

การดูดซับสารหนูของดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาวและเถ้าลอย ในดินที่ปนเปื้อนสารหนู

ละออง วุฒิพันธุ์¹ ประวิทย์ โต้วัฒนะ² สุรพล อารีย์กุล³ และ วีระศักดิ์ จงสู่วิวัฒน์วงศ์⁴

Abstract

Wuthiphun, L.¹, Towatana, P.², Arrykul, S.³ and Chongsuvivatwong, V.⁴

Arsenic adsorption of lateritic soil, limestone powder, lime and fly ash on arsenic-contaminated soil

Songklanakarin J. Sci. Technol., May 2007, 29(Suppl. 2) : 401-411

Arsenic adsorption efficiency of soil covering materials (lateritic soil, limestone powder, lime and fly ash) on arsenic-contaminated soil obtained from Ronpiboon District, Nakhon Sri Thammarat Province to solve arsenic air pollution problem was investigated using batch experiments. The four types of the aforementioned soil covering materials were examined to determine their arsenic adsorption efficiency, equilibrium time as well as adsorption isotherms.

The results revealed that among soil covering materials mixed with arsenic-contaminated soil at 10% w/w, the efficiency of arsenic adsorption of fly ash, lateritic soil, lime and limestone powder were 84, 60, 38 and 1% respectively. The equilibrium time for lateritic soil at pH 4 was achieved within 4 hrs, whereas pH 7 and 12, the equilibrium time was 6 hrs. For fly ash, 2 hrs were required to reach the equilibrium at pH

¹Faculty of Environmental Management, ²Department of Earth Science, Faculty of Natural Resources, ³Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, ⁴Epidemiology Unit, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

¹นักศึกษาลำดับต้น วท.ม. สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ²Ph.D. (Geochemistry) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ³Ph.D. (Applied Geology) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ⁴Ph.D. (Epidemiology) ศาสตราจารย์ หน่วยระบาดวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail : la_na11@yahoo.com

รับต้นฉบับ 21 เมษายน 2549 รับลงตีพิมพ์ 13 พฤศจิกายน 2549

12, while the equilibrium time was attained within 6 hrs at pH 4 and 7. Furthermore, lateritic soil possessed high arsenic adsorption efficiency at pH 7 and 4 and best fit with the Langmuir isotherm. The fly ash showing high arsenic adsorption efficiency at pH 12 and 7 fit the Freundlich isotherm at pH 12 and Langmuir isotherm at pH 7.

This indicated that lateritic soil was suitable for arsenic adsorption at low pH, whilst at high pH, arsenic was well adsorbed by fly ash. The Freundlich and Langmuir isotherm could be used to determine quantities of soil covering materials for arsenic adsorption to prevent arsenic air pollution from arsenic-contaminated soils.

Key words : arsenic, soil covering materials, contamination, adsorption, isotherm

บทคัดย่อ

ละออง วัสดุพิษ ปรอท โดว์ฒนะ สุรพล อารีย์กุล และ วีระศักดิ์ จงสู่วิวัฒน์วงศ์
การดูดซับสารหนูของดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาวและเถ้าลอยในดินที่ปนเปื้อนสารหนู
ว. สงขลานครินทร์ วทท. พฤษภาคม 2550 29(ฉบับพิเศษ 2) : 401-411

การศึกษานี้เป็นการหาประสิทธิภาพของดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และเถ้าลอย ในการดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในดินจาก อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช เพื่อลดผลกระทบของสารหนูที่สะสมอยู่ในดินไม่ให้ฟุ้งกระจายออกสู่อากาศ โดยใช้การทดลองแบบแบทช์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูของวัสดุทั้ง 4 ชนิด และหาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ตลอดจนไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างวัสดุคลุมดินและดินเหมืองแร่ที่ 10% w/w ประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินในการดูดซับสารหนูจากมากไปหาน้อยดังนี้ เถ้าลอย ดินลูกรัง ปูนขาว และหินปูนฝุ่น โดยมีประสิทธิภาพ 84% 60% 38% และ 1% ตามลำดับ และจากการศึกษาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของดินลูกรังพบว่าที่พีเอช 4 จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลา 4 ชั่วโมง ส่วนที่พีเอช 7 และ 12 ใช้เวลา 6 ชั่วโมง สำหรับเถ้าลอยที่พีเอช 12 จะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนที่พีเอช 4 และ 7 จะใช้เวลา 6 ชั่วโมง นอกจากนั้นพบว่าดินลูกรังมีสมดุลของการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 7 และ 4 และลักษณะการดูดซับเป็นแบบ Langmuir ส่วนเถ้าลอยมีสมดุลของการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 12 และ 7 และลักษณะการดูดซับที่พีเอช 12 เป็นแบบ Freundlich และพีเอช 7 เป็นแบบ Langmuir

จากผลการวิจัยบ่งชี้ได้ว่า ดินลูกรังมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับสารหนูได้ดีในสภาวะที่มีพีเอชต่ำ ส่วนเถ้าลอยมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับสารหนูได้ดีในสภาวะที่มีพีเอชสูง นอกจากนี้ไอโซเทอม (Isotherm) ของ Langmuir และ Freundlich สามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณวัสดุคลุมดินที่จะใช้ในการป้องกันการฟุ้งกระจายของสารหนูในดินที่ปนเปื้อนสารหนูสู่อากาศได้

สารหนูหากมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากเกินไป มาตรฐานที่กำหนดไว้ อาจก่อให้เกิดพิษต่อมนุษย์ ทั้งโดยตรงและทางอ้อม ดังเช่น บริเวณ ต.ร้อนพิบูลย์ อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุก ทำให้มีเศษแร่อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite) ปะปนในดินและแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในดินบริเวณเหมืองแร่และบริเวณที่เคยทิ้งกากแร่มีการเคลื่อนที่สู่วิวดินและสามารถปนเปื้อนไปสู่อากาศโดยรอบในรูปของฝุ่น

ละออง เนื่องจากพื้นที่เหล่านั้นไม่มีพืชหรือสิ่งปกคลุมพื้นผิวดินในช่วงฤดูแล้ง เมื่อผิวดินแห้งและมีลมพัดผ่าน อากาศดินที่มีสารหนูปนเปื้อนเหล่านี้จะถูกลมพัดพาและฟุ้งกระจายไปทั่ว บางส่วนสามารถตกลงบนหลังคา และเมื่อฝนตกฝุ่นสารหนูที่สะสมอยู่บนหลังคาจะถูกชะล้างลงมายังภาชนะเก็บน้ำฝน ทำให้น้ำฝนมีการปนเปื้อนสารหนูด้วย นอกจากนี้สารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ ดิน และน้ำฝน สามารถแพร่เข้าสู่ร่างกายประชาชนในบริเวณ ต.ร้อนพิบูลย์ และจากก่อ

ให้เกิดความเสี่ยงรวมต่อการเกิดโรคมะเร็งได้ (กิตติยา, 2542) ซึ่งการปนเปื้อนของสารหนูดังกล่าว มีแหล่งที่มาที่สามารถระบุได้ 2 บริเวณ คือ (1) พื้นที่ที่ผ่านการทำเหมืองแร่ดีบุกบนเขาร่อนนา-สรวงจันทร์ และโรงแต่งแร่ ซึ่งมีกองกากแร่สารหนูที่เกิดจากการแยกแร่จะมีสารหนูเจือปนสูง 1-30% กองกากแร่เหล่านี้ถูกทิ้งไว้ใน 7 บริเวณ คิดเป็นปริมาณรวมประมาณ 2,500 ลบ.เมตร และ (2) พื้นที่ราบตะกอนเชิงเขาและตะกอนน้ำพา ซึ่งมีสารหนูปนเปื้อนในระดับสูงกว่า 50 มก./กก. ถึง 80% ของพื้นที่สำรวจ และยังพบว่าพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายของประชาชนใน ต.ร่อนพิบูลย์ อ. ร่อนพิบูลย์ คือ หมู่ที่ 1, 2, 12 และ 13 นอกจากนี้ความเสี่ยงต่อการได้รับสารหนู เกิดจากการทำกิจกรรมในบริเวณที่มีฝุ่นสารหนู การสัมผัสดินโดยตรง และการดื่มน้ำฝนที่มีสารหนูปนเปื้อน (อนงค์, 2540 และกิตติยา, 2542) ดังนั้นหากมีมาตรการเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของสารหนูในดินไม่ให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวดินและกลายเป็นฝุ่นที่มีสารหนูปนเปื้อน ก็อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการป้องกันและแก้ไขผลกระทบ รวมถึงลดความเสี่ยงต่อการได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายของประชาชนได้

งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดิน ซึ่งได้แก่ ดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และเถ้าลอย ในการดูดซับสารหนู และถ้าพบว่าวัสดุชนิดใดมีความสามารถในการดูดซับสารหนูได้ดี แล้วจะถูกนำไปใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของสารหนูสู่ผิวดินโดยการตรึงสารหนูไว้กับดินเพื่อป้องกันการปนเปื้อนไปสู่อากาศและสิ่งแวดล้อมโดยรอบในรูปของฝุ่นละออง

วิธีการทดลอง

การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินที่มีสารหนูปนเปื้อนจากบริเวณโรงแต่งแร่เก่า อ.ร่อนพิบูลย์ และดินลูกรังจากบ่อก้านขวด อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินแบบ composite sample จากผิวดินจนถึงระดับความลึก 30 ซม. มาหลาย ๆ จุด แล้วมาผสมกัน และเก็บเถ้าลอยมาจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต นำตัวอย่างดินเหมืองแร่และดินลูกรังมาผึ่งลมจนแห้ง ส่วนหินปูนฝุ่น ปูนขาวและเถ้าลอยนำไปอบที่ 103-105°C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำ

ตัวอย่างมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2 มม. เก็บส่วนที่ผ่านตะแกรง (ขนาดเล็กกว่า 2 มม.) ไว้ในภาชนะ polyethylene เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจนกว่าจะทำการวิเคราะห์พีเอช (ดิน : น้ำ = 1:5) ค่าความนำไฟฟ้า (ดิน : น้ำ = 1:5) ปริมาณสารอินทรีย์ (Walkley & Black Method) ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณแคลเซียมทั้งหมดวิเคราะห์ตามมาตรฐานของ Method of Soil Analysis แล้ววัดปริมาณโดยใช้ flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS) ของ Varian รุ่น Spectra 220, Australia (Klute, 1986 and Page *et al.*, 1982) ส่วนปริมาณสารหนูทั้งหมดวิเคราะห์ตาม method 200.9 ของ US.EPA ซึ่งสกัดโดยใช้ (1+1) HNO₃ : (1+4) HCl เท่ากับ 4 : 10 แล้วนำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปั่นให้เย็นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำน้ำส่วนใสไปวัดปริมาณสารหนูทั้งหมดด้วย graphite furnace atomic absorption spectrophotometer (GFASS) ของ PerkinElmer รุ่น Optima 2000 DV, USA (Creed *et al.*, 1994)

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยวัสดุคลุมดิน

การวางแผนการทดลองจะใช้ (วัสดุคลุมดิน + ดินเหมืองแร่) : น้ำ = 1 : 4 ดัง Table 1 และกำหนดให้อัตราส่วนการผสมระหว่างวัสดุคลุมดินแต่ละชนิด และดินเหมืองแร่เป็นดังนี้คือ 2 4 6 8 และ 10 (%w/w) แล้วเติมน้ำกลั่น 100 มล. นำไปเขย่า 48 ชม. จากนั้นกรองด้วยแผ่นกรอง GF/C นำน้ำส่วนใสไปวิเคราะห์พีเอช ค่าความนำไฟฟ้า ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณเหล็ก ปริมาณแคลเซียม และปริมาณสารหนู เพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินทั้ง 4 ชนิดในการดูดซับสารหนู ทั้งนี้เพื่อคัดเลือกวัสดุคลุมดินที่มีประสิทธิภาพสองชนิดเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

การศึกษาระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับสารหนู

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารหนูบนวัสดุคลุมดินชนิดต่างๆ ทำให้ทราบว่าดินลูกรังและเถ้าลอย มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารหนู ดังนั้นจึงใช้ดินลูกรังและเถ้าลอยมาทำการศึกษาโดยการทดลอง ได้ใช้

Table 1. The experimental design for the determination of arsenic adsorption efficiency of soil covering materials (4 types)

Treatment	Treatment Description
1	As contaminated soil (25 g) + deionized water (100 ml)
2	(Lateritic soil+ As contaminated soil)* 25 g + deionized water (100 ml)
3	(Limestone powder + As contaminated soil)* 25 g + deionized water (100 ml)
4	(Lime+ As contaminated soil)* 25 g + deionized water (100 ml)
5	(Fly ash+ As contaminated soil)* 25 g + deionized water (100 ml)

Note : * The amounts of soil covering materials in the As contaminated soil were 2, 4, 6, 8 and 10% (w/w) for each treatment.

ปริมาณวัสดุคลุมดิน 2 กรัม/สารละลายสารหนู 50 มล. (ความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 100 มก.สารหนู/ลิตร) และเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.05 โมลาร์ เพื่อเพิ่ม ionic strength เพื่อให้สารละลายที่ใช้ทดลองมีสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างของเม็ดดินตามธรรมชาติ (Mopoung and Thavorn-yutikarn, 2004) และทำการทดลองที่ พีเอช 4 7 และ 12 (± 0.05) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำไปเขย่าภายใต้อุณหภูมิ 25°C และเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดไว้ เป็นระยะเวลา ตั้งแต่ 0-24 ชม. จากนั้นนำตัวอย่างที่เขย่าแล้วไปทำการเหวี่ยงด้วยความเร็ว 16,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที (Pierce and Moore, 1980) แล้วนำตัวอย่างน้ำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูโดยวิธี colorimetry molybdenum blue (Johnson and Pilson, 1972)

การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารหนูบนวัสดุคลุมดิน

ใช้ปริมาณวัสดุคลุมดิน 2 กรัม/สารละลายสารหนู 50 มล. ซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เริ่มต้นเท่ากับ 25 50 100 150 และ 200 มก. สารหนู/ล. ทำการทดลองที่ พีเอช 4, 7 และ 12 (± 0.05) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำไปเขย่าภายใต้อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำตัวอย่างที่เขย่าแล้วไปทำการเหวี่ยงด้วยความเร็ว 16,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำตัวอย่างน้ำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู โดยวิธี colorimetry molybdenum blue (Johnson and Pilson, 1972)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษามัธยสัมพันธ์ของดินเหมืองแร่และวัสดุคลุมดิน

