



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์ใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

Application of Iron - Oxide Coated Volcanic Rock for Arsenic Removal
from Surface Water

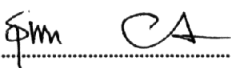
นามผู้วิจัย นางสาวพัฒนรัชดา ทองขาว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

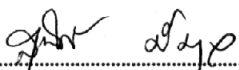
ประธานกรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ดวงเคื่อน, วท.ม.)

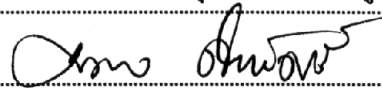
กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, M.Eng)

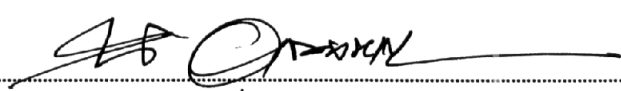
กรรมการ

( รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

( อาจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 19 เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๘

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

Application of Iron - Oxide Coated Volcanic Rock for Arsenic Removal from Surface Water

โดย

นางสาวพัฒนรัชดา ทองขาว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2548

ISBN 974-16-1032-7

พัฒนธิดา ทองขาว 2548: การประยุกต์ใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัด
สารหนูในน้ำผิวดิน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ปรธานกรรมการที่ปรึกษา:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญญา ดวงเดือน, วท.ม. 132 หน้า

ISBN 974-16-1032-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำโดยใช้หินภูเขาไฟและหิน
ภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นสารดูดซับ การทดลองแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ (1) ศึกษาปัจจัย
ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนูในน้ำสังเคราะห์โดยการทดลองแบบทีละเท (2) ศึกษา
เปรียบเทียบประสิทธิภาพ การกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
ในน้ำสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดซับแบบคอลัมน์ ใช้อัตราการกรองและ
ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน (3) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน (4)
ศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดซับ

จากผลการศึกษา พบว่าการเคลือบผิวหินภูเขาไฟด้วยเหล็กออกไซด์ทำให้มีประสิทธิภาพ
การดูดซับสารหนูเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารหนูคือ 7-8 เวลาสัมผัส
ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่จุดสมดุลคือ 4 ชั่วโมง ในการทดลองเดิน
ระบบแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารหนูในน้ำสังเคราะห์เริ่มต้น 1.05 มก./ล.
อัตราการกรองที่ใช้สำหรับหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์คือ 0.1 และ 0.4 ลบ.
ม./ตร.ม.-ชม.ตามลำดับ สารดูดซับทั้งสองมีประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนูมากกว่า 95%
(ปริมาณสารหนูไม่เกิน 0.05 มก./ล. อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค) และเมื่อ
ทดลองกับน้ำผิวดินที่มีความเข้มข้นสารหนู 0.311 มก./ล. พบว่าหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบ
เหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูสูง คือ 96.60 และ 99.85% ตามลำดับ ผลของการ
ฟื้นฟูประสิทธิภาพหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยใช้สารละลายโซเดียม
ไฮดรอกไซด์ในรอบการทำงาน 3 รอบ พบว่าหินภูเขาไฟไม่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ดูดซับ
สารหนูอีก เนื่องจากปริมาณสารหนูในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ
เพื่อการบริโภค แต่หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ภายหลังการฟื้นฟูประสิทธิภาพสามารถนำ
กลับมาใช้งานใหม่ได้ทั้ง 3 รอบการทำงาน

พัฒนธิดา ทองขาว

ลายมือชื่อนิติ



ลายมือชื่อประธานกรรมการ

30 / พ.ย. / 48

Pattida Thongkaow 2005: Application of Iron-Oxide Coated Volcanic Rock for Arsenic Removal from Surface Water. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Utchara Duangdeun, M.Sc. 132 pages. ISBN 974-16-1032-7

This research studied the efficiency of arsenic removal from water by volcanic rock (VR) and iron-oxide coated volcanic rock (IOCVR) as adsorbents. The experiments were performed in 4 steps. The first step was to study optimum parameters for arsenic adsorption in synthetic water by batch experiments. The second step was to compare the efficiency of arsenic removal with VR and IOCVR from synthetic water in an adsorber. The different filtration rates and initial arsenic concentrations were studied. The third step was to study the arsenic removal efficiency from surface water and the final step was to study regeneration of VR and IOCVR.

The results showed that the volcanic rock coated with iron-oxide provided higher effective in removal arsenic than the volcanic rock without coating. The optimum pH for arsenic adsorption was 7-8. The contact time at equilibrium for both adsorbents were 4 hours. The continuous experiments for 24 hours were conducted with the initial arsenic concentration of synthetic water of 1.05 mg/l, and filtration rates of 0.1 and 0.4 m³/m²-hr for VR and IOCVR, respectively. The removal efficiencies of both adsorbents were more than 95% (arsenic concentration not more than 0.05 mg/l). For the surface water with 0.311 mg/l of arsenic concentration, the efficiencies of VR and IOCVR were found at 96.60 and 99.85%, respectively. The results of regeneration adsorbents with sodium hydroxide in 3 working cycles were found that VR cannot be reused because arsenic still remains in the effluent more than 0.05 mg/l while regenerated IOCVR can be reused after 3 cycles.

Pattida Thongkaow

Student's signature

Utchara Duangdeun

Thesis Advisor's signature

30 /Nov/ 2005

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ดวงเดือน ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง และรองศาสตราจารย์ธีรธร อัสวรจนาพันธ์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์และสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่างๆ ขอขอบคุณคุณเจนวิทย์ วงษ์สาณุน และคุณอัศร คำเมือง นักวิชาการและเจ้าหน้าที่ฝ่ายสารพินและของเสียอันตราย ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมเทคโนโลยี จ.ปทุมธานี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือเพื่อทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่เป็ก พี่บี๊ต รวิ หนู ดาวและเพื่อนๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณย่า คุณลุง คุณป้าและญาติพี่น้องทุกคนที่ได้ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือและโอกาสที่ดีในการศึกษาเล่าเรียนจนประสบความสำเร็จจนถึงทุกวันนี้ และขอบคุณน้องบิวและน้องเมที่ช่วยดูแลและให้กำลังใจเป็นอย่างดีจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ หากวิทยานิพนธ์นี้มีความดีและก่อให้เกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดีทั้งปวงให้แก่มนุษย์ทุกคนที่มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จได้ด้วยดี

พัฒนัธิดา ทองขาว

ตุลาคม 2548

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงานวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	4
สารหนู	4
มาตรการควบคุมและกระบวนการกำจัดสารหนู	12
หินภูเขาไฟ	14
การดูดติดผิว	16
การแลกเปลี่ยนไอออน	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการทดลอง	34
ผลและการวิจารณ์	55
การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดติดผิว	55
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารหนูในน้ำสังเคราะห์	58
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์โดยการทดสอบ	65
แบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (adsorption column)	
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน	76
การศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพ	81
การประเมินค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารหนูของสารดูดติดผิว	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สรุปและข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ภาคผนวก	91

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการศึกษาคณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	55
2	ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหินภูเขาไฟและ หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	57
3	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างกัน	58
4	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างกัน	61
5	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟและ หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน	66
6	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	69
7	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตรา การกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	70
8	อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	75
9	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดิน	76
10	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	78
11	เปรียบเทียบคุณภาพน้ำผิวดินก่อนและหลังการดูดซับด้วยหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	80
12	อายุการใช้งานและปริมาณน้ำที่บำบัดได้ของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ	82
13	การประเมินค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารหนู	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างกัน 92
2	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ 93
3	ผลการทดลอง Adsorption Isotherm ของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ 94
4	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.05 มก./ล.) 96
5	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.05 มก./ล.) 101
6	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.8 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.05 มก./ล.) 106
7	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.54 มก./ล. (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ) 109
8	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.05 มก./ล. (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ) 115
9	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5.12 มก./ล. (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ) 120
10	ประสิทธิภาพของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่าน การฟื้นฟูประสิทธิภาพ 124
11	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.311 มก./ล. (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ) 127

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ	6
2	การกระจายแต่ละสปีชีส์ของ As^{3+} และ As^{5+} ในแหล่งน้ำธรรมชาติกับค่าพีเอช	8
3	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์	17
4	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน	18
5	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (freundlich isotherm)	19
6	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ (langmuir isotherm)	21
7	การเคลื่อนตัวของ adsorption zone สำหรับชั้นสารดูดติดผิวที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย	24
8	การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่าง $H_2PO_4^-$ กับหมู่ -OH บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์	27
9	แผนภาพการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์	38
10	แผนภาพการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์	39
11	แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดติดผิว	40
12	แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์เมื่อให้อัตราการกรองของสารดูดติดผิวแตกต่างกัน	42
13	แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์แตกต่างกัน	44
14	แผนภาพการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์	46
15	แผนภาพการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	48
16	แผนภาพการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	แผนภาพการศึกษาการฟื้นฟูอำนาจของสารดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพหลังจากใช้กำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์	52
18	ส่วนประกอบของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง	53
19	ลักษณะภายนอกและรูปทรงของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	56
20	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์กับค่าพีเอช	59
21	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์กับเวลาสัมผัส	61
22	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิกซ์ของหินภูเขาไฟ	63
23	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	63
24	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของสารดูดติดผิวเมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน	67
25	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	72
26	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	72
27	อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	74
28	อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน	74
29	อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน	79
30	อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ก.	=	กรัม
ก./ลบ.ซม.	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ซม.	=	ชั่วโมง
ซม.	=	เซนติเมตร
ตร.ซม.	=	ตารางเซนติเมตร
ตร.ม.	=	ตารางเมตร
ตร.ม./ก.	=	ตารางเมตรต่อกรัม
มก./ก.	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
มก./กก.	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มก./ลบ.ม	=	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
มล.	=	มิลลิลิตร
มล./นาที่	=	มิลลิลิตรต่อนาที
ลบ.ม./ตร.ม.-ซม.	=	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง
µg/l	=	ไมโครกรัม/ลิตร
VR	=	Volcanic Rock (หินภูเขาไฟ)
IOCVR	=	Iron-Oxide Coated Volcanic Rock (หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์)

การประยุกต์ใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

Application of Iron - Oxide Coated Volcanic Rock for Arsenic Removal from Surface Water

คำนำ

ปัจจุบันประชาชนในบางพื้นที่ยังต้องใช้แหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับการอุปโภคและบริโภค แต่พบว่ามีแหล่งน้ำหลายแห่งที่มีการปนเปื้อนจากโลหะ ซึ่งมีความเป็นพิษอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้ การปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อมจัดเป็นปัญหาสำคัญ สาเหตุเกิดจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์จากกิจกรรมด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทำให้สารหนูปนเปื้อนสู่พื้นดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ ประเทศที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของสารหนู ได้แก่ บังคลาเทศ อินเดีย จีน ไต้หวัน ซิลิ รวมทั้งประเทศไทยก็พบปัญหาที่เกิดจากการปนเปื้อนของสารหนูในแหล่งน้ำเช่นกัน ในพื้นที่อำเภอธนบุรี จังหวัดนครราชสีมา เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ดีบุกและมีแร่อาร์เซนไฟไรต์ปะปนอยู่ พบว่ายังมีการปนเปื้อนของสารหนูอย่างต่อเนื่องและมีระดับความเข้มข้นของสารหนูสูงจนถึงปัจจุบัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

สารหนูเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง ซึ่งก่อให้เกิดอาการต่างๆ เช่น อักเสบ อาเจียน ปวดท้อง ชักกระตุก ระบายท้องเกิดเป็นตุ่มแฉกสีพองซึ่งเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งผิวหนัง วิธีการกำจัดสารหนูในน้ำที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ การตกตะกอนด้วยเกลือของเหล็กและสารส้ม การดูดซับ การออกซิเดชันและการกรองผ่านทรายเคลือบแมงกานีส อย่างไรก็ตาม การเลือกวิธีการกำจัดสารหนูจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและค่าใช้จ่ายด้วย เพื่อให้มีวิธีการกำจัดสารหนูในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการดูดซับโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสารดูดซับได้โดยการเคลือบผิววัสดุด้วยโลหะออกไซด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้นำหินภูเขาไฟมาใช้เป็นสารดูดซับเพื่อกำจัดสารหนูในน้ำ และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพให้หินภูเขาไฟด้วยการเคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งคาดว่าจะช่วยทำให้หินภูเขาไฟมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้มากขึ้นกว่าเดิม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารหนูในน้ำโดยใช้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และน้ำผิวดิน โดยใช้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
3. เพื่อศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่

ขอบเขตงานวิจัย

1. น้ำตัวอย่าง คือน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ (As^{5+}) และน้ำผิวดินที่มีสารหนูปนเปื้อนจากอำเภอรัตนัญญ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
2. สารดูดซับ คือหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์จากอำเภอลำราญ จังหวัดลพบุรี และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เตรียมขึ้นโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกไนเตรท ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) ตามวิธีการของ Edward and Benjamin (1989)
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณสารดูดซับที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบทีละเท (batch)
4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และน้ำผิวดินจากแหล่งธรรมชาติด้วยการทดสอบแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดซับแบบคอลัมน์
5. ถังดูดซับแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สูง 100 ซม.
6. กำหนดให้มีระดับความสูงของสารดูดซับในคอลัมน์ 40 ซม.

7. อัตราการกรองที่ใช้ในการศึกษา คือ 0.1, 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
8. ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษา คือ 0.5, 1.0 และ 5.0 มก./ล.
9. สารเคมีที่ใช้ฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดซับคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การตรวจเอกสาร

1. สารหนู

1.1 คุณสมบัติทั่วไปของสารหนู (arsenic)

สารหนูที่พบในธรรมชาติ มักพบในรูปของสารประกอบอาร์เซไนต์ หรือซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว เงิน และทอง โดยพบในรูปของแร่อาร์เซโนไฟไรต์ (FeAsS) รีอัลการ์ (As_4S_4) และออร์พิเมนต์ (As_2S_3) หรืออาจพบในรูปสารประกอบออกไซด์ ในตารางธาตุสัญลักษณ์ของสารหนูคือ As เป็นธาตุหมู่ 5 เลขอะตอม 33 มีน้ำหนักอะตอม 74.9216 สารหนูมีสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ สารหนูแสดงประจุได้หลายค่าคือ +3, +5, 0 และ -3 แต่ส่วนใหญ่จะพบในรูปอาร์เซไนต์ (arsenite, As^{3+}) หรืออาร์เซเนต (arsenate, As^{5+}) สารหนูมีความถ่วงจำเพาะ 2.0 – 5.7 จุดเดือด 616 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท

1.2 ประเภทของสารหนู แบ่งออกเป็น 4 ประเภท (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541; Fergusson, 1989 และ Norman, 1998)

1.2.1 ประเภทโลหะ (element or metallic arsenic, As_4) เกิดจากการหลอมอาร์เซโนไฟไรต์ (FeAsS) หรือโลลินไจด์ (FeAs_2) ที่อุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจนจะเกิดโลหะสารหนู (As_4) ที่เป็นของแข็งหรือผงไม่ละลายน้ำ มี 3 ชนิด

ก. ของแข็งสีเทา (metallic arsenic) ไม่ละลายน้ำ มีจุดหลอมละลาย 817 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกหรือกรดซัลฟิวริกร้อน เมื่อเผาจะให้เปลวไฟสีน้ำเงินและควันสีขาวของอาร์เซนิคไดรอกไซด์ (As_2O_3) มีกลิ่นคล้ายกระเทียม

ข. ของแข็งสีเหลือง (yellow arsenic) เกิดจากการหลอมอาร์เซนิคไดรอกไซด์ร่วมกับซัลไฟต์ ไม่เสถียรเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งสีเทาได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน

ค. แอมมอร์ฟัสอาร์เซนิค (amorphous arsenic) เป็นสารที่มีรูปผลึกไม่แน่นอน มีสีดำ สามารถเปลี่ยนไปเป็นของแข็งสีเทาได้ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

1.2.2 ประเภทสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic arsenic compounds) ได้แก่

ก. อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As_2O_3) มีน้ำหนักโมเลกุล 197.82 ความถ่วงจำเพาะ 3.74 - 4.15 จุดเดือด 465 องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากการถลุงโลหะอาร์เซนิกหรือแร่กำมะถัน หรือการถลุงแร่ทองแดงและตะกั่วที่มีสารหนูประกอบอยู่ เมื่อโลหะหรือแร่นี้ถูกเผาที่อุณหภูมิ 650 – 670 องศาเซลเซียส ไอระเหยจากการเผาจะจับตัวตามผนังปล่องไฟเป็นผงสีขาวคืออาร์เซนิกไตรออกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะได้กรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) นอกจากนี้ยังละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริกและด่าง

ข. อาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (arsenic pentoxide, As_2O_5) น้ำหนักโมเลกุล 229.82 ความถ่วงจำเพาะ 4.08 จุดหลอมละลาย 315 องศาเซลเซียส เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซนิกไตรออกไซด์กับกรดไนตริก เมื่อนำสารละลายนี้ไประเหยแล้วนำส่วนที่เหลือเจดน้ำออกจะได้ผลึกสีขาวของอาร์เซนิกเพนทอกไซด์ ละลายน้ำได้ดีกว่าอาร์เซนิกไตรออกไซด์ซึ่งจะได้กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) และละลายได้ดีในแอลกอฮอล์

ค. อาร์เซไนต์ (arsenite, MH_2AsO_3 , M_2HAsO_3 และ M_2AsO_3) เมื่อ M คือกลุ่มไอออนของโลหะที่มีวาเลนซ์ 1 เกือบอาร์เซไนต์ที่สำคัญ ได้แก่ ตะกั่วอาร์เซไนต์ (lead arsenite, $\text{Pb}(\text{AsO}_2)_2$) และโซเดียมอาร์เซไนต์ (sodium arsenite, NaAsO_2) เป็นต้น

ง. อาร์เซเนต (arsenates, $\text{M}_3(\text{AsO}_4)_2$) เกือบอาร์เซเนตที่สำคัญคือ แคลเซียมอาร์เซเนต (calcium arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$) และตะกั่วอาร์เซเนต (lead arsenate, PbHAsO_4)

จ. อาร์เซนิกเฮไลด์ (halide of arsenic) โดยทั่วไปไม่พบในธรรมชาติ แต่พบในการวิเคราะห์ทางเคมี สารประกอบที่สำคัญ เช่น อาร์เซนิกคลอไรด์ (AsCl_3) อาร์เซนิกโบรไมด์ (AsBr_3) และอาร์เซนิกฟลูออไรด์ (AsF_3)

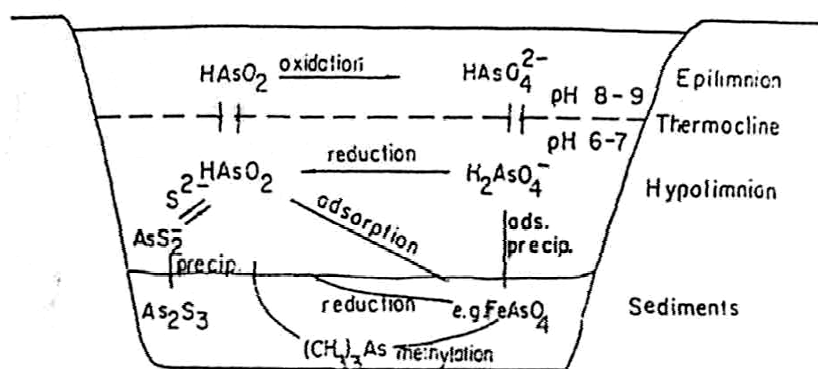
1.2.3 ประเภทสารประกอบอินทรีย์ (organic arsenic compound) ได้แก่ กรดมีเทนอาร์โซนิค (methanearsonic acid) และไตรเมทิลอาร์ซีน (trimethylarsine) ส่วนกลุ่มอนุพันธ์ของสารหนูประเภทสารอะโรมาติกใช้เป็นสารเติมในอาหารสัตว์และยาฆ่าโรคสัตว์ เช่น 3-nitro-4-hydroxy-phenylarsonic acid นอกจากนี้ยังใช้สารหนูเป็นยาฆ่าโรคสำหรับมนุษย์ด้วย เช่น กรดอาร์เซนิลิก (*p*-arsenilic acid) ใช้เป็นยานอนหลับและคาร์บาโซน (carbasone) เป็นยาฆ่าโรคเรื้อน

1.2.4 ประเภทก๊าซ สารหนูอยู่ในรูปของก๊าซอาร์ซีน (arsine or arsenic hydride, AsH_3) เกิดขึ้นเมื่ออาร์เซนิกทำปฏิกิริยากับน้ำ ก๊าซนี้มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง

1.3 วัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ

สารหนูที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) ได้แก่ As(OH)_3 , As(OH)_4^- และ AsO_3^{3-} และในรูปของอาร์เซเนต (As^{5+}) ได้แก่ AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} และ H_2AsO_4^-

ปฏิกิริยาของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เกิดขึ้นประกอบด้วยการเคลื่อนย้ายสารหนูระหว่างสภาวะที่อยู่ในรูปสารละลายและของแข็ง การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่มีเลขออกซิเดชันค่าหนึ่งไปอยู่ในรูปออกซิเดชันอีกค่าหนึ่ง และมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 1 (Ferguson and Gavis, 1972)



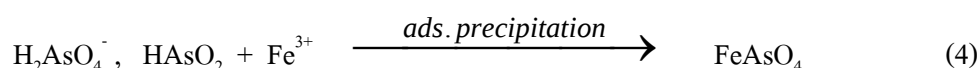
ภาพที่ 1 วัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ

ที่มา: Ferguson and Gavis (1972)

ในชั้นน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่มาก (epilimnion) สารหนูจะอยู่ในรูปสารประกอบอาร์เซเนต (As^{5+}) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดไอออนสารหนูประจุลบ 2 ค่า ถ้าค่าพีเอชของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 6 – 7 จะอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- และค่าพีเอชของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 8 – 9 จะอยู่ในรูปของ HAsO_4^{2-} ดังสมการที่ 1 ถ้าในน้ำมีตะกอนและความขุ่นมากจะสามารถตรึงสารประกอบอาร์เซเนตบางส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและจมลงสู่ชั้นน้ำที่ไม่มีออกซิเจน ดังนั้นสารประกอบอาร์เซเนตจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็นสารประกอบอาร์เซไนต์ ดังสมการที่ 2



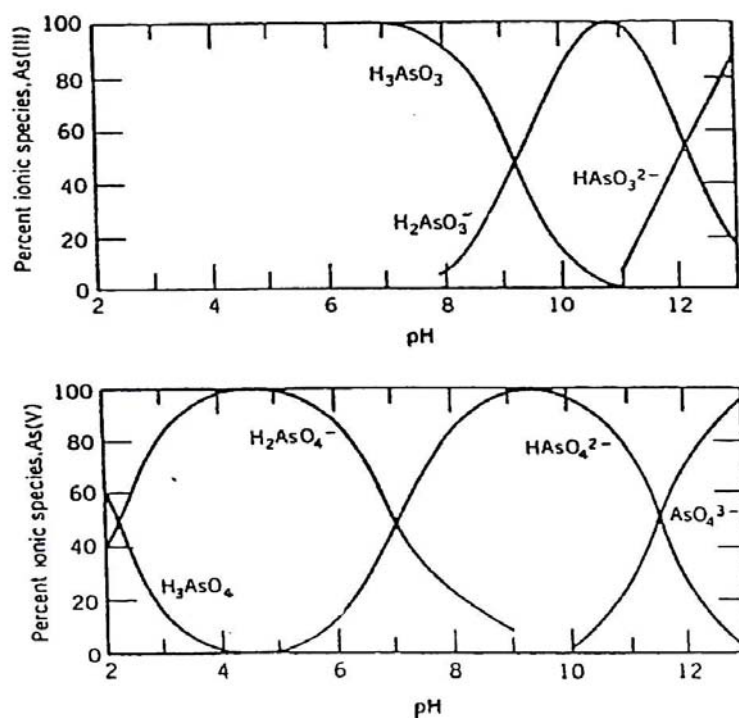
ถ้าในน้ำมีกำมะถันเพียงพอ มีค่าพีเอชและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ที่เหมาะสม สารประกอบอาร์เซไนต์จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดตะกอนในรูปของ As_2S_3 ตกลงสู่ท้องน้ำได้ ส่วน H_2AsO_4^- และ HAsO_2 ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถันจะเกิดการดูดติดผิวกับไอออนของเหล็กซึ่งจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเฟอร์รัสอาร์เซเนต แสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ 3 และ 4



สำหรับชั้นตะกอนท้องน้ำ (sediment) สิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนสารหนูในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (FeAsO_4) ได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ เกิดเป็นสารหนูอินทรีย์ในรูปของสารประกอบของกรดไตรเมทิลอาร์เซนิก $[(\text{CH}_3)_3\text{As}]$ ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอาร์เซเนตถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็นสารประกอบอาร์เซไนต์ ก่อนที่จะมีการเติมหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) อย่างไรก็ตามสารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียออกซิไดส์และดึงหมู่เมทิลออก (demethylation) ให้กลับไปอยู่ในรูปของสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ได้

สารหนูในน้ำจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ที่เป็นแอนไอออนและเป็นกรด ซึ่งเกิดจากการละลายน้ำของสารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปของแข็ง สารหนูในน้ำจะมีความสัมพันธ์ทางเคมีกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน การตกผลึก การดูดติดผิวหรือทั้งหมด

Ferguson and Gavis (1972) เสนอการกระจายของสารหนูในแต่ละสปีชีส์ของ As^{3+} และ As^{5+} ในแหล่งน้ำธรรมชาติกับค่าพีเอช แสดงดังภาพที่ 2 โดยกรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) เป็นกรดอ่อนแตกตัวได้ต่ำและพบได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงค่าพีเอช 2-9 ในขณะที่กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) พบในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี พบ HAsO_4^{2-} ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 7-11.5 และ H_2AsO_4^- พบได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 3-7



ภาพที่ 2 การกระจายแต่ละสปีชีส์ของ As^{3+} และ As^{5+} ในแหล่งน้ำธรรมชาติกับค่าพีเอช

ที่มา: Ferguson and Gavis (1972)

1.4 การใช้ประโยชน์ของสารหนู สารหนูถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

- 1.4.1 ทางด้านเกษตรกรรม เช่น สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง สารกำจัดวัชพืช สารรักษาเนื้อไม้และเนื้อดิน ผสมในอาหารสัตว์
- 1.4.2 ทางด้านปศุสัตว์ เช่น สารช่วยป้องกันโรคพยาธิหัวใจ และโรคบิดในสุกร
- 1.4.3 ทางด้านการแพทย์ เช่น ใช้รักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัวและพยาธิบางชนิด ผสมในยาปฏิชีวนะ โลหะอัลลอยด์ในการผ่าตัด
- 1.4.4 ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ประยุกต์ใช้ในเซมิคอนดักเตอร์ ไดโอดเรืองแสง
- 1.4.5 ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น เครื่องแก้ว สบู่ ผลิตภัณฑ์เร่งปฏิกิริยาเคมี (catalysts) สีกันเชื้อรา และสีย้อมผ้า

1.5 การแพร่กระจายสารหนูสู่สิ่งแวดล้อม

- 1.5.1 จากแหล่งธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกหรือจากก๊าซของภูเขาไฟ ซึ่งสารหนูจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อม และจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกคาดว่ามีการปนเปื้อนจากแหล่งธรรมชาติประมาณปีละ 72,000 ตันในรูปของอาร์เซนัสออกไซด์
- 1.5.2 จากกิจกรรมการเกษตร เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร (pesticide) และการใช้ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate) ซึ่งในปุ๋ยประกอบด้วยสารหนูประมาณ 1% การใช้ยาฆ่าแมลงที่สำคัญคือ ตะกั่วอาร์เซเนตซึ่งทำให้สารหนูปนเปื้อนในดิน โดยเฉพาะดินสวนผลไม้ นอกจากนั้นสารหนูบางส่วนจะถูกพืชดูดซับเข้าไป บางส่วนปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู
- 1.5.3 จากกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานถลุงโลหะ และโรงงานปุ๋ยไนโตรเจน เป็นต้น

ในสิ่งแวดล้อมนั้นพบสารหนูกระจายอยู่ทั่วไปทั้งในหิน ดิน อากาศ และแหล่งน้ำธรรมชาติ บริเวณพื้นเปลือกโลกพบปริมาณสารหนูประมาณ 1.5–2 มก./กก. ซึ่งนับว่ามีมากเป็นอันดับที่ 20 เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบในถ่านหิน ในดินมีสารหนูประมาณ 0.2–0.4 มก./กก. จากรายงานการสำรวจดินพบว่าในบางพื้นที่พบสารหนูในปริมาณสูง เช่น ประเทศชิลี พบ

สารหนู 3.2 มก./กก. และประเทศเม็กซิโกพบสารหนูในผิวน้ำดิน 3–9 มก./กก. และดินในระดับที่ลึกลงไปพบสารหนูมากกว่า 20 มก./กก. ตะกอนดินธรรมชาติปริมาณสารหนูที่พบมีค่าน้อยกว่า 10 มก./กก. (น้ำหนักแห้ง) ส่วนตะกอนดินบริเวณที่มีการปนเปื้อน เช่น บริเวณถลุงแร่ทองแดงในสหรัฐอเมริกา พบว่ามีสารหนูสูงถึง 10,000 มก./กก. (น้ำหนักแห้ง) (IRPTC, 1978)

ในอากาศอนุภาคสารหนูมีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในบริเวณที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าต่ำมาก น้อยกว่า 1–2 มก./ลบ.ม. ส่วนบริเวณที่ใกล้กับแหล่งถลุงแร่ทองแดงและตะกั่ว ปริมาณสารหนูในบรรยากาศที่วัดได้มีค่ามากกว่า 1 มก./ลบ.ม. เช่น เมืองวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกาตรวจวัดตลอดเดือนมีค่าเฉลี่ย 1.4 มก./ลบ.ม. และประเทศรัสเซียตรวจวัดได้ 0.7–2.5 มก./ลบ.ม. (IRPTC, 1982)

สารหนูในน้ำมีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ รูปอนินทรีย์ ได้แก่ อาร์เซไนต์ และอาร์เซเนต ส่วนในรูปสารอินทรีย์พบได้น้อยกว่า เช่น สารประกอบเมทิลอาร์เซนิค และสารประกอบไดเมทิลอาร์เซนิค โดยทั่วไปปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำผิวดินมีค่าต่ำ รายงานการสำรวจคุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีน ปี พ.ศ. 2525 ของกองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม พบปริมาณสารหนูเฉลี่ยตลอดทั้งปีมีค่าเท่ากับ 1.2–6.8 ไมโครกรัม/ลิตร แต่จากรายงานการสำรวจคุณภาพน้ำผิวดิน อำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่ามีการปนเปื้อนของสารหนูเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินคือ 0.01 มก./ล. โดยความเข้มข้นสารหนูที่ตรวจพบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.239 มก./ล. (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

ในแหล่งน้ำบริโภคปริมาณความเข้มข้นของสารหนูโดยธรรมชาติ มีค่าแตกต่างกันตามแต่ละแห่ง เช่น การสำรวจบ่อน้ำในเมืองโนวาสกอตเทีย ประเทศแคนาดา ประมาณ 800 บ่อ พบว่า 13% ของบ่อน้ำที่สำรวจมีปริมาณสารหนูเกิน 0.05 มก./ล. เนื่องจากบ่อเหล่านี้ได้รับการปนเปื้อนสารหนูจากเหมืองทอง และพื้นที่ที่มีปัญหาโรคพิษสารหนูเรื้อรัง พบว่ามีสารหนูมากกว่า 1 มก./ล. ในประเทศไทย จากการสำรวจของกรมควบคุมมลพิษ (2541) พบว่าปริมาณสารหนูในน้ำบ่อตื้น ที่อำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ในบางพื้นที่มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคคือ 0.05 มก./ล. โดยความเข้มข้นของสารหนูที่ตรวจพบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.504 มก./ล.

