบ.ม. และ(2) พื้นที่ราบตะกอนเชิงเขาและตะกอนน้ำพา ซึ่งมีสารหนูปนเปื้อนในระดับสูงกว่า 50 มก./กก. ถึง 80 % ของพื้นที่สำรวจ และยังพบว่าพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายของประชาชนใน ต.ร่อนพิบูลย์ อ. ร่อนพิบูลย์ คือ หมู่ที่ 1, 2, 12 และ 13 (อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์, 2540 และกิตติยา รัชชวงค์, 2542) และการเคลื่อนที่ของสารหนูในดิน ไปสู่สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ จะอาศัยกระบวนการเคลื่อนที่ไปกับการไหลซึมของน้ำผ่านตัวกลางพรุน เช่น ดิน ความแตกต่างของแรงดันน้ำ และการเคลื่อนที่อันเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารหนูในดิน จากส่วนที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าโดยไม่จำเป็นต้องมีการไหลของน้ำ ดังนั้นการใช้วัสดุคลุมดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูในพื้นที่ดังกล่าว จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารหนูไม่ให้ขึ้นสู่ผิวดินได้ แต่การเลือกวัสดุคลุมดินจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของวัสดุคลุมดินด้านต่างๆ เช่น ความสามารถในการดูดซับ

สารหนู ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity, K) ปริมาณที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุคลุมดิน รวมถึงควรเป็นวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นและหาได้ง่าย เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกหาวัสดุคลุมดินที่มีคุณสมบัติเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของสารหนูในหน้าตัดดินมากที่สุด เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของสารหนูในดินไม่ให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวดินและกลายเป็นฝุ่นที่มีสารหนูปนเปื้อน

งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดิน (ดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และถ่านลอม) ในการดูดซับสารหนู เพื่อควบคุมไม่ให้สารหนูที่อยู่ในดินเคลื่อนที่สู่ผิวดิน โดยน้ำได้ดินแล้วมาสะสมที่ผิวหน้าดินและกลายเป็นฝุ่นที่มีสารหนูปนเปื้อนได้ เพื่อใช้ลดผลกระทบของสารหนูที่สะสมอยู่ในดินและเป็นการป้องกันไม่ให้ประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์ได้รับอันตรายจากสารหนูอีกทางหนึ่ง

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารหนู

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะ มีน้ำหนักอะตอม 74.9 เลขอะตอมเท่ากับ 33 มีจุดเดือดเท่ากับ 615 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวเท่ากับ 818 องศาเซลเซียส และมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ -3, 0, +3 และ +5 สารประกอบสารหนูสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามคุณสมบัติทางกายภาพทางเคมี และความเป็นพิษ (Marie, 1990) ได้แก่

1.2.1.1 สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู แบ่งเป็น

- 1) Trivalent compounds เช่น arsenic trioxide (As_2O_3), sodium arsenite (NaAsO_2) และ arsenic trichloride (AsCl_3) เป็นต้น
- 2) Pentavalent compounds เช่น arsenic pentoxide (As_2O_5) และ arsenic acid (H_3AsO_4) เป็นต้น

1.2.1.2 สารประกอบอินทรีย์ของสารหนู แบ่งเป็น

- 1) Trivalent เช่น trimethylarsine [$(\text{CH}_3)_3\text{As}$] และ dimethylarsine [$(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$]
- 2) Pentavalent เช่น dimethylarsinic acid [$(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$] และ disodium-methylarsenate [$\text{CH}_3\text{AsO}(\text{ONa})_2$] เป็นต้น

1.2.1.3 แก๊สอาร์ซีน (AsH_3) เป็นแก๊สพิษอันตรายทำให้ถึงตายได้

1.2.2 ปฏิกริยาทางเคมีของสารหนูในธรรมชาติ

สารหนูจะคงรูปที่เลขออกซิเดชัน -3, 0, +3, +5 สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนสารหนูที่มีค่าออกซิเดชัน 0, +3, -3 เกิดจากกระบวนการรีดักชัน ส่วนใหญ่สารหนูในธรรมชาติจะอยู่ในรูปที่มีเลขออกซิเดชันเป็นอ็อกไซด์ (Elder, 1988) และสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้นๆ ที่จะเอื้ออำนวยให้สารประกอบของสารหนูเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

1.2.2.1 กระบวนการออกซิเดชัน เกิดจากกระบวนการผุกร่อนของหินที่มีสารหนูปะปนอยู่โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาวะที่มีออกซิเจนและน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบอาร์ซีเนต และในสภาวะที่เป็นกรดหรือค่อนข้างเป็นกรดสารประกอบอาร์ซีเนตจะเคลื่อนที่ไปได้ไกล แต่ถ้าสภาพสิ่งแวดล้อมเป็นด่างหรือเป็นกลางสารประกอบอาร์ซีเนต จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยการตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (Willson and Hawkin, 1987) และเมื่อสารประกอบอาร์ซีเนตซึมผ่านไปยังบริเวณที่มี อนุภาคของแร่บางชนิด ดินโคลน หรือ gels ก็จะมีการดูดซับ และ chelation เกิดการตกตะกอน และถ้าบริเวณนั้นมีสารประกอบอินทรีย์พวก humic สะสมอยู่จะเกิดการตกตะกอน โดยเกิดการกระบวนการ organic binding (เกษม จันทรจรัญพงษ์, 2519) และยังพบว่าสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน 0 ส่วนมากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มากกว่า +5 โดยมี O_2 เป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลง สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ส่วนมากจะเกิดในสารละลายหรือในพวกจุลินทรีย์ แต่โดยปกติแล้วสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 จะไม่พบในธรรมชาติ มักจะถูกออกซิไดซ์ไปอยู่ในรูปที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Boyle and Jonasson, 1973)

