

การบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากอำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
Treatment of Arsenic Contaminated Water from Amphoe Ronpibul,
Changwat Nakhon Si Thammarat



นิภา มหารัชพงษ์
Nipa Maharachpong

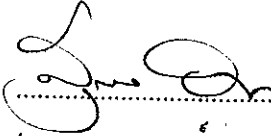
เลขหมู่	TDA55 ๖๖๖ ๖๕๙๐ ๘.๒
Order Key	29009
Bib Key	141557
	2.1.0.0.2543

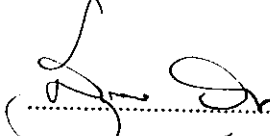
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Science Thesis in Environmental Management
Prince of Songkla University
2540

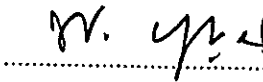
ชื่อวิทยานิพนธ์ การบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
ผู้เขียน นางสาวนิภา มหารัษฎพงศ์
สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

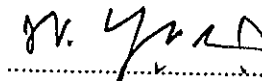
คณะกรรมการที่ปรึกษา

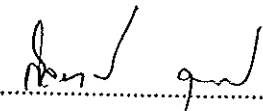
คณะกรรมการสอบ

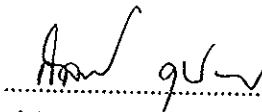

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีรักษ์กุล)

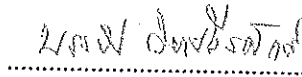

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีรักษ์กุล)

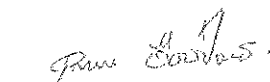

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ บุญนวล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ บุญนวล)

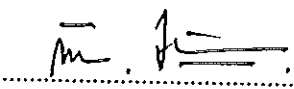

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)


.....กรรมการ
(ดร.บรรจง วิทย์วิระศักดิ์)


.....กรรมการ
(ดร.อุดมพล พิชนไพบูลย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาน จันท์พรหมมา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

Thesis Title Treatment of Arsenic Contaminated Water from
 Amphoe Ronpibul, Changwat Nakhon Si Thammarat

Author Miss Nipa Maharachpong

Major Program Environmental Management

Academic Year 1997

Abstract

The treatment of arsenic contaminated water from Amphoe Ronpibul Changwat Nakhon Si Thammarat was studied. The main aim was to remove arsenic to less than WHO drinking water limit.

The methods used were coagulation and adsorption. The results showed that arsenic can be removed down to safe drinking water limit by chlorination, coagulation with ferric chloride by the molar ratio As/Fe equal to 4 and filtered through Fe²⁺ treated activated carbon.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่อง จากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีรักษ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ บุญนวล ซึ่งผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.บรรจง วิทย์วิระศักดิ์ และอาจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบูลย์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาใช้เวลาในการสอบ เสนอแนะ และแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความสะดวกเกี่ยวกับสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ ในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณยุพิน จันทร์ตน์ ที่ให้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณมูลนิธิ TOYOTA และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจสำคัญตลอดมา และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดในที่นี้ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

นิภา มหารัชพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	21
2. วิธีการวิจัย	22
วัสดุ	22
อุปกรณ์	22
ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย	24
วิธีการวิเคราะห์	27
3. ผลการวิจัย	28
การทดลองที่ 1 การใช้คลอรีนในการลดความเข้มข้นสารหนู	28
การทดลองที่ 2 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	29
การทดลองที่ 3 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ไม่ปรับ pH)	32
การทดลองที่ 4 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปรับ pH)	34
	(6)

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
การทดลองที่ 5 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของ สารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5	37
การทดลองที่ 6 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของ สารหนูและเหล็กที่ 1:0, 1:3, 1:4 และ 1:5 ในแต่ละช่วงเวลา	38
การทดลองที่ 7 การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้ไน้จาก บ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	40
4. วิจัยรณผลการทดลอง	43
5. บทสรุปและขอเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	61
ประวัติผู้เขียน	66