1.6 ความเป็นพิษของสารหนู

กลไกการเกิดพิษของสารหนูในร่างกายขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของสารประกอบสารหนู โดยสารหนูสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ได้แก่

- (1) ทางการหายใจ ได้รับฝุ่น ไอ หรือหมอกควันที่มีสารหนูปนเปื้อนจากการทำงาน
- (2) ทางเดินอาหาร จากการรับประทานอาหารและน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน
- (3) ทางผิวหนัง โดยการสัมผัสเมื่อทำงานหรือจากการสัมผัสเพื่อรักษาโรค

นอกจากนี้การเกิดพิษของสารหนูในร่างกายยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารที่ได้รับ ระยะเวลาที่ได้รับ อายุและเพศ ซึ่งอาร์เซไนต์ (As^{3+}) มีความเป็นพิษรุนแรงกว่าอาร์เซเนต (As^{5+}) โดยทั่วไปพบความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในคนจากอาร์เซเนตมากกว่าอาร์เซไนต์ และถ้าได้รับอาร์เซเนต เข้าสู่ร่างกายเอนไซม์ในร่างกายจะทำให้เกิดขบวนการเปลี่ยนแปลงให้เป็นอาร์เซไนต์ได้ ซึ่งจะเสริม ให้ความเป็นพิษรุนแรงมากขึ้น

สารหนูเป็นสารที่ออกฤทธิ์แบบเฉียบพลันและพิษเรื้อรัง อาการของพิษแบบเฉียบพลัน มักจะเกี่ยวข้องกับเลือด สมอ ห้วใจ ไต และระบบทางเดินอาหาร ได้แก่ ระบายท้อง อักเสบ มีแผล พุพองที่เนื้อเยื่อและผิวหนัง อาเจียน ระบายน้ำมาก ปวดท้อง ไตถูกทำลาย ชักกระตุก และตายได้ ส่วนการเกิดพิษแบบเรื้อรังจะเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ผิวหนังและระบบประสาทส่วนปลาย ได้แก่ อาการเมื่อยล้า อ่อนเพลีย ปากอักเสบ ระบบทางเดินอาหารปั่นป่วน ผิวหนังส่วนข้อพับพุพอง มีจุดสี ดำเห็นได้ชัดเจนบริเวณท้องแขนและขา ผิวหนังตกสะเก็ด เส้นผมหยาบ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาตและ หดลีบ มองเห็นไม่ชัดอาจรุนแรงถึงตาบอด มีความผิดปกติทางสมอง หากสัมผัสสารหนูเป็นเวลานานติดต่อกัน จะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองตรงบริเวณที่สัมผัส เกิดเป็นตุ่มแข็งใสพองเป็นสาเหตุ ของมะเร็งผิวหนัง หากหายใจเอาสารหนูเข้าไปจะเกิดการสะสมที่ปอด ในกรณีที่สารหนูเข้าสู่ระบบ ไหลเวียนโลหิตจะทำให้เกิดการเบื่ออาหาร โลหิตจาง เกิดเป็นมะเร็งในตับและไตได้

สำหรับอาการแสดงพิษจากก๊าซอาร์ซีน (AsH_3) จะมีอาการแตกต่างจากพิษของสารหนู ที่ได้กล่าวมาแล้วคือ หลังจากได้รับก๊าซอาร์ซีน 2-24 ชั่วโมงจะแสดงอาการทันที เช่น คลื่นไส้ ปวด ท้องบริเวณลำไส้ใหญ่ อาเจียน หายใจติดขัด มีการแตกตัวของเม็ดเลือด หากได้รับก๊าซอาร์ซีนใน ปริมาณมากจะทำให้ตายในทันทีโดยไม่มีอาการแสดงพิษอื่นๆ อาการแสดงร่วมของความเป็นพิษ ทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรังคือ พบเส้นลายขวางสีขาวที่เล็บ (Mee's lines) พบเซลล์ผิวหนังหนา บริเวณฝ่ามือ หน้าแดง และเหงื่อออก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

2. มาตรการควบคุมและกระบวนการกำจัดสารหนู

มาตรการที่ใช้ควบคุมปริมาณสารหนู คือเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำต่างๆ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามแต่ละประเภทของน้ำ เช่น มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกระทรวงสาธารณสุขและมาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดปริมาณสารหนูที่ยอมรับให้มีค่าไม่เกิน 0.05 มก./ล. มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.25 มก./ล. เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้นจึงควรมีวิธีการที่ใช้กำจัดสารหนูในน้ำที่มีความเหมาะสม

วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดสารหนูในน้ำโดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีทางเคมีและฟิสิกส์ ได้แก่

2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการนี้กำจัดสารหนูซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ด้วยการใช้เกลือของอะลูมิเนียมหรือเหล็ก ปูนขาวหรือสารส้ม โดยสารหนูจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับอนุภาคของสารประกอบดังกล่าว เกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์แล้วจึงตกตะกอนสารหนูจึงถูกกำจัดออกจากน้ำ การโคแอกกูเลชันด้วยเกลือของเหล็กและสารส้มเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมทั้งด้านเทคโนโลยีและราคา แต่อย่างไรก็ตามอาจมีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน

สมศักดิ์ (2532) ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการลดปริมาณสารหนูในน้ำโดยใช้สารส้มและปูนขาว พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มคือ 6.5-7.0 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมากกว่า 90% ในขณะที่ปูนขาวมีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 11.0-11.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู 80.2% และการศึกษาของ Irkayama (1971) ใช้สารเฟอริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ พบว่าที่ค่าพีเอช 10.3 มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูถึง 98%

2.2 กระบวนการออกซิเดชันและการกรอง

กระบวนการออกซิเดชันมีความสำคัญในการออกซิไดส์ As^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น As^{5+} สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซคลอรีน โอโซน สารประกอบไฮโปคลอไรต์ สารประกอบเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น ก๊าซคลอรีนและสารประกอบไฮโปคลอไรต์มีการใช้กันทั่วไปเนื่องจากใช้ง่ายและมีราคาถูก

แต่จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำจะทำให้เกิดสารประกอบฮาโลมีเทน ซึ่งมีความเป็นพิษ สำหรับวิธีการกรอง ได้แก่ การกรองผ่านทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์

2.3 กระบวนการดูดติดผิว

การกำจัดสารหนูโดยดูดติดผิวด้วยแอคติเวตเต็ดอะลูมินา หรือแอคติเวตเต็ดคาร์บอน พบว่าเหมาะสมสำหรับระบบขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีราคาแพง และมีข้อเสียคือการฟื้นฟูสภาพแต่ละครั้งทำให้สารดูดติดผิวมีความสามารถในการดูดติดผิวลดลง ดังนั้นจึงควรหาวัสดุดูดติดผิวที่มีราคาเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้

Dikshit (2000) นำทางแร่คิมเบอร์ไรต์มาใช้ดูดติดผิวสารหนูในน้ำ พบว่าสามารถดูดติดผิวสารหนูได้ 0.25 มก./ก. ซึ่งประสิทธิภาพการดูดติดผิวสารหนูจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง และการทดลองบำบัดน้ำได้ดินที่ปนเปื้อน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูงถึง 90-94% และ Bellack (1971) พบว่าการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลความเข้มข้น 0.106 มก./ล. โดยผ่านคอลัมน์แอคติเวตเต็ดอะลูมินาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.5 มม. ให้ความสูงตัวกลาง 25 ซม. ที่อัตราการไหล 20 มล./นาทิจ สามารถกำจัดสารหนูในน้ำให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลกคือปริมาณสารหนูไม่เกิน 0.05 มก./ล. ได้

2.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการนี้เหมาะสมกับระบบที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพดี แต่จะมีราคาสูง เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสามารถดูดซับสารไอออนประจุลบอื่นๆในน้ำได้ จึงทำให้มีอายุการใช้งานและประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูน้อยลง วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับน้ำที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมากกว่า 500 มก./ล. หรือมีซัลเฟตมากกว่า 2.5 มก./ล. และจะต้องออกซิไดส์ As^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น As^{5+} ก่อน ข้อดีคือไม่ต้องปรับค่าพีเอชของน้ำดิบและใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการชะล้างสารหนูออกจากคอลัมน์ได้

3. หินภูเขาไฟ

หินภูเขาไฟ (volcanic rock) เป็นหินอัคนีที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น ทำให้หินหนืดได้พื้นโลกแทรกตัวขึ้นมาบนผิวโลก เมื่อเย็นตัวจึงกลายเป็นหินที่มีเนื้อละเอียด มีองค์ประกอบของแร่เล็กๆมากและมีความโปร่งพรุน หินภูเขาไฟพบมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ ส่วนประเทศไทยพบที่จังหวัดลพบุรี นครราชสีมา เพชรบูรณ์ ศรีสะเกษ สุรินทร์ ลำปาง เชียงใหม่ เชียงราย ตราด และจันทบุรี แหล่งที่พบมาก คือบริเวณอำเภอลำานารายณ์ จังหวัดลพบุรี เรียกว่าแร่กลุ่มภูเขาไฟลำานารายณ์ซึ่งเป็นหินที่อยู่ในยุคเทอเชียรีซึ่งมีอายุอยู่ในช่วง 65 - 1.65 ล้านปี (นิคม, 2538)

3.1 การเกิดหินภูเขาไฟ

หินภูเขาไฟสามารถแบ่งตามลักษณะของแหล่งกำเนิดเป็น 3 ประเภท ได้แก่

3.1.1 การเกิดหินภูเขาไฟในท้องสมุทร ประกอบด้วยหินภูเขาไฟที่เกิดจากการไหลของลาวาออกมาจากสันเขาใต้มหาสมุทรและหินภูเขาไฟที่เกิดตามเกาะภูเขาไฟต่างๆ ในมหาสมุทร

3.1.2 การเกิดหินภูเขาไฟในบริเวณเทือกเขาและแนวหมู่เกาะโค้ง เกิดจากการถูกบีบอัด (compression) การถูกแปรสภาพด้วยความร้อนและความดัน (metamorphism) และการยกตัวขึ้นของตะกอนทะเล (marine sediments) ที่สะสมกันอยู่ในแอ่งสะสมตะกอนตามขอบของทวีป

3.1.3 การเกิดหินภูเขาไฟในทวีป มีลักษณะการเกิดคล้ายกับการเกิดหินภูเขาไฟในท้องมหาสมุทร การเกิดหินภูเขาไฟในทวีปมี 2 แบบ คือ การเกิดหินภูเขาไฟในบริเวณที่ราบสูง ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของหินหนืดออกมาตามรอยแยกบนทวีป หินที่ได้จากการเย็นตัวของลาวาจะเป็นหินบะซอลต์ชนิดโทเลอइट และการเกิดหินภูเขาไฟในบริเวณหุบเขาทรุด

3.2 ประเภทของหินภูเขาไฟ

หินภูเขาไฟสามารถจำแนกเป็น 4 ประเภทใหญ่ คือ ไรโอไลต์ (rhyolite), แอนดีไซต์

(andesite), บะซอลต์ (basalt) และหินชิ้นภูเขาไฟ (pyroclastics) หินทั้ง 4 ชนิดนี้สามารถแยกออกจากกันได้โดยใช้องค์ประกอบเชิงแร่ ลักษณะของเนื้อหิน สี แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักและชนิดของหินที่เป็นต้นกำเนิด

3.3 องค์ประกอบของหินภูเขาไฟลำนารายณ์

หินภูเขาไฟลำนารายณ์เป็นหินภูเขาไฟที่มีส่วนประกอบของ basic ไปจนถึงชนิด acid โดยพบว่าหินไรโอไลต์ (rhyolite) จะวางตัวปิดทับชั้นของหินแอนดีไซต์ (andesite) หินบะซอลติกแอนดีไซต์ (basaltic andesite) หินควอร์ตลาไทต์ (quartz latite) และหินควอร์ตแทรไคต์ (quartz trachyte) นอกจากนั้นยังพบว่าบริเวณที่ราบตอนเหนือ และด้านตะวันออกของพื้นที่มีหินบะซอลต์ไหลปกคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างซึ่งเป็นปฏิกิริยาจากภูเขาไฟที่เกิดหลังสุดของการเกิดหินภูเขาไฟลำนารายณ์ ดังนั้นหินภูเขาไฟลำนารายณ์จึงประกอบด้วยหินแอนดีไซต์ หินบะซอลติกแอนดีไซต์ หินควอร์ตลาไทต์ หินควอร์ตแทรไคต์ และหินไรโอไลต์ ซึ่งหินไรโอไลต์เป็นหินภูเขาไฟที่พบมากที่สุดในกลุ่มหินภูเขาไฟลำนารายณ์ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 300 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วยหิน 5 ชนิด ได้แก่ หินตะกอนภูเขาไฟ (pyroclastic deposits) หินแก้วภูเขาไฟ (perlite) หินไรโอไลต์ (rhyolite flow) หินแกรนิต (microgranite) และหินบะซอลต์ (basalt)

3.4 หินบะซอลต์ (basalt)

หินภูเขาไฟชนิดหินบะซอลต์ เป็นหินภูเขาไฟที่ไหลปกคลุมพื้นที่ราบบริเวณรอบกลุ่มหินภูเขาไฟที่ไหลเป็นเทือกเขา หินบะซอลต์ประกอบด้วยซิลิกาประมาณ 50% เนื้อหินมีลักษณะเป็นโพรงเล็กๆ มีรูพรุนจำนวนมากซึ่งเกิดจากฟองอากาศที่ถูกกักอยู่ในลาวาในขณะที่เกิดการเย็นตัว เนื้อหินละเอียด สีเทาดำ ประกอบด้วยแร่โอลิวีน แร่ไพรอกซีน แร่แพลจิโอเคลส และแร่เหล็ก (นิกม, 2538 และ ศากล, 2538)

4. การดูดซับผิว

การดูดซับผิว (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สถานะ โดยดึงโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โมเลกุลที่เคลื่อน

ย้ายมาเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) การดูดติดผิวสามารถใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี

4.1 กลไกการดูดติดผิว (adsorption mechanism) (Eckenfelder, 1981)

การดูดติดผิวที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (london dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การกระจายตัว (dispersion) การเหนี่ยวนำ (induction) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้น แรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วการดูดติดผิวจะเกิดแบบกระจายตัวทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลเข้ามาเกาะติดได้

การดูดติดผิวทางเคมีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิว เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งจะแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ เพราะกระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทมวลสารจึงทำให้เกิดการดูดติดผิวด้วยพันธะเคมีกับส่วนที่เกิดปฏิกิริยาของสารดูดติดผิว โดยทั่วไปการดูดติดผิวทางเคมีจะมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ของการดูดติดผิวทางกายภาพ

4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer) (Eckenfelder, 1981)

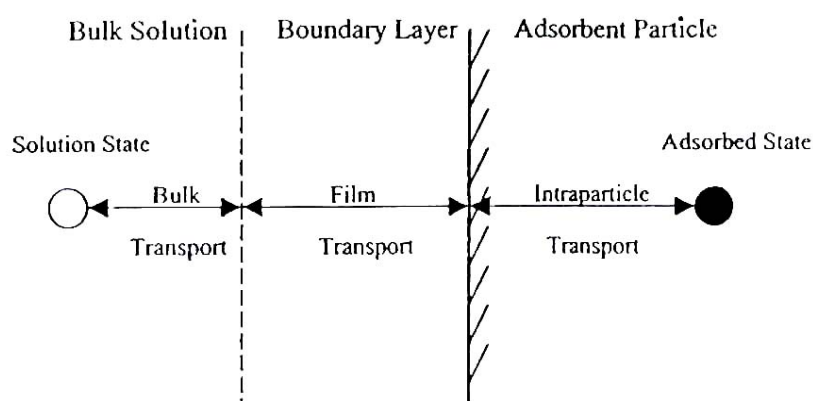
อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุด ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล กลไกการดูดติดผิวมี 3 ขั้นตอน คือ

4.2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดติดผิว

4.2.2 การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติดผิว การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

4.2.3 การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติดผิว (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวภายใน จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน

การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่าระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

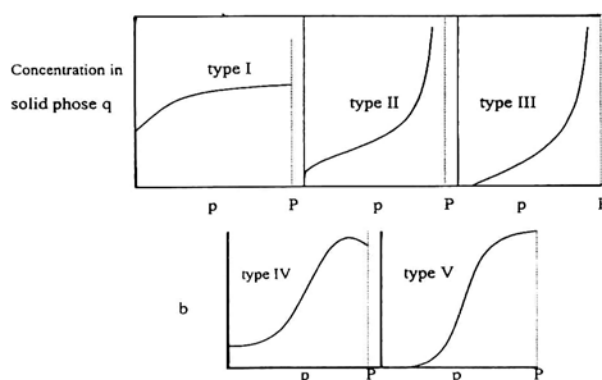
ที่มา: Eckenfelder (1981)

4.3 สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium)

ในการดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่สารละลาย เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจากผิวจะเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งเรียกว่า สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดติดผิว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดติดผิว ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm)

4.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว แสดงถึงลักษณะของกระบวนการดูดติดผิว และปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบ แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนรูปที่ 2 ถึง 5 เป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยมีทฤษฎีมากมายที่พัฒนาขึ้นเพื่อแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิว ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดที่จะอธิบายสมการและกลไกการดูดติดผิวได้อย่างถูกต้อง จึงนำเสนอสมการทั่วไปดังนี้



ภาพที่ 4 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน

ที่มา: Faust and Aly (1987)

4.4.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้อธิบายกระบวนการดูดติดผิวในระบบของเหลว มีสมการดังนี้

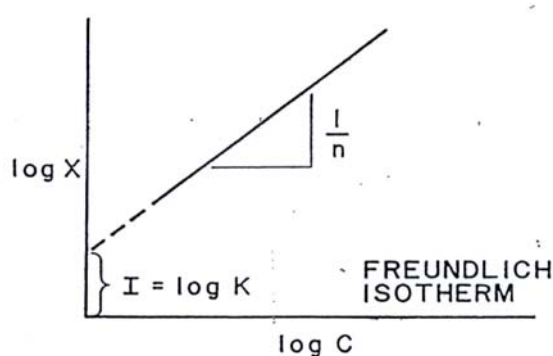
$$\frac{X}{M} = KC_c^{1/n} \quad (5)$$

เมื่อ X/M = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว หน่วย มก./ก.
 C_c = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.
 K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว
 $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ (5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log (X/M) = \log K + (1/n) \log C_c \quad (6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/M)$ กับ $\log C_c$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ แสดงดังภาพที่ 5 ถ้าค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี



ภาพที่ 5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช

ที่มา: Sunstrom and Klei (1995)

4.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ หรือเรียกว่า localized monolayer model คือ โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บนบริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ แต่ละโมเลกุลเกิดการดูดซับได้โมเลกุลเดียวโดยพื้นที่บริเวณดูดซับมีค่าที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิวและพลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (7)

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad (7)$$

เมื่อ X/M = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับ หน่วย มก./ก.

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.

a = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับที่ต้องการสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว หน่วย มก./ก.

b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ

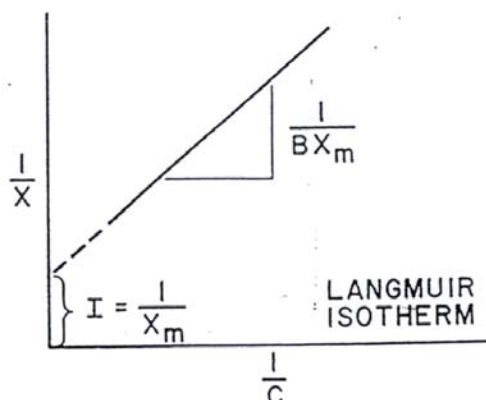
จากสมการที่ (7) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{X/M} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a} \quad (8)$$

หรือ

$$\frac{1}{X/M} = \frac{1}{ab C_e} + \frac{1}{a} \quad (9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/(X/M)$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรง สามารถหาค่าคงที่ a และ b ได้จากความชันและจุดตัดแกน ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์

ที่มา: Sunstrom and Klei (1995)

4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

4.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิว (adsorption capacity) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ คือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดติดผิวโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว ถ้าสารดูดติดผิวขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดติดผิวมากกว่าสารดูดติดผิวขนาดใหญ่

การศึกษาของนันทนา (2543) ใช้เศษคอนกรีตกำจัดสารหนู พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเศษคอนกรีตให้ใหญ่ขึ้นจะดูดติดผิวสารหนูลดลง เศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กที่สุดคือ 1.0 มม. ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีที่สุด และการทดลองของสุชาดา (2546) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ พบว่าขนาดของหินภูเขาไฟที่เล็กที่สุด 0.30 มม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียดีที่สุด แต่จะเกิดปัญหาการอุดตันเร็วจึงเลือกหินภูเขาไฟขนาด 0.30 - 0.85 มม. ใช้เป็นขนาดสารกรองที่เหมาะสม

4.5.2 ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว

เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง จะเกิดการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะถูกดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว ดังนั้นการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อยหรือเข้ากับโพรงได้พอดี โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะเข้าไปในโพรงก่อนโมเลกุลขนาดใหญ่

4.5.3 ความดัน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำจะทำให้มีชั้นฟิล์มหนามากขึ้นโมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดติดผิวได้ช้า ดังนั้นการแพร่ผ่านฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิวของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันสูงจะทำให้มีฟิล์มบางลงโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าสู่สารดูดติดผิวได้เร็วกว่าการแพร่เข้าสู่รูพรุน ดังนั้นอัตราเร็วการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวจึงขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่เข้าสู่รูพรุน

4.5.4 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสาร ค่าพีเอชจึงมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว ซึ่งไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้ดี และค่าพีเอชของสารละลายยังมีผลกระทบต่ออัตราการดูดติดผิวของไอออนอื่นๆ ด้วย

การศึกษาของ Lin and Wu (2001) กำจัดสารหนู (As^{5+}) โดยการดูดติดผิวด้วยแอคติเวตเต็ดอะลูมินา พบว่าการดูดติดผิวสารหนูจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงค่าพีเอช 7 - 8 เนื่องจากเป็นช่วงค่าพีเอชที่สารหนูอยู่ในรูปประจุลบ ($H_2AsO_4^-$) สามารถดูดติดผิวกับแอคติเวตเต็ดอะลูมินาที่เป็นประจุบวกได้ ($AlOH_2^+$)

4.5.5 เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของถังดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับด้วย

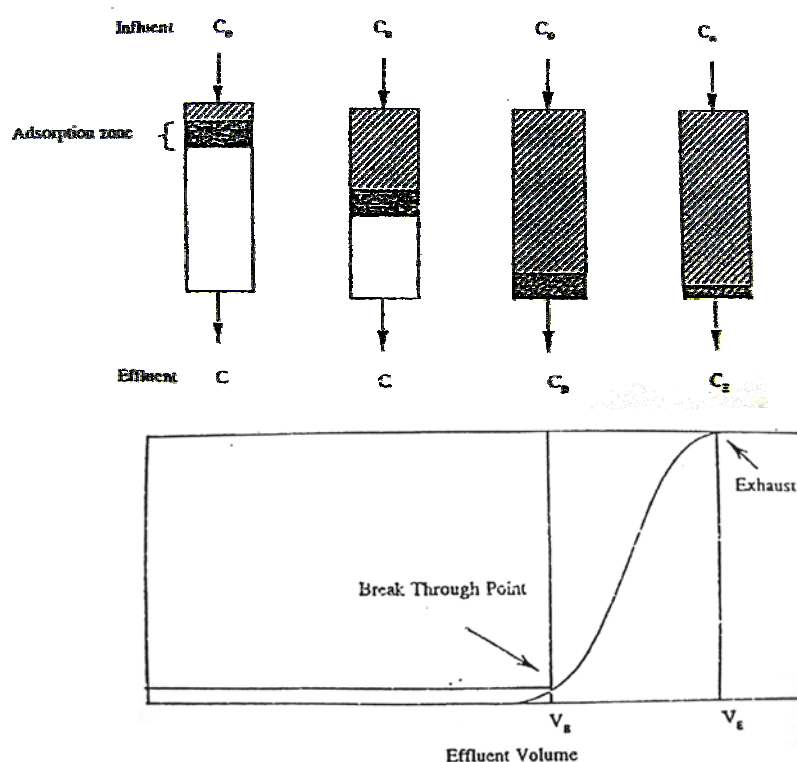
4.5.6 อุณหภูมิ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยอุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้นด้วยการดูดซับจึงน้อยลง

4.6 ถังกรองดูดซับแบบคอลัมน์ (adsorption column)

ผลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ นำมาใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดวัสดุกรองที่มีความเหมาะสมได้ แต่ข้อมูลที่ได้นั้นยังคงไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองโดยใช้ถังกรองดูดซับ (column test) เพื่อหาอายุการใช้งานของสารดูดซับที่เลือกใช้ว่ามีอายุการใช้งานนานเท่าใด สารดูดซับนั้นจึงจะเสื่อมคุณภาพ (Sunstrom and Klei, 1995)

เมื่อนำน้ำที่ปนเปื้อนมาผ่านคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุกรองอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นไหลผ่านชั้นสารดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง สารดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นต่อมาจะมีประสิทธิภาพลดลงเรื่อยๆ ตามเวลา ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งมีค่าความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ แสดงว่าคอลัมน์หมดประสิทธิภาพการดูดซับแล้ว เรียกจุดนี้ว่า จุดเบรคทวร์จ (breakthrough point) แสดงดังภาพที่ 7 โดยอายุการใช้งานคอลัมน์ (survice time) คือเวลาที่นับจากเริ่มดำเนินการดูดซับจนถึงจุดเบรคทวร์จ อายุการใช้งานนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ถ้าให้ความสูงของชั้นสารดูดซับเพิ่มขึ้นเวลาการใช้งานก็จะเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นน้ำเสียและอัตราการกรองสูงจะทำให้มีอายุการใช้งานต่ำ และถ้าสารดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากก็จะทำให้มีอายุการใช้งานมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย



ภาพที่ 7 การเคลื่อนตัวของ adsorption zone สำหรับชั้นสารดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย

ที่มา: Sunstrom and Klei (1995)

4.7 การดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์

4.7.1 ลักษณะของไฮดรอกไซด์

ไฮดรอกไซด์ (hydrous metal oxide) คือของแข็งที่ประกอบด้วยไอออนโลหะประจุบวกตั้งแต่ 1 ขึ้นไป รวมตัวกับอนุภาคของน้ำ คือไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์จึงรวมถึงสารประกอบโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ (-O) ไฮดรอกไซด์ (-OH) และออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) ไฮดรอกไซด์ของเหล็กกระจายอยู่ทั่วไปในดินเหนียว หรือตะกอน โดยเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุอื่นๆ และอยู่ในรูปของออกไซด์ รูปแบบทางเคมีของเหล็กออกไซด์

และไฮดรอกไซด์มักจะอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_3O_4 และ $\alpha\text{-FeOOH}$ เป็นต้น

(Kinniburgh and Jackson, 1981)

ไฮดรอสโลหะออกไซด์แสดงลักษณะที่เป็นทั้งกรดและเบสในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวหน้าของออกไซด์สามารถจับหรือปล่อยโปรตอน ทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยานั้นย้ายโปรตอนและมีประจุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมัน คุณสมบัติที่สำคัญของไฮดรอสโลหะออกไซด์คือความเป็นกรดของพื้นผิว เนื่องจากการที่ผิวมีหมู่ฟังก์ชันนั้นมีความสัมพันธ์กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมต่อของผิว เช่น ปฏิกิริยาการดูดติดผิวและการจับตัวเป็นก้อน ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวจะเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่นในสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอสโลหะออกไซด์

M^{2+} คือ ไอออนประจุบวกสอง

H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

4.7.2 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอสโลหะออกไซด์

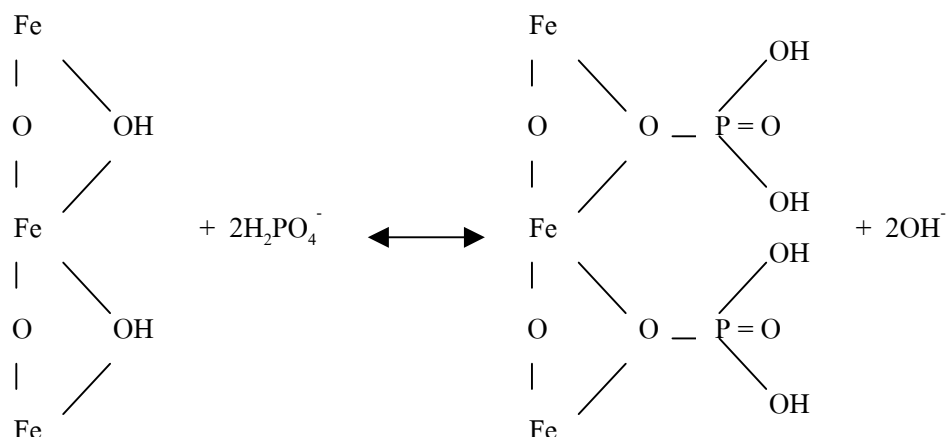
การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอสโลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาเล็กน้อย การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ของพื้นผิวที่พรูมจะรับไอออนจากสารละลาย ซึ่งการดูดติดผิวตัวถูกละลายบนไฮดรอสโลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารที่อยู่ในรูปไฮดรอสโลหะออกไซด์ โดยรวมถึงส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาดอนุภาค รูปร่างลักษณะของสาร พื้นที่ผิวสัมผัส ความพรุน ปริมาณและธรรมชาติของบริเวณพื้นผิวที่ดูดติดผิวได้ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการดูดติดผิวไอออนต่างๆ บนไฮดรอสโลหะออกไซด์ โดยการดูดติดผิวไอออนบวกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่การดูดติดผิวไอออนลบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าพีเอชต่ำและจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดติดผิวไอออนบนไฮดรอสโลหะออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว และไอออนชนิดอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งรบกวนการดูดติดผิวบนไฮดรอสโลหะออกไซด์

กลไกการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์ คือเมื่อโลหะออกไซด์สัมผัสกับน้ำจะเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่พื้นผิวของโลหะ ในขั้นแรกไอออนของโลหะที่ชั้นผิวหน้าของออกไซด์ยังแห้งอยู่เพราะโมเลกุลของน้ำยังไม่เข้าไปจับ เมื่อน้ำเข้าไปจับตรงที่ว่างอยู่จะเกิดพันธะได้โดยการดูดซับทางเคมี ทำให้พื้นผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้แล้ว โปรตอนนี้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำยังออกซิเจนไอออนที่อยู่ในชั้นผิว ซึ่งอาจมีการดูดซับน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Dzombak and Morel, 1990)

4.7.3 การดูดซับไอออนลบด้วยไฮดรอกไซด์

ความสามารถในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ เป็นกลไกที่สลับซับซ้อนและยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างแน่ชัด แต่ถ้าพิจารณาการดูดซับเป็นหลัก ไอออนประจุลบที่ถูกดูดซับจะเป็นการดูดซับที่จำเพาะเจาะจง (specific adsorption) หรือการดูดซับเชิงเคมี (chemical adsorption) ซึ่งการดูดซับนี้เกิดจากแรงดูดยึดแบบไฟฟ้าสถิต หรือแบบคูลอนน์ โดยปริมาณที่ดูดซับไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวสารดูดซับ นอกจากนั้นดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจะเกิดการดูดซับไอออนประจุลบได้ดี เช่น AsO_4^{3-} , SeO_4^{2-} และ CrO_4^{2-}

ฟอสเฟตเกิดการดูดซับแบบจำเพาะเจาะจงและไอออนประจุลบของฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับหมู่ฟังก์ชันนัล (-OH) หรือ H_2O บนผิวแร่เหล็กออกไซด์ การแลกเปลี่ยนลิแกนด์จะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่าง H_2PO_4^- กับหมู่ $-\text{OH}$ บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์

ที่มา: ไพนูลย์ (2544)

5. การแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) คือกระบวนการระหว่างสารละลายกับสารประกอบซึ่งไม่ละลายในสารละลายนั้น สารประกอบที่มีคุณสมบัติแลกเปลี่ยนไอออนหรือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ cation-exchange แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก เช่น ไอออนของโลหะ และ anion-exchange แลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ เช่น ไอออนของโลหะ โครงสร้างของเรซินเป็นตัวกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินที่มีไฮโดรคาร์บอนหลายๆ โมเลกุลประสานกันเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ เรียกว่า เมตริกซ์ โดยมีหมู่ฟังก์ชันนอลเกาะอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายซึ่งทำให้เรซินมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนประจุ แต่ส่วนที่ทำให้เรซินมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำได้นั้นเป็นหมู่ไอออนที่มีส่วนหนึ่งเกาะติดอยู่กับโครงร่างและไม่เคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่งเป็นไอออนเคลื่อนที่ได้และเป็นส่วนที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่ในน้ำ (มันสิน, 2538)

5.1 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

5.1.1 กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งอาจใช้กำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษด้วย แต่จำเป็นต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะหนักที่ใช้เรซินกำจัด ได้แก่ สารหนู แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง และสังกะสี เป็นต้น

5.1.2 ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากขึ้นในน้ำออก คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน เนื่องจากปริมาณของสารละลายรีเจนเนอเรนต์มีน้อยกว่าปริมาณของสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ดังนั้นความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมากซึ่งเป็นการทำให้ไอออนเดิมที่เจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายเท่า

5.2 วัฏจักรการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

5.2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (service)

สารละลายที่ต้องการบำบัดผ่านเข้าไปในชั้นของเรซินและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าความจุของเรซินคือความสามารถในการใช้งานเรซิน เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณไอออนที่เรซินแลกเปลี่ยนได้สูงสุด ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสิ้นสุดเมื่อความเข้มข้นของไอออนที่ผ่านออกมาในสารละลายมีค่าสูงสุดจนถึงจุดที่ยอมรับได้

5.2.2 การล้างย้อน (backwash)

หลังจากขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะถูกล้างย้อนทำให้เกิดการขยายตัวเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้การสัมผัสของสารเคมีกับเม็ดเรซินเป็นไปอย่างทั่วถึงในขั้นตอนการฟื้นฟูประสิทธิภาพ การล้างย้อนช่วยกำจัดอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของเรซิน หลังจากนั้นปล่อยให้ชั้นเรซินตกลง

5.2.3 การฟื้นฟูประสิทธิภาพ (regeneration)

คือการทำให้เรซินที่หมดอำนาจแล้วกลับฟื้นตัวขึ้นมามีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ใหม่อีกครั้ง การที่เรซินหมดอำนาจ (ชั่วคราว) เป็นเพราะไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกกับไอออนอื่นในน้ำจนหมดสิ้น การฟื้นฟูประสิทธิภาพเป็นการขับไล่ไอออนในเรซินที่แลกมาจากน้ำและเติมไอออนอิสระให้กับเรซินทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิมและมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้ง สารเคมีที่ใช้เติมให้กับเรซินที่หมดอำนาจแล้ว เรียก สารรีเจนเนอเรนต์ (regenerant) โดยปกติอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชันมักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.025-1 แกลลอน/นาฬิกา

(2.8 ปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง) วิธีการรีเจนเนอเรชันมี 2 แบบคือ การรีเจนเนอเรชันแบบไหลตาม (co-current regeneration) มีทิศทางเดียวกับการแลกเปลี่ยนไอออน และการรีเจนเนอเรชันแบบไหลสวนทาง (counter-current regeneration) มีทิศทางตรงกันข้ามกับการแลกเปลี่ยนไอออน

5.2.4 การชะล้างสารเคมี (rinse)

สารรีเจนเนอเรนต์จะถูกแทนที่ด้วยน้ำที่มีอัตราการไหลต่ำในชั้นเรซินจนหมด การล้างชั้นนี้จะตามด้วยการล้างเร็ว โดยปล่อยน้ำที่มีอัตราการไหลสูงเพื่อกำจัดรีเจนเนอเรนต์ที่ตกค้างในชั้นเรซิน ความเข้มข้นของรีเจนเนอเรนต์ถูกตรวจวัดจนกระทั่งลดลงถึงค่าที่ต้องการ วัฏจักรการทำงานในรอบต่อไปก็จะเริ่มต้นอีกครั้ง

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดสารหนูด้วยกระบวนการดูดซับผิว

นันทนา (2543) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 เมตร ความสูงคอลัมน์ 1.70 เมตร ความสูงตัวกลาง 1.50 เมตร และใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 1.0 มก./ล. พบว่าไอโซเทอมการดูดซับผิวที่เหมาะสมของเศษคอนกรีตคือ ไอโซเทอมแบบฟรังก์ลิช และการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 3.7 ปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง เศษคอนกรีตทุกขนาดที่ใช้ในการทดลองตั้งแต่ 1.0-2.36 มม. จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตั้งแต่ 95-100 % ซึ่งเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพและปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดได้มากกว่าเศษคอนกรีตขนาดใหญ่

Bellack (1971) ศึกษาการกำจัดสารหนูและฟลูออไรด์โดยการดูดซับผิวด้วยแอคติเวเต็ดอะลูมินาในน้ำบาดาลที่มีสารหนูปนเปื้อน 0.06 มก./ล. และฟลูออไรด์ 4.8 มก./ล. โดยผ่านคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.85 ซม. ที่บรรจุแอคติเวเต็ดอะลูมินามีความสูง 25 ซม. กำหนดให้มีอัตราการไหล 20 มล./นาที่ สามารถกำจัดสารหนูและฟลูออไรด์ในน้ำให้เหลือความเข้มข้นเพียง 0.003 และ 1.0 มก./ล. ตามลำดับ และใช้กำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลความเข้มข้น 0.106 มก./ล. ให้มีความเข้มข้นเหลือ 0.01 มก./ล.

การกำจัดสารหนูด้วยกระบวนการอื่นๆ

สมศักดิ์ (2532) ศึกษาการลดปริมาณสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับชนบท พบว่าค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มและปูนขาวเป็นสารโคแอกกูแลนท์จะเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู ในกรณีที่ใช้สารส้มค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 6.5-7.0 และค่าพีเอชที่เหมาะสมเมื่อใช้ปูนขาวเท่ากับ 11.0-11.2 นอกจากนี้ยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นด้วย สารส้มและปูนขาวให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 90 และ 80.2 % ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.68 มก./ล.

Irkayama (1971) ทดลองการกำจัดสารหนูโดยการใช้สารประกอบเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ ซึ่งน้ำตัวอย่างที่ใช้จะปรับค่าพีเอชให้มีค่า 10.3 ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ขึ้นซึ่งถูกกำจัดออกโดยการกรองผ่านชั้นทราย ผลการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนู 3 มก./ล. ให้เหลือเพียง 0.05 มก./ล.

การดูดซับด้วยโลหะออกไซด์

ธรรม (2541) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์เป็นตัวกลางใช้คอลัมน์ที่บรรจุตัวกลางสูง 35 ซม. พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้มากกว่าทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนไอออนสารหนูคือ 7 มีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูโดยใช้ทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ค่าพีเอช 3 และอัตราการกรองที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนไอออนสารหนูของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์อยู่ในช่วง 12-20 ปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์อยู่ในช่วง 2-30 ปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง และการทดลองการฟื้นอำนาจตัวกลางทั้งสองชนิดโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล กำหนดการทำงาน 10 รอบ พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีกว่าทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีปริมาณน้ำที่ผ่านการกำจัดมากกว่าทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์

พรเพ็ญ (2545) ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักสามชนิด คือ สารหนู ตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม ในการดูดติดผิวสารหนูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มก./ล. ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 7 เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับ 35.19% สำหรับตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 เวลาสัมผัส 45 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวมากกว่า 99.0% และแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มก./ล. ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 5 เวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวเท่ากับ 91.67% และในการศึกษาไอโซเทอมพบว่าสารหนูและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ส่วนแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

Edward and Benjamin (1989) นำสารดูดติดผิวที่เป็นเหล็กไฮดรอกไซด์มาฟื้นฟูอำนาจและนำกลับมาใช้ใหม่ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขึ้นรูปโลหะ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตกผลึกของไฮดรอกไซด์และการดูดติดผิวบนเฟอร์ริไฮไดรต์ (ferrihydrite) ผลการทดลองพบว่าการดูดติดผิวบนเฟอร์ริไฮไดรต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะต่างๆออกจากน้ำเสียได้ทุกค่าพีเอชและเฟอร์ริไฮไดรต์ยังนำมาฟื้นฟูอำนาจและใช้ใหม่ได้ถึง 50 ครั้งโดยไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น ไม่ว่าจะใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียจริงและเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมจริงได้ ในขณะที่การตกผลึกนั้นไม่สามารถกำจัดโลหะต่างๆได้ ไม่ว่าที่ค่าพีเอชใดๆ

Ioannis and Anastasios (2002) ศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้เม็ดพลาสติกเคลือบเหล็กออกไซด์ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารหนู ได้แก่ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิว และไอออนประจุลบอื่นที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารหนู ทำการทดลองโดยบรรจุเม็ดพลาสติกเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.86 ซม. ความสูง 40 ซม. ป้อนน้ำสังเคราะห์สารหนูให้มีทิศทางไหลขึ้นในคอลัมน์ และฟื้นฟูประสิทธิภาพสารดูดติดผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 นอร์มัล ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัส 12.5 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวจะเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว ดังนั้นการใช้เม็ดพลาสติกเคลือบเหล็กออกไซด์ในการดูดติดผิวสารหนูจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถกำจัดน้ำที่ปนเปื้อนสารหนูได้

Joshi and Chaudhuri (1996) ศึกษาการกำจัดสารหนูโดยใช้ทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็ก 50 มล. บรรจุในคอลัมน์ขนาด 11 มม. และปล่อยน้ำดิบสังเคราะห์ผ่านใช้อัตราการกรอง 1 มม./นาทิจำ และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล ปริมาณ 2 ลิตร การรีเจนเนอเรชันสามารถกำจัดสารหนูปริมาณความเข้มข้น 1 มก./ล. ในน้ำดิบสังเคราะห์ได้ประสิทธิภาพมีค่า 94-99% ในวัฏจักรการทำงานทั้งหมด 10 รอบ

การใช้หินภูเขาไฟเป็นสารดูดซับ

สุชาดา (2546) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ เพื่อหาค่าพีเอช ขนาดหินภูเขาไฟที่เหมาะสม และประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียโดยใช้ถังกรองแบบคอลัมน์ จากผลการทดลองพบว่าหินภูเขาไฟเป็นหินบะซอลต์ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียมีค่า 7 – 8 ขนาดของหินภูเขาไฟที่ใช้ 0.3 - 0.85 มม. และการทดลองในคอลัมน์ พบว่าที่ระดับความสูงของชั้นหินภูเขาไฟที่สูงกว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้มากขึ้น และอัตราการกรองที่ใช้ คือ 0.4, 0.8 และ 1.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมากกว่า 95% ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียและสารอินทรีย์ที่ระดับความสูงของชั้นหินภูเขาไฟ 60 ซม. เท่ากับ 96.8 และ 60.8% ตามลำดับ

พรพิมล (2547) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้หินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครง ทดลองหาค่าพีเอช ขนาดสารดูดซับและเวลาสัมผัส และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้ถังดูดซับแบบคอลัมน์ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 7 ขนาดหินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครงที่ใช้ 0.3 - 0.85 มม. เวลาสัมผัส 2 ชม. และการทดลองในคอลัมน์ความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 10.05 มก./ล. เมื่อเดินระบบ 12 ชม. ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความสูงของชั้นสารดูดซับ 60 ซม. สารดูดซับทั้งสองมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์มากกว่า 85.0% เมื่อทดลองกับน้ำบาดาลที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น 8.10 มก./ล. พบว่าหินภูเขาไฟและเปลือกหอยแครงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เท่ากับ 94.80 และ 83.24% ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอลัมน์อะคริลิกใสเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สูง 100 ซม. พื้นที่หน้าตัด 11.40 ตร.ซม.
2. ปัมป์สูบน้ำและถังเก็บน้ำ
3. เครื่องบดและตะแกรงร่อนคัดแยกขนาด
4. เครื่องเขย่าสารและเครื่องเหวี่ยง
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
6. เครื่องวัดค่าพีเอชรุ่น Model 215 บริษัท Denver Instrument
7. เครื่องแก้วและขวดโพลีเอทิลีนสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง
8. เครื่อง Hydride Generation Atomic Absorption Spectrophotometer (HG-AAS)
รุ่น AAnalyst 300 บริษัท Perkin Elmer
9. หินภูเขาไฟจากอำเภอลำนาทรายณ์ จังหวัดลพบุรี
10. สารประกอบโซเดียมอาร์เซเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
11. เฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
13. กรดซัลฟิวริก กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก (H_2SO_4 , HNO_3 และ HCl)

วิธีการ

1. การเตรียมสารดูดติดผิว

1.1 การเตรียมตัวอย่างหินภูเขาไฟ

นำหินภูเขาไฟมาล้างน้ำให้สะอาดและบดให้ละเอียด นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 50 เพื่อให้ได้หินภูเขาไฟที่มีขนาดระหว่าง 0.85–0.30 มม. นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

1.2 การเตรียมตัวอย่างหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยใช้วิธีการของ Edward และ Benjamin (1989)

1) นำหินภูเขาไฟที่มีขนาดระหว่าง 0.30 – 0.85 มม. มาทำความสะอาดโดยการแช่กรด H_2SO_4 50% ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) ล้างหินภูเขาไฟด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

3) เตรียมสารละลายเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ใช้ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มล. (ปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 11 ด้วยสารละลาย NaOH)

4) นำหินภูเขาไฟที่อบแห้งแล้ว 200 กรัม ใส่ลงในสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทแล้วคนให้เข้ากันอย่างทั่วถึง ต่อจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

5) นำหินภูเขาไฟที่เคลือบผิวแล้วมาล้างออกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใสและนำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

6) จากวิธีการดังกล่าวจะได้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ไปให้นำไปใช้งานได้

2. การเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

2.1 เตรียมสารละลายสารหนูมาตรฐานเข้มข้น 1,000 มก./ล. โดยใช้สารประกอบโซเดียมอาร์เซเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 4.16 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

2.2 เตรียมตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสารหนู (As^{5+}) 0.5, 1.0 และ 5.0 มก./ล. โดยใช้สารละลายสารหนูมาตรฐานจำนวน 0.5, 1.0 และ 5.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ ปรับปริมาตรด้วยน้ำประปาให้เป็น 1 ลิตร

3. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

- ศึกษาปริมาณพื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง Gas Sorption Analyzer โดยวิธี BET และหาความหนาแน่นด้วยเครื่อง Densitometer

- ศึกษาโครงสร้างขนาดรูพรุนของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

- ศึกษาองค์ประกอบของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

- ศึกษาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

4. วิธีดำเนินการทดลอง

4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารหนูในตัวอย่างสังเคราะห์

4.1.1 ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิวสารหนูในตัวอย่างสังเคราะห์

1) เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 1.0 มก./ล. ปริมาตร 50 มล.ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 200 มล. จำนวน 9 ขวด

2) ปรับค่าพีเอชในแต่ละขวดให้มีค่า 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และไม่ปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล

3) เติมหินภูเขาไฟ 1 กรัม ลงในขวดทุกใบ

4) นำขวดทั้งหมดมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

5) เก็บน้ำตัวอย่างโดยแยกหินภูเขาไฟออกด้วยเครื่องเหวี่ยง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS

6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

7) เปลี่ยนสารดูดติดผิวเป็นหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์และทำการทดลองเช่นเดิม แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 9

4.1.2 ศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

1) เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 1.0 มก./ล. ปริมาตร 50 มล. ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 200 มล. จำนวน 8 ขวด

2) ปรับค่าพีเอชในแต่ละขวดให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล

3) เติมหินภูเขาไฟ 1 กรัม ลงในขวดทุกใบ

4) นำขวดทั้งหมดมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

5) เก็บน้ำตัวอย่างโดยแยกหินภูเขาไฟออกด้วยเครื่องเหวี่ยง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือนด้วยเครื่อง HG-AAS

6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

7) เปลี่ยนสารดูดติดผิวเป็นหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์และทำการทดลองเช่นเดิม แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 10

4.1.3 ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดติดผิว

1) เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 1.0 มก./ล. ปริมาตร 50 มล.ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 200 มล. จำนวน 5 ขวด

2) ปรับค่าพีเอชในแต่ละขวดให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล

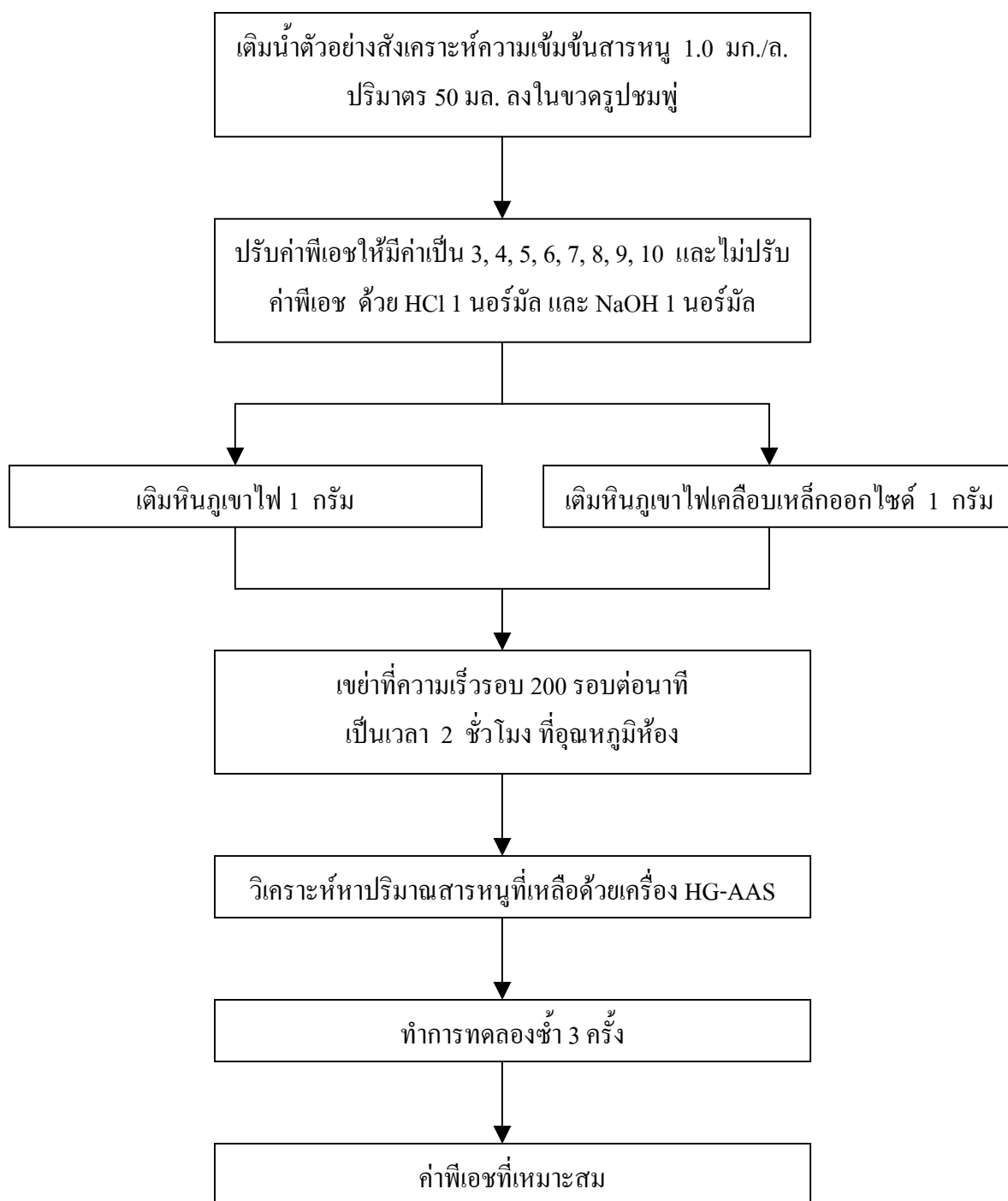
3) เติมหินภูเขาไฟ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัมลงในขวดทุกใบ

4) นำขวดทั้งหมดมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.2 ที่อุณหภูมิห้อง

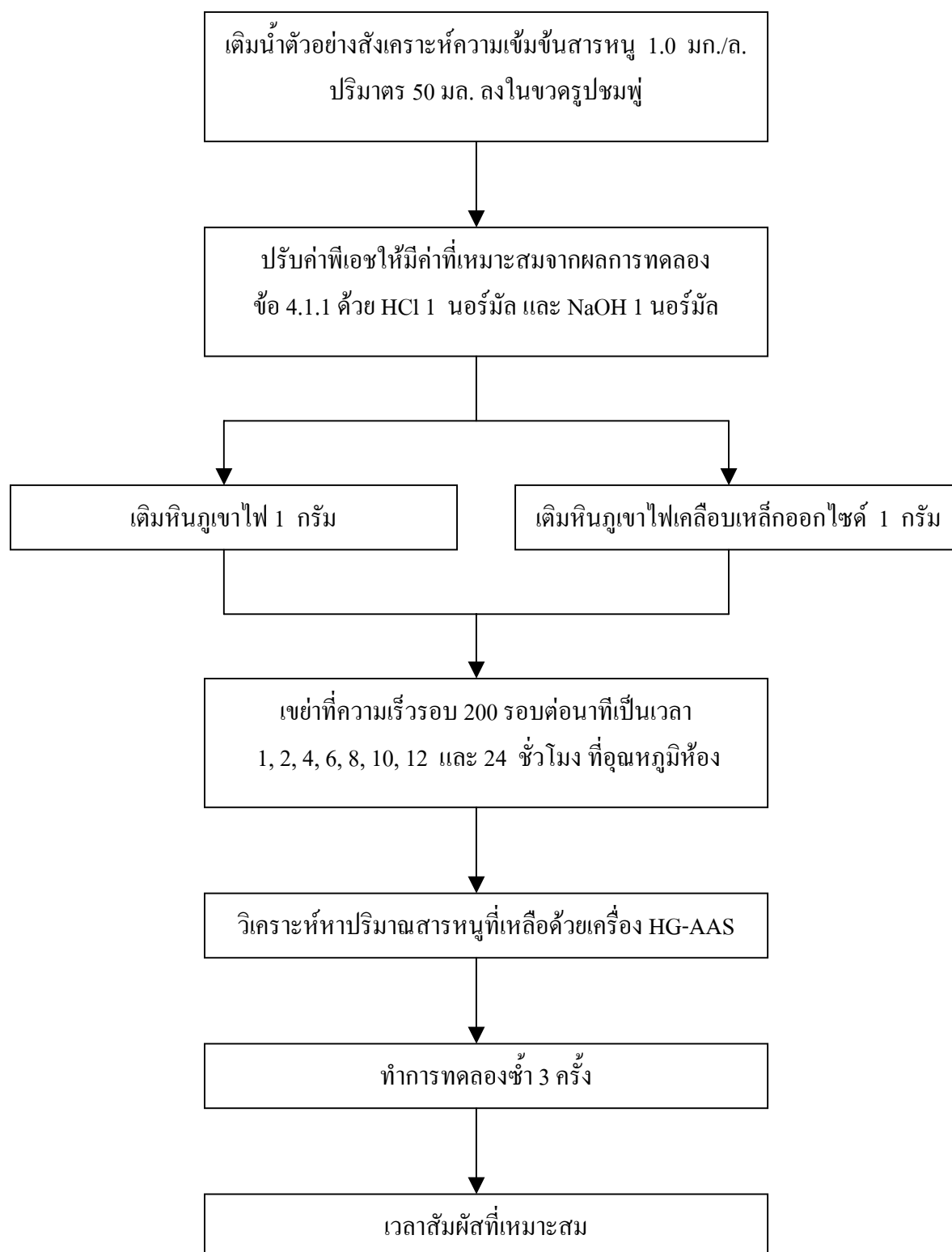
5) เก็บน้ำตัวอย่างโดยแยกหินภูเขาไฟออกด้วยเครื่องเหวี่ยง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือนด้วยเครื่อง HG-AAS