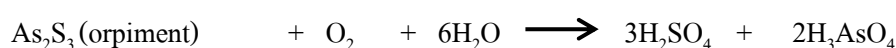
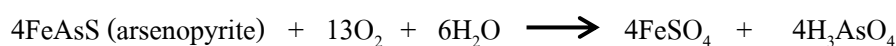
1.2.2.2 กระบวนการรีดักชัน กระบวนการนี้ในธรรมชาติจะเกิดอย่างช้าๆ โดยมากเกิดจากกระบวนการย่อยสลายในดินหรือหิน น้ำพุร้อน ไร่อะเหยจากภูเขาไฟ ซึ่งดินหรือหินที่มีสารหนูปนอยู่จะถูกสลายด้วยน้ำที่มีสภาวะเป็นด่างหรือค่อนข้างเป็นด่าง สารประกอบของสารหนูที่เกิดจากกระบวนการนี้ จะอยู่ในรูปของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน 3 ตัวอย่าง เช่น AsH_3 , $AsCl_3$, As_2S_3 สารประกอบของสารหนูเหล่านี้จะสลายตัวได้รวดเร็ว ภายใต้อิทธิพลของสภาวะกรดและด่าง (Boyle and Jonasson, 1973) ดังนั้นเมื่อสารประกอบเหล่านี้เคลื่อนตัวไปตามลำน้ำ ก็เกิดการตกตะกอนหรือสะสมปะปนอยู่กับตะกอนท้องน้ำ นอกจากนี้สารประกอบของสารหนูบางชนิดสามารถเคลื่อนตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่มีค่าไอออนเป็นบวก เมื่อพบกับอนุภาคของสารละลายที่มีค่าไอออนเป็นลบ ก็จะทำปฏิกิริยาและตกตะกอนตามผิวหน้าดินหรือตะกอนท้องน้ำได้ (เกษม จันทรจรัญพงษ์, 2519) นอกจากนี้ยังพบว่าในกระบวนการรีดักชัน สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 สามารถทำปฏิกิริยารีดักชันโดย

กระบวนการทางเคมีหรือชีวภาพให้กลับเป็นสารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ก็ได้ แต่จะเปลี่ยนจากสภาพที่มีเลขออกซิเดชัน +5 เป็น 0 ได้ค่อนข้างยาก (Boyle and Jonasson, 1973)

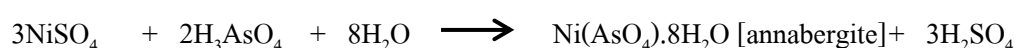
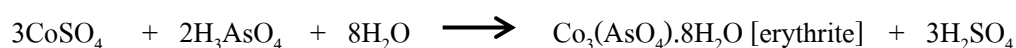
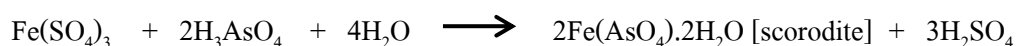
1.2.3 การสลายตัวของแร่ที่มีสารหนู

สารหนูที่อยู่ในแร่ของสารประกอบซัลไฟด์ เช่น arsenopyrite, cobaltite, enargite, orpiment, realgar และ proustite แร่เหล่านี้มีอยู่ในหินและแหล่งแร่ต่าง ๆ เมื่อมีการผุกร่อนของหินหรือแร่หรือมีการทำลายหินหรือแร่จะทำให้สารหนูสัมผัสกับอากาศ และน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วเปลี่ยนสารหนูไปอยู่ในรูปของสารประกอบอาร์ซีเนต

(เกษม จันทรจรัญพงษ์, 2519; Boyle and Jonasson, 1973) ดังสมการ



สารประกอบอาร์ซีเนตสามารถละลายได้ดีในน้ำที่มีสภาวะความเป็นกรดสูง แต่ถ้ามีสภาวะความเป็นกรดอ่อน เป็นกลาง หรือเป็นด่างจะเกิดการตกตะกอน โดยเกิดการดูดซับของสารประกอบของเหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล ตะกั่วและสังกะสี ตกตะกอนกลายเป็นแร่ธาตุต่างๆ ดังสมการ



กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารหนูจากสมการข้างต้นนี้ และปฏิกิริยาการตกตะกอนดังกล่าวทำให้สารประกอบสารหนูมีการสะสมอยู่ตามพื้นดิน ตะกอนท้องน้ำ และบริเวณอื่น ๆ ทำให้สารหนูที่อยู่ในสิ่งเหล่านี้สามารถกลับเข้าสู่สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้อีก โดยกระบวนการย่อยสลายของพวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย และเชื้อรา (Willson and Hawkin, 1987)