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. การลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้สารที่ทำให้ตกตะกอน	14
2. ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำที่มีสารหนูวาเลนซี 3 และวาเลนซี 5 ปนเปื้อน	19
3. วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำตัวอย่าง	27
4. ผลการทดลองใช้คลอรีนในการลดความเข้มข้นของสารหนู	28
5. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	29
6. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	30
7. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)	32
8. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น, 0, 10, 15, 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)	33
9. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)	34
10. ผลการทดลองลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)	36
11. ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนู ที่ Molar ratio ระหว่าง As:Fe เท่ากับ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5	37
12. ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนู ที่ Molar ratio ระหว่าง As:Fe เท่ากับ 1:0, 1:3, 1:4 และ 1:5 ในแต่ละช่วงเวลา	38
13. ผลการทดลองลดความเข้มข้นของน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ที่ 12 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช	41
14. ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ที่ 12 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช	42

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 3 กับ ค่า pH	6
2. การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 5 กับ ค่า pH	7
3. Eh-pH ไดอะแกรมในแต่ละสปีชีส์ของสารหนู	8
4. Eh-pH ไดอะแกรมสำหรับแต่ละสปีชีส์ของสารหนูและเหล็ก	9
5. ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันสารส้ม	12
6. ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันเฟอร์ริคคลอไรด์	13
7. แบบจำลองที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	23
8. แผนภาพแสดงวิธีการศึกษาการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน	25
9. ชุดการทดลองที่ใช้ในการลดความเข้มข้นสารหนูในห้องปฏิบัติการ	27
10. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	31
11. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	31
12. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)	31
13. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)	35
14. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)	35
15. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)	35
16. การลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากทิ้งให้ตกตะกอน 10 นาที	39

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17. การลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากทิ้งให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง	39
18. การลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากทิ้งให้ตกตะกอน 3 ชั่วโมง	39
19. การลดความเข้มข้นสารหนู ในน้ำตัวอย่างจากตำบลรอนพิบูลย์	42
20. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร	44
21. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับpH)	45
22. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับpH)	46
23. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับpH)	47
24. การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับpH และ ปรับpH)	48
25. ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นสารหนูของเฟอร์ริกคลอไรด์ ในแต่ละช่วงเวลา	49

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

การทำเหมืองแร่เป็นอีกวิธีการหนึ่งของการนำเอาทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มาใช้ โดยในกระบวนการทำเหมืองแร่ต้องมีการขุด การเจาะ การบด การแยก และการแต่งแร่เพื่อให้ได้แร่ที่มีความบริสุทธิ์ ซึ่งในแต่ละกระบวนการของการทำแร่ให้บริสุทธิ์จะมีองค์ประกอบบางชนิดที่อาจเป็นอันตรายเมื่อขาดการจัดการที่ดีเพียงพอและอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ และเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยเห็นได้จากกรณีการทำเหมืองแร่ดีบุกในเขต อำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งส่งผลให้ประชาชนในบริเวณนั้นมีอาการป่วย เนื่องมาจากการทำเหมืองในอดีตที่ไม่ถูกวิธีและไม่ทราบถึงอันตรายที่จะเกิดขึ้น

เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2530 โรงพยาบาลมหาราช จังหวัดนครศรีธรรมราชได้ตรวจพบผู้ป่วยที่เป็นโรคผิวหนังผื่นปกติและจากการวินิจฉัยทางพยาธิวิทยาของสถาบันโรคผิวหนังพบว่าเป็นโรคผิวหนังที่เกิดจากพิษสารหนูเรื้อรัง จากการศึกษาทางพยาธิวิทยา โดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบว่าประชาชนในเขตตำบลอ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีปริมาณของสารหนูในเลือด ผม เล็บ และปัสสาวะสูงเกินค่าปกติ รวมถึงมีลักษณะอาการของผิวหนังที่มีสีเข้มจนเป็นจุดสีดำ และถ้ามีอาการรุนแรงจะกลายเป็นผื่นสีดำเป็นบริเวณกว้าง ที่ฝ่ามือและฝ่าเท้าจะมีผิวหนังหนาเป็นหย่อมๆ เมื่อมีอาการมากขึ้นจะเกิดอาการชาที่ปลายมือและปลายเท้า และพัฒนาเป็นมะเร็งผิวหนังซึ่งชาวบ้านเรียกกันโดยทั่วไปว่า "โรคไขดำ" (กองอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2531)

สภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ของตำบลอ่อนพิบูลย์ ตั้งอยู่บนพื้นที่ราบเชิงเขาที่มีการสะสมตัวของดินตะกอน กรวด หิน และสินแร่ที่ผุพังจากเขาร่อนนา และเขาสรวงจันทร์ ซึ่งมีสายแร่ควอตซ์ ดีบุกและซุลเฟรม โดยมีแร่ไพไรต์และอาร์ซีโนไฟไรต์เกิดเป็นเพื่อนแร่ มีการทำเหมืองโดยวิธีเจาะงัน และทำการแยกเอาแร่ดีบุกและซุลเฟรมออกจากเพื่อนแร่ที่ไม่ต้องการ โดยที่แร่อาร์ซีโนไฟไรต์จะมีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 46 สามารถผุพังได้ง่ายตามธรรมชาติ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะกลายเป็นสารประกอบอาร์ซีนีตซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ทำให้สารหนูสามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว

จากรายงานเบื้องต้นของกรมทรัพยากรธรณี (2530) และการศึกษาของ Fordyce *et.al.* (1995) เกี่ยวกับแหล่งที่มาของสารหนูและสาเหตุของโรคพิษสารหนู สามารถสรุปได้ คือ ปริมาณสารหนูในแหล่งแร่มีปริมาณมาก วิธีการทำเหมืองและการแต่งแร่ที่ไม่ถูกวิธี สภาพทางอุทกธรณีวิทยาที่เอื้ออำนวยให้เกิดการสะสมตัวและแพร่กระจายของสารหนู ความขาดแคลนสาธารณูปโภคด้านการจัดหา น้ำสะอาด และทัศนคติหรือความเคยชินของประชาชนที่นิยมบริโภคน้ำจากบ่อน้ำตื้น

ไพชยนต์ เจริญไชยศรี (2536) พบแหล่งแร่ที่ยังคงมีกongsซีแร่อาร์ซีโนไฟไรต์เหลืออยู่ประมาณ 4 แหล่ง และเป็นพื้นที่ที่ชาวบ้านยังร่อนแร่อยู่ 1 แหล่ง ส่วนการแพร่กระจายของสารหนูในแหล่งน้ำผิวดิน พบว่ามีความเข้มข้นสารหนูเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดเกือบทุกตัวอย่างน้ำ สารหนูสามารถแพร่กระจายโดยอาศัยน้ำเป็นตัวพาจากแหล่งกำเนิดบริเวณเชิงเขาทางทิศตะวันตกไปสะสมในแหล่งน้ำ ตะกอนท้องน้ำและบริเวณที่ราบทางทิศตะวันออก (สำนักวิจัยและพัฒนา ฝ่ายข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, 2539)

จากการศึกษาโรคพิษอาร์.ชนิดในคนงานร่อนแร่ พ.ศ.2530 (อรพวรรณ เมธาติลกกุลและคณะ, 2530) พบว่าคนงานในโรงงานร่อนแร่ป่วยด้วยโรคพิษสารหนูเรื้อรังประมาณร้อยละ 46 และยังพบว่าน้ำทิ้งจากโรงงานมีความเข้มข้นของสารหนูประมาณ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าค่ากำหนดของปริมาณสารหนูในน้ำทิ้ง ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม 16 เท่า

จากการศึกษาของ ณรงค์ ณ เชียงใหม่ (2534) เกี่ยวกับปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำ พิษ ผัก ผลไม้ และเส้นผมของประชาชนในเขตตำบลร่อนพิบูลย์ รวมถึงในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง พบว่าปริมาณของสารหนูในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.055-5.556 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการศึกษาของ วรพิน วิทวารวัฒน์ (2537) ถึงการปนเปื้อนของสารหนู แคดเมียมและตะกั่วในลุ่มแม่น้ำปากพอง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าปริมาณสารหนูมีค่าสูงสุด เท่ากับ 4.27 มิลลิกรัมต่อลิตรและประชาชนในเขตพื้นที่เสี่ยงร้อยละ 25 ยังนิยมบริโภคน้ำจากบ่อน้ำตื้นและน้ำบาดาล