6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

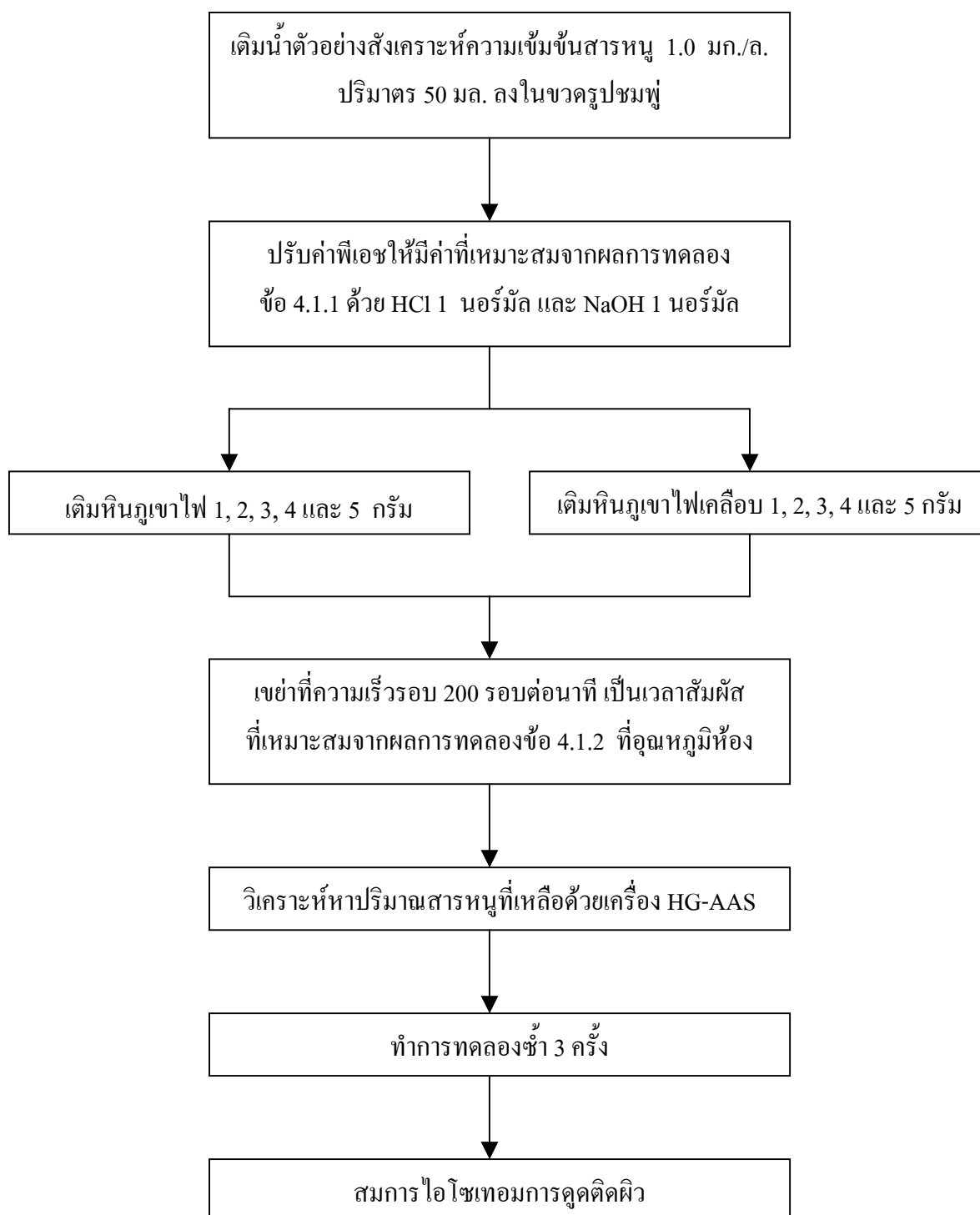
7) เปลี่ยนสารดูดติดผิวเป็นหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์และทำการทดลองเช่นเดิม แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 9 แผนภาพการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิวสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์



ภาพที่ 10 แผนภาพการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับพิษสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

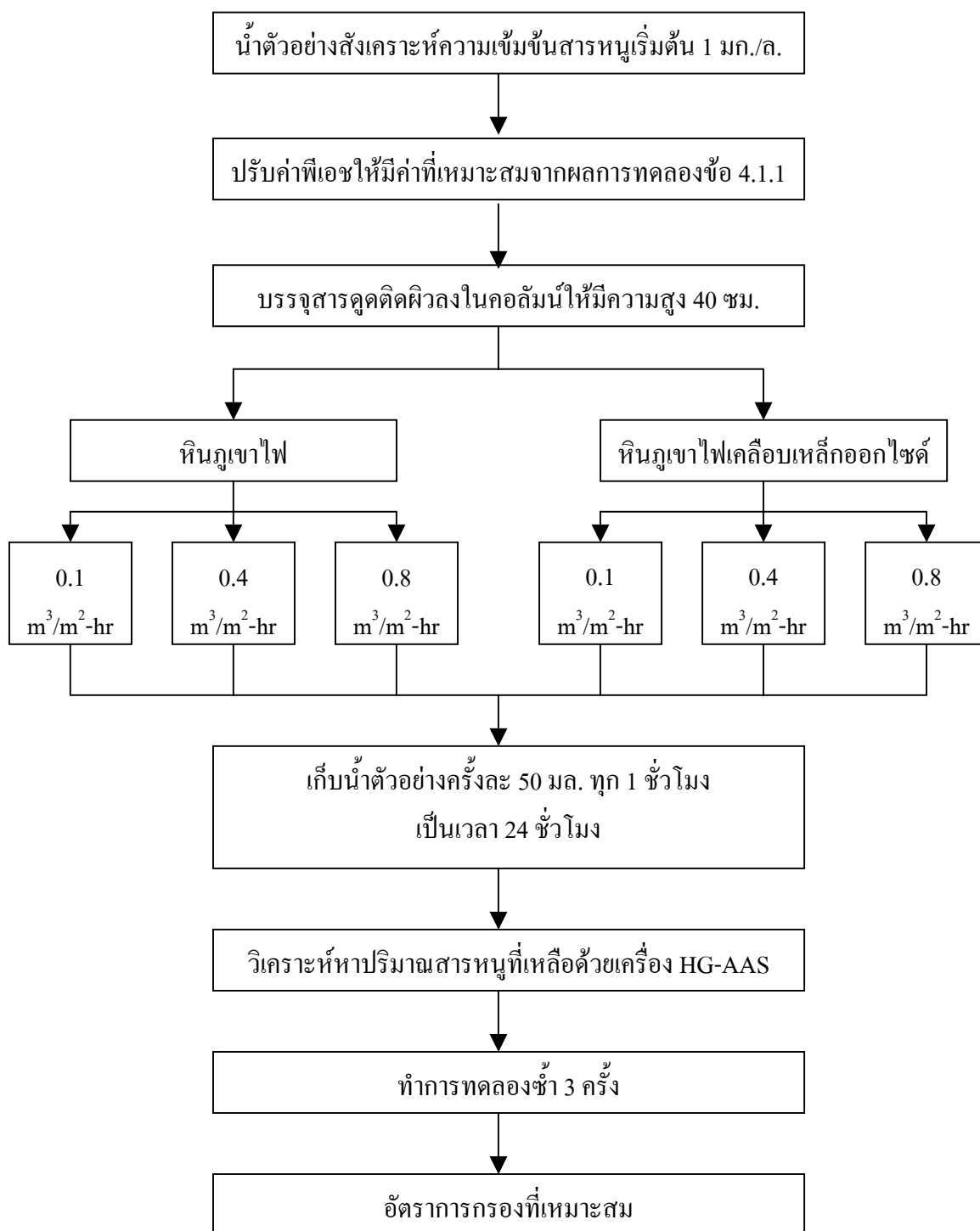


ภาพที่ 11 แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็ก
ออกไซด์โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับ

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (adsorption column)

4.2.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ของ หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน

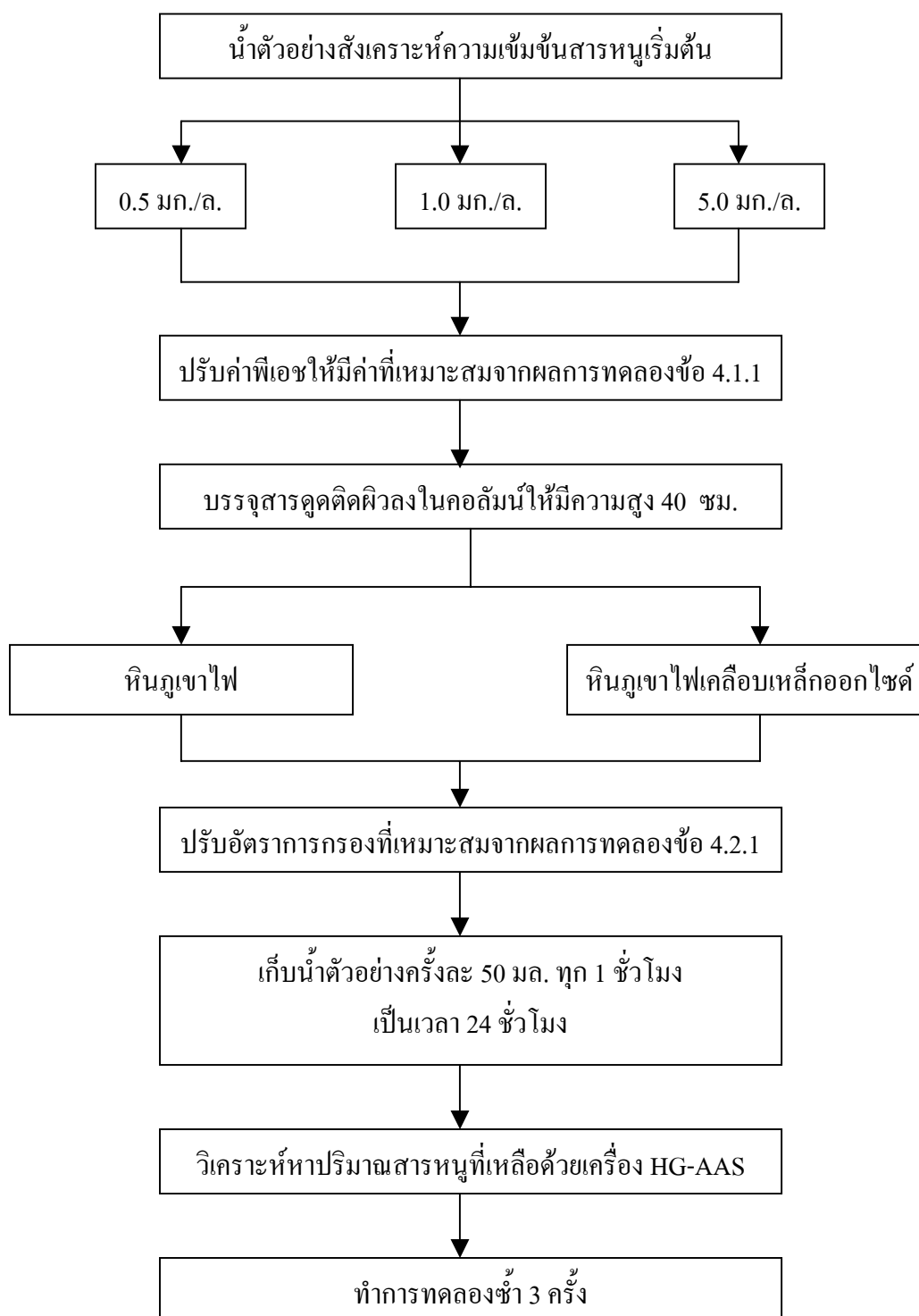
- 1) กำหนดอัตราการกรองที่ใช้ศึกษา 3 ค่า คือ 0.1, 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
- 2) บรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ลงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ให้มีความสูงของชั้นสารดูดติดผิว 40 ซม.
- 3) ปรับค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
- 4) ป้อนน้ำสังเคราะห์สารหนูเข้มข้น 1.0 มก./ล. ให้ไหลผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรอง 0.1, 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ ตร.ม.-ชม. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS
- 6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์
เพื่อให้อัตราการกรองของสารดูดซับผิวแตกต่างกัน

4.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์แตกต่างกัน

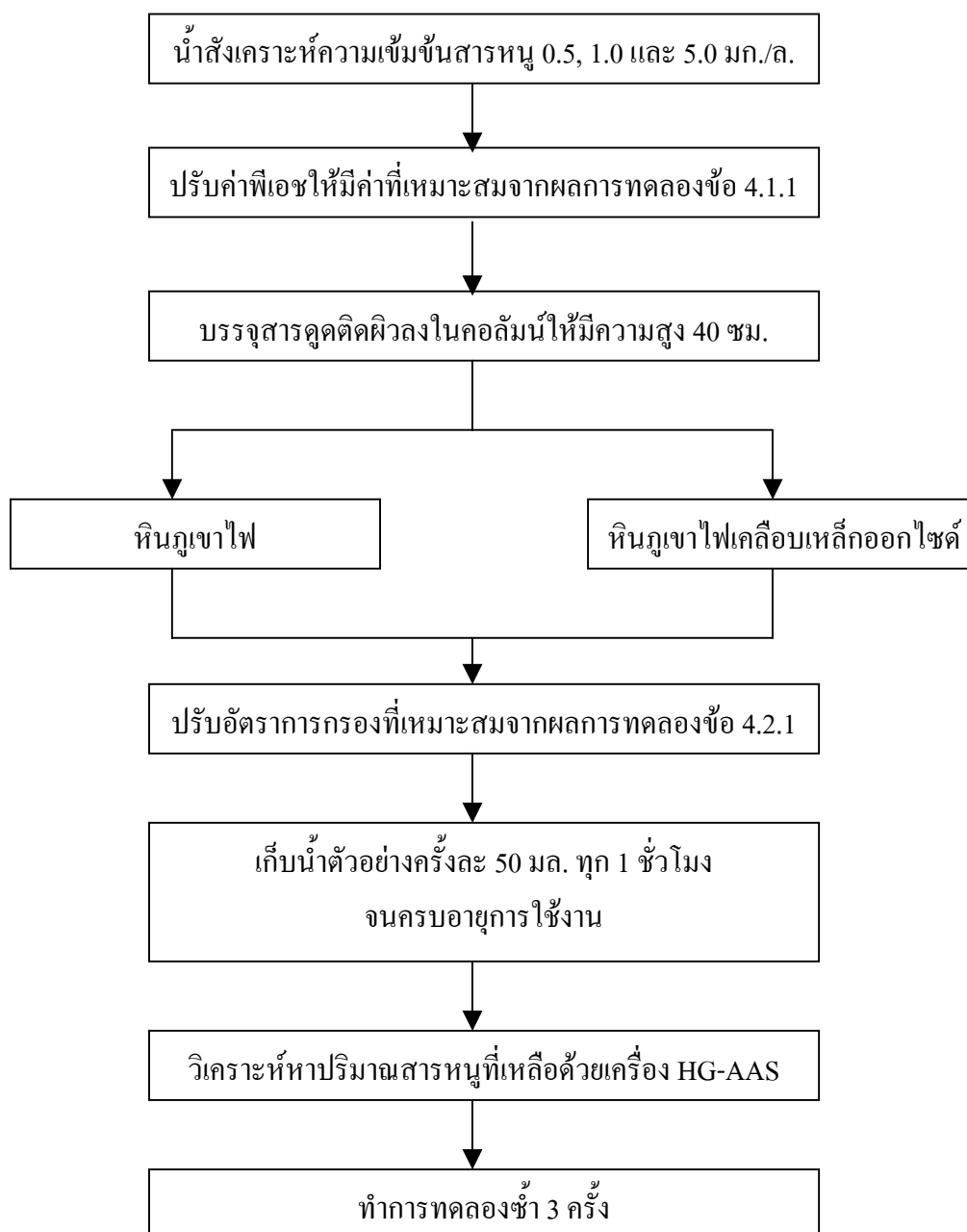
- 1) กำหนดความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษามี 3 ค่า คือ 0.5, 1.0 และ 5.0 มก./ล. ตามลำดับ
- 2) บรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ลงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ให้มีความสูงของชั้นสารดูดติดผิว 40 ซม.
- 3) ปรับค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
- 4) ป้อนน้ำสังเคราะห์สารหนูเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 มก./ล. ให้ไหลผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรองที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.2.1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS
- 6) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แผนภาพการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์แตกต่างกัน

4.2.3 ศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใน การกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

- 1) บรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ลงในถังดูดติดผิวแบบ
คอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ให้มีความสูงของชั้นสารดูดติดผิว 40 ซม.
- 2) ปรับค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
- 3) ป้อนน้ำสังเคราะห์สารหนูเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 มก./ล. ให้ไหลผ่านชั้นหิน
ภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรองที่เหมาะสม
จากผลการทดลองข้อ 4.2.1
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบ
เหล็กออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบอายุการใช้งาน เพื่อ
วิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS
- 5) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 14

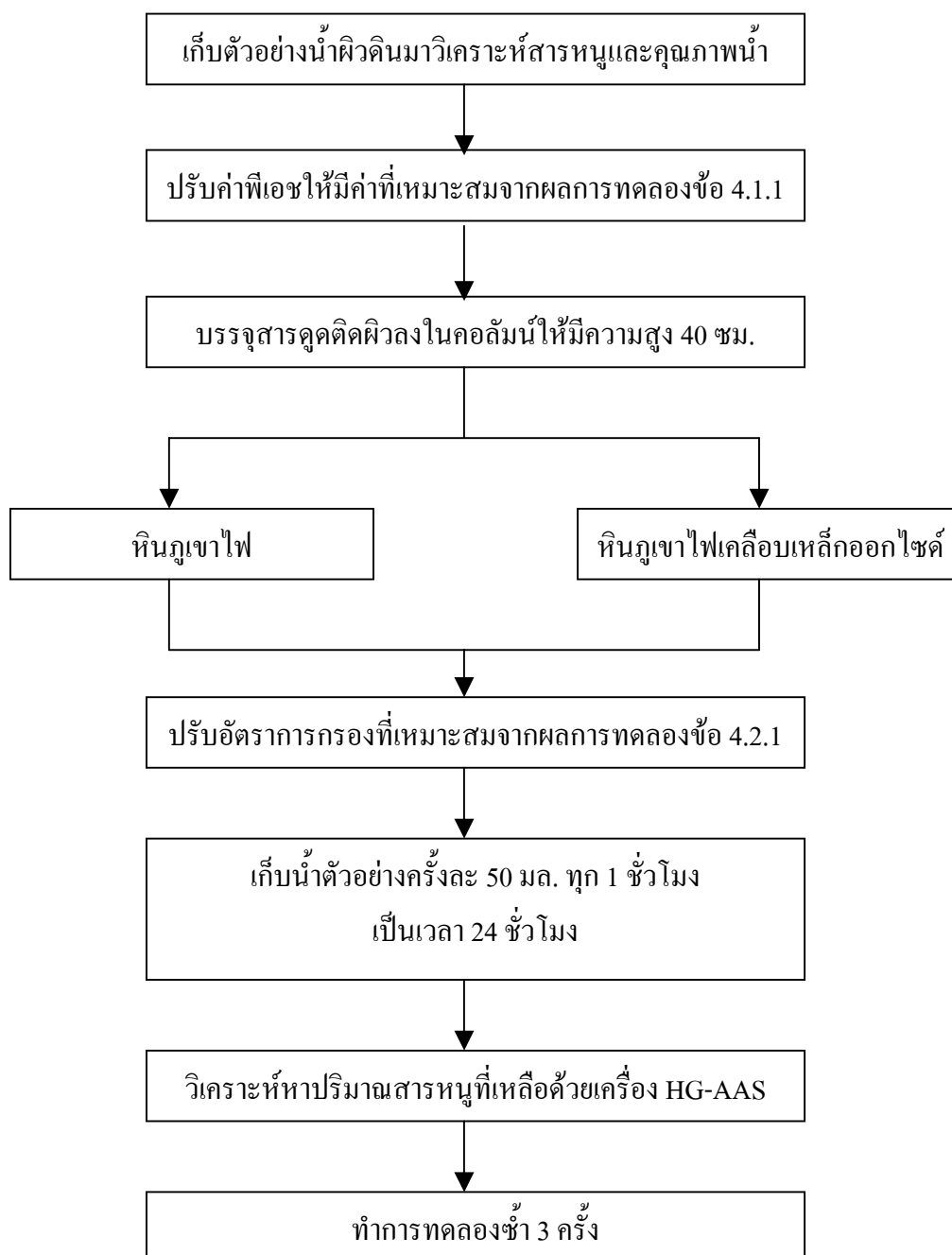


ภาพที่ 14 แผนภาพการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
ในการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

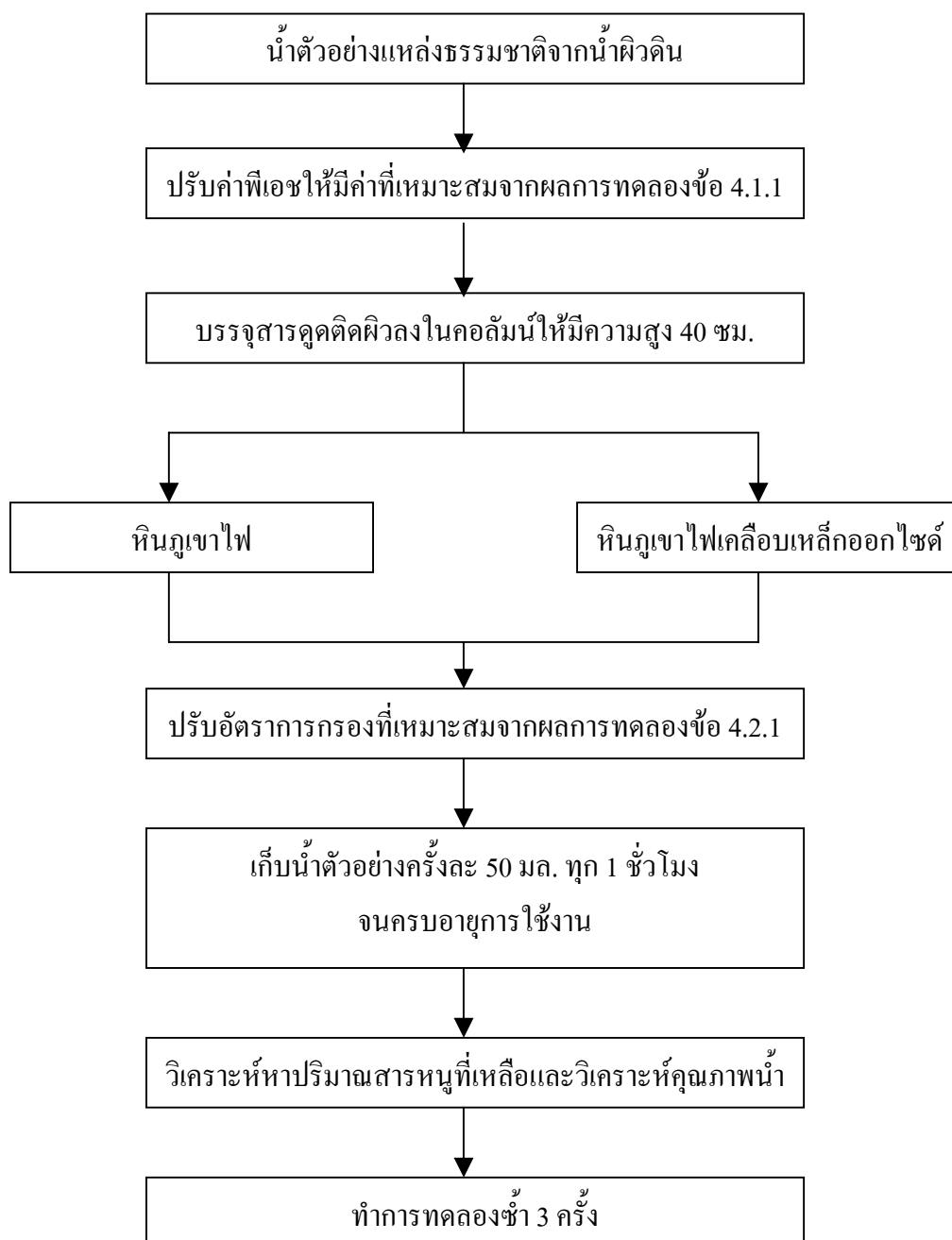
- 1) วิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินที่เก็บจากลำธาร บ้านหัวเหมือง หมู่ที่ 2 ตำบล ร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ ปริมาณสารหนู ค่าพีเอช ความขุ่น ความกระด้าง ความเป็นด่าง คลอไรด์และซัลเฟต
- 2) ปรับค่าพีเอชของน้ำผิวดินให้มีค่าเหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
- 3) ป้อนน้ำผิวดินให้ไหลผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็ก ออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรองที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.2.1
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำผิวดินก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็ก ออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS
- 5) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แผนภาพการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินของหินภูเขาไฟและ
หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

4.3.2 ศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใน การกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

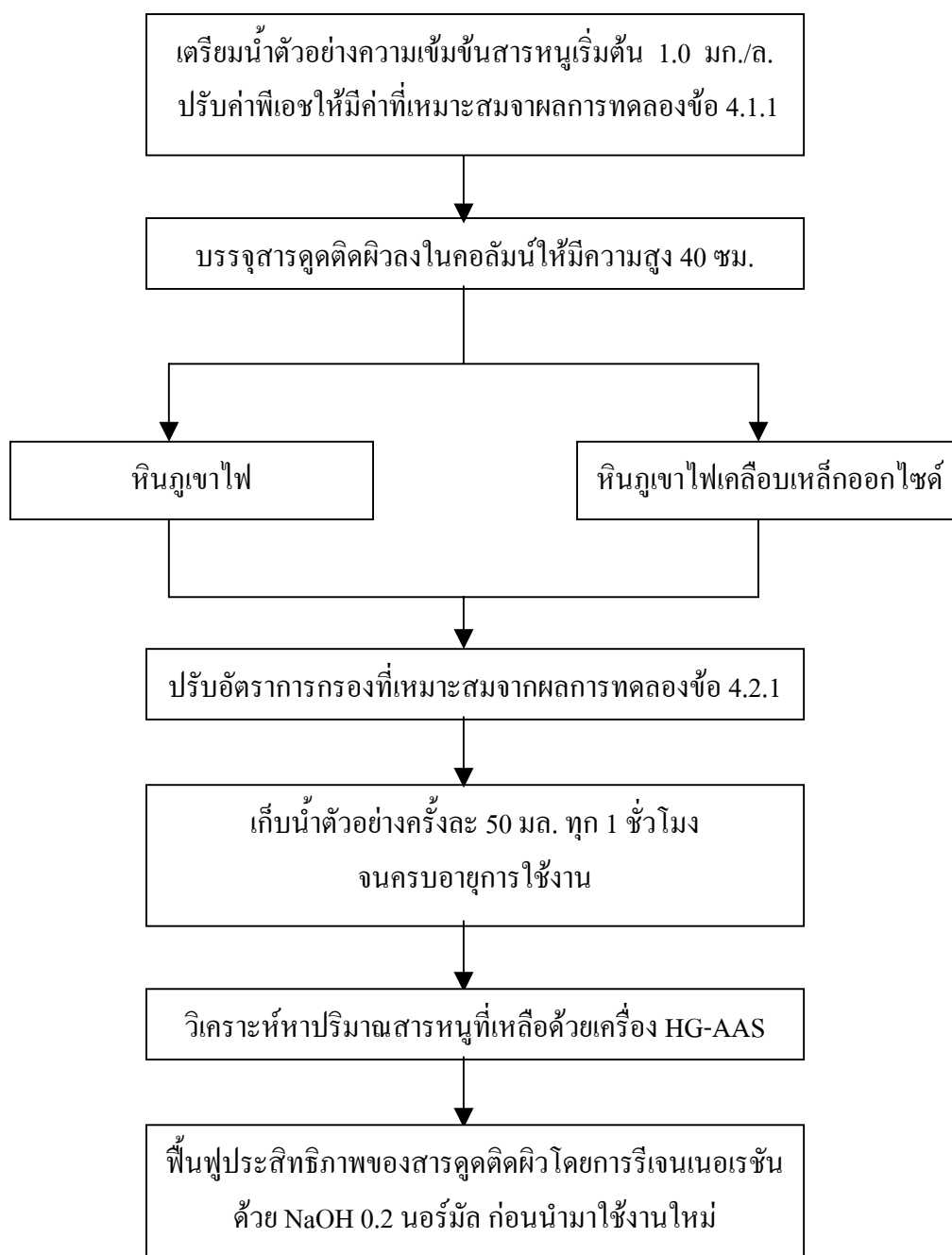
- 1) ปรับค่าพีเอชของน้ำผิวดินให้มีค่าเหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
- 2) ป้อนน้ำผิวดินให้ไหลผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรองที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.2.1
- 3) เก็บตัวอย่างน้ำผิวดินก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบอายุการใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS ค่าพีเอช ความขุ่น ความกระด้าง ความเป็นด่าง คลอไรด์และซัลเฟต
- 4) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 16