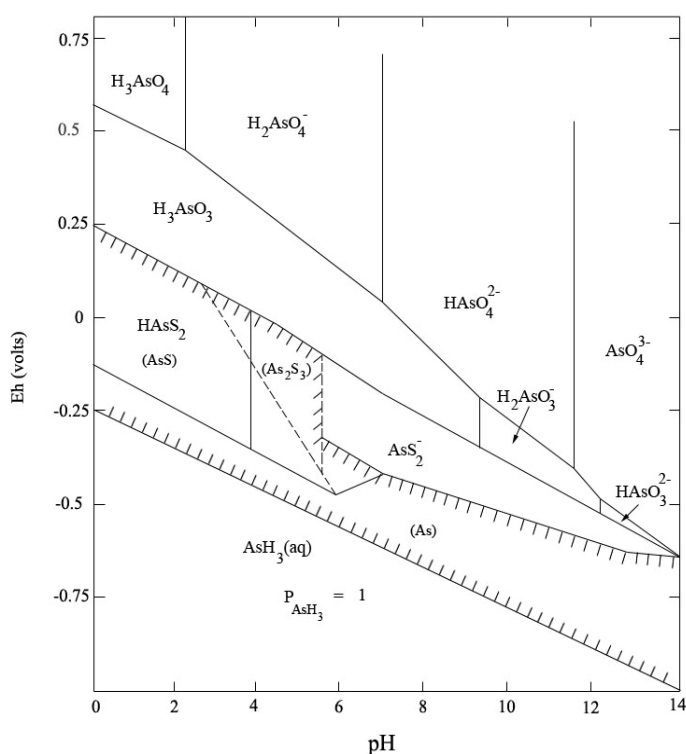
1.2.4 กระบวนการทางเคมีของสารหนูที่แพร่กระจายลงสู่ดิน

สารหนูสามารถเคลื่อนย้ายลงสู่ดินได้ ในรูปของไอระเหยหรือสารละลายโดยมีอากาศและน้ำเป็นตัวพาตลอดจนการย่อยสลายของแร่ธาตุหรือสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่มีสารหนูปะปนอยู่ เมื่อผ่านดินที่มีค่า Eh และ pH ที่แตกต่างกันจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Boyle and Jonasson, 1973) ทำให้เกิดการตกตะกอนบนพื้นดิน แต่ถ้าบริเวณนี้มีสารอินทรีย์หรือเหล็กสูงจะสามารถดูดซับสารหนูได้มากขึ้น (Michio, 1980) โดยเฉพาะดินชั้น A horizon ซึ่งมีสารอินทรีย์สูง และสามารถเคลื่อน

ไปสู่ชั้นระดับความลึกดินชั้น B horizon ถ้าหากดินชั้นนี้มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูง (สุรพล อารีย์กุล, 2531) นอกจากนี้ถ้าดินมีค่า pH ต่ำ อลูมิเนียม และเหล็กสามารถดูดซับ อาร์เซนไนต์ได้ดี (Sabine and Glaubig, 1988; Pierce and Moore, 1982) และอัตราการดูดซับของ สารประกอบอาร์เซนไนต์ของเหล็กในดิน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาด้วย (Elkhatib *et al.*, 1983)

1.2.5 ไดอะแกรมของ Eh-pH ของสารหนู

สารหนูในธรรมชาติมักพบว่าอยู่ในรูปของสารประกอบมากกว่าอยู่ในรูปอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยารีดอกซ์ การเปลี่ยนแปลงลิแกนด์ การเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนหรือการดูดซับของสารหนู ภายใต้สภาวะของค่า pH และค่า Eh เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเปลี่ยนแปลง ทำให้สารหนูอยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ ดังที่ Ferguson and Gavis(1972) ได้นำเสนอในรูปของไดอะแกรมของ Eh-pH ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันที่ 1 บรรยากาศ โดยสารหนูมีความเข้มข้น 10^{-5} mol^{-1} กำมะถันมีความเข้มข้น 10^{-3} mol^{-1} และมีออกซิเจนอยู่ในสารละลาย ซึ่งแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 1-1