ตัวอย่างของดินเหมืองแร่ที่นำมาศึกษา (Table 2) มีปริมาณทั้งหมดของสารหนูและเหล็กสูงมากเนื่องจากเป็นตัวอย่างดินเหมืองแร่ที่นำมาจากบริเวณโรงแต่งแร่เก่า โดยสารหนูที่พบอยู่เป็นผลจากการสลายตัวของแร่อาร์เซนไพไรต์ ตัวอย่างดินนี้จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของดินเหมืองแร่ที่พบอยู่ทั่วไปในอ.ร่อนพิบูลย์ ได้ และเป็นที่น่าสนใจว่าดินเหมืองแร่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.60 ซึ่งไม่เป็นกรดตามที่คาดว่าจะพบอยู่ในดินเหมืองแร่ทั่วไป ที่มีการปนเปื้อนของแร่ อาร์เซนไพไรต์และการที่พีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากในภาคใต้มีอากาศร้อนชื้นและฝนตกชุก เมื่อดินเหมืองแร่ถูกน้ำฝนชะล้างเป็นระยะเวลานานหลาย ๆ ปี ไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ในดินจะถูกชะล้างออกไปจากหน้าตัดดินทำให้พีเอชของดินสูงขึ้น สำหรับดินลูกรังมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.02 เมื่อใส่ลงในดินเหมืองแร่ จะทำให้ดินเหมืองแร่มีพีเอชลดลง และดินลูกรังยังมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำ นอกจากนั้น ปริมาณเหล็กที่มีอยู่สูงจะทำให้สามารถดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในดินได้มากขึ้น (สุรพล, 2531) สำหรับหินปูนฝุ่นปูนขาวและเถ้าลอย นอกจากจะมีปริมาณแคลเซียมอยู่สูงมาก ยังมีพีเอชและค่าความนำไฟฟ้าสูง เมื่อใส่ลงในดินเหมืองแร่จะมีผลทำให้ดินเหมืองแร่มีพีเอชสูงมาก เป็นผลทำให้ดินมีสมบัติไม่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการปลูกพืชคลุมดินที่จะถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของดินที่มีสารหนูปนเปื้อน

Table 2. The chemical properties of arsenic - contaminated soil collected from Ronpiboon District, Nakhon Si Thammarat Province and soil covering materials.

Parameters	As-contaminated soil	Lateritic soil	Limestone powder	Lime	Fly ash
pH	7.60±0.03	5.02±0.06	8.98±0.02	12.58±0.02	12.10±0.02
Electric Conductivity (µs/cm)	74±3.26	20±0.53	156±0.49	9,850±179.69	38,366±880.66
Organic Matter (%)	0.56±0.01	0.58±0.01	4.14±0.06	18.27±0.15	4.99±0.11
Total As (mg/kg)	78±0.23	21±0.07	13±0.03	17±0.04	13±0.12
Total Fe (mg/kg)	3,504±8.73	15,391±80.98	20±1.81	1±0.24	3,871±11.00
Total Ca (mg/kg)	278±2.47	52±0.62	101,135±79.60	112,542±79.05	75,804±73.00

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยวัสดุคลุมดิน

ผลการศึกษาวัสดุคลุมดินสำหรับดินเหมืองแร่ที่มีสารหนูปนเปื้อน พบว่าประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินที่สามารถดูดซับสารหนูได้มากที่สุดที่ 10% w/w จากมากไปน้อย ได้แก่ เถ้าลอย ดินลูกรัง ปูนขาว และ หินปูนฝุ่น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู 84% 60% 38% และ 1% ตามลำดับ (Figure 1) ซึ่งแสดงว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูงสุดและหินปูนฝุ่นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูน้อยที่สุด

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับสารหนู

ผลการทดลองปรากฏอยู่ในกราฟแสดงระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของสารหนูที่ถูกดูดซับด้วยดินลูกรัง และ เถ้าลอย (Figure 2 และ 3) โดยพบว่าที่พีเอช 4 ดินลูกรัง จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาประมาณ 240 นาที ที่พีเอช 7 และ 12 จะใช้เวลาประมาณ 360 นาที ส่วนเถ้าลอยที่พีเอช 12 จะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาประมาณ 120 นาที ที่พีเอช 4 และ 7 จะใช้เวลาประมาณ 360 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับของสารหนู โดยพบว่าที่พีเอชต่ำ ดินลูกรังจะสามารถดูดซับสารหนูได้ดีกว่าเถ้าลอย เนื่องจาก $Fe(OH)_3$ ในดินลูกรังจะทำปฏิกิริยาร่วมกันกับสารหนูที่อยู่ในรูป $HAsO_4^{2-}$ และเกิดการตกตะกอนได้ $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ (scorodite) (Wilson and Hawkin,1987) แต่ที่พีเอชสูง เถ้าลอยจะสามารถดูดซับสารหนูได้ดีกว่าดิน

ลูกรัง เนื่องจากในเถ้าลอยจะมี $Ca(OH)_2$ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถดูดซับหรือรวมตัวกับสารหนูแล้วเกิดการตกตะกอน และการตกตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ Ca-As-O เช่น $Ca_4(OH)_2(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 3/3 H_2O$ (Moon et al., 2004 และ Nishimura et al., 1985)

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารหนูบนวัสดุคลุมดิน

ความสามารถในการดูดซับของสารหนูสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ยังคงเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดซับ (Schuliger, 1978) โดยการศึกษาเลือกไอโซเทอมนั้นจะพิจารณาจากค่าที่ของการดูดซับควบคู่กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination : R^2) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 -1 โดยค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือต่ำสุด ส่วนค่าที่เข้าใกล้ 1 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด แบบจำลองที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่สองรูปแบบคือ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm ดังสมการที่ (1) และ สมการที่ (2)