ปัญหาสารหนูเป็นพิษในเขตอำเภอร่อนพิบูลย์เป็นอีกตัวอย่างของการพัฒนา โดยการนำทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์โดยขาดการจัดการที่ถูกต้อง แนวทางการแก้ไขของทางราชการได้แบ่งออกเป็นหลายวิธีและหลายหน่วยงาน เช่น การจัดทำฝายที่ตำบลหินตก โดยกรมชลประทาน ซึ่งอยู่ห่างจากตำบลร่อนพิบูลย์ประมาณ 18 กิโลเมตร แต่ไม่สามารถส่งจ่ายน้ำมายังตำบลร่อนพิบูลย์ได้ (มงคล ณ สงขลาและจันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ, 2539) การจัดหา น้ำสะอาดโดยการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งสามารถจัดหาให้ประชาชนในเขตสุขาภิบาลได้บางส่วน และการให้ความรู้เกี่ยวกับพิษของสารหนู โดยกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งผลการดำเนินงานไม่ประสบผลสำเร็จมากนัก เห็นได้จากการศึกษาของ กองระบาดวิทยา ร่วมกับโรงพยาบาลหาดใหญ่และสำนักงานสาธารณสุข จังหวัดนครศรีธรรมราช

(วิชัย เอกพลากร และอมรา ทองหงษ์, 2539) ได้ทำการสุ่มสำรวจร้อยละ 5 ของหลังคาเรือนของแต่ละหมู่บ้านในตำบลร่อนพิบูลย์ จำนวน 619 คน พบว่ามีอัตราชุกของโรคพิษสารหนู ร้อยละ 26.3 และอัตราชุกของคนที่มีการสารหนูในร่างกายสูงกว่าปกติร้อยละ 55.8 (มีระดับของสารหนูในร่างกายสูงกว่า 20 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนัก) ในขณะที่กลุ่มอายุน้อย (อายุ 0-9 ปี) ร้อยละ 89.8 มีปริมาณสารหนูในร่างกายสูงกว่าปกติ ส่วนในกลุ่มอายุ 10-19 ปี มีปริมาณของสารหนูในร่างกายสูงกว่าปกติ ร้อยละ 67 และแสดงอาการทางคลินิก ร้อยละ 19.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประชาชนในเขตตำบลร่อนพิบูลย์มีปริมาณสารหนูสะสมในร่างกายสูงกว่าปกติตั้งแต่อายุน้อยและอาจจะเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าการดำเนินงานแก้ไขปัญหาพิษสารหนูของทางราชการไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร

จากปัญหาของประชาชนในอำเภอร่อนพิบูลย์ที่มีอัตราเสี่ยงในการได้รับอันตรายจากสารหนู เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการอุปโภคและบริโภคถูกปนเปื้อนด้วยสารหนูในปริมาณที่สูง แนวทางในการแก้ไขแนวทางหนึ่งซึ่งรัฐสามารถทำได้ คือการจัดหาน้ำสะอาดในรูปแบบของน้ำประปาเพื่อให้บริการประชาชน โดยอาจจะดำเนินการได้ 2 วิธี คือจัดหาแหล่งน้ำดิบที่ไม่มีสารปนเปื้อนของสารหนูในการผลิตเป็นน้ำประปาแล้วส่งจ่ายให้ประชาชนในเขตพื้นที่เสี่ยง แต่ทั้งนี้รัฐบาลจะต้องลงทุนสูงในระบบการส่งจ่ายน้ำหรือทำการสร้างระบบประปาโดยใช้น้ำที่มีสารปนเปื้อนเป็นแหล่งน้ำดิบ โดยระบบการผลิตน้ำประปาจะต้องมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย องค์การอนามัยโลกได้กำหนดปริมาณสารหนูที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และการประปานครหลวงได้กำหนดปริมาณสารหนูที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มเท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉะนั้นการศึกษาเพื่อหาวิธีการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำจึงเป็นเป็นแนวทางที่สำคัญแนวทางหนึ่งในการพัฒนาระบบการผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ในเขตพื้นที่เสี่ยงที่ได้มาตรฐานต่อไป

การตรวจเอกสาร

1. การจำแนกสารและคุณสมบัติของสารหนู (กองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม, 2530)