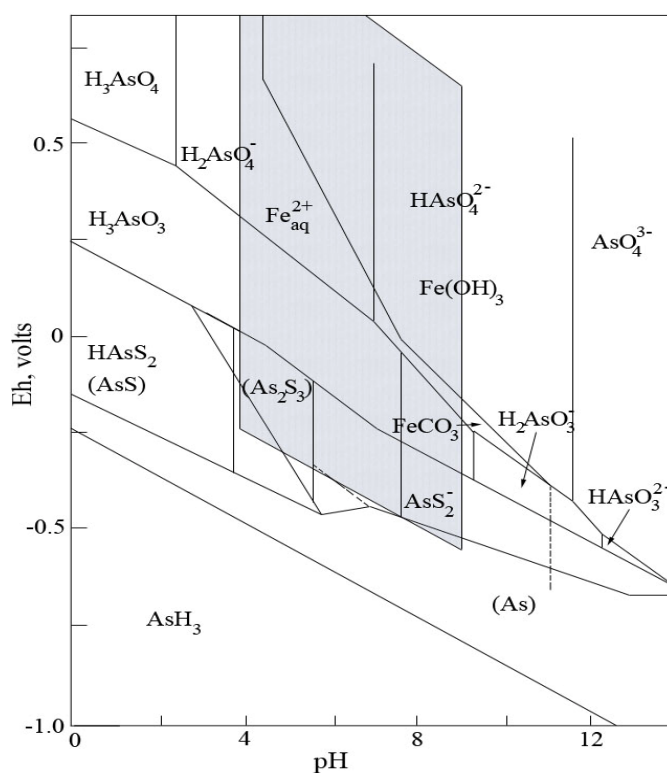


ภาพประกอบที่ 1-1 ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนู

ที่มา : Ferguson and Gavis , 1972

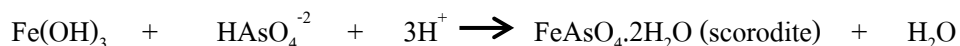
จากภาพประกอบที่ 1-1 Ferguson and Gavis ได้อธิบายไดอะแกรมนี้ว่าถ้าในน้ำซึ่งมีออกซิเจนอยู่และค่า Eh ในน้ำสูง กรดสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน + 5 จะคงตัวในรูปของ H_3AsO_4 , AsO_4^{3-} , H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} แต่ถ้าค่า Eh ต่ำลงมาและ สารประกอบสารหนูจะคงตัวในรูปของ H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- และ HASO_3^-

สารประกอบสารหนูซัลไฟด์ เช่น รีเอลการ์ (As_4S_4) ออฟิเมนต์ (As_2S_3) จะคงตัวอยู่ในรูปของแข็ง ที่มีค่า Eh ประมาณ 0 โวลต์ และค่า pH ต่ำกว่า 5.5 และสารประกอบสารหนูชนิด HAS_2 จะคงตัวได้มากในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ และค่า Eh ประมาณ 0 โวลต์ โดยอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ ที่มีความสามารถละลายน้ำประมาณ $10^{-6.5}$ โมลต่อลิตร ส่วนสารประกอบ AsS_2^- จะพบได้ที่ค่า pH มากกว่า 3.7 แต่ถ้าค่า pH มากกว่า 5.5 ก็จะละลายน้ำได้ประมาณ 10^{-5} โมลต่อลิตร ส่วนสารหนูโลหะจะละลายน้ำได้น้อยมาก จะสามารถคงตัวที่ค่า Eh ต่ำ ๆ ได้แต่ถ้าสภาวะซึ่งมีค่า Eh ต่ำมากๆ จะพบว่าสารหนูคงตัวอยู่ในรูปของอาร์ซีน ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยมากเช่นกัน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูและเหล็กภายใต้ไดอะแกรม Eh-pH และค่า pH อยู่ในช่วง 4 ถึง 8.5 และค่า Eh อยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.75 ดัง แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 1-2



ภาพประกอบที่ 1-2 ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนูและเหล็ก
ที่มา ; Wilson and Hawkins, 1987

สำหรับในน้ำที่มีออกซิเจนนั้น สารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน + 5 จะละลายอยู่ เช่น H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} (Wilson and Hawkins, 1987; Boyle and Jonasson, 1973) สำหรับ HAsO_4^{2-} ซึ่งเป็นสารละลายที่อยู่ในสภาวะที่มีค่าของ Eh และ pH ระดับเดียวกันกับไฮดรอกไซด์ของเหล็ก ดังภาพประกอบที่ 1-2 จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาร่วมกันและเกิดการตกตะกอนได้ดังสมการ



ส่วนในน้ำที่มีออกซิเจนอยู่น้อยสารประกอบสารหนูที่ละลายอยู่ จะอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีเลขออกซิเดชัน +3 เป็นส่วนใหญ่ เช่น H_3AsO_3 และมีเหล็กอยู่ในรูปของสารละลาย $\text{Fe}^{+2}_{(\text{aq})}$ แต่หากสารเหล่านี้อยู่ในช่วงที่มีค่า pH และ Eh ในระดับเดียวกัน ก็สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกันได้แล้วก็ตกตะกอนเหมือนปฏิกิริยาของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ กับ HAsO_4^{2-} ดังสมการข้างบน

1.2.6 การปนเปื้อนของสารหนูในอากาศ

อนุภาคของสารหนูในอากาศมีทั้งในรูปของสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ โดยทั่วไปการได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายทางอากาศไม่ควรสูงกว่า 0.01 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (WHO, 1984) แต่ผู้ที่อาศัยอยู่ในเขตอุตสาหกรรมภายในเมืองอาจได้รับสารหนูสูงกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เช่น บริเวณรัศมี 4 กิโลเมตร จากโรงงานถลุงทองแดงในประเทศไทยสามารถตรวจวัดระดับสารหนูได้ 0.7 – 2.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และบริเวณโรงงานถลุงทองแดง รัฐวอชิงตันในประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถตรวจวัดสารหนูได้ 1.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ ในบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ ยังตรวจพบการปนเปื้อนของสารหนูในตัวอย่างฝุ่นในอากาศ โดยมีค่าเฉลี่ยในพื้นที่เสี่ยงสูงประมาณ 0.046 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้กับบริเวณเหมืองแร่มีโอกาสได้รับความเสี่ยงจากการเกิดโรคมะเร็งได้หากได้รับการสะสมเป็นเวลานาน (กิตติยา รักรวงษ์, 2542)

1.2.7 เทคโนโลยีการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนสารหนู (U.S.EPA, 1997)

การบำบัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในดินซึ่งรวมถึงสารหนู พบว่าการบำบัด ณ แหล่งกำเนิดจะช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ โดยเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่นิยม มีอยู่ 4 แบบคือ

1.2.7.1 กลศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetics)

เป็นการประยุกต์ใช้อัตราการไหลของพลังงานไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในดิน โดยสารปนเปื้อนจะถูกเคลื่อนย้ายออกไปในรูปของประจุไฟฟ้า

อนุภาคที่เล็ก ๆ หรือ อีออน ขึ้นสู่ผิวดิน และอนุภาคเหล่านี้จะถูกนำไปบำบัดต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อป้องกันหรือทำให้การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนช้าลง โดยการสร้างโครงสร้างภายนอกให้เป็นขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งจะทำให้สารปนเปื้อนไหลไปสู่ใจกลางของพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของดินเรียกแนวทางการปฏิบัตินี้ว่า “electrokinetic fencing” แต่มีข้อจำกัดคือพื้นที่ที่ถูกบำบัดจะต้องมีความชื้นที่มากพอและมีการเว้นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพื้นที่ สำหรับโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ สารหนู ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม โครเมียมและนิเกิล รวมทั้งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัด radionuclides และ สารอินทรีย์บางประเภท

1.2.7.2 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

อาศัยหลักการดูดซึมสารปนเปื้อนจากดินผ่านเนื้อเยื่อไปสะสมในพืช จากนั้นก็เก็บเกี่ยวและนำไปบำบัดต่อไป เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำ และช่วยป้องกันการพังทลายของดินได้ด้วย เหมาะสำหรับการบำบัดในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิดซึ่งมีความเข้มข้นน้อยและมีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง โดยรากของพืชที่ใช้ในการบำบัดต้องหยั่งถึงในดินบริเวณที่มีการปนเปื้อน และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินต้องมีความสามารถในการละลายดี

1.2.7.3 การล้างดิน (Soil Flushing)

อาศัยการสกัดสารปนเปื้อนจากดินโดยใช้น้ำหรือสารละลายที่เหมาะสมอื่น ๆ ซึ่งสารเหล่านี้จะต้องมีความสามารถในการละลายได้ดี โดยทำการฉีดของเหลวไปยังบริเวณที่มีการปนเปื้อนโดยตรง จากนั้นน้ำที่ถูกชะละลายออกมาจะถูกปั๊มสูกลับขึ้นไปบำบัดข้างบน แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะจำเพาะของพื้นที่และดำเนินการด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนไปที่อื่น

1.2.7.4 การทำเป็นก้อนแข็งหรือการปรับเสถียร (Solidification/Stabilization)

เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียให้อยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ไม่ได้ ส่วนใหญ่โลหะหนักหลายชนิดจะถูกบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนอกพื้นที่ด้วย ปูน pozzolan และบางครั้งใช้สารเติมแต่งบางชนิด จากนั้นจะถูกนำไปฝังยัง secured landfill วิธีการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้บำบัดในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน โดยการอาศัยเครื่องขุดเจาะดินใช้ส่งและผสมสารเคมีเข้าไปในดิน ที่มีของเสียปนเปื้อนโดยตรง ซึ่งมีราคาถูกกว่าการนำไปบำบัดนอกพื้นที่ และสามารถบำบัดได้ในระยะยาว นอกจากนี้การเปลี่ยนให้เป็นก้อนแข็งยังสามารถใช้กระแสไฟฟ้าส่งผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าไปหลอมละลายดินและรวมโลหะหลายชนิดเข้าไว้ด้วยกันจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นก้อนแข็ง ซึ่งเป็นการดูดซับสารปนเปื้อนไม่ให้เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณอื่น

สำหรับการทำเป็นก้อนแข็งหรือการปรับเสถียรนี้กลไกสำคัญที่ช่วยยึดหรือดูดซับสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินไม่ให้เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณอื่นก็คือ การดูดซับและการตกตะกอน (Max and Robert, 1994)

1.2.8 การดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับ

1.2.8.1 การดูดซับ เป็นการกระทำระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) หลักการของการดูดซับ จะเป็นการทำให้เกิดพันธะระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นการจับยึดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีความแข็งแรงกว่าการจับยึดในแบบของ macro และ microencapsulation โดยทั่วไปถ้าตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับพบกันและดูดซับกันไว้แล้ว ที่สภาวะหนึ่ง ๆ ก็จะจับยึดกันตลอดไปที่สภาวะนั้น ๆ โดยการดูดซับ (adsorption) มีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะดังนี้คือ

1) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้ อาศัยการดูดติดด้วยไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว

2) การดูดซับแบบเคมี (chemical adsorption) การดูดซับแบบนี้ อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกันทำให้โมเลกุลของสารเคมีที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิว

3) การดูดซับแบบกายภาพ (physical adsorption) การดูดซับแบบนี้ อาศัยการเกิดการดูดติดด้วยแรงประเภท Van Der Waals ซึ่งไม่ยึดติดแน่นเหมือนกับสองแบบแรก มักจะเหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิต่ำ ๆ