Freundlich Isotherm

$$q = x/m = K C_f^{1/n} \tag{1}$$

Langmuir Isotherm

$$1/q = (1/C_f)(K_A * q_m) + (1/ q_m) \tag{2}$$

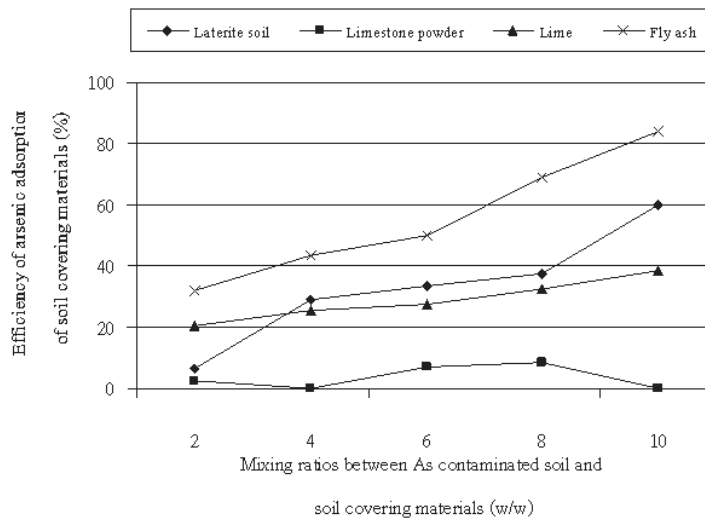


Figure 1. Efficiency of arsenic adsorption of soil covering materials (4 types)

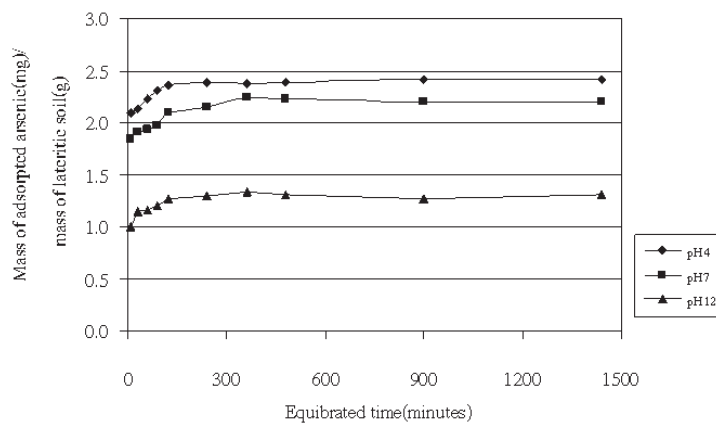


Figure 2. Reaction time for arsenic adsorbed by lateritic soil to achieve equilibrium

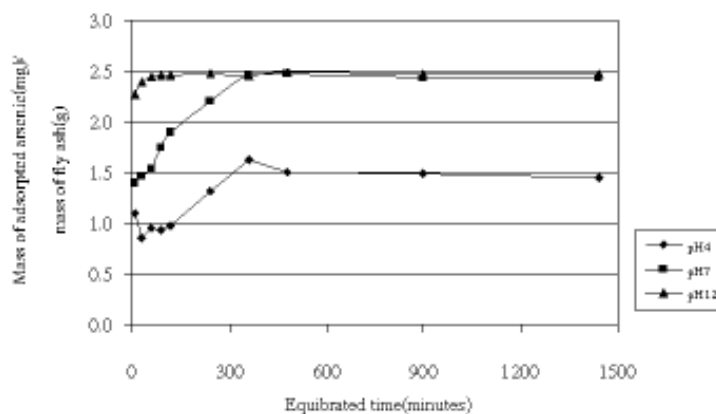


Figure 3. Reaction time for arsenic adsorbed by fly ash to achieve equilibrium

เมื่อ q คือ มวลของสารหนูที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุ
 กลุ่มดิน
 C_f คือ ความเข้มข้นของสารหนูที่เหลืออยู่ใน
 สารละลาย ณ สภาวะสมดุล, มก./ลิตร
 x คือ มวลของสารหนูที่ถูกดูดซับ, มก.
 m คือ มวลของวัสดุกลุ่มดิน, มก.
 K, n, q_m และ KA คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการ
 ทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการศึกษานี้ตามสภาวะพีเอชที่
 ทดลองดัง Table 3 (Figure 5 และ Figure 7) พบว่าที่
 พีเอช 7 และ 4 ความสามารถในการดูดซับสารหนูของดิน
 ลูกครึ่งจะสูงที่สุด เนื่องจากที่พีเอช 4 ถึง 7 มีการดูดซับเกิด
 ขึ้นได้ดีกว่าพีเอชอื่น เพราะดินที่ใช้ศึกษานั้นเป็นดินธรรมชาติ
 ซึ่งมีค่า pH_{PZC} อยู่ที่พีเอชประมาณ 4 ถึง 5 ดังนั้นที่พีเอช 4
 หรือต่ำกว่า ประจุรวมบนผิวหน้าจะเป็นประจุบวกทำให้การ
 ดูดติดผิวเกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่พีเอชที่เพิ่มมากขึ้น
 ทำให้ประจุรวมที่ผิวหน้าดินจะเป็นลบมากขึ้น ดังนั้นการดูด
 ซซับของสารหนูจึงเกิดได้น้อยลง (ธนัชพร และคณะ, 2548;
 Sabine, 2002 และ Mopoung and Thavornyutikarn,
 2004) และจากค่า R^2 (linear regression) ของไอโซเทอม
 การดูดซับทั้งสองจะพบว่าสมดุลของการดูดซับมีแนวโน้ม
 เป็นแบบ Langmuir มากกว่า Freundlich แต่ทั้งนี้ค่า R^2
 มีค่าสูงใกล้เคียงกันมากทั้งสองสมการ จึงถือว่าทั้งสองสมการ
 ก็มีความเหมาะสมที่จะนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง
 ปริมาณของดินลูกครึ่งกับความสามารถในการดูดซับสารหนู
 ภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองได้