1.1 การจำแนกสาร สารหนูเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 น้ำหนักอะตอม 74.9216 จัดอยู่ในกลุ่ม VA ของระบบตารางธาตุ ใช้สัญลักษณ์ As มีความหนาแน่นเท่ากับ 6.7 จุดเดือด 625 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียส มีค่าวาเลนซ์ได้หลายค่า คือ -3, 0, +3 และ +5 โดยทั่วไปมีสีเงินแกมเทา ผิวคล้ำมัว ค่อนข้างเปราะ พบในรูปธาตุโลหะและในรูปของสารประกอบซึ่งมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารหนู สารหนูในรูปอิสระสามารถพบได้น้อยมากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบเป็นส่วนประกอบของแร่ต่างๆ ในรูปของสารประกอบโลหะ เช่น ทองแดง, นิกเกิล, เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น สำหรับในน้ำมักพบในรูปของสารประกอบ Arsenate หรือ Arsenite และในรูปของสารประกอบ Methylate Arsenic โดยสามารถแบ่งสารประกอบของสารหนูได้เป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้ (กองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม, 2530)

1.2.1 สารประกอบโลหะสารหนู มีลักษณะเป็นของแข็ง หรือเป็นผง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

1.2.1.1 Metallic Arsenic เป็นผลึกที่เสถียรภายใต้สภาวะปกติ สีเทา จุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 36 บรรยากาศ

1.2.1.2 Yellow Arsenic ไม่เสถียร ลักษณะเป็นผง สีเหลืองอ่อน ความถ่วงจำเพาะ 1.97 เปลี่ยนแปลงเป็นรูป Metallic Arsenic ได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน

1.2.1.3 Amorphous Arsenic มีรูปผลึกไม่แน่นอน สีดำ ความถ่วงจำเพาะ 3.7 เปลี่ยนแปลงเป็นรูป Metallic Arsenic ได้ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

1.2.2 ประเภทสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู ที่สำคัญ คือ

1.2.2.1 Arsenic Trioxide (As_2O_3) หรือ White Arsenic มีน้ำหนักโมเลกุล 197.82 ความถ่วงจำเพาะ 3.74 - 415 จุดเดือด 465 องศาเซลเซียส ละลายน้ำได้น้อยมาก สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรด แต่สามารถละลายได้ดีในกรดไฮดรอกลอร์ริกและในด่างได้ สารละลายสารหนูในรูปของ Arsenite

1.2.2.2 Arsenic Pentoxide (As_2O_5) เป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุล 229.82 ความถ่วงจำเพาะ 4.08 สามารถละลายน้ำได้ดีกว่า Arsenic Trioxide และยังสามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และรวมตัวกับน้ำอย่างช้าๆ กลายเป็น Arsenic Acid (H_3AsO_4)

1.2.2.3 Arsenites มีสูตรโมเลกุล คือ MH_2AsO_3 , M_2HAsO_3 และ M_3AsO_3 โดยที่ M คือไอออนของโลหะวาเลนซ์ 1 หรือกลุ่มไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 คุณสมบัติการละลายน้ำของเกลือ Arsenites แบ่งได้เป็น Alkali-Metal Arsenites ซึ่งละลายน้ำได้ดี Alkali-Eartharsenites ละลายน้ำได้เล็กน้อย และ Heavy Metal Arsenites ไม่ละลายน้ำ เกลือ Arsenites ที่สำคัญคือ Cupric Arsenite ($CuHAsO_3$) Lead Arsenite ($Pb(AsO_3)_2$) และ Sodium Arsenite ($NaAsO_2$) เป็นต้น

1.2.2.4 Arsenate เป็นเกลือของ Arsenic Acid ที่สำคัญคือ Calcium Arsenate ($Ca_3(AsO_4)_2$) และ Lead Arsenate ($PbHAsO_4$) เป็นต้น

1.2.2.5 Arsenic Sulfides เป็นสารหนูที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำต่ำ เมื่ออยู่ในน้ำที่ไม่ออกซิเจนและในตัวกลางที่มี Hydrogen Sulfide จะเกิดเป็นสารประกอบและเกิดการตกตะกอนที่สำคัญ ได้แก่ Realgar และ Orpiment เป็นต้น

1.2.3 ประเภทสารประกอบอินทรีย์ของสารหนู

1.2.4 ก๊าซ สารหนูที่อยู่ในรูปก๊าซ คือ Arsine หรือ Arsenic Hydride (AsH_3) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง และสามารถละลายน้ำได้ดี