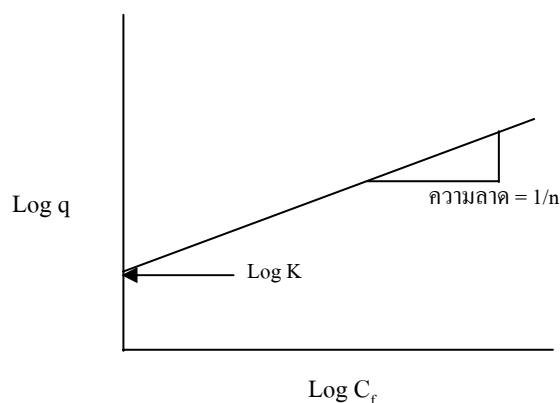
เมื่อก้าวถึง การดูดซับทั้ง 3 แบบแล้ว ต่อไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ระบบดูดซับโดยอาศัย ไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงการทำงานของ การดูดซับ ได้ดียิ่งขึ้นและเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ได้ รวมถึงอาจใช้เป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับต่อไป

1.2.8.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ ก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ยังคงเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดซับ (Schuliger, 1978) โดยการพิจารณาเลือกไอโซเทอมนั้น จะพิจารณาจากค่าคงที่ของการดูดซับควบคู่กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination : R^2) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0-1 โดยค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือต่ำสุด ส่วนค่าที่เข้าใกล้ 1 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด แบบจำลองที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่สองรูปแบบคือ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm

1) สมการของ Freundlich Isotherm เป็นสมการที่นิยมใช้กันมากในระบบดูดซับ โดยเฉพาะจะใช้อธิบายสำหรับสารละลายที่มีความเจือจางและความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ รวมถึงรูปแบบการดูดซับแบบ multilayer คือนอกจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมี interaction กับผิวของตัวดูดซับแล้ว ยังมี interaction ระหว่างกันอีกด้วย และอาจเกิดจากการดูดซับแบบ monolayer ที่มาซ้อนทับกัน ซึ่งมีสมการและสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้คือ

$$q = x/m = KC_f^{1/n} \quad \text{หรือ} \quad \text{Log}(q) = \text{Log}K + (1/n)\text{Log}C_f$$

- เมื่อ q คือ มวลของสารหนุ่ที่ถูกดูดซับ(adsorbate)ต่อมวลของวัสดุคลุมดิน
 C_f คือ ความเข้มข้นของสารหนุ่ที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล, มิลลิกรัมต่อลิตร
 x คือ มวลของสารหนุ่ที่ถูกดูดซับ, มิลลิกรัม
 m คือ มวลของวัสดุคลุมดิน, มิลลิกรัม
 K คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
 n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง



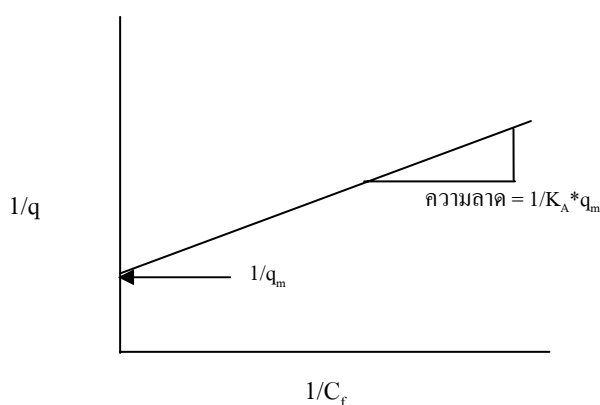
ภาพประกอบที่ 1-3 กราฟของ Freundlich Isotherm เพื่อหาค่า K และ n

จากลักษณะของเส้นกราฟ Freundlich Isotherm ค่าคงที่ K จะบอกถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ และ $1/n$ เป็นค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรง ซึ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับได้ โดยหากมีค่า $1/n$ ต่ำจะทำให้พันธะของการดูดซับอ่อนข้างแข็งแรงมากกว่า $1/n$ ที่มีค่าสูง (Snoeyink, 1990) และกรณีเส้นความชันมีค่าสูง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารที่ต้องการดูดซับมีความเข้มข้นสูง (Ford, 1981)

2) สมการของ Langmuir Isotherm เป็นสมการที่ใช้อธิบายในกรณีที่การดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียว (monolayer) และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) จะไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิวของตัวดูดซับ (adsorbant) ซึ่งมีสมการและสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้คือ

$$q = (q_m K_A C_f) / (1 + K_A C_f) \text{ หรือ } 1/q = (1/C_f)(K_A * q_m) + (1/q_m)$$

- เมื่อ q คือ มวลของสารหนุที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุคลุมดิน
 C_f คือ ความเข้มข้นของสารหนุที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล, มิลลิกรัมต่อลิตร
 q_m คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
 K_A คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง



ภาพประกอบที่ 1-4 กราฟของ Langmuir Isotherm เพื่อหาค่า K_A และ q_m

1.2.9 คุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุที่นำมาใช้คลุมดิน

งานวิจัยในครั้งนี้จะนำวัสดุทั้งหมด 4 ชนิด คือ ดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และเถ้าลอย มาใช้ทดสอบหาความสามารถในการดูดซับสารหนุเพื่อใช้เป็นวัสดุคลุมดินและตรึงสารหนุไม่ให้เคลื่อนที่หรือเกิดการแพร่กระจายไปยังบริเวณอื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ดังนี้คือ