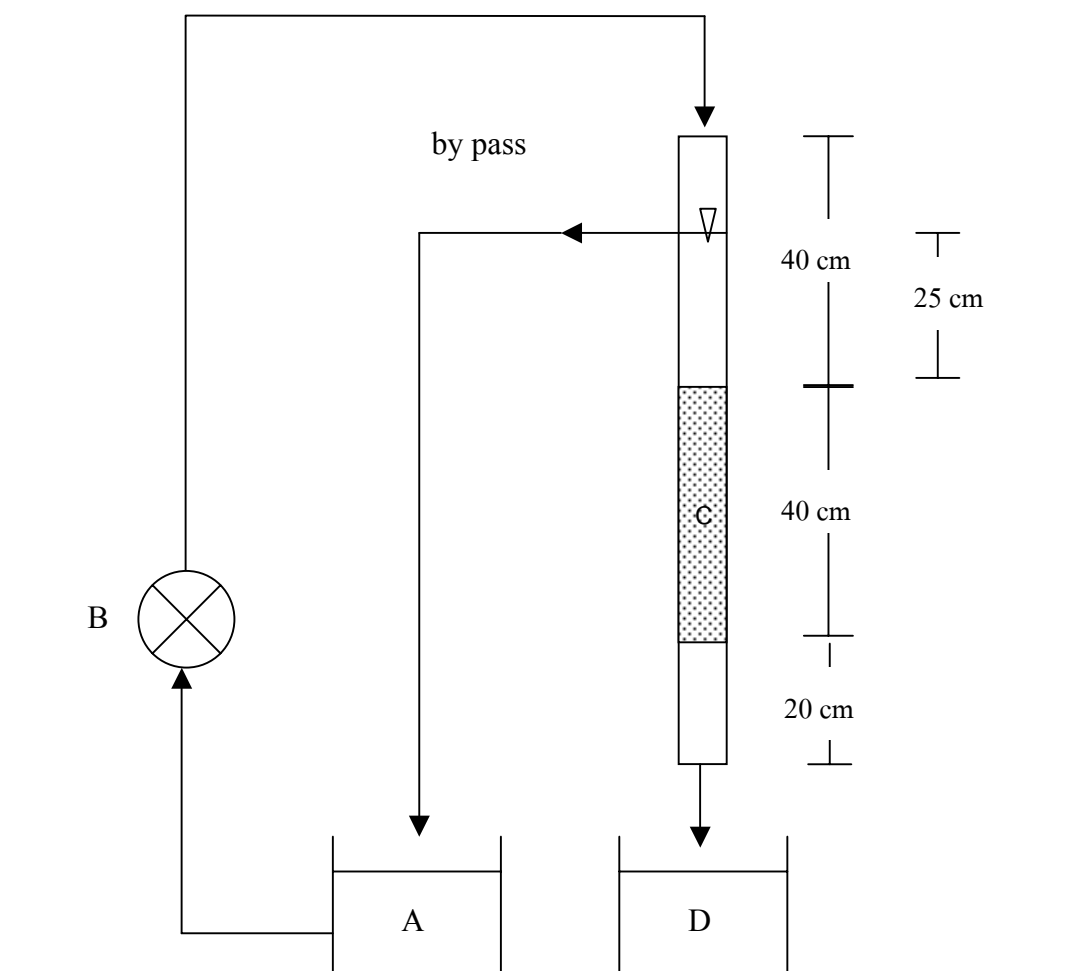
ภาพที่ 16 แผนภาพการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

4.4 การศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดซับที่หมดประสิทธิภาพหลังจากใช้กำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

- 1) บรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ลงในถังดูดซับแบบคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ให้มีความสูงของชั้นสารดูดซับ 40 ซม.
 - 2) ปรับค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.1.1
 - 3) ป้อนน้ำสังเคราะห์สารหนูเข้มข้น 1.0 มก./ล. ให้ไหลผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ในอัตราการกรองที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้อ 4.2.1
 - 4) เก็บตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ก่อนผ่านชั้นหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ และเก็บน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งละ 50 มล. ทุก 1 ชั่วโมงจนครบอายุการใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่เหลือด้วยเครื่อง HG-AAS
 - 5) ฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดซับทั้งสองในคอลัมน์ โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.2 นอร์มัล ที่อัตราการไหล 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. สำหรับหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ตามลำดับ เข้าทางด้านบนของคอลัมน์เป็นเวลา 60 นาที
 - 6) ปล่อยน้ำชะล้างสารละลาย NaOH ในคอลัมน์ โดยใช้น้ำกลั่นให้ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ที่อัตราการไหลเดียวกับการฟื้นฟูประสิทธิภาพด้วยสารละลาย NaOH เป็นเวลา 60 นาที
 - 7) ใช้น้ำกลั่นชะล้างสารละลายในคอลัมน์อีกครั้ง จนกระทั่งน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8-8.5
 - 8) เริ่มรอบการทำงานใหม่โดยทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3-7 อีกเป็นจำนวน 2 รอบ
- แผนภาพการศึกษาแสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แผนภาพการศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพหลังจากใช้กำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์



สัญลักษณ์

A = ถังน้ำตัวอย่าง หรือถังน้ำรีเจเนอเรนต์

B = ปั๊มน้ำ

C = คอลัมน์บรรจุสารดูดซับ

D = ถังรับน้ำที่ผ่านคอลัมน์ หรือถังน้ำรีเจเนอเรนต์

→ = ทิศทางการไหลของน้ำ

ภาพที่ 18 ส่วนประกอบของถังดูดซับแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. วิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิว และพื้นที่ผิวจำเพาะของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง Gas Sorption Analyzer โดยวิธี BET และหาความหนาแน่นโดยใช้เครื่อง Densitometer ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
3. วิเคราะห์ขนาดและลักษณะของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5410 ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น D 8 Advance บริษัท Bruker A.G. ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) บริษัท Bruker A.G. ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6. วิเคราะห์ปริมาณสารหนูด้วยเครื่อง Hydride Generation Atomic Absorption Spectrophotometer (HG-AAS) รุ่น AAnalyst 300 บริษัท Perkin Elmer ที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมเทคโนโลยี จ.ปทุมธานี

ผลและการวิจารณ์

1. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

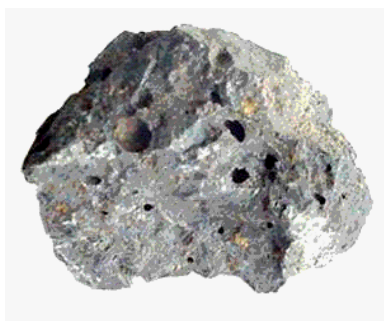
จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Sorption Analyzer โดยวิธี BET และหาความหนาแน่นโดยใช้เครื่อง Densitometer พบว่าหินภูเขาไฟมีพื้นที่ผิว 21.32 ตร.ม. พื้นที่ผิวจำเพาะ 28.55 ตร.ม./ก. และความหนาแน่น 1.24 ก./ลบ.ซม. ในขณะที่หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีพื้นที่ผิว 39.24 ตร.ม. พื้นที่ผิวจำเพาะ 43.85 ตร.ม./ก. และความหนาแน่น 2.66 ก./ลบ.ซม. ขนาดของรูพรุนวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งขนาดรูพรุนของหินภูเขาไฟมีค่า 4,000 – 8,000 อังสตรอม และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ 100 – 1,000 อังสตรอม แสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 19

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

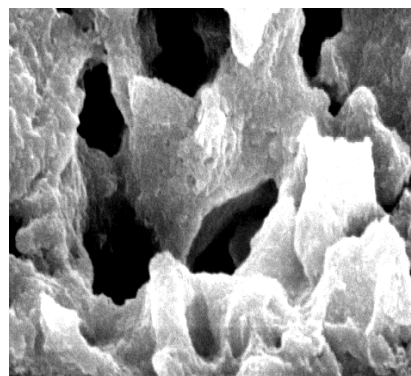
คุณสมบัติ	หน่วย	หินภูเขาไฟ	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
1. พื้นที่ผิว	ตร.ม.	21.32	39.24
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ	ตร.ม./ก.	28.55	43.85
3. ความหนาแน่น	ก./ลบ.ซม.	1.24	2.66
4. ขนาดรูพรุน	อังสตรอม	4,000 – 8,000	100 - 1,000

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่าพื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า เนื่องจากวิธีการเคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์นั้นจะทำให้อุณหภูมิสูงทำให้หินภูเขาไฟมีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส แต่ขนาดของรูพรุนจะเล็กลง เนื่องจากเหล็กออกไซด์ได้เข้าไปเคลือบในช่องว่างรูพรุนของหินภูเขาไฟ เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของสารเคลือบผิวทั้งสอง

ชนิด พบว่าความหนาแน่นของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่ามากกว่าหินภูเขาไฟ และเมื่อใช้สารดูดติดผิวในปริมาณเท่ากัน จึงทำให้มีเนื้อหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มากกว่าเนื้อหินภูเขาไฟ



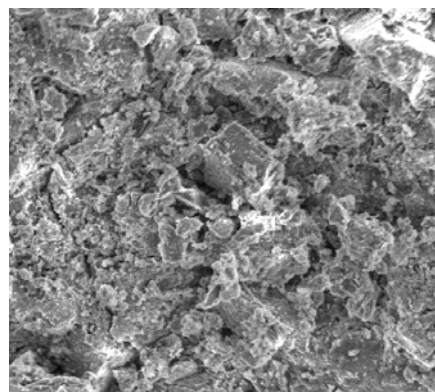
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 19 ลักษณะภายนอกและรูพรุนของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

(ก) ลักษณะภายนอกของหินภูเขาไฟ

(ข) รูพรุนของหินภูเขาไฟ กำลังขยาย 4,000 เท่า

(ค) ลักษณะภายนอกของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ กำลังขยาย 500 เท่า

(ง) รูพรุนของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ กำลังขยาย 2,000 เท่า

1.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าเป็นหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ (basalt) ประกอบด้วยแร่อะลูมิเนียม (aluminian) ควอร์ต (quartz) แคลไซต์ (calcite) และแร่อื่น ๆ อีกในปริมาณเล็กน้อย การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่า หินภูเขาไฟมีสารประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O และ MgO ในปริมาณ 33.25, 21.58, 16.42, 18.13, 4.75, 3.36 และ 2.51% ตามลำดับ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีปริมาณ 34.67, 18.10, 14.20, 26.20, 3.28, 2.57 และ 0.98% ตามลำดับ จะเห็นว่าองค์ประกอบของหินภูเขาไฟมีสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการดูดติดผิว คือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) แคลไซต์ (CaCO_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และยังพบว่าในหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีปริมาณของเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าเหล็กออกไซด์ที่พบเป็นผลึกแร่ฮีมาไทต์ ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งการเคลือบผิวหินภูเขาไฟด้วยเหล็กออกไซด์นั้นทำให้ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

ปริมาณธาตุ (%)	หินภูเขาไฟ	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
SiO_2	33.25	34.67
Al_2O_3	21.58	18.10
CaCO_3	16.42	14.20
Fe_2O_3	18.13	26.20
Na_2O	4.75	3.28
K_2O	3.36	2.57
MgO	2.51	0.98

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

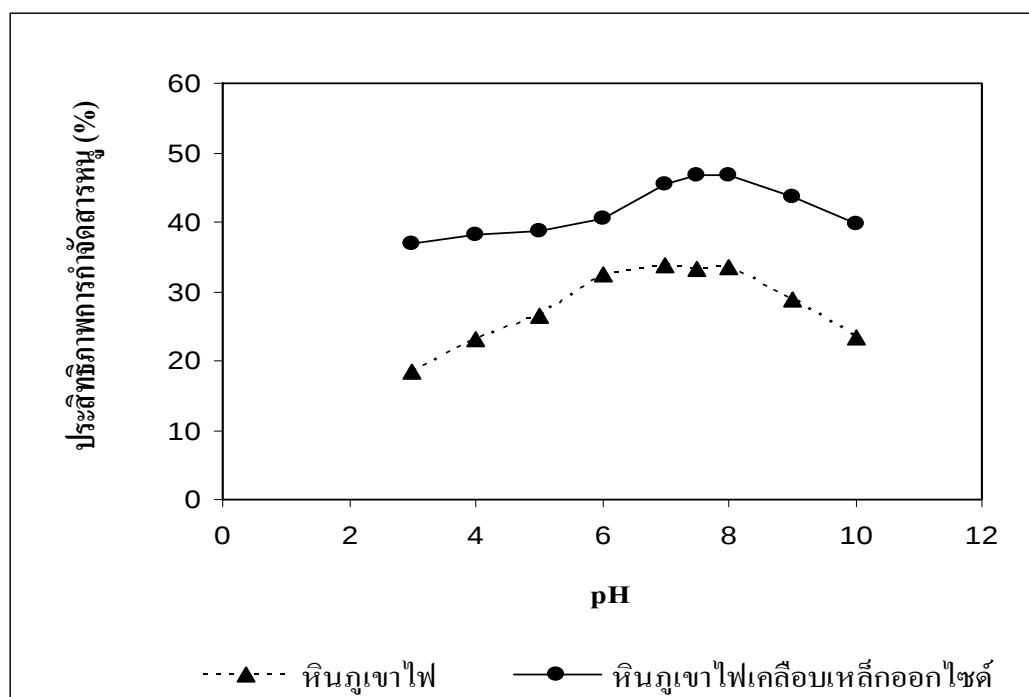
2.1 ผลการศึกษาค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสารหนู

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวสารหนู ทำการศึกษา 9 ค่า คือ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และไม่ปรับค่าพีเอช ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 1.05 มก./ล. ปริมาณหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 1.0 กรัม ปริมาณน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 50 มล. อัตราเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที และเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง

พบว่าที่ค่าพีเอช 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และไม่ปรับค่าพีเอช หินภูเขาไฟมีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 18.40, 23.16, 26.53, 32.44, 33.84, 33.41, 28.96, 23.40 และ 33.17% ตามลำดับ หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 36.76, 38.26, 38.80, 40.57, 45.47, 46.79, 43.66, 39.82 และ 46.64% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 20

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างกัน

ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ (%)	
	หินภูเขาไฟ	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
3	18.40	36.76
4	23.16	38.26
5	26.53	38.80
6	32.44	40.57
7	33.84	45.47
8	33.41	46.79
9	28.96	43.66
10	23.40	39.82
ไม่ปรับพีเอช	33.17	46.64



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์กับค่าพีเอช

จากผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 3–8 แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 9–10 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูจะลดลง โดยทั่วไปสารหนูในน้ำจะเกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของประจุลบ ซึ่งรูปแบบการแตกตัวจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย (Ferguson and Gavis, 1972) จากช่วงค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองคือ ค่าพีเอช 3–10 พบสารหนูแตกตัวอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} เป็นส่วนใหญ่ จากผลการทดลองเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 8 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูจะลดลง เนื่องจากไอออนสารหนูที่มีประจุลบ (H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-}) จะต้องแข่งขันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ทำให้พื้นผิวสัมผัสบางส่วนของสารดูดซับผิวถูกแทนที่ด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลง ส่วนหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ค่าพีเอชของน้ำจะเป็นค่าที่กำหนดประจุบนพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ ถ้าน้ำเป็นเบสเพิ่มมากขึ้นพื้นผิวของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์จะเป็นประจุลบ จึงเกิดการผลักรันกับไอออนสารหนูที่มีประจุลบเช่นกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลง

ผลการศึกษาพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิว คือ 7–8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ioannis and Anastasios (2002) พบว่าเม็ดพลาสติกเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดสารหนูให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าพีเอช 7 สมการการดูดติดผิวสารหนูบนพื้นผิวเหล็กออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 12 และ 13



R คือ พื้นผิวสัมผัสของหินภูเขาไฟ

ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7–8 เพื่อให้การกำจัดสารหนูมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งค่าพีเอชนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำตัวอย่างที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช

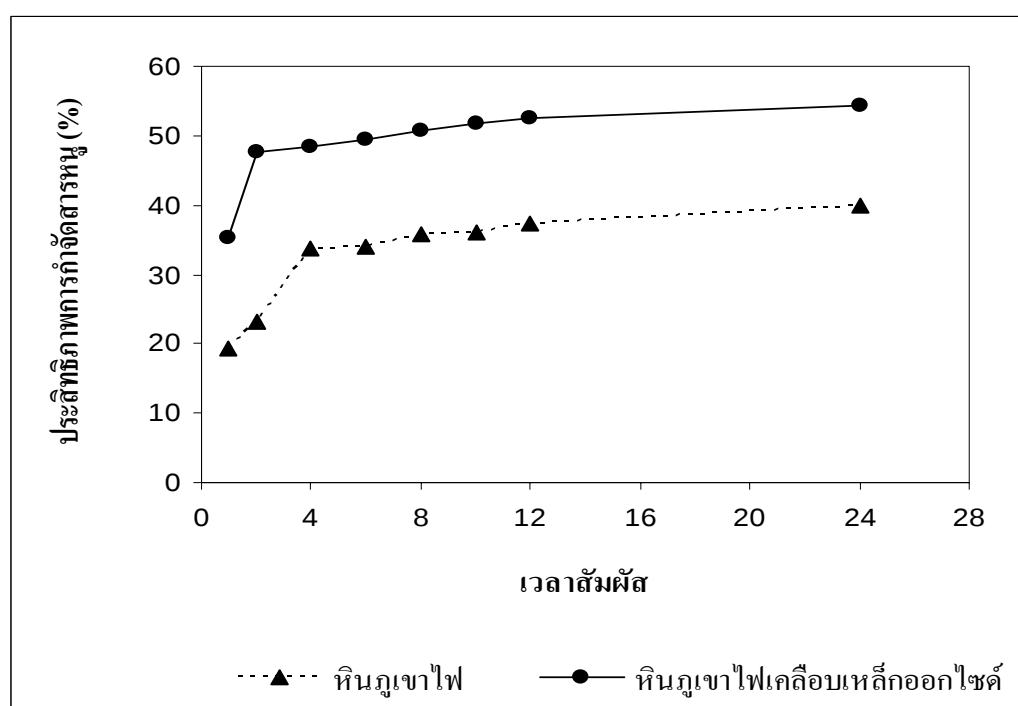
2.2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสารหนู

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสม กำหนดเวลาสัมผัสที่ใช้เป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 1.05 มก./ล. น้ำตัวอย่างมีค่าพีเอช 7-8 จึงไม่มีการปรับค่าพีเอช ปริมาณหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 1.0 กรัม ปริมาตรน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 50 มล. และอัตราเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที

พบว่าที่เวลาสัมผัส 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง หินภูเขาไฟมีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 19.36, 23.26, 33.69, 34.12, 35.79, 36.16, 37.22 และ 39.96% ตามลำดับ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 35.40, 47.75, 48.34, 49.43, 50.65, 51.72, 52.64 และ 54.31% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 21

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างกัน

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ (%)	
	หินภูเขาไฟ	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
1	19.36	35.40
2	23.26	47.75
4	33.69	48.34
6	34.12	49.43
8	35.79	50.65
10	36.16	51.72
12	37.22	52.64
24	39.96	54.31



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์กับเวลาสัมผัส

จากผลการทดลอง พบว่าหินภูเขาไฟมีการดูดติดผิวสารหนูเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมงแรก ในขณะที่หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีการดูดติดผิวสารหนูเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมงแรก และเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการดูดติดผิวสารหนูเริ่มเข้าสู่สมดุลแล้ว ดังนั้นเวลาสัมผัสของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสารหนูมีค่าเป็น 4 และ 2 ชั่วโมง แต่เลือกใช้เวลาสัมผัสที่ค่าเดียวกันเพื่อใช้เปรียบเทียบผลในการทดลองต่อไป จึงใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 4 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นเวลาที่สารดูดติดผิวทั้งสองอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว

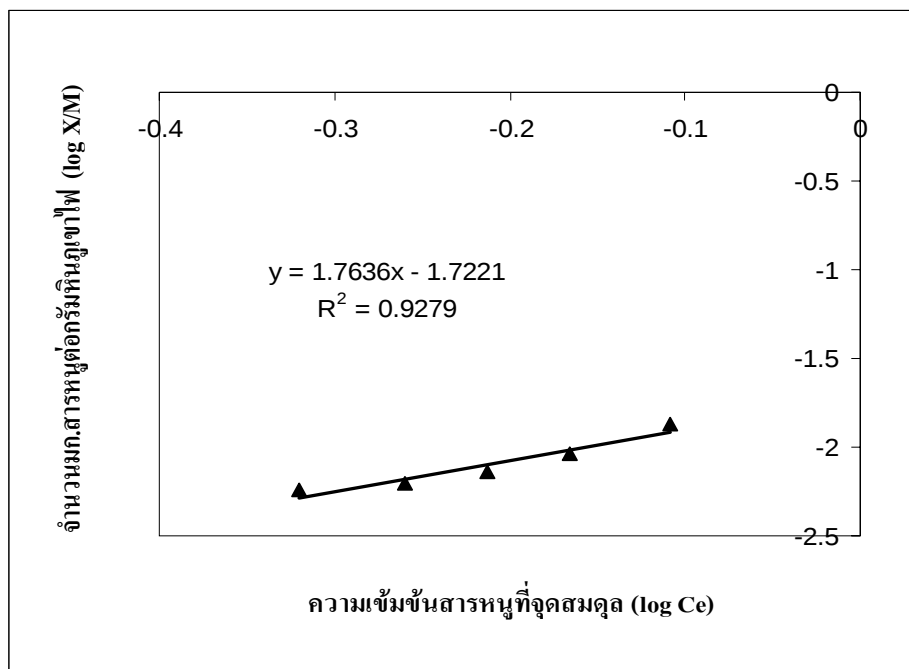
2.3 ผลการศึกษาความสามารถการดูดติดผิวของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยพิจารณาจากไอโซเทอมการดูดติดผิว

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิวที่เหมาะสมสำหรับหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ให้ความเข้มข้นสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 1.05 มก./ล. น้ำตัวอย่างมีค่าพีเอช 7-8 จึงไม่มีการปรับค่าพีเอช ปริมาณสารดูดติดผิวที่ใช้เท่ากับ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม ปริมาตรน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 50 มล. อัตราเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัสของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์คือ 4 ชั่วโมง พบว่าไอโซเทอมการดูดติดผิวสำหรับหินภูเขาไฟคือไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนด์ลิช เนื่องจากหินภูเขาไฟเกิดกลไกการดูดติดผิวทางกายภาพ ส่วนหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เกิดกลไกการดูดติดผิวทางเคมีจึงเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 22 และ 23

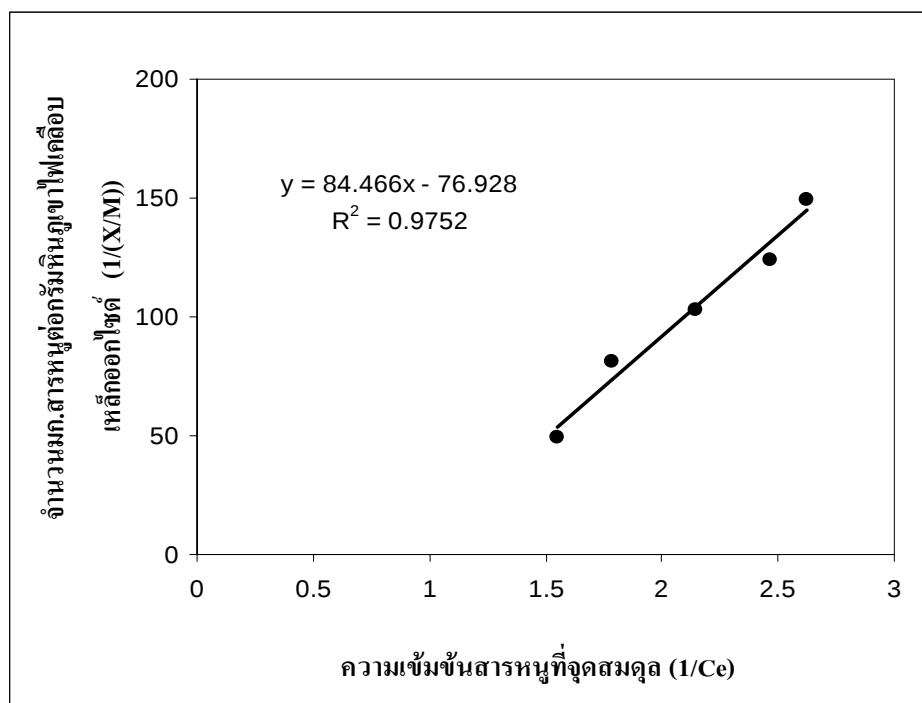
$$\text{ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนด์ลิช} \quad \frac{X}{M} = KC_e^{1/n}$$

$$\text{ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์} \quad \frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$$

- เมื่อ X/M = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว หน่วย มก./ก.
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.
 $K, 1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดติดผิวของฟรอนด์ลิช
 a, b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิวของแลงเมียร์



ภาพที่ 22 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรังก์ซ์สำหรับหินภูเขาไฟ



ภาพที่ 23 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

จากผลการทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิวสารหนูแสดงดังภาพที่ 22 และ 23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า X/M คือ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดติดผิวดำหน้าหน้าสารดูดติดผิว และค่า C_e คือ ความเข้มข้นของสารหนูที่จุดสมดุล ค่าคงที่การดูดติดผิวและค่าความจุสูงสุดของสารดูดติดผิวหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิว

สมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดติดผิวของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นดังนี้

$$\text{หินภูเขาไฟ} \quad X/M = (0.019) C_e^{(1.7636)}$$

$$\text{หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์} \quad X/M = \frac{0.012 C_e}{1 - 0.908 C_e}$$

เมื่อพิจารณาผลของไอโซเทอมการดูดติดผิวทำให้ทราบปริมาณสารหนูที่ถูกดูดติดผิวดำหน้าหน้าหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ได้ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นสารหนูในน้ำสังเคราะห์หลังการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.05 มก./ล. ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค ดังนั้นปริมาณสารหนูที่ถูกดูดติดผิวดำหน้าหน้าหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.096×10^{-3} และ 0.628×10^{-3} มก./ก. ตามลำดับ

3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (adsorption column)

3.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ของ หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน

ในการทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ กำหนดให้ระดับความสูงสารดูดติดผิว 40 ซม. ความเข้มข้น สารหนูเริ่มต้นเท่ากับ 1.05 มก./ล. น้ำตัวอย่างมีค่าพีเอช 7-8 จึงไม่มีการปรับค่าพีเอช ทำการทดลอง โดยป้อนน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่อัตราการกรอง 3 ค่า คือ 0.1, 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และ เติมน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการกรอง 0.1, 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. หินภูเขาไฟมี ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 96.93, 92.63 และ 76.98% ตามลำดับ พบว่าที่อัตรา การกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูดีที่สุด แต่ที่อัตราการกรอง อื่นๆ มีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่า และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพเฉลี่ย ในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 99.77, 99.68 และ 97.82% ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราการกรอง 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 24

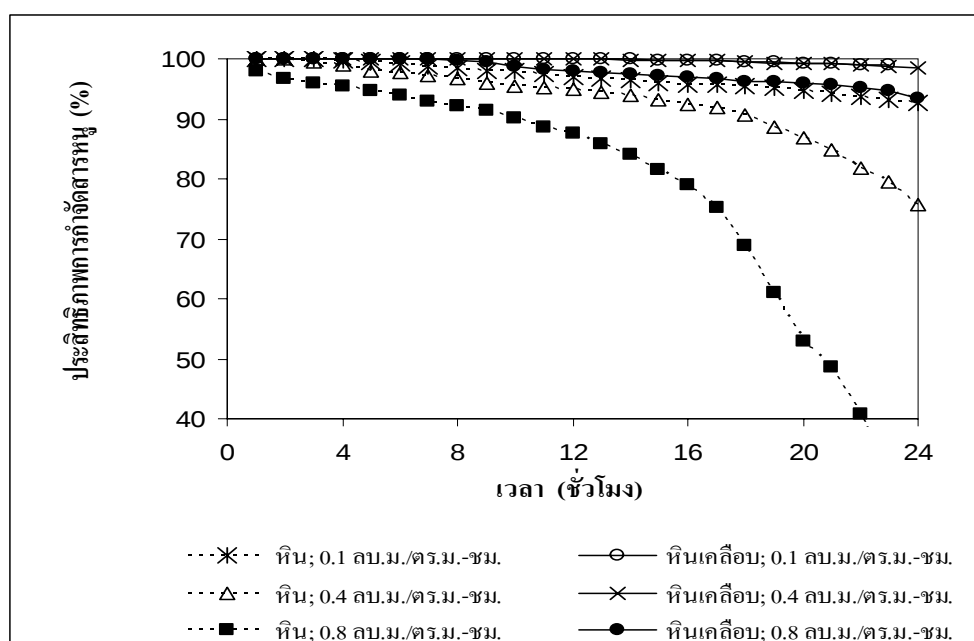
ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน

ชั่วโมง ที่	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)					
	หินภูเขาไฟ			หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์		
	อัตราการกรอง	อัตราการกรอง	อัตราการกรอง	อัตราการกรอง	อัตราการกรอง	อัตราการกรอง
	0.1 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.	0.4 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.	0.8 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.	0.1 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.	0.4 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.	0.8 ลบ.ม/ตร.ม.-ชม.
1	100.00	100.00	97.92	100.00	100.00	100.00
2	100.00	100.00	96.81	100.00	100.00	100.00
3	100.00	99.62	95.99	100.00	100.00	100.00
4	99.70	98.87	95.45	100.00	100.00	100.00
5	99.51	98.06	94.62	100.00	100.00	100.00
6	99.25	97.60	93.91	100.00	100.00	100.00
7	98.84	97.20	92.79	100.00	100.00	99.89
8	98.53	96.78	92.11	100.00	100.00	99.67
9	98.08	95.83	91.27	100.00	100.00	99.39
10	97.88	95.32	90.12	100.00	100.00	98.63
11	97.56	95.21	88.60	100.00	100.00	98.25
12	97.03	94.90	87.58	100.00	99.96	98.00
13	96.74	94.33	85.82	100.00	99.91	97.82
14	96.37	93.82	83.98	100.00	99.86	97.56
15	96.04	93.06	81.62	99.92	99.79	97.27
16	95.82	92.43	79.11	99.87	99.74	96.97
17	95.63	91.99	75.31	99.79	99.66	96.82
18	95.46	90.63	68.98	99.68	99.55	96.32
19	95.15	88.64	60.96	99.57	99.34	96.09
20	94.74	86.76	53.01	99.41	99.27	95.91
21	94.30	84.93	48.50	99.25	99.19	95.73
22	93.62	81.88	40.67	99.12	98.94	95.31

ตารางที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน

ชั่วโมง ที่	ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)					
	หินภูเขาไฟ			หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์		
	อัตราการกรอง 0.1	อัตราการกรอง 0.4	อัตราการกรอง 0.8	อัตราการกรอง 0.1	อัตราการกรอง 0.4	อัตราการกรอง 0.8
	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.	ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
23	93.22	79.53	31.63	99.05	98.72	94.60
24	92.77	75.69	20.66	98.88	98.45	93.52
เฉลี่ย	96.93	92.63	76.98	99.77	99.68	97.82

หมายเหตุ ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูที่ทำให้น้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค มีค่าไม่น้อยกว่า 95.24% (สารหนูไม่เกิน 0.05 มก./ล.)