จาก Table 4 Figure 4 และ Figure 6 พบว่าที่พีเอช
 12 และ 7 ความสามารถในการดูดซับสารหนูของเถ้าลอยจะ
 สูงที่สุดเนื่องจากในเถ้าลอยจะมีองค์ประกอบของ $Ca(OH)_2$
 อยู่สูงมาก นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบทางแร่วิทยาซึ่ง
 ประกอบไปด้วยผลึกแร่ของ $KCl, NaCl, CaCO_3, Ca(OH)_2,$
 $CaSO_4, CaCl_2, CaClOH, CaSO_4 \cdot 2H_2O$ และ
 $K^{86.5} Al^{86.5} Si^{105.5} O^{384}$ (พจนีย์, 2545) และ $Ca(OH)_2$ จะ
 เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง (Ricou *et al.*,
 1999) จึงทำให้สามารถดูดซับสารหนูได้ดีมาก รวมถึง
 สารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำในสภาวะที่มีออกซิเจนและมีพีเอช
 สูง สารหนูจะอยู่ในรูปของ AsO_4^{3-} จึงสามารถทำปฏิกิริยา
 ร่วมกันกับ $Ca(OH)_2$ แล้วตกตะกอนได้ $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 3/3$
 H_2O (Ferguson and Gavis, 1972 และ Nishimura *et al.*,
 1985) และจากค่า R^2 (linear regression) ของไอโซ-
 เทอมการดูดซับทั้งสอง จะพบว่าสมดุลของการดูดซับที่พีเอช
 12 มีแนวโน้มเป็นแบบ Freundlich แต่ขณะเดียวกันที่
 พีเอช 7 จะพบว่าสมดุลของการดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบ
 Langmuir

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุกลุ่มดิน 4 ชนิด
 ที่นำมาใช้ดูดซับสารหนูเพื่อตรึงสารหนูไม่ให้เคลื่อนที่สู่ผิวดิน
 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ประสิทธิภาพของวัสดุกลุ่มดินในการดูดซับสารหนู
 ในดินเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ เถ้าลอย ดินลูกครึ่ง ปูนขาว
 และหินปูนฝุ่น ตามลำดับ

Table 3. Freundlich Isotherm for arsenic adsorption of lateritic soil and fly ash

Lateritic soil	$q = KC_f^{1/n}$	Slope	n	K	R^2
pH 4	$q = 322.62C_f^{0.6801}$	0.6801	1.47	322.62	0.983
pH 7	$q = 189.37C_f^{0.7182}$	0.7182	1.39	189.37	0.979
pH 12	$q = 52.97C_f^{0.7916}$	0.7916	1.26	52.97	0.883
Fly ash					
pH 4	$q = 23.27C_f^{1.0739}$	1.0739	0.93	23.27	0.936
pH 7	$q = 132.34C_f^{0.9592}$	0.9592	1.04	132.34	0.967
pH 12	$q = 569.38C_f^{0.7386}$	0.7386	1.35	569.38	0.989

Table 4 Langmuir Isotherm for arsenic adsorption of lateritic soil and fly ash

Lateritic soil	$1/q = (1/C_p)(K_A * q_m) + (1/q_m)$	Slope	qm	KA	R ²
pH 4	$1/q = (1/C_p)4.2689 + 0.1522$	4.2689	6.57	0.04	0.987
pH 7	$1/q = (1/C_p)7.9051 + 0.1657$	7.9051	6.04	0.02	0.994
pH 12	$1/q = (1/C_p)4.2689 + 0.1522$	4.2689	1.95	0.02	0.772
Fly ash					
pH 4	$1/q = (1/C_p)44.6180 - 0.3192$	44.6180	-3.13	-0.01	0.936
pH 7	$1/q = (1/C_p)9.0709 - 0.0550$	9.0709	-18.18	-0.01	0.977
pH 12	$1/q = (1/C_p)1.6508 + 0.1672$	1.6508	5.98	0.10	0.988