1.2.9.1 ดินลูกรัง เป็นดินที่มีส่วนประกอบของ เหล็ก และอะลูมิเนียม อยู่เป็นจำนวนมาก และมีแร่ธาตุหลักคือ kaolinite, goethite, hematite และ gibbsite นอกจากนี้ดินลูกรังส่วนมากยังประกอบไปด้วยแร่ quartz และออกไซด์ของเหล็กในดินลูกรังซึ่งจะเป็นตัวที่ทำให้ ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดง

1.2.9.2 หินปูนฝุ่น หินปูนฝุ่นจะประกอบไปด้วยแร่คาร์บอเนต มากกว่าร้อยละ 50 และอาจมีสีขาวยเทา เทาแกมเขียว เทาแกมน้ำเงิน ชมพูหรือดำ องค์ประกอบอื่นๆ ที่อาจ

ปนอยู่ในเนื้อหินปูน ได้แก่ แมกนีเซียมคาร์บอเนต โดโลไมต์ ยิปซัม ฟลูออไรต์ เหล็กออกไซด์ ฟอสเฟต ดินและอินทรีย์สาร

1.2.9.3 ปูนขาว มีสูตรทางเคมีคือ Ca(OH)_2 (calcium hydroxide) เมื่อนำปูนขาวมาผสมกับสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัด Ca(OH)_2 จะทำปฏิกิริยากับของเสียนั้นได้เป็น hydrated ของ calcium silicate, calcium alumina, calcium arsenate เป็นต้น

1.2.9.4 ถ้ำลอย สำหรับถ้ำลอยที่นำมาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นถ้ำที่เกิดจากการเผาไหม้มูลฝอยชุมชน จากเตาเผาขยะภูเก็ต ซึ่งจะมีอนุภาคขนาดเล็ก เป็นผงละเอียดคล้ายปูนซีเมนต์ (เทศบาลเมืองภูเก็ต, 2545) และจากการศึกษาของพจนีย์ อินทสโร (2545) พบว่า ขนาดอนุภาคของถ้ำลอยจะอยู่ระหว่าง 30-80 ไมครอน เมื่อร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้อง scanning electron microscope (SEM) พบว่า พื้นที่ผิวของอนุภาคจะขรุขระ เป็นเหลี่ยมบิดเบี้ยว และมีรูพรุน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจะอยู่ในรูปของออกไซด์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือปูนขาว Ca(OH)_2 ส่วน alkali (Na_2O และ K_2O), Cl และ SO_3 มีความเข้มข้นสูง และเมื่อนำถ้ำลอยมาล้างด้วยน้ำ พบว่าในน้ำที่ผ่านการล้างด้วยถ้ำลอยนี้จะมีการละลายของ NaCl และ KCl อยู่สูง (ภควัฒน์ แสนเจริญ, 2546) ส่วนองค์ประกอบทางแร่วิทยา ประกอบไปด้วยผลึกแร่ของ KCl, NaCl, CaCO_3 , Ca(OH)_2 , CaSO_4 , CaCl_2 , CaClOH , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{K}_{86.5}\text{Al}_{86.5}\text{Si}_{105.5}\text{O}_{384}$ (พจนีย์ อินทสโร, 2545)

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดจากเหมืองแร่และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยปกติแล้วจะถูกบำบัดโดยใช้ CaO และ Ca(OH)_2 เพื่อเพิ่มพีเอช และลดปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำโดยเฉพาอย่างยิ่งสารหนูที่ละลายในน้ำบางชนิดจะตกตะกอนเป็นโลหะอาร์ซีเนตของโลหะชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในสารละลายที่อยู่ในสภาพสมดุลกับ calcium arsenate magnesium arsenate และ iron (III) arsenates

Solid phase	T/K	pH ^a	Arsenate _{total} /(mol/L) ^a
CaHAsO ₄ ·H ₂ O	308	acid	0.12-1.2
Ca ₃ (AsO ₄) ₂	293	6.90-8.35	1.5 x 10 ⁻² -3.5 x 10 ⁻³
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·4.25 H ₂ O	296	7.32-7.55	1.1 x 10 ⁻² -6.5 x 10 ⁻³
Ca ₁₀ (AsO ₄) ₆ (OH) ₂	310	5.56-7.16	7.5 x 10 ⁻³ -4.4 x 10 ⁻⁴
Ca ₁₀ (AsO ₄) ₆ Cl ₂	310	4.67-7.42	1.9 x 10 ⁻³ -3.7 x 10 ⁻⁵
Mg ₃ (AsO ₄) ₂	293	6.50-7.40	1.5 x 10 ⁻² -4.6 x 10 ⁻³
FeAsO ₄	293	1.90-2.95	3.7 x 10 ⁻³ -8.5 x 10 ⁻⁵
FeAsO ₄ ·2H ₂ O	298	5.53-6.36	1.4 x 10 ⁻⁴ -2.5 x 10 ⁻⁵

^apH and total arsenate values are the highest and lowest numbers presented in the references, but a direct relation does not exist between the values of the two columns.