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของสารดูดติดผิว เมื่ออัตราการกรองแตกต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการกรองเพิ่มขึ้น หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลง เนื่องจากอัตราการกรองสูงทำให้สารหนูติดผิวในคอลัมน์มีระยะเวลาสัมผัสกับสารหนูในน้ำสังเคราะห์สั้นลง และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นสารหนูติดผิวมีมากขึ้นทำให้มีปริมาณสารหนูมากกว่าที่อัตราการกรองต่ำ ดังนั้นอัตราการกรองที่เหมาะสมของหินภูเขาไฟคือ 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 96.93% เนื่องจากประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้น้ำที่บำบัดได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค แต่ที่อัตราการกรอง 0.4 และ 0.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และสำหรับหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่อัตราการกรองทั้ง 3 ค่า มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนูในแต่ละชั่วโมงและปริมาณน้ำที่บำบัดได้ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มีความเหมาะสมที่สุด

สรุปว่าอัตราการกรองที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูโดยใช้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ คือ 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ซึ่งสามารถกำจัดสารหนูในน้ำให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคได้

3.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

ในการทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ อัตราการกรองที่เหมาะสมคือ 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ที่ระดับความสูงสารหนูติดผิว 40 ซม. ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 3 ค่า คือ 0.54, 1.05 และ 5.12 มก./ล. น้ำตัวอย่างมีค่าพีเอช 7-8 จึงไม่มีการปรับค่าพีเอชและเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง เมื่อให้ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 0.54, 1.05 และ 5.12 มก./ล. หินภูเขาไฟมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 97.47, 96.93 และ 86.47% ตามลำดับ หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 99.75, 99.68 และ 98.25% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ภาพที่ 25 และ 26

การพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูที่ทำให้น้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค (สารหนูไม่เกิน 50 ไมโครกรัม/ลิตร) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคือ 0.54, 1.05 และ 5.12 มก./ล. ต้องมีประสิทธิภาพเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 90.74, 95.24 และ 99.02%

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลือและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนู					
	สารหนู 540 µg/l		สารหนู 1050 µg/l		สารหนู 5120 µg/l	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
1	0.00	100.00	0.00	100.00	60.84	98.81
2	0.00	100.00	0.00	100.00	100.86	98.03
3	0.00	100.00	0.00	100.00	119.33	97.67
4	0.00	100.00	3.13	99.70	168.75	96.70
5	0.00	100.00	5.13	99.51	194.98	96.19
6	1.44	99.73	7.92	99.25	221.26	95.68
7	2.79	99.48	12.14	98.84	271.48	94.70
8	3.70	99.32	15.42	98.53	320.71	93.74
9	5.87	98.91	20.20	98.08	367.42	92.82
10	7.77	98.56	22.25	97.88	399.93	92.19
11	9.26	98.29	25.60	97.56	433.70	91.53
12	10.95	97.97	31.18	97.03	481.23	90.60
13	13.26	97.54	34.21	96.74	509.09	90.06
14	15.18	97.19	38.15	96.37	589.51	88.49
15	17.74	96.71	41.54	96.04	650.36	87.30
16	20.15	96.27	43.84	95.82	737.11	85.60
17	20.50	96.20	45.84	95.63	870.78	82.99
18	22.86	95.77	47.65	95.46	930.25	81.83
19	24.53	95.46	50.98	95.15	1051.33	79.47
20	26.72	95.05	55.20	94.74	1214.46	76.28
21	28.70	94.68	59.82	94.30	1424.36	72.18
22	30.30	94.39	66.99	93.62	1540.82	69.91

**ตารางที่ 6 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-
ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน**

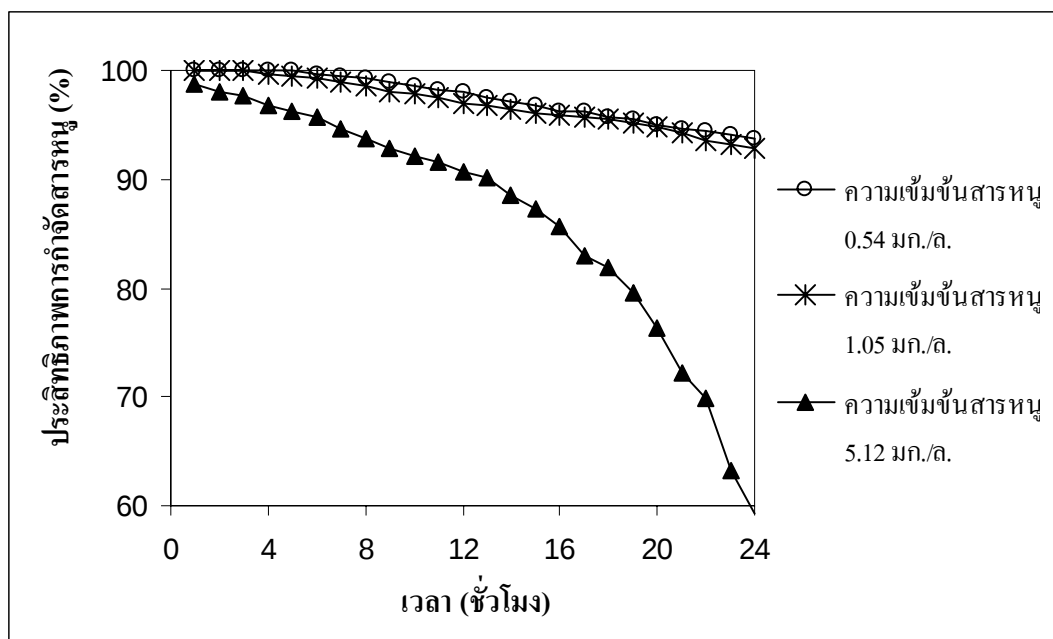
ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลือและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนู					
	สารหนู 540 µg/l		สารหนู 1050 µg/l		สารหนู 5120 µg/l	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
23	31.56	94.15	71.24	93.22	1881.72	63.25
24	33.97	93.71	75.87	92.77	2082.33	59.33
เฉลี่ย	13.64	97.47	32.26	96.93	692.61	86.47

**ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง
0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน**

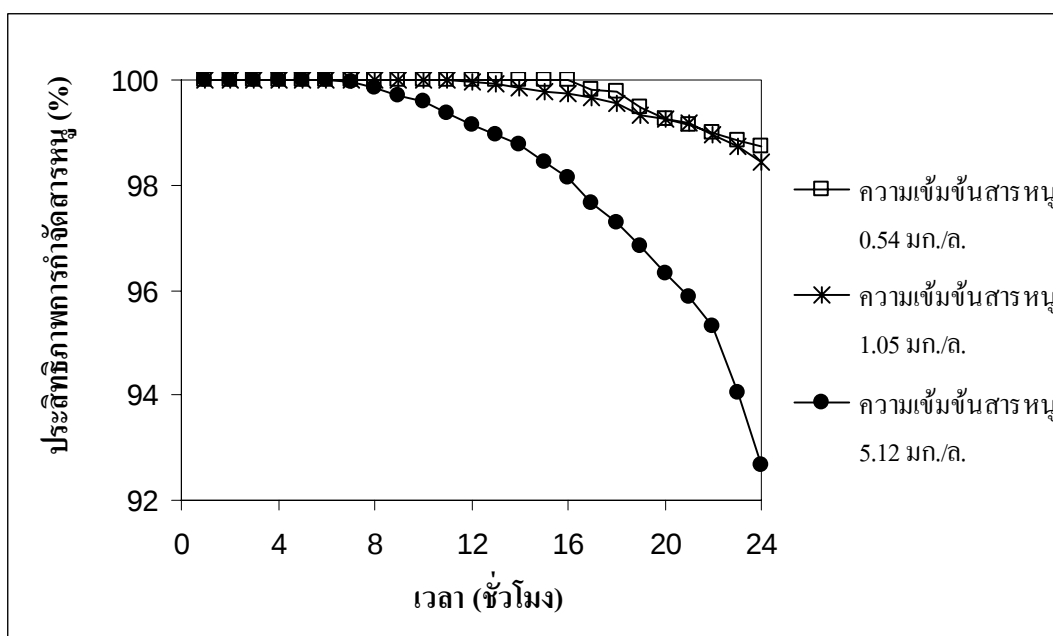
ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลือและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนู					
	สารหนู 540 µg/l		สารหนู 1050 µg/l		สารหนู 5120 µg/l	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
1	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
4	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
5	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
6	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
7	0.00	100.00	0.00	100.00	1.62	99.97
8	0.00	100.00	0.00	100.00	7.42	99.86
9	0.00	100.00	0.00	100.00	14.72	99.71
10	0.00	100.00	0.00	100.00	20.92	99.59
11	0.00	100.00	0.00	100.00	33.38	99.35
12	0.00	100.00	0.44	99.96	43.20	99.16
13	0.00	100.00	0.97	99.91	54.20	98.94
14	0.00	100.00	1.51	99.86	62.24	98.78
15	0.00	100.00	2.17	99.79	80.08	98.44

ตารางที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตรา
การกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

ชั่วโมง	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลือและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนู					
	สารหนู 540 µg/l		สารหนู 1050 µg/l		สารหนู 5120 µg/l	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้น ที่เหลือ (µg/l)	ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
16	0.00	100.00	2.69	99.74	94.61	98.15
17	0.97	99.82	3.53	99.66	120.46	97.65
18	1.22	99.77	4.69	99.55	139.66	97.27
19	2.80	99.48	6.93	99.34	161.72	96.84
20	4.12	99.24	7.70	99.27	189.37	96.30
21	4.70	99.13	8.52	99.19	212.17	95.86
22	5.45	98.99	11.16	98.94	239.87	95.31
23	6.22	98.85	13.48	98.72	305.29	94.04
24	6.76	98.75	16.30	98.45	375.50	92.67
เฉลี่ย	1.34	99.75	3.34	99.68	89.85	98.25



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของหินภูเขาไฟ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน



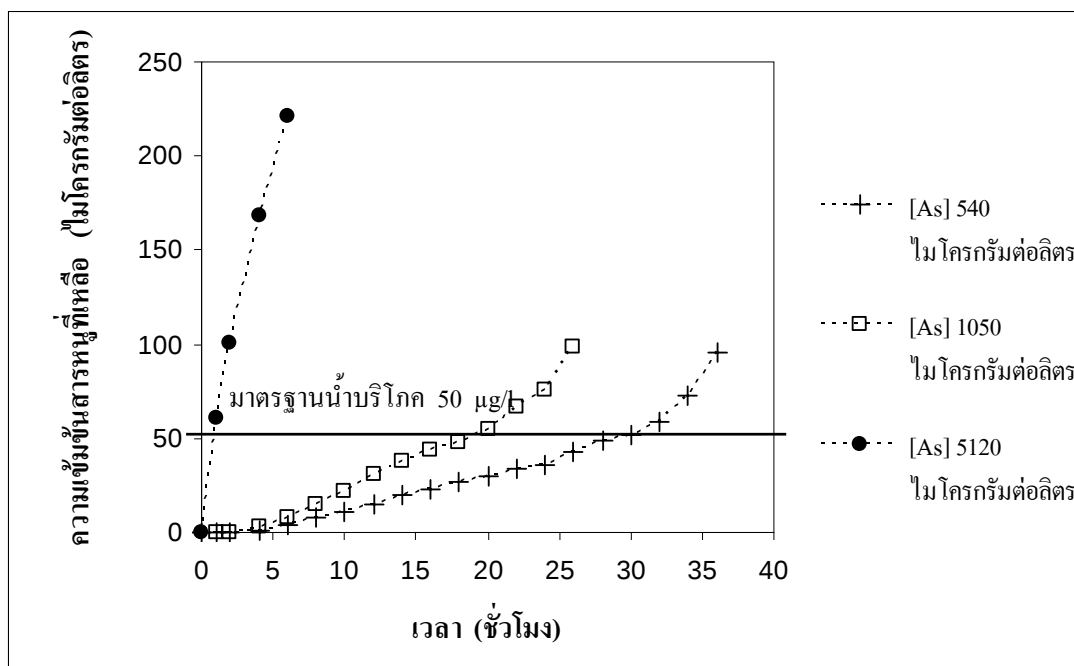
ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

เมื่อใช้หินภูเขาไฟเป็นสารดูดซับที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. พบว่าที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นมีค่า 0.54 และ 1.05 มก./ล. มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค แต่ที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5.12 มก./ล. ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนูลดลงและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นหินภูเขาไฟจึงเหมาะสมที่จะใช้กำจัดสารหนูที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ สำหรับหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. พบว่าความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นทั้ง 3 ค่า มีประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดสารหนูอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค ดังนั้นหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถใช้กำจัดสารหนูที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูงได้

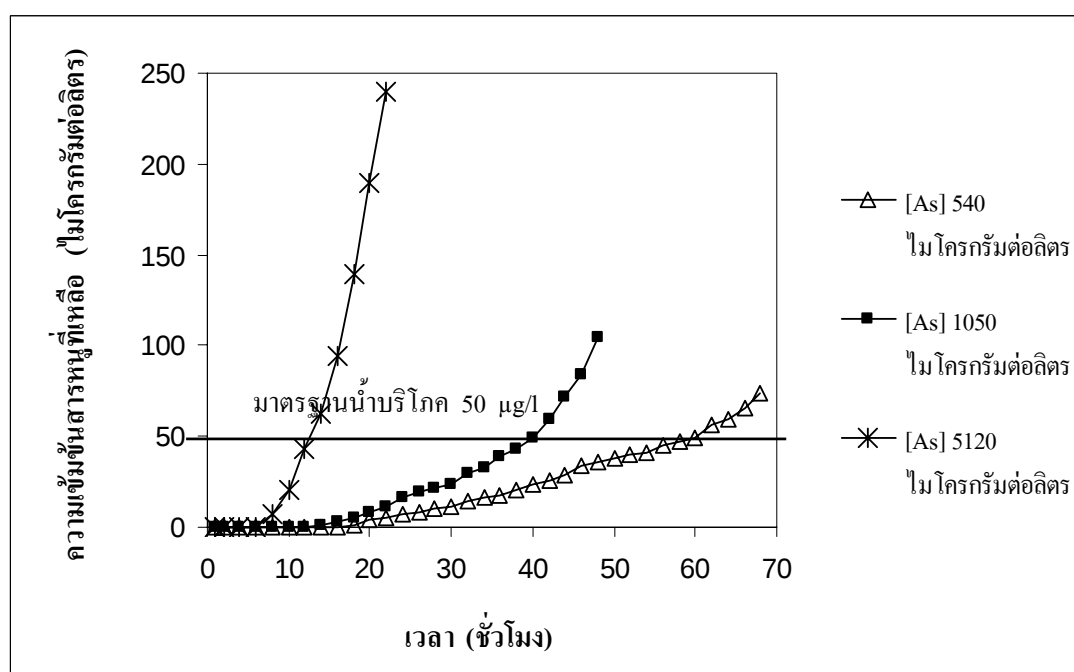
3.3 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ป้อนน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.54, 1.05 และ 5.12 มก./ล. ให้ไหลอย่างต่อเนื่องที่อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ เมื่อนำมาพิจารณาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์โดยพิจารณาจากความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ออกจากระบบต้องมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค คือ 0.05 มก./ล. (หรือ 50 ไมโครกรัม/ลิตร)

จากผลการทดลองที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.54, 1.05 และ 5.12 มก./ล. พบว่าหินภูเขาไฟมีอายุการใช้งาน 30, 18 ชั่วโมงและไม่สามารถใช้งานได้ ตามลำดับ ในขณะที่หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีอายุการใช้งานนานกว่าคือ 60, 40 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 27 และ 28 และตารางที่ 8 และตารางผนวกที่ 7 – 9



ภาพที่ 27 อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน



ภาพที่ 28 อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 8 อายุการใช้งานและปริมาณน้ำที่บำบัดได้ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้น สารหนู (มก./ล.)	หินภูเขาไฟ		หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	
	(อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		(อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	
	อายุการใช้งาน (ชม.)	ปริมาณน้ำที่ บำบัดได้ (ลิตร)	อายุการใช้งาน (ชม.)	ปริมาณน้ำที่ บำบัดได้ (ลิตร)
0.54	30	3.42	60	27.36
1.05	18	2.05	40	18.24
5.12	- (*)	- (*)	12	5.47

หมายเหตุ (*) คือความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ออกจากระบบชั่วโมงแรกมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

จะเห็นว่าความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างมีผลต่ออายุการใช้งานของสารดูดติดผิว ที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นต่ำจะมีอายุการใช้งานนานกว่าที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นสูง เมื่อใช้หินภูเขาไฟที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.54 มก./ล. มีอายุการใช้งานนานที่สุด 30 ชั่วโมงและได้ปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานมากที่สุดเท่ากับ 3.42 ลิตร แต่ที่ความเข้มข้นสารหนู 5.12 มก./ล. น้ำที่ออกจากระบบมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากมีความเข้มข้นสารหนูมากเกินไปจนขีดความสามารถของหินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. สามารถกำจัดสารหนูได้ทุกความเข้มข้น เมื่อความเข้มข้นสารหนูเพิ่มขึ้นหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ก็ยังสามารถกำจัดสารหนูได้แต่มีค่าน้อยลง ที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 0.54 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีที่สุดเช่นเดียวกับหินภูเขาไฟ แต่มีอายุการใช้งานนานกว่าคือ 60 ชั่วโมงและได้ปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานมากที่สุดเท่ากับ 27.36 ลิตร

4. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดิน

น้ำผิวดินที่นำมาใช้ในการทดลองเก็บมาจากบ้านหัวหมือง หมู่ที่ 2 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นลำธารที่ไหลผ่านเหมืองแร่เก่าจึงมีสารหนูปนเปื้อน แต่ชาวบ้านยังนำมาใช้ในการอุปโภค ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดิน (ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	น้ำผิวดิน
1. ค่าพีเอช	-	6.70
2. สารหนู	มก./ล.	0.311
3. ความขุ่น	NTU	1.47
4. ความกระด้าง	มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต	49.0
5. ความเป็นด่าง	มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต	2.0
6. คลอไรด์	มก./ล.	3.50
7. ซัลเฟต	มก./ล.	2.48

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดิน เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค พบว่าปริมาณสารหนูที่พบในน้ำผิวดินมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ (เกณฑ์อนุโลมสูงสุดสารหนูมีค่าไม่เกิน 0.05 มก./ล. หรือ 50 ไมโครกรัม/ลิตร) เช่น

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)

- มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)

แต่ดัชนีคุณภาพน้ำค่าอื่นๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ความขุ่น ความกระด้าง ความเป็นด่าง คลอไรด์ และซัลเฟต มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

การทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินด้วยหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้อัตราการกรองที่เหมาะสมคือ 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ ให้ความสูงสารดูดติดผิวในคอลัมน์ 40 ซม. ความเข้มข้นสารหนูในน้ำผิวดินมีค่า 0.311 มก./ล. และเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 96.60 และ 99.85% ตามลำดับ จากการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง สารดูดติดผิวทั้งสองชนิดสามารถกำจัดสารหนูให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคได้ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

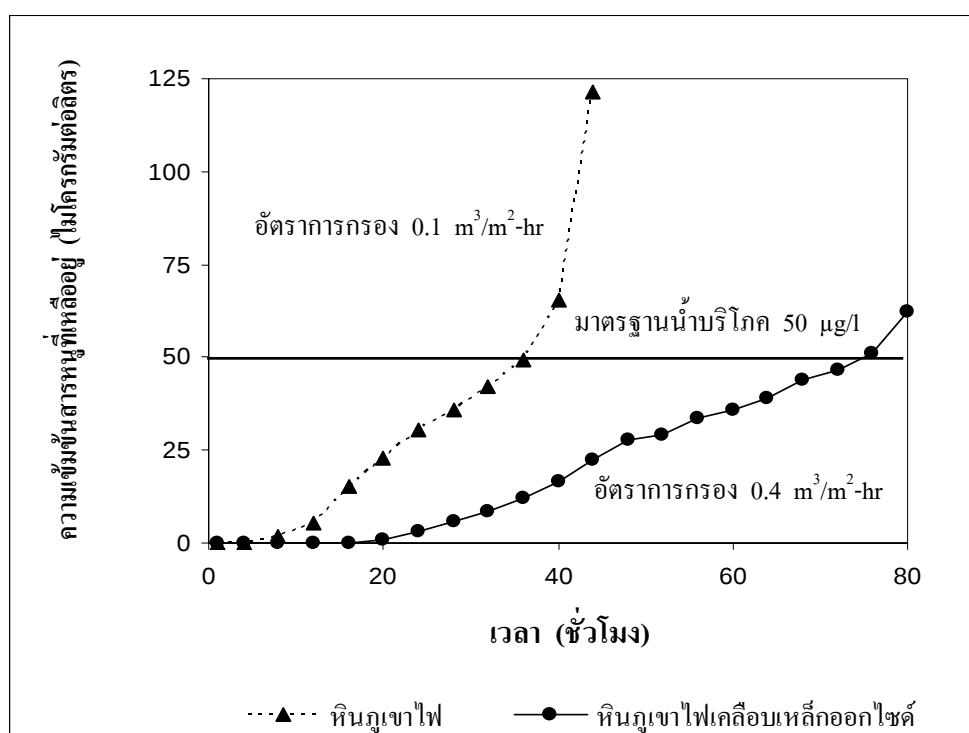
ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ (อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ (อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (µg/l)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสารหนู (%)	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (µg/l)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสารหนู (%)
1	0.00	100.00	0.00	100.00
2	0.00	100.00	0.00	100.00
3	0.00	100.00	0.00	100.00
4	0.00	100.00	0.00	100.00
5	0.00	100.00	0.00	100.00
6	0.00	100.00	0.00	100.00
7	0.00	100.00	0.00	100.00
8	1.64	99.47	0.00	100.00
9	2.40	99.23	0.00	100.00
10	2.90	99.07	0.00	100.00
11	4.15	98.67	0.00	100.00
12	5.28	98.30	0.00	100.00
13	6.43	97.93	0.00	100.00
14	10.95	96.48	0.00	100.00
15	13.26	95.74	0.00	100.00
16	15.18	95.12	0.00	100.00
17	17.74	94.30	0.00	100.00
18	20.15	93.52	0.00	100.00
19	20.50	93.41	0.88	99.72
20	22.86	92.65	0.96	99.69
21	24.53	92.11	1.27	99.59
22	26.72	91.41	1.93	99.38
23	28.70	90.77	2.77	99.11
24	30.30	90.26	3.23	98.96
เฉลี่ย	10.57	96.60	0.46	99.85

หมายเหตุ ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูที่ทำให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคมีค่าไม่น้อยกว่า 83.92% (สารหนูไม่เกิน 50 ไมโครกรัม/ลิตร)

4.3 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

จากผลการทดลองข้อ 4.2 เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องจนครบอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยพิจารณาจากความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค ซึ่งยอมให้มีสารหนูไม่เกิน 0.05 มก./ล. และวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินหลังออกจากระบบด้วย

ผลการทดลองพบว่าอายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่สามารถกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคคือ 36 และ 74 ชั่วโมง และปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานเท่ากับ 4.10 และ 33.74 ลิตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน

เนื่องจากความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นมีค่าต่ำ คือ 0.311 มก./ล. จึงทำให้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูง จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินหลังออกจากระบบการดูดซับด้วยหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นสารหนู ค่าพีเอช ความขุ่น ความกระด้าง ความเป็นด่าง คลอไรด์ และซัลเฟต ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำผิวดินก่อนและหลังการดูดซับด้วยหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	คุณภาพน้ำผิวดิน			
	ก่อนเข้า	หลังออกจากระบบ		มาตรฐาน (*)
		หินภูเขาไฟ	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์	
1. ค่าพีเอช	6.70	7.44	7.15	6.5-8.5
2. สารหนู (ไมโครกรัม/ลิตร)	311	49.28	49.05	50
3. ความขุ่น (NTU)	1.47	0.72	0.45	20
4. ความกระด้าง (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)	49.00	380	320	500
5. ความเป็นด่าง (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)	2.00	32.6	45.5	250
6. คลอไรด์ (มก./ล.)	3.50	7.4	5.3	600
7. ซัลเฟต (มก./ล.)	2.48	0.85	0.64	250

หมายเหตุ (*) มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคในเกณฑ์อนุโลมสูงสุด ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำผิวดินก่อนและหลังการดูดติดผิวด้วยหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นสารหนู ความขุ่น และซัลเฟตมีค่าลดลง เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารดูดติดผิว โดยสารหนูและซัลเฟตจะเกิดการดูดติดผิวที่พื้นผิวสัมผัสของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ได้ และความขุ่นจะถูกดักจับไว้ในช่องว่างรูพรุน สำหรับค่าพีเอช ความเป็นด่าง ความกระด้าง และคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งทำให้เกิดความกระด้าง และเหล็กออกไซด์ที่มีในสารดูดติดผิวทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนจึงทำให้ค่าพีเอช และความเป็นด่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