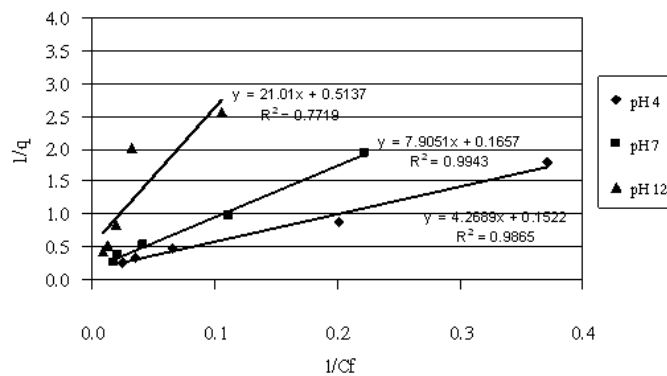


Figure 4. Langmuir isotherm of lateritic soil for arsenic adsorption

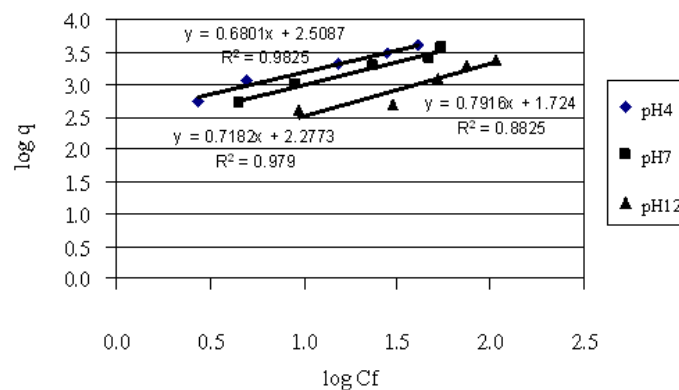


Figure 5. Freundlich isotherm of lateritic soil for arsenic adsorption

2) ดินลูกรังมีระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาประมาณ 240 นาที ที่พีเอช 4 และ 360 นาที ที่พีเอช 7 และ 12 ส่วนแก้ล่อยจะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาประมาณ 120 นาที ที่พีเอช 12 และ 360 นาที ที่พีเอช 4 และ 7

3) ดินลูกรังมีความสามารถในการดูดซับสารหนูสูงสุดที่พีเอช 7 และ 4 และสมดุลของการดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบ Langmuir ส่วนในแก้ล่อยพบว่ามีความสามารถในการดูดซับสารหนูสูงสุดที่พีเอช 12 และ 7 และสมดุลของการดูดซับ มีแนวโน้มเป็นแบบ Freundlich และ Langmuir

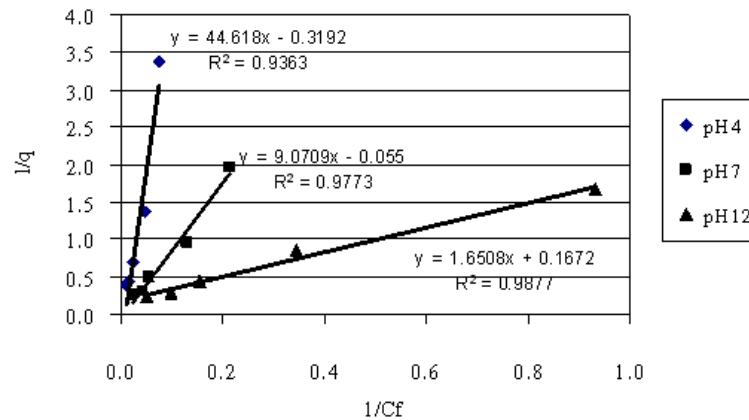


Figure 6. Langmuir isotherm of fly ash for arsenic adsorption

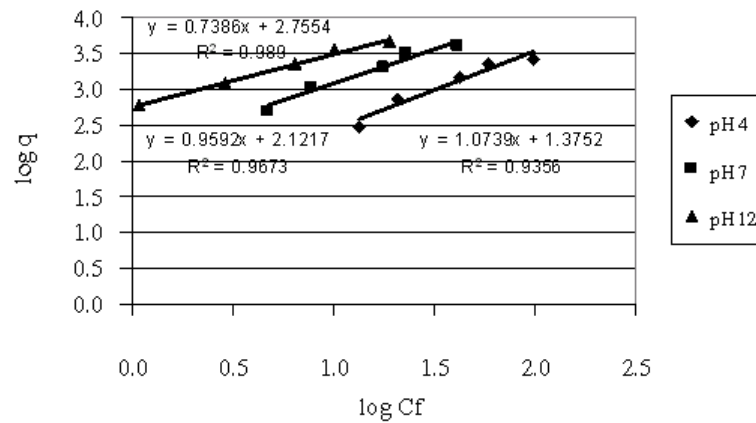


Figure 7. Freundlich isotherm of fly ash for arsenic adsorption

ตามลำดับ นอกจากนี้ไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุคลุมดินที่จะใช้ในการป้องกันการฟุ้งกระจายของสารหนูสู่อากาศในดินที่ปนเปื้อนสารหนูได้

4) ดินลูกรังและเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายในจังหวัดนครศรีธรรมราช และมีความสามารถในการดูดซับสารหนูได้ค่อนข้างดี จึงมีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมดินในพื้นที่ที่ปนเปื้อนสารหนูในอำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของสารหนูสู่ผิวดินและอากาศ