ที่มา : Nishimura *et al.*, 1985

โดยปกติแล้วสารหนูที่ละลายน้ำ อยู่ในช่องว่างของดินจะมีปริมาณค่อนข้างต่ำ อันเป็นผลมาจากกระบวนการต่าง ๆ หลายกระบวนการที่เกิดขึ้นในดิน เช่น กระบวนการ chelation การแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน การดูดซับโดยแร่ดินเหนียว แร่ Mica Oxides ของ Fe, Mg และ Al สารประกอบคาร์บอเนตและอินทรีย์วัตถุ (Bowell *et al.*, 1994) ซึ่งทำให้สารหนูเกิดการตกตะกอนและเคลื่อนที่ช้าลง สอดคล้องกับ Edita *et al.*, (1995) และ Krause and Ettl (1989) ที่ได้ทำการศึกษาการละลายตะกอนที่ได้จากสารหนู และสารประกอบเฟอร์ริกอาร์ซีเนต ที่ pH ในช่วง 2-10 และจำกัดอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กต่อสารหนู พบว่าที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) เท่ากับ 10^{-24.45} รวมทั้งได้ทำการเปรียบเทียบการละลายของสารหนูจากการตกตะกอนของเฟอร์ริกอาร์ซีเนต พบว่าค่าการละลายของสารหนูมีค่าน้อยมากในช่วงสภาวะพีเอชที่ 3-8 และถ้าอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลเหล็กต่อสารหนูเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การละลายของสารหนูลดลง และที่อัตราส่วนมวลโมเลกุลเท่ากับ 8 เฟอร์ริกอาร์ซีเนตจะมีอัตราการละลายต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมทั้งอัตราการละลายจะไม่เพิ่มขึ้นในระยะเวลา 2-3.7 ปี แต่จะมีค่าการละลายที่สูงขึ้นในสภาวะที่เป็นกรด หรือค่าอย่างรุนแรง นอกจากนี้งานวิจัยของ Magalhaes (2002) ได้ระบุถึงการใช้ธาตุ Ca, Mg และ Fe เพื่อลดปริมาณสารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำโดยการทำให้

ตกตะกอนร่วมกับโลหะเหล่านี้ พบว่าสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เหล่านี้ไม่เป็นพิษกับสภาพแวดล้อม มีราคาถูก และโลหะอาร์ซีเนต ของธาตุเหล่านี้มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมาก ดังนั้นสารประกอบสารหนูในรูปของตะกอน FeAsO_4 จึงมีความเสถียรในสภาวะพีเอชตามธรรมชาติ จึงสามารถถูกบำบัดโดยการฝังกลบที่ถูกต้องได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากการละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก

นอกจากนี้งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับ As(III) และ As(V) ด้วย clay minerals, goethite, $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับ As(V) มีดังนี้ $\text{Al}(\text{OH})_3 > \text{Fe}(\text{OH})_3 > \text{goethite} > \text{clay minerals}$ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารหนู พีเอช และปริมาณไอออนชนิดต่างๆ ที่แข่งขันกับสารหนูในการถูกดูดซับ และ 92% ของอาร์ซีเนตจะถูกดูดซับโดย $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Pierce and Moore, 1982; Carlson *et al.*, 2002) และจากการศึกษาโดยวิธี column leaching test เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้สารปรับปรุงดิน 4 ชนิด ประกอบด้วย แร่ goethite ($\infty\text{-FeOOH}$), Fe-grit, Fe(II) และ Fe(III) sulphate ที่ผสมกับปูนขาว และปูนขาว โดยใส่ลงไปในดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับสารหนูในดินที่ปนเปื้อนเรียงจากมากไปน้อย มีดังนี้ $\text{Fe(III)Sulphate} > \text{Fe(II)} > \text{Fe-grit} > \text{goethite} > \text{lime}$ และพบว่าการดูดซับสารหนูของ Fe-Oxide จะมีเสถียรภาพอยู่เป็นระยะเวลานาน ดังนั้น Fe-oxide จึงสามารถใช้ในการดูดซับสารหนูในดินได้ (Hartley *et al.*, 2004)

จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าการใช้ดินลูกรัง (Fe-oxide ชนิดต่างๆ และแร่ดินเหนียว) หินปูนฝุ่น (CaCO_3) ปูนขาว [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มาใช้เป็นวัสดุคลุมดิน เพื่อป้องกันไม่ให้สารหนูเคลื่อนที่ขึ้นมาสู่ผิวดินและฟุ้งกระจายไปในอากาศ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินเหล่านี้

1.4 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของชั้นดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาวและเถ้าลอย ในการควบคุมการแพร่กระจายของสารหนูสู่ผิวดินเพื่อลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินที่มีสารหนูไม่ให้ปนเปื้อนสู่อากาศ
2. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของสารหนูในแนวตั้งสู่ชั้นดินที่สร้างขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้วิธีการป้องกันการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินที่มีสารหนูไม่ให้ปนเปื้อนสู่อากาศ โดยการใช้วัสดุคลุมดินปิดทับ
- 2 ได้ข้อมูลประสิทธิภาพของชั้นดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และถ้ำล่อยในการควบคุมการแพร่กระจายของสารหนูสู่ผิวดินและการป้องกันการเคลื่อนที่ของสารหนูในแนวตั้ง
3. ใช้เป็นข้อมูลทางเลือกเพื่อใช้ในการจัดการและแก้ไขปัญหาการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินที่มีสารหนูปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายมนุษย์โดยการหายใจ