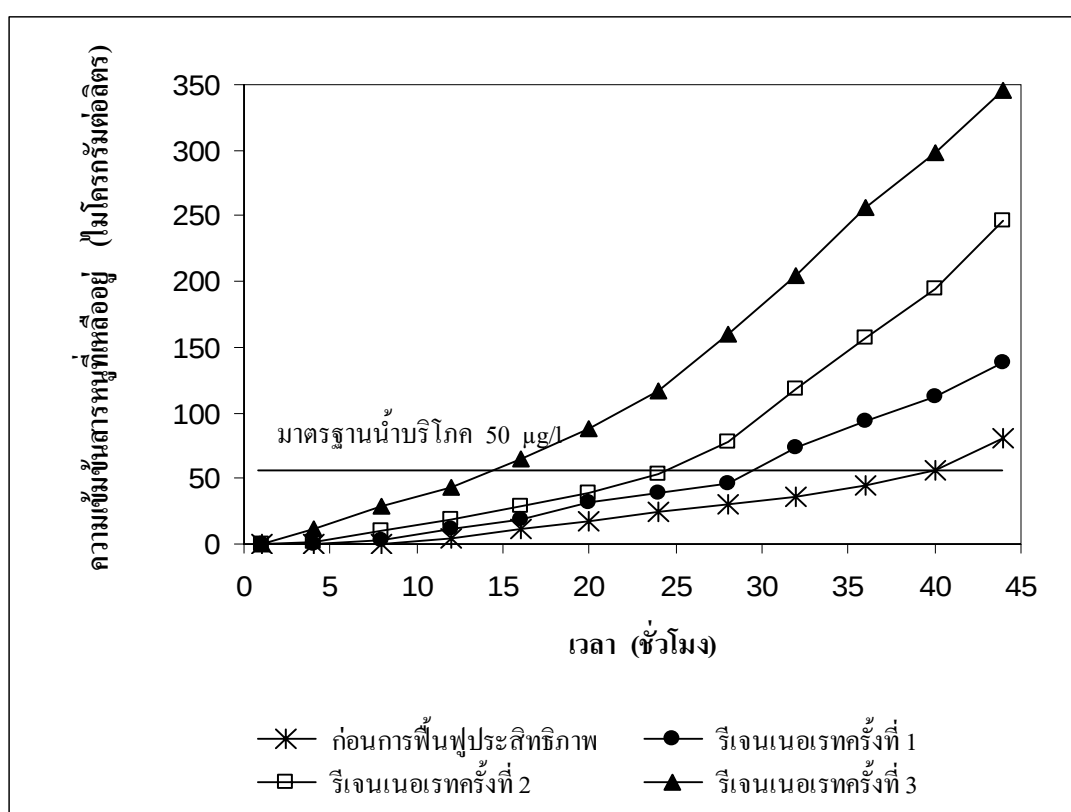
5. การศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพ

ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของสารดูดติดผิว การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การฟื้นฟูประสิทธิภาพสารดูดติดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2 นอร์มัล และขั้นตอนที่ 2 การนำสารดูดติดผิวกลับมาใช้งานใหม่ ทำการทดลองโดยป้อนน้ำสังเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1.05 มก./ล. ลงในคอลัมน์ที่บรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ที่มีระดับความสูง 40 ซม. ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ กำหนดระยะเวลาเดินระบบอย่างต่อเนื่องสำหรับหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นเวลา 24 และ 44 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่สารดูดติดผิวทั้งสองหมดประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากอายุการใช้งานในการทดลองข้อ 3.3 เมื่อทำการทดลองทั้ง 2 ขั้นตอน จึงถือว่าเป็น 1 รอบการทำงาน ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีรอบการทำงาน 3 รอบ เพื่อหาอายุการใช้งานของสารดูดติดผิวทั้งสองว่าจะสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่

ผลการทดลองพบว่าหินภูเขาไฟสามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดติดผิวได้ แต่นำกลับมาใช้งานใหม่ไม่ได้ สำหรับหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ภายหลังผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพสามารถกำจัดสารหนูในรอบการทำงานได้ทั้ง 3 รอบการทำงาน แต่อายุการใช้งานในแต่ละรอบจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทำงานในรอบแรก แสดงดังตารางที่ 12 และภาพที่ 30

ตารางที่ 12 อายุการใช้งานและปริมาณน้ำที่บำบัดได้ของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ

รอบการทำงาน	ความเข้มข้น ที่เหลือ ($\mu\text{g/l}$)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสารหนู (%)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ (ลิตร)
ก่อนการฟื้นฟู	49.71	95.27	38	17.33
1	49.13	95.32	29	13.22
2	48.65	95.37	22	10.03
3	47.26	95.50	14	6.38



ภาพที่ 30 อายุการใช้งานของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ

จากผลการทดลอง พบว่าการทำงานรอบแรกก่อนการฟื้นฟูประสิทธิภาพ หินภูเขาไฟมีอายุการใช้งาน 17 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค 1.94 ลิตร ภายหลังจากการฟื้นฟูประสิทธิภาพแล้วเริ่มการทำงานรอบที่ 1 หินภูเขาไฟยังคงดูดซับพิวสารถได้ แต่ความเข้มข้นสารหนูในน้ำออกจากระบบชั่วโมงแรกนั้นมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคคือ 0.05 มก./ล. จึงถือว่าหินภูเขาไฟหมดอายุการใช้งานและการฟื้นฟูประสิทธิภาพนั้นไม่สามารถนำหินภูเขาไฟกลับมาใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากหินภูเขาไฟเกิดกลไกการดูดซับพิวสารถแบบกายภาพ สารหนูถูกดูดซับที่พื้นผิวสัมผัสและในรูพรุนของหินภูเขาไฟ เมื่อระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวสัมผัสและรูพรุนของหินภูเขาไฟลดลงจึงเกิดการดูดซับพิวสารถได้น้อย ส่วนหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการฟื้นฟูประสิทธิภาพมีอายุการใช้งานเป็นเวลา 38 ชั่วโมง ภายหลังจากการฟื้นฟูประสิทธิภาพสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ทั้ง 3 รอบการทำงาน โดยมีอายุการใช้งานเป็น 29, 22 และ 14 ชั่วโมง และได้ปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคเท่ากับ 13.22, 10.03 และ 6.38 ลิตร ตามลำดับ แสดงว่าหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดซับพิวสารถเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากการเคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์จะช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสและองค์ประกอบทางเคมีทำให้เกิดการดูดซับพิวสารถได้เพิ่มขึ้น

จากการฟื้นฟูประสิทธิภาพหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าอายุการใช้งานและปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคมีค่าน้อยลงกว่าการทำงานในรอบแรก เนื่องจากสารหนูเกิดการดูดซับผิวกับเหล็กออกไซด์ได้ดี เมื่อทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพจึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนสารหนูและไฮดรอกไซด์ไอออนที่ผิวสัมผัสเหล็กออกไซด์ได้น้อยลง ทำให้ผิวสัมผัสเหล็กออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ไอออนเกาะอยู่น้อยกว่าการใช้งานในครั้งแรก (ธรรม, 2541) ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับพิวสารถจึงลดลง การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารหนูและไฮดรอกไซด์ไอออน แสดงได้ดังสมการที่ 14



R คือ พื้นผิวสัมผัสเหล็กออกไซด์

6. การประเมินค่าใช้จ่ายการกำจัดสารหนูโดยใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

การประเมินค่าใช้จ่ายจะคิดจากต้นทุนในการเตรียมสารดูดซับและค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ โดยการเดินระบบ 1 ครั้งใช้สารดูดซับน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

1. การเตรียมสารดูดซับ

- หินภูเขาไฟ 1 กิโลกรัม ราคา 5 บาท
- หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ สารเคมีที่ใช้ในการเคลือบผิว
 - (1) กรดซัลฟิวริกใช้ 0.25 ลิตรต่อหินภูเขาไฟ 1 กิโลกรัม ราคา 50 บาท
 - (2) เฟอร์ริกไนเตรทใช้ 0.1 กิโลกรัมต่อหินภูเขาไฟ 1 กิโลกรัม ราคา 200 บาท

2. การเดินระบบ

- ค่าไฟ ในการเดินระบบ 1 ชั่วโมง คิดเป็นเงิน 0.11 บาท
- ค่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการฟื้นฟูประสิทธิภาพในแต่ละครั้ง คิดเป็นเงิน 1.83 บาท

ตารางที่ 13 การประเมินค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารหนู

รอบการทำงาน ที่	ประสิทธิภาพ การกำจัด สารหนู (%)	อายุการใช้งาน (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำ ที่บำบัดได้ (ลิตร)	ค่าใช้จ่ายเตรียม สารดูดซับ (บาท)	ค่าใช้จ่ายใน การเดินระบบ (บาท)	ค่าใช้จ่าย ทั้งหมด (บาท)
ก่อน ฟื้นฟู	95.27	38	17.33	255	4.18	259.18
1	95.32	29	13.22	-	5.02	5.02
2	95.37	22	10.03	-	4.25	4.25
3	95.50	14	6.38	-	3.37	3.37

ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารหนูโดยใช้หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ในรอบการทำงาน 3 รอบการทำงาน ซึ่งได้ปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค 46.96 ลิตร มีค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น 271.82 บาท

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และน้ำผิวดินที่เก็บมาจากบ้านหัวเหมือง หมู่ที่ 2 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนูในน้ำ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-8 และเวลาสัมผัสที่เข้าสู่สมดุลของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เท่ากับ 4 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ
2. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์แบบต่อเนื่องด้วยถังดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าหินภูเขาไฟมีอัตราการกรองที่เหมาะสม คือ 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และเหมาะสำหรับกำจัดสารหนูที่มีค่าความเข้มข้นต่ำคือมีปริมาณสารหนูไม่เกิน 1.0 มก./ล. ส่วนหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีอัตราการกรองที่เหมาะสม คือ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และสามารถกำจัดสารหนูที่มีค่าความเข้มข้นสูงได้ แต่มีปริมาณสารหนูไม่เกิน 5.0 มก./ล.
3. การศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดินเก็บจากบ้านหัวเหมือง หมู่ที่ 2 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าในน้ำผิวดินมีความเข้มข้นสารหนู 0.311 มก./ล. ทำการทดลองโดยบรรจุหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ให้มีความสูง 40 ซม. ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ เติมน้ำต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสารหนูเท่ากับ 96.60 และ 99.85% อายุการใช้งานเท่ากับ 36 และ 74 ชั่วโมง และมีปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคเท่ากับ 4.10 และ 33.74 ลิตร ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินหลังจากจากระบบพบว่าปริมาณสารหนู ค่าพีเอช ความขุ่น ความกระด้าง ความเป็นด่าง คลอไรด์ และซัลเฟตอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

4. การศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพสารดูดซับผิวโดยการรีเจนเนอเรชันด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าหินภูเขาไฟไม่เหมาะที่จะนำมาฟื้นฟูประสิทธิภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ เนื่องจากไม่สามารถกำจัดสารหนูในน้ำที่ออกจากระบบให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคได้ แต่หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์นั้นสามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพและนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ในรอบการทำงาน 3 รอบ อายุการใช้งานในแต่ละรอบเป็น 29, 22 และ 14 ชั่วโมง และปริมาณน้ำที่บำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคเท่ากับ 13.22, 10.03 และ 6.38 ลิตร ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากสารดูดซับที่ใช้แล้วมีความเป็นพิษอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงควรใช้วิธีการกำจัดที่เหมาะสม เช่น การฝังกลบ
2. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูโดยใช้หินภูเขาไฟเคลือบโลหะออกไซด์อื่นๆ
3. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักอื่นๆ โดยใช้หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์
4. ศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์เพิ่มเติมเพื่อหากรอบการทำงานมากที่สุดในการนำสารดูดซับผิวกลับมาใช้งานใหม่
5. ศึกษาหาสารดูดซับผิวจากธรรมชาติหรือวัสดุเคลือบชนิดอื่นมาใช้ในการกำจัดสารหนู

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนปฏิบัติการการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ. 2541. สารหนู. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท อินทิเกรตเต็ดโปรโมชันเทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ.

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2525. รายงานคุณภาพแม่น้ำท่าจีน ปี พ.ศ. 2525. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

ธรรม ฐึ่ประกอบกิจ. 2541. การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นันทนา ชูจักร. 2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิคม จิงอยู่สุข. 2538. รายงานการศึกษาวิจัยหินเพอร์ไลต์ บริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟลำนารายณ์ จังหวัดลพบุรี. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. 48 น.

พรพิมล พัดภู. 2547. การกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้หินภูเขาไฟ และเปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรเพ็ญ มีทองมูล. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพบุลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. เคมิดิน. ห้างหุ้นส่วนจำกัดเชียงใหม่พิมพ์สวย, เชียงใหม่.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2538. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 321น.

สากุล สถิตวิทยานันท์. 2538. **การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดินและธรณีฐานและการประเมินสมรรถนะความอุดมสมบูรณ์ของดินที่เกิดจากหินภูเขาไฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา ขางเอน. 2546. **การจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ อินทรการุณเวช. 2532. **การลดสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการโคเอกทูเลชันสำหรับชนบท**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ASTM D 2972-93. 1996. Standard Test Methods for Arsenic in Water. **Annual Book of ASTM Standards**. 11.01: 251-257.

Bellack, E. 1971. Arsenic Removal from Potable Water. **Journal of AWWA**: 454-459.

Cornell R.M. and Schwertmann U. 2003. **The Iron Oxides**. 2nd edition. Germany: Wiley-VCH Gmbh & Co.

Dikshit, A.K. 2000. Arsenic in Groundwater and Its Sorption by Kimberlite Tailing. **Journal of Environmental Science and Health part A – toxic/hazardous substance and Environmental Engineering**. 35(1): 65-85

Dzombak, D. A., and Morel, F.M.M. 1990. **Surface Complexation modeling: Hydrous Ferric Oxide**. New York: John Wiley & Sons.

Eckenfelder, W.W., Jr. 1981. **Application of Adsorption to Wastewater Treatment**. Enviropress, Nashville, Tennessee.

- Edward, M. and Benjamin, M.M. 1989. Adsorptive Filtration using Coated Sand A New Approach For Treatment of Metal-bearing Wastes. **Journal WPCF.** :1523-1533
- Faust, S.D. and Aly,O.M. 1987. **Adsorption Process for Water Treatment.** M.A.:Butterworth
- Ferguson, J.F. and Gavis, J. 1972. A Review of the Arsenic Cycle in Natural Water. **Water Research.** (6): 1259-1274.
- Ioannis, A.K. and Anastasios, I.Z. 2002. Removal of Arsenic from Contaminated Water Sources by Sorption onto Iron - Oxide - Coated Polymeric Materials. **Water Research.** (36): 5141 – 5155.
- Irkayama,K. 1971.Discussion-Relation between Black-foot Disease and the Pollution of Drinking Water by Arsenic in Taiwan in Proc. 2nd. **International Conference Water Pollution Research.** :173-190.
- IRPTC. 1978. **Data Profiles for Chemicals the Evaluation of their Hazards to the Environment of the Mediterranean Sea,** International Register of Potentially Toxic Chemical, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- IRPTC. 1982.**Scientific Reviews of Sovite. Literature on Toxicity and Hazards of Chemicals,** : Arsenic, Center of International Project, GKNT, Moscow, USSR.
- Joshi, A. and Chaudhuri, M. 1996. Removal of Arsenic from Groundwater by Iron Oxide Coated Sand. **Journal of Environmental Engineering.** : 769-771.
- Kinniburgh, D.G., and Jackson, M.L. 1981. Cation Adsorption by Hydrous Metal Oxides and Clay. In M.A. Anderson, and A.J. Rubin (eds.), pp. 91-160, **Adsorption of Solid-Liquid Interfaces.** Michigan: Ann Arbor Science.

- Lin, T.F. and Wu, J.K. 2001. Adsorption of arsenite and arsenate within activated alumina grains: Equilibrium and kinetics. **Water Research**. 35: 2049 – 2057.
- Metcalf and Eddy, Inc. 1991. **Wastewater Engineering : Treatment Disposal and Reuse**. 3 ed., McGraw-Hill, Inc., USA. 1335p.
- Norman, N.C. 1998. **Chemistry of Arsenic, Antimony and Bismuth**. First Edition. Thomson Science, London.
- Satpathy, J.K. and Chaudhuri, M. 1994. Treatment of Cadmium-Plating and Chromium-Plating Water by Iron Oxide-Coated Sand. **Water Environment Research**. : 788-790.
- Slingh, D.B. 1988. As(III) Removal from Aqueous Solution by Adsorption. **Water, Air and Soil Pollution**. 42: 373-386.
- Sunstrom, D. W. and Klei, H.B. 1995. **Wastewater Treatment**. Department of Chemical Engineering. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. Pp 241-273.
- World Health Organization. 1981. **Environmental Health Criteria 18 : Arsenic**. United Nations Environmental Programme, Switzerland.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟ เคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างกัน
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ค่าพีเอช	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
3	854.23	847.25	868.78	856.75	18.40	658.25	671.23	662.54	664.01	36.76
4	804.65	798.47	817.36	806.83	23.16	644.23	649.14	651.45	648.27	38.26
5	765.23	778.25	770.85	771.44	26.53	630.12	647.25	650.42	642.60	38.80
6	695.69	728.24	704.28	709.40	32.44	612.48	625.12	634.58	624.06	40.57
7	703.69	692.14	688.11	694.65	33.84	576.23	579.25	562.36	572.61	45.47
8	691.35	708.25	698.04	699.21	33.41	558.32	567.69	550.12	558.71	46.79
9	745.89	752.23	739.78	745.97	28.96	597.12	590.45	587.23	591.60	43.66
10	802.56	814.62	795.62	804.27	23.40	623.65	640.44	631.54	631.88	39.82
ไม่ปรับ	701.45	712.36	691.47	701.76	33.17	560.14	568.36	552.47	560.32	46.64

ตารางผนวกที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่เวลาสัมผัสต่างๆ
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

เวลา สัมผัส (ชั่วโมง)	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ ภาพ เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
1	834.23	847.25	858.78	846.75	19.36	667.23	695.24	672.30	678.26	35.40
2	794.45	804.56	818.23	805.75	23.26	552.26	544.35	549.11	548.57	47.75
4	688.23	696.35	704.26	696.28	33.69	546.32	549.25	531.87	542.48	48.34
6	705.69	688.24	681.28	691.74	34.12	521.25	539.14	532.47	530.95	49.43
8	682.14	664.25	676.32	674.24	35.79	528.45	514.87	511.05	518.12	50.65
10	661.23	678.36	671.45	670.35	36.16	508.56	497.56	514.62	506.91	51.72
12	665.20	660.87	651.47	659.18	37.22	502.36	49*.32	492.14	497.25	52.64
24	623.12	635.44	632.58	630.38	39.96	486.23	480.45	472.56	479.75	54.31

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดลอง Adsorption Isotherm ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

ครั้งที่	M (กรัม)	หินภูเขาไฟ			M (กรัม)	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์		
		Ce	X	X/M		Ce	X	X/M
		(มก./ล.)	(มก.)	(มก./ก.)		(มก./ล.)	(มก.)	(มก./ก.)
1	1.0004	0.7785	0.0136	0.0136	1.0002	0.6413	0.0204	0.0204
	2.0001	0.6912	0.0179	0.0090	2.0001	0.5625	0.0244	0.0122
	3.0002	0.6078	0.0221	0.0074	3.0002	0.4641	0.0293	0.0098
	4.0001	0.5784	0.0236	0.0059	4.0003	0.4092	0.0320	0.0080
	5.0001	0.4825	0.0284	0.0057	5.0002	0.3782	0.0336	0.0067
2	1.0002	0.7984	0.0126	0.0126	1.0003	0.6658	0.0192	0.0192
	2.0003	0.6814	0.0184	0.0092	2.0002	0.5441	0.0253	0.0126
	3.0001	0.6351	0.0207	0.0069	3.0001	0.4512	0.0299	0.0100
	4.0002	0.5412	0.0254	0.0064	4.0001	0.3945	0.0328	0.0082
	5.0001	0.4634	0.0293	0.0059	5.0003	0.3956	0.0327	0.0065
3	1.0001	0.7623	0.0144	0.0144	1.0001	0.6321	0.0209	0.0209
	2.0002	0.6745	0.0188	0.0094	2.0001	0.5712	0.0239	0.0120
	3.0001	0.5964	0.0227	0.0076	3.0003	0.4845	0.0283	0.0094
	4.0001	0.5301	0.0260	0.0065	4.0001	0.4141	0.0318	0.0079

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ) ผลการทดลอง Adsorption Isotherm ของหินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์

ครั้งที่	M (กรัม)	หินภูเขาไฟ			M (กรัม)	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์		
		Ce	X	X/M		Ce	X	X/M
		(มก./ล.)	(มก.)	(มก./ก.)		(มก./ล.)	(มก.)	(มก./ก.)
ค่าเฉลี่ย	5.0002	0.4901	0.0280	0.0056	5.0001	0.3702	0.0340	0.0068
	1.0002	0.7797	0.0135	0.0135	1.0002	0.6464	0.0202	0.0202
	2.0002	0.6824	0.0184	0.0092	2.0001	0.5593	0.0245	0.0123
	3.0001	0.6131	0.0218	0.0073	3.0002	0.4666	0.0292	0.0097
	4.0001	0.5499	0.0250	0.0063	4.0002	0.4059	0.0322	0.0081
	5.0001	0.4787	0.0286	0.0057	5.0002	0.3813	0.0334	0.0067

ตารางผนวกที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม.
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิภาพ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิภาพ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	2.36	3.15	3.89	3.13	99.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	5.12	5.79	4.47	5.13	99.51	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	8.36	9.14	6.25	7.92	99.25	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	12.54	10.23	13.65	12.14	98.84	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8	15.25	13.14	17.86	15.42	98.53	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9	19.26	19.97	21.38	20.20	98.08	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
10	22.49	20.51	23.74	22.25	97.88	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
11	26.87	24.89	25.04	25.60	97.56	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12	30.27	32.38	30.89	31.18	97.03	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำดื่มเคาะห้ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม.
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
13	35.16	34.98	32.48	34.21	96.74	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	39.47	36.25	38.74	38.15	96.37	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
15	43.25	41.48	39.89	41.54	96.04	0.67	0.85	1.03	0.85	99.92
16	45.33	44.08	42.11	43.84	95.82	1.15	1.84	1.23	1.41	99.87
17	47.33	44.08	46.11	45.84	95.63	1.69	2.23	2.78	2.23	99.79
18	47.15	46.56	49.25	47.65	95.46	2.96	3.14	3.88	3.33	99.68
19	51.23	49.12	52.58	50.98	95.15	4.13	4.26	5.20	4.53	99.57
20	55.13	54.25	56.21	55.20	94.74	6.24	5.48	6.87	6.20	99.41
21	58.14	59.23	62.08	59.82	94.30	7.45	7.86	8.47	7.93	99.25
22	65.48	68.21	67.28	66.99	93.62	9.14	9.78	8.74	9.22	99.12
23	72.12	70.24	71.36	71.24	93.22	10.25	8.45	11.23	9.98	99.05
24	74.84	77.65	75.13	75.87	92.77	11.47	12.15	11.78	11.80	98.88

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำดื่มเคระห์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม.
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
25	88.23	89.10	84.69	87.34	91.68	12.69	11.21	12.98	12.29	98.83
26	96.25	98.14	102.46	98.95	90.58	14.25	12.14	13.85	13.41	98.72
27	125.23	118.78	132.54	125.52	88.05	14.58	15.76	15.07	15.14	98.56
28	134.36	148.10	113.24	131.90	87.44	16.74	17.25	16.98	16.99	98.38
29	154.36	178.10	163.24	165.23	84.26	18.26	18.92	16.77	17.98	98.29
30	184.14	189.56	186.25	186.65	82.22	19.26	18.14	20.55	19.32	98.16
31	197.25	213.24	201.35	203.95	80.58	20.23	21.55	19.47	20.42	98.06
32	236.12	221.69	215.84	224.55	78.61	22.52	21.13	23.58	22.41	97.87
33	244.36	269.14	250.47	254.66	75.75	23.56	22.14	23.89	23.20	97.79
34	289.56	294.14	301.48	295.06	71.90	24.78	22.98	25.24	24.33	97.68
35	326.45	311.78	347.12	328.45	68.72	25.58	26.14	23.88	25.20	97.60
36	366.87	351.17	348.47	355.50	66.14	27.84	26.31	26.84	27.00	97.43

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม.
(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
37	402.15	383.56	377.25	387.65	63.08	29.32	30.14	27.16	28.87	97.25
38	402.15	423.56	437.25	420.99	59.91	30.14	31.26	31.94	31.11	97.04
39	457.25	489.21	495.64	480.70	54.22	31.56	31.82	32.54	31.97	96.95
40	526.36	547.10	551.26	541.57	48.42	32.11	32.85	34.59	33.18	96.84
41	587.14	604.52	618.21	603.29	42.54	34.48	34.97	33.14	34.20	96.74
42	657.45	692.33	661.47	670.42	36.15	35.27	36.14	35.04	35.48	96.62
43	695.25	714.32	708.47	706.01	32.76	36.78	36.88	35.79	36.48	96.53
44	754.12	778.10	765.36	765.86	27.06	37.25	38.24	36.89	37.46	96.43
45	784.23	770.15	777.87	777.42	25.96	40.36	38.13	38.77	39.09	96.28
46	815.26	822.10	805.96	814.44	22.43	42.21	43.25	43.77	43.08	95.90
47	874.23	855.62	847.20	859.02	18.19	44.36	45.11	45.67	45.05	95.71

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.1 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม.

(ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
48	933.56	940.19	924.38	932.71	11.17	45.87	45.03	46.87	45.92	95.63
50	1018.23	1025.32	1003.36	1015.64	3.27	46.25	47.89	45.30	46.48	95.57
52	1050.87	1049.28	1051.10	1050.42	-0.04	49.03	48.87	48.11	48.67	95.36
54	1049.23	1051.32	1052.36	1050.97	-0.09	51.23	53.14	49.48	51.28	95.12
56	-	-	-	-	-	53.58	55.12	54.74	54.48	94.81
58	-	-	-	-	-	57.39	56.47	56.85	56.90	94.58

ตารางผนวกที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	3.97	4.15	3.78	3.97	99.62	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	10.26	14.13	11.25	11.88	98.87	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	19.21	20.48	21.29	20.33	98.06	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	23.56	26.87	25.14	25.19	97.60	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	30.45	28.24	29.46	29.38	97.20	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8	33.44	35.14	32.78	33.79	96.78	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9	45.26	42.18	43.85	43.76	95.83	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
10	48.23	50.26	48.95	49.15	95.32	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
11	50.58	51.02	49.36	50.32	95.21	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ
	ที่เหลืออยู่				ภาพ	ที่เหลืออยู่				ภาพ
	(ไมโครกรัม/ลิตร)				เฉลี่ย	(ไมโครกรัม/ลิตร)				เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
12	53.17	54.46	52.98	53.54	94.90	0.31	0.57	0.43	0.44	99.96
13	61.08	58.45	59.22	59.58	94.33	0.95	0.84	1.13	0.97	99.91
14	64.25	66.41	63.88	64.85	93.82	1.34	1.47	1.72	1.51	99.86
15	71.58	73.25	73.66	72.83	93.06	2.17	1.95	2.38	2.17	99.79
16	78.29	79.45	80.74	79.49	92.43	3.56	2.45	2.06	2.69	99.74
17	83.26	83.87	85.14	84.09	91.99	3.56	3.14	3.88	3.53	99.66
18	99.26	98.24	97.77	98.42	90.63	5.25	4.97	3.86	4.69	99.55
19	112.36	125.78	119.73	119.29	88.64	6.33	7.48	6.97	6.93	99.34
20	135.89	141.26	139.77	138.97	86.76	7.20	7.34	8.56	7.70	99.27
21	156.58	158.78	159.25	158.20	84.93	9.45	8.22	7.89	8.52	99.19
22	189.26	190.47	191.12	190.28	81.88	11.79	11.02	10.68	11.16	98.94
23	214.56	208.47	221.63	214.89	79.53	14.26	13.37	12.81	13.48	98.72

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
24	256.48	249.55	259.74	255.26	75.69	16.21	16.97	15.72	16.30	98.45
25	282.14	290.86	272.35	281.78	73.16	17.25	18.09	16.47	17.27	98.36
26	311.40	299.87	301.23	304.17	71.03	20.14	18.26	18.79	19.06	98.18
27	336.58	317.12	329.55	327.75	68.79	19.45	20.35	20.96	20.25	98.07
28	344.65	362.44	357.13	354.74	66.22	21.56	22.04	21.78	21.79	97.92
29	395.47	382.43	401.24	393.05	62.57	23.47	22.04	22.58	22.70	97.84
30	443.26	458.01	449.52	450.26	57.12	22.63	23.78	23.07	23.16	97.79
31	487.25	490.23	481.25	486.24	53.69	25.44	27.89	28.05	27.13	97.42
32	523.77	520.79	515.44	520.00	50.48	29.58	28.36	30.77	29.57	97.18
33	556.38	568.15	560.27	561.60	46.51	32.10	30.47	31.56	31.38	97.01
34	612.32	601.48	624.11	612.64	41.65	34.11	33.28	32.41	33.27	96.83
35	674.25	680.12	698.14	684.17	34.84	35.14	36.25	33.88	35.09	96.66

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
36	721.36	729.45	713.47	721.43	31.29	39.49	38.10	38.95	38.85	96.30
37	794.63	786.45	780.86	787.31	25.02	40.28	40.97	41.16	40.80	96.11
38	877.25	884.25	871.74	877.75	16.41	43.79	42.11	44.58	43.49	95.86
39	997.25	989.26	991.74	992.75	5.45	47.84	47.05	48.47	47.79	95.45
40	1044.23	1048.74	1041.78	1044.92	0.48	51.22	48.25	49.02	49.50	95.29
41	1051.13	1050.87	1050.25	1050.75	-0.07	53.14	54.02	55.78	54.31	94.83
42	1049.23	1051.32	1052.36	1050.97	-0.09	58.12	58.97	60.14	59.08	94.37
43	1055.78	1050.68	1048.21	1051.56	-0.15	63.78	63.21	62.89	63.29	93.97
44	1052.21	1051.20	1054.22	1052.54	-0.24	70.32	72.15	71.92	71.46	93.19
45	1053.14	1053.87	1054.20	1053.74	-0.36	81.14	80.27	82.56	81.32	92.25
46	1056.28	1052.77	1053.48	1054.18	-0.40	83.26	85.14	84.77	84.39	91.96

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.4 ลบ.ม./ ตร.ซม.-ซม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ตารางผนวกที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.8 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
1	12.54	13.26	10.78	12.19	98.84	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	20.87	22.59	22.14	21.87	97.92	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	32.23	33.08	35.12	33.48	96.81	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	48.21	47.87	47.14	47.74	95.45	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	56.45	55.17	57.86	56.49	94.62	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	64.88	63.79	63.02	63.90	93.91	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	74.95	76.20	75.88	75.68	92.79	0.95	1.28	1.34	1.19	99.89
8	82.23	83.44	82.99	82.89	92.11	4.05	2.96	3.28	3.43	99.67
9	91.14	91.87	92.08	91.70	91.27	5.87	6.12	7.17	6.39	99.39
10	102.58	108.77	99.85	103.73	90.12	15.32	13.44	14.47	14.41	98.63
11	118.36	119.21	121.47	119.68	88.60	17.36	18.63	19.12	18.37	98.25

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่อัตราการกรอง 0.8 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์						
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
12	128.36	132.44	130.56	130.45	87.58	22.14	20.88	20.03	21.02	98.00		
13	147.88	148.32	150.55	148.92	85.82	23.33	24.51	20.87	22.90	97.82		
14	169.03	167.45	168.21	168.23	83.98	25.02	24.78	27.11	25.64	97.56		
15	191.15	192.23	195.66	193.01	81.62	30.53	27.04	28.44	28.67	97.27		
16	212.35	225.14	220.46	219.32	79.11	29.54	32.86	33.14	31.85	96.97		
17	254.11	264.02	259.57	259.23	75.31	33.23	34.84	32.24	33.44	96.82		
18	321.74	338.26	317.05	325.68	68.98	38.58	39.44	37.97	38.66	96.32		
19	411.35	397.66	420.78	409.93	60.96	41.59	42.86	38.76	41.07	96.09		
20	501.26	487.52	491.36	493.38	53.01	43.26	44.08	41.57	42.97	95.91		
21	554.33	540.79	527.25	540.79	48.50	44.02	44.83	45.53	44.79	95.73		
22	637.45	610.14	621.23	622.94	40.67	51.44	47.36	49.02	49.27	95.31		

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำล้างแคระห์ ที่อัตราการกรอง 0.8 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. (ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
23	734.12	712.35	707.25	717.91	31.63	56.32	58.14	55.71	56.72	94.60
24	826.20	832.11	841.03	833.11	20.66	66.95	68.23	69.01	68.06	93.52
25	903.48	887.33	911.14	900.65	14.22	72.23	74.10	75.89	74.07	92.95
26	962.35	948.14	951.23	953.91	9.15	87.04	85.57	86.69	86.43	91.77

ตารางผนวกที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็ก ออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	1.36	1.87	1.08	1.44	99.73	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	2.55	2.86	2.97	2.79	99.48	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8	3.15	3.87	4.07	3.70	99.32	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9	5.18	6.56	5.87	5.87	98.91	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
10	7.71	7.55	8.06	7.77	98.56	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
11	10.04	8.15	9.58	9.26	98.29	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12	10.58	11.34	10.92	10.95	97.97	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำดื่มเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
13	13.44	12.47	13.88	13.26	97.54	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	14.21	16.37	14.95	15.18	97.19	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
15	17.22	17.96	18.04	17.74	96.71	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
16	20.13	21.54	18.77	20.15	96.27	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
17	21.88	19.55	20.07	20.50	96.20	1.23	0.98	0.71	0.97	99.82
18	22.14	22.58	23.85	22.86	95.77	1.23	0.98	1.45	1.22	99.77
19	25.47	23.85	24.26	24.53	95.46	3.08	2.95	2.36	2.80	99.48
20	27.46	26.14	26.55	26.72	95.05	3.87	4.12	4.38	4.12	99.24
21	28.26	29.12	28.73	28.70	94.68	5.02	4.86	4.23	4.70	99.13
22	29.59	30.44	30.87	30.30	94.39	4.78	5.81	5.77	5.45	98.99
23	32.58	30.45	31.66	31.56	94.15	5.23	6.45	6.97	6.22	98.85

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
24	33.51	34.48	33.92	33.97	93.71	7.26	6.87	6.14	6.76	98.75
25	35.38	34.73	35.07	35.06	93.51	7.15	7.72	8.08	7.65	98.58
26	35.11	36.47	35.70	35.76	93.38	9.23	8.77	7.63	8.54	98.42
27	40.25	41.08	41.47	40.93	92.42	8.50	8.95	9.34	8.93	98.35
28	42.03	43.12	42.65	42.60	92.11	9.77	9.23	10.56	9.85	98.18
29	45.73	45.09	44.28	45.03	91.66	9.65	10.26	11.87	10.59	98.04
30	50.23	48.08	48.95	49.09	90.91	11.21	12.58	11.36	11.72	97.83
31	51.66	50.44	49.16	50.42	90.66	12.25	12.87	13.26	12.79	97.63
32	52.78	51.63	52.05	52.15	90.34	14.33	15.02	13.78	14.38	97.34
33	56.66	54.12	53.73	54.84	89.85	15.03	14.87	14.66	14.85	97.25
34	59.46	58.21	58.87	58.85	89.10	16.23	16.89	15.39	16.17	97.01

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟ เคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
35	68.22	70.15	71.23	69.87	87.06	17.22	16.97	17.04	17.08	96.84
36	72.26	73.15	74.03	73.15	86.45	17.25	17.13	18.44	17.61	96.74
37	90.31	81.23	85.23	85.59	84.15	19.48	18.76	19.13	19.12	96.46
38	95.76	96.48	94.11	95.45	82.32	21.36	20.85	19.87	20.69	96.17
39	97.23	99.15	104.26	100.21	81.44	21.59	22.75	21.10	21.81	95.96
40	108.47	113.56	105.23	109.09	79.80	23.02	22.84	23.69	23.18	95.71
41	112.36	121.58	128.77	120.90	77.61	24.26	25.87	23.92	24.68	95.43
42	132.22	135.89	129.73	132.61	75.44	26.11	25.47	25.88	25.82	95.22
43	141.23	144.52	142.70	142.82	73.55	28.45	27.36	27.91	27.91	94.83
44	152.36	158.47	161.55	157.46	70.84	29.55	28.17	29.16	28.96	94.64
45	170.69	171.25	169.14	170.36	68.45	31.13	29.75	30.62	30.50	94.35
46	182.35	186.02	185.14	184.50	65.83	32.55	33.14	34.56	33.42	93.81

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
47	201.23	213.44	217.59	210.75	60.97	35.26	34.89	34.02	34.72	93.57
48	236.24	241.02	253.85	243.70	54.87	37.12	36.23	35.03	36.13	93.31
50	264.58	274.98	271.08	270.21	49.96	38.47	38.15	37.22	37.95	92.97
52	278.12	285.03	291.47	284.87	47.25	39.24	40.12	39.55	39.64	92.66
54	322.56	334.78	340.89	332.74	38.38	40.63	41.23	41.87	41.24	92.36
56	351.11	362.44	359.23	357.59	33.78	45.35	44.21	44.89	44.82	91.70
58	388.02	394.26	401.87	394.72	26.90	46.22	47.48	46.81	46.84	91.33
60	423.36	436.47	440.18	433.34	19.75	50.15	48.21	49.36	49.24	90.88
62	466.47	470.58	468.22	468.42	13.25	55.36	56.74	56.08	56.06	89.62
64	478.23	492.15	480.36	483.58	10.45	59.23	60.27	59.94	59.81	88.92
66	523.59	541.78	538.07	534.48	1.02	63.21	66.84	65.32	65.12	87.94
68	560.36	563.17	562.85	562.13	-4.10	72.89	73.23	74.54	73.55	86.38

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 540 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย
					(%)					(%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
70	604.22	592.58	598.71	598.50	-10.83	88.26	90.25	90.17	89.56	83.41
72	-	-	-	-	-	99.32	112.56	108.45	106.78	80.23
74	-	-	-	-	-	132.56	133.29	134.05	133.30	75.31
76	-	-	-	-	-	149.23	151.66	152.47	151.12	72.01
78	-	-	-	-	-	170.25	169.33	168.30	169.29	68.65
80	-	-	-	-	-	189.40	192.05	191.78	191.08	64.62

ตารางผนวกที่ 8 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร(หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	2.36	3.15	3.89	3.13	99.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	5.12	5.79	4.47	5.13	99.51	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	8.36	9.14	6.25	7.92	99.25	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	12.54	10.23	13.65	12.14	98.84	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8	15.25	13.14	17.86	15.42	98.53	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9	19.26	19.97	21.38	20.20	98.08	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
10	22.49	20.51	23.74	22.25	97.88	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
11	26.87	24.89	25.04	25.60	97.56	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12	30.27	32.38	30.89	31.18	97.03	0.31	0.57	0.43	0.44	99.96

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
13	35.16	34.98	32.48	34.21	96.74	0.95	0.84	1.13	0.97	99.91
14	39.47	36.25	38.74	38.15	96.37	1.34	1.47	1.72	1.51	99.86
15	43.25	41.48	39.89	41.54	96.04	2.17	1.95	2.38	2.17	99.79
16	45.33	44.08	42.11	43.84	95.82	3.56	2.45	2.06	2.69	99.74
17	47.33	44.08	46.11	45.84	95.63	3.56	3.14	3.88	3.53	99.66
18	47.15	46.56	49.25	47.65	95.46	5.25	4.97	3.86	4.69	99.55
19	51.23	49.12	52.58	50.98	95.15	6.33	7.48	6.97	6.93	99.34
20	55.13	54.25	56.21	55.20	94.74	7.20	7.34	8.56	7.70	99.27
21	58.14	59.23	62.08	59.82	94.30	9.45	8.22	7.89	8.52	99.19
22	65.48	68.21	67.28	66.99	93.62	11.79	11.02	10.68	11.16	98.94
23	72.12	70.24	71.36	71.24	93.22	14.26	13.37	12.81	13.48	98.72
24	74.84	77.65	75.13	75.87	92.77	16.21	16.97	15.72	16.30	98.45

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	88.23	89.10	84.69	87.34	91.68	17.25	18.09	16.47	17.27	98.36
26	96.25	98.14	102.46	98.95	90.58	20.14	18.26	18.79	19.06	98.18
27	125.23	118.78	132.54	125.52	88.05	19.45	20.35	20.96	20.25	98.07
28	134.36	148.10	113.24	131.90	87.44	21.56	22.04	21.78	21.79	97.92
29	154.36	178.10	163.24	165.23	84.26	23.47	22.04	22.58	22.70	97.84
30	184.14	189.56	186.25	186.65	82.22	22.63	23.78	23.07	23.16	97.79
31	197.25	213.24	201.35	203.95	80.58	25.44	27.89	28.05	27.13	97.42
32	236.12	221.69	215.84	224.55	78.61	29.58	28.36	30.77	29.57	97.18
33	244.36	269.14	250.47	254.66	75.75	32.10	30.47	31.56	31.38	97.01
34	289.56	294.14	301.48	295.06	71.90	34.11	33.28	32.41	33.27	96.83
35	326.45	311.78	347.12	328.45	68.72	35.14	36.25	33.88	35.09	96.66
36	366.87	351.17	348.47	355.50	66.14	39.49	38.10	38.95	38.85	96.30

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
37	402.15	383.56	377.25	387.65	63.08	40.28	40.97	41.16	40.80	96.11
38	402.15	423.56	437.25	420.99	59.91	43.79	42.11	44.58	43.49	95.86
39	457.25	489.21	495.64	480.70	54.22	47.84	47.05	48.47	47.79	95.45
40	526.36	547.10	551.26	541.57	48.42	51.22	48.25	49.02	49.50	95.29
41	587.14	604.52	618.21	603.29	42.54	53.14	54.02	55.78	54.31	94.83
42	657.45	692.33	661.47	670.42	36.15	58.12	58.97	60.14	59.08	94.37
43	695.25	714.32	708.47	706.01	32.76	63.78	63.21	62.89	63.29	93.97
44	754.12	778.10	765.36	765.86	27.06	70.32	72.15	71.92	71.46	93.19
45	784.23	770.15	777.87	777.42	25.96	81.14	80.27	82.56	81.32	92.25
46	815.26	822.10	805.96	814.44	22.43	83.26	85.14	84.77	84.39	91.96
47	874.23	855.62	847.20	859.02	18.19	92.24	93.15	90.86	92.08	91.23
48	933.56	940.19	924.38	932.71	11.17	98.24	104.22	110.47	104.31	90.07

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1050 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
50	1018.23	1025.32	1003.36	1015.64	3.27	115.63	121.84	117.58	118.35	88.73
52	1050.87	1049.28	1051.10	1050.42	-0.04	150.48	147.63	152.89	150.33	85.68
54	1049.23	1051.32	1052.36	1050.97	-0.09	192.47	211.46	208.02	203.98	80.57
56	-	-	-	-	-	256.14	241.36	248.02	248.51	76.33
58	-	-	-	-	-	301.25	297.03	286.29	294.86	71.92

ตารางผนวกที่ 9 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5120 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
1	58.23	61.44	62.86	60.84	98.81	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	105.58	97.26	99.74	100.86	98.03	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	117.36	119.48	121.15	119.33	97.67	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	167.71	168.47	170.07	168.75	96.70	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	195.69	199.27	189.99	194.98	96.19	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	223.14	220.89	219.76	221.26	95.68	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	268.45	273.54	272.46	271.48	94.70	1.77	1.26	1.83	1.62	99.97
8	311.95	325.68	324.49	320.71	93.74	7.75	6.85	7.67	7.42	99.86
9	371.25	368.22	362.79	367.42	92.82	14.26	14.77	15.14	14.72	99.71
10	402.56	398.17	399.06	399.93	92.19	20.89	20.24	21.63	20.92	99.59
11	430.89	438.77	431.45	433.70	91.53	32.25	33.87	34.02	33.38	99.35
12	483.95	480.17	479.58	481.23	90.60	44.56	42.89	42.15	43.20	99.16

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำดื่มเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5120 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
13	513.69	508.47	505.12	509.09	90.06	54.16	55.37	53.08	54.20	98.94
14	583.44	591.63	593.45	589.51	88.49	62.42	63.03	61.28	62.24	98.78
15	648.23	650.08	652.77	650.36	87.30	78.56	80.14	81.55	80.08	98.44
16	743.56	730.45	737.33	737.11	85.60	93.45	94.76	95.61	94.61	98.15
17	863.59	877.07	871.68	870.78	82.99	113.58	129.74	118.07	120.46	97.65
18	923.57	929.07	938.11	930.25	81.83	139.16	141.88	137.94	139.66	97.27
19	1051.78	1051.36	1050.84	1051.33	79.47	156.32	167.33	161.52	161.72	96.84
20	1204.36	1215.63	1223.38	1214.46	76.28	188.25	189.07	190.79	189.37	96.30
21	1387.15	1413.59	1472.35	1424.36	72.18	211.47	203.56	221.48	212.17	95.86
22	1548.68	1569.77	1504.02	1540.82	69.91	245.58	230.89	243.15	239.87	95.31
23	1847.25	1895.36	1902.54	1881.72	63.25	297.15	311.28	307.44	305.29	94.04
24	2145.02	2087.61	2014.36	2082.33	59.33	381.25	375.88	369.36	375.50	92.67

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5120 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
25	2613.75	2547.20	2686.49	2615.81	48.91	423.26	445.59	440.33	436.39	91.48
26	3063.14	3218.45	3187.22	3156.27	38.35	562.38	571.55	570.23	568.05	88.91
27	3987.25	3845.11	3802.66	3878.34	24.25	683.51	655.07	698.44	679.01	86.74
28	4213.77	4375.10	4402.63	4330.50	15.42	811.25	833.74	823.65	822.88	83.93
29	4560.23	4612.74	4687.65	4620.21	9.76	965.77	987.02	991.45	981.41	80.83
30	5122.36	5118.87	5120.45	5120.56	-0.01	1225.36	1128.13	1177.09	1176.86	77.01
31	5231.25	5287.65	5124.08	5214.33	-1.84	1485.95	1467.23	1474.36	1475.85	71.17
32	5236.52	5289.25	5207.45	5244.41	-2.43	1778.32	1802.36	1835.47	1805.38	64.74
33	5258.36	5307.46	5266.12	5277.31	-3.07	2110.56	1997.45	2004.36	2037.46	60.21
34	5312.56	5389.47	5304.56	5335.53	-4.21	2485.12	2401.36	2364.23	2416.90	52.79
35	5388.32	5428.47	5495.66	5437.48	-6.20	2987.31	3021.45	3014.78	3007.85	41.25
36	5442.63	5547.25	5508.44	5499.44	-7.41	3420.58	3478.14	3514.95	3471.22	32.20

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำดื่มเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5120 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	
37	5513.89	5620.56	5647.23	5593.89	-9.26	3956.84	4032.58	4018.96	4002.79	21.82
38	5710.23	5697.41	5705.14	5704.26	-11.41	4350.18	4397.56	4409.60	4385.78	14.34
39	5786.14	5756.85	5822.47	5788.49	-13.06	4668.32	4787.23	4695.14	4716.90	7.87
40	5907.32	5885.20	5962.77	5918.43	-15.59	5012.36	4989.36	5124.25	5041.99	1.52
41	-	-	-	-	-	5138.36	5129.36	5114.78	5127.50	-0.15
42	-	-	-	-	-	5208.36	5213.69	5197.36	5206.47	-1.69
43	-	-	-	-	-	5114.36	5287.32	5330.85	5244.18	-2.43
44	-	-	-	-	-	5215.26	5288.26	5310.47	5271.33	-2.96
45	-	-	-	-	-	5310.45	5288.44	5374.32	5324.40	-3.99
46	-	-	-	-	-	5401.84	5345.23	5368.78	5371.95	-4.92
47	-	-	-	-	-	5416.36	5358.47	5406.38	5393.74	-5.35
48	-	-	-	-	-	5493.84	5480.59	5477.08	5483.84	-7.11

ตารางผนวกที่ 10 ประสิทธิภาพของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)			
	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	3.14	100.00	100.00	100.00	99.70
3	0.00	0.00	0.87	7.48	100.00	100.00	99.92	99.29
4	0.00	0.00	1.96	10.89	100.00	100.00	99.81	98.96
5	0.00	0.00	2.85	12.12	100.00	100.00	99.73	98.85
6	0.00	1.58	4.25	18.88	100.00	99.85	99.60	98.20
7	0.00	2.77	6.77	21.36	100.00	99.74	99.36	97.97
8	0.00	3.58	9.54	28.77	100.00	99.66	99.09	97.26
9	0.00	5.07	11.28	30.42	100.00	99.52	98.93	97.10
10	1.25	7.84	13.44	33.58	99.88	99.25	98.72	96.80
11	2.98	9.15	15.18	39.51	99.72	99.13	98.55	96.24
12	4.02	11.18	18.33	43.23	99.62	98.94	98.25	95.88
13	6.47	12.66	20.48	45.47	99.38	98.79	98.05	95.67
14	7.98	14.59	22.74	47.26	99.24	98.61	97.83	95.50
15	9.35	16.28	25.26	53.59	99.11	98.45	97.59	94.90

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ) ประสิทธิภาพของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)			
	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3
16	11.12	19.08	29.47	64.56	98.94	98.18	97.19	93.85
17	12.88	22.36	30.13	71.10	98.77	97.87	97.13	93.23
18	14.36	26.14	33.47	78.63	98.63	97.51	96.81	92.51
19	16.47	29.33	35.85	83.47	98.43	97.21	96.59	92.05
20	17.95	31.45	39.07	87.66	98.29	97.00	96.28	91.65
21	19.02	33.29	45.68	91.51	98.19	96.83	95.65	91.28
22	20.86	36.77	48.65	97.15	98.01	96.50	95.37	90.75
23	22.47	38.46	51.95	108.55	97.86	96.34	95.05	89.66
24	24.36	39.14	53.47	117.36	97.68	96.27	94.91	88.82
25	26.43	40.87	56.78	123.89	97.48	96.11	94.59	88.20
26	28.15	41.89	61.44	135.56	97.32	96.01	94.15	87.09
27	29.77	43.87	69.25	141.05	97.16	95.82	93.40	86.57
28	30.83	46.08	77.36	159.47	97.06	95.61	92.63	84.81
29	32.47	49.13	82.55	168.14	96.91	95.32	92.14	83.99
30	34.56	52.77	93.47	172.36	96.71	94.97	91.10	83.58

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ) ประสิทธิภาพของหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์หลังจากผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นสารหนูที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)			
	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3	ก่อนการ ฟื้นฟู	การทำงาน รอบที่ 1	การทำงาน รอบที่ 2	การทำงาน รอบที่ 3
31	35.88	61.58	101.14	190.54	96.58	94.14	90.37	81.85
32	36.05	74.05	117.54	204.56	96.57	92.95	88.81	80.52
33	37.25	79.36	126.58	217.50	96.45	92.44	87.94	79.29
34	39.78	84.25	139.14	223.48	96.21	91.98	86.75	78.72
35	42.84	88.30	147.80	237.47	95.92	91.59	85.92	77.38
36	44.18	93.14	156.36	256.32	95.79	91.13	85.11	75.59
37	47.25	98.25	164.29	267.35	95.50	90.64	84.35	74.54
38	49.71	102.77	177.85	274.14	95.27	90.21	83.06	73.89
39	52.36	106.95	189.25	285.65	95.01	89.81	81.98	72.80
40	55.87	112.25	194.36	297.77	94.68	89.31	81.49	71.64
41	58.33	118.47	201.47	314.69	94.44	88.72	80.81	70.03
42	62.85	122.59	225.36	328.62	94.01	88.32	78.54	68.70
43	74.56	131.47	238.47	337.11	92.90	87.48	77.29	67.89
44	80.12	138.65	246.78	345.06	92.37	86.80	76.50	67.14

ตารางผนวกที่ 11 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ชม.-ชม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย	ความเข้มข้นสารหนู ที่เหลืออยู่ (ไมโครกรัม/ลิตร)				ประสิทธิภาพ เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	(%)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8	1.32	1.68	1.93	1.64	99.47	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9	2.62	2.44	2.15	2.40	99.23	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
10	2.89	2.77	3.05	2.90	99.07	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
11	4.25	3.78	4.42	4.15	98.67	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12	5.23	4.85	5.77	5.28	98.30	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
13	6.32	6.87	6.11	6.43	97.93	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	10.58	11.34	10.92	10.95	96.48	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
15	13.44	12.47	13.88	13.26	95.74	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
16	14.21	16.37	14.95	15.18	95.12	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
17	17.22	17.96	18.04	17.74	94.30	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	20.13	21.54	18.77	20.15	93.52	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19	21.88	19.55	20.07	20.50	93.41	0.87	1.21	0.55	0.88	99.72
20	22.14	22.58	23.85	22.86	92.65	1.09	0.82	0.96	0.96	99.69
21	25.47	23.85	24.26	24.53	92.11	1.34	0.96	1.52	1.27	99.59
22	27.46	26.14	26.55	26.72	91.41	1.95	1.77	2.08	1.93	99.38
23	28.26	29.12	28.73	28.70	90.77	2.36	2.85	3.11	2.77	99.11
24	29.59	30.44	30.87	30.30	90.26	3.36	3.25	3.08	3.23	98.96

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	32.58	30.45	31.66	31.56	89.85	3.69	3.85	4.05	3.86	98.76
26	33.51	34.48	33.92	33.97	89.08	4.25	4.45	4.78	4.49	98.56
27	35.38	34.73	35.07	35.06	88.73	5.26	4.77	5.06	5.03	98.38
28	35.11	36.47	35.70	35.76	88.50	6.17	5.98	5.23	5.79	98.14
29	36.47	36.95	37.68	37.03	88.09	6.23	6.14	6.07	6.15	98.02
30	39.14	38.36	37.11	38.20	87.72	7.04	6.75	6.95	6.91	97.78
31	39.35	40.25	38.47	39.36	87.35	7.32	8.41	7.56	7.76	97.50
32	41.15	41.68	42.98	41.94	86.52	7.65	9.12	8.69	8.49	97.27
33	43.28	44.75	42.51	43.51	86.01	8.06	10.25	10.10	9.47	96.95
34	45.22	45.89	46.07	45.73	85.30	8.25	11.95	10.21	10.14	96.74
35	47.36	48.88	46.42	47.55	84.71	10.58	12.07	11.13	11.26	96.38
36	50.24	48.15	49.44	49.28	84.16	11.26	12.87	12.08	12.07	96.12

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
37	52.69	49.78	53.18	51.88	83.32	13.59	13.08	12.69	13.12	95.78
38	56.82	58.24	59.13	58.06	81.33	14.26	14.87	13.25	14.13	95.46
39	62.74	61.52	60.45	61.57	80.20	16.59	15.11	14.95	15.55	95.00
40	66.89	64.52	65.21	65.54	78.93	15.26	16.81	17.08	16.38	94.73
41	77.23	72.89	80.34	76.82	75.30	18.07	17.95	17.23	17.75	94.29
42	86.32	90.12	88.26	88.23	71.63	18.23	18.97	19.12	18.77	93.96
43	95.36	97.84	102.56	98.59	68.30	19.36	19.87	20.25	19.83	93.62
44	113.95	128.21	121.85	121.34	60.98	23.08	22.74	21.85	22.56	92.75
45	134.58	138.74	130.12	134.48	56.76	23.36	23.87	24.11	23.78	92.35
46	151.23	149.15	153.44	151.27	51.36	25.36	26.14	24.97	25.49	91.80
47	166.59	168.95	170.28	168.61	45.79	27.08	26.85	26.12	26.68	91.42
48	188.36	190.24	195.42	191.34	38.48	27.36	28.45	27.11	27.64	91.11

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
50	-	-	-	-	-	28.36	28.97	29.24	28.86	90.72
52	-	-	-	-	-	30.15	28.14	29.58	29.29	90.58
54	-	-	-	-	-	30.56	31.54	32.45	31.52	89.87
56	-	-	-	-	-	33.89	33.13	34.10	33.71	89.16
58	-	-	-	-	-	34.36	34.08	35.13	34.52	88.90
60	-	-	-	-	-	35.43	36.11	35.84	35.79	88.49
62	-	-	-	-	-	37.36	37.48	38.44	37.76	87.86
64	-	-	-	-	-	39.23	38.74	39.20	39.06	87.44
66	-	-	-	-	-	40.26	41.25	41.87	41.13	86.78
68	-	-	-	-	-	44.69	43.87	43.18	43.91	85.88
70	-	-	-	-	-	46.95	45.58	46.25	46.26	85.13

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำผิวดิน เมื่อความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 311 ไมโครกรัม/ลิตร (หินภูเขาไฟและหินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้อัตราการกรอง 0.1 และ 0.4 ลบ.ม./ตร.ซม.-ซม. ตามลำดับ)

ชั่วโมง ที่	หินภูเขาไฟ					หินภูเขาไฟเคลือบเหล็กออกไซด์				
	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)	ความเข้มข้นสารหนู				ประสิทธิ ภาพ เฉลี่ย (%)
	ที่เหลืออยู่					ที่เหลืออยู่				
	(ไมโครกรัม/ลิตร)					(ไมโครกรัม/ลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
72	-	-	-	-	-	47.69	46.95	45.77	46.80	84.95
74	-	-	-	-	-	49.36	48.77	49.01	49.05	84.23
76	-	-	-	-	-	53.29	51.07	51.98	52.11	83.24
78	-	-	-	-	-	55.26	58.14	56.84	56.75	81.75
80	-	-	-	-	-	58.21	62.42	60.47	60.37	80.59