5) ถึงแม้ว่าเถ้าลอยจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูในดินได้สูงกว่าดินลูกรัง แต่หากนำเถ้าลอยไปเป็น

วัสดุคลุมดินจะทำให้พีเอช และค่าความนำไฟฟ้าของดินที่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าสูง ทำให้ดินมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชคลุมดิน ดังนั้นดินลูกรังที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูได้รองลงมา จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการเป็นวัสดุคลุมดินที่ปนเปื้อนสารหนูเนื่องจากดินลูกรัง จะทำให้พีเอชของดินเป็นกลางมากขึ้น และดินลูกรังยังมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำ เมื่อใส่ลงไปในดินจะไม่ไปเพิ่มความเค็มให้กับดินทำให้สมบัติของดินมีความเหมาะสมสำหรับปลูกพืชคลุมดิน โดยพืชคลุมดินก็เป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่มีสารหนูปนเปื้อนไปสู่อากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาสุขภาพภาคใต้ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- กิตติยา รักษ์วงศ์. 2542. พฤติกรรมเสี่ยงและแหล่งที่มาของการได้รับสารหนูในเด็กในนักเรียน ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธัญพร อยู่ยงยืน และคณะ. 2548. พฤติกรรมการดูดดื่มและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเดในชั้นน้ำใต้ดิน. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 4 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย วันที่ 19-21 มกราคม 2548 โรงแรมแอมบาสตราเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา.
- พจนีย์ แสนเจริญ. 2545. การนำเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)
- สุรพล อารีย์กุล. 2531. การแพร่กระจายของสารหนูในสิ่งแวดล้อม. ใน เอกสารการประชุมวิชาการผลกระทบจากการทำเหมืองแร่ต่อสิ่งแวดล้อม. วันที่ 12-13 พฤษภาคม 2531. โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ จังหวัดเชียงใหม่
- อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์. 2540. สถานการณ์ปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนู อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. ในการประชุมเสนอผลงานการแก้ไขปัญหาการแพร่กระจายของสารหนู อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. จัดโดยกรมทรัพยากรธรณี วันที่ 2 กรกฎาคม 2540 โรงแรมนิวกี๊ กรุงเทพมหานคร.
- Creed, J.T., Matin, T.D. and O'Dell, J.W. 1994. Method 2009. Determination of Trace Elements by Stabilized Temperature Graphite Furnace Atomic Absorption. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency

Cincinnati, Ohio.

- Eisenberg, S.H., Tittlebaum, M.E., Eaton, H.C. and Soroczack, M.M. 1986. Chemical Characteristics of Selected Fly Ash Leachates. J. Environ. Sci. Health A21, 383-402.
- Ferguson, J.F. and Gavis, J. 1972. A Review of the Arsenic Cycle in Natural Waters. Wat. Res. 6, 1259-1274.
- Johnson, D.L. and Pilson, M.E.Q. 1972. Spectrophotometric Determination of Arsenic, Arsenate and Phosphate in Natural Water. Anal. Chim. Acta. 58, 289-298.
- Moon, H.D., Dermatas, D. and Menounou, N. 2004. Arsenic Immobilization by Calcium-Arsenic Precipitates in Lime Treated Soils. J. Sci. Tot. Env. 330, 171-185.
- Mopoung, S. and Thavornyutikarn, P. 2004. Adsorption of Arsenate on Clays. NU Sci.J. 1(1), 1-10.
- Nishimura, T.C.T., Tozawa, K. and Robins, R.G. 1985. The Calcium-Arsenic-Water-Air System. In 15th Annual Hydrometallurgical Meeting of CIM. Proceedings of Impurity Control and Disposal, Vancouver, Canada. August 1985. pp. 2/1-2/19.
- Klute, A. 1986. Methods of Soil Analysis Part 1; Physical and Mineralogical Methods 2nd ed., American Society of Agronomy & Soil Science Society of America Publisher, Wisconsin, USA.
- Page, A.L., Miller, R.H. and Keemey, D.R. 1982. Methods of Soil Analysis Part 2; Chemical and Microbiological Properties 2nd ed', American Society of Agronomy & Soil Science Society of America Publisher, Wisconsin, USA.
- Pierce, M.L. and Moore, C.B. 1980. Adsorption of Arsenic on Amorphous Iron Hydroxide from Dilute Aqueous Solution. Environ. Sci. Technol. 14, 214-216.
- Ricou, P., Hequet, V., Lecuyer, I. and Le Clorirec, P. 1999. Influence of Operating Condition on Heavy Metal Cation Removal by Fly Ash in Aqueous Solutions. In international Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, pp. 42 .
- Sabine, G. 2002. Competitive Adsorption of Arsenate Arsenite on Oxide and Clay Minerals. Soil. Sci. Soc. Am. J., 66, 413-421.

- Schuliger, W.G. 1978. Purification of Industrial Liquids with Granular Activated Carbon: Techniques for Obtaining and Interpreting Data and Electing the Type of Commercial System. In Carbon Adsorption. pp. 56-58.
- Wilson, F.H. and Hawkin, D.B. 1987. Arsenic in Stream Sediments and Groundwater (Fairbank Area Alaska). Environ. Geo. 2, 195-202.