2. การใช้ประโยชน์และความเป็นพิษของสารหนู

2.1 การใช้ประโยชน์จากสารหนู สารหนูสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน สามารถแยกการใช้ประโยชน์จากสารหนูที่สำคัญ คือ (สมพร ภาวการคำดี, 2531)

2.1.1 การใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ใช้เป็นส่วนประกอบในสารพิษป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) และสารพิษสำหรับฆ่าวัชพืช (Herbicides)

2.1.2 การใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม ใช้เป็นส่วนผสมกับโลหะอื่นเพื่อเพิ่มความคงทนต่อการกัดกร่อน และใช้เป็นวัตถุดิบในตัวนำในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์

2.1.3 การใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคหัดคนและสัตว์ ซึ่งเป็นทั้งยาแผนโบราณและยาแผนปัจจุบัน

2.1.4 การใช้ประโยชน์ทางการทหาร ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารพิษในการทำสงคราม

2.1.5 การใช้ประโยชน์ทางการสำรวจแหล่งแร่ (เกษม จันทจรรยาพงษ์, 2519) โดยทั่วไปสารหนูจะอยู่รวมเป็นสารประกอบกับแร่ที่สำคัญต่างๆ เช่น แร่ทอง เงิน ทองแดง ดีบุก ซึ่งส่วนใหญ่จะมีความสัมพันธ์กับสารหนูในแง่บวก คือ ถ้าบริเวณใดที่มีปริมาณของสารหนูสูงจะมีปริมาณของแร่ที่มีค่าสูงด้วย

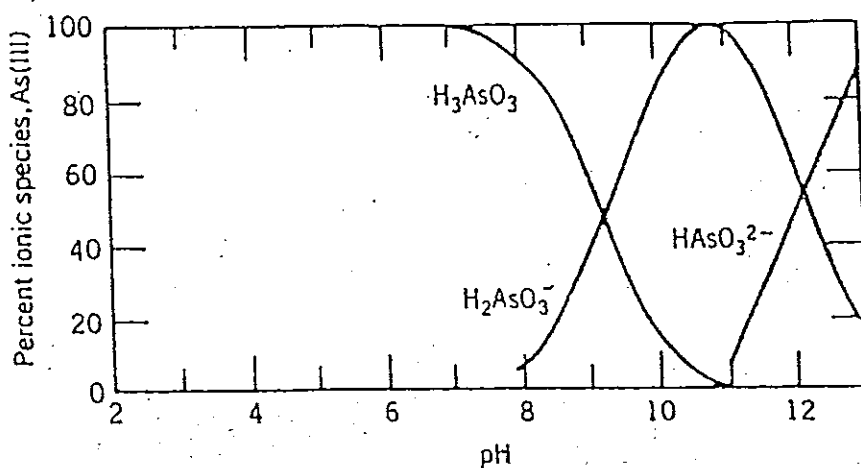
2.2 ความเป็นพิษของสารหนู ความเป็นพิษของสารหนูขึ้นกับหลายปัจจัย โดยที่ชนิดของสารประกอบของสารหนูเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด ก๊าซอาร์ซีนีมีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงไปได้แก่ สารหนูอนินทรีย์ที่มีวาเลนซ์ 3 สารหนูอินทรีย์ที่มีวาเลนซ์ 3 สารหนูอนินทรีย์ที่มีวาเลนซ์ 5 และสารหนูอินทรีย์ที่มีวาเลนซ์ 5 มีค่าความเป็นพิษน้อยที่สุด (Pontius et. al, 1994) นอกจากนั้นความเป็นพิษของสารหนูยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น ความสามารถในการดูดซึมและความสามารถในการขับสารหนูออกจากร่างกายของแต่ละบุคคล รวมถึงความแตกต่างของเพศ อายุ และคุณภาพชีวิตด้วย โดยสารหนูที่เข้าสู่ร่างกายด้วยวิธีการกินร่างกายจะสามารถดูดซึมได้มากที่สุด

ลักษณะการเกิดพิษต่อคน ส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดพิษแบบเรื้อรัง จากการสัมผัสและการรับสารหนูเข้าสู่ร่างกายโดยการกินหรือดื่มติดต่อกันเป็นเวลานาน แต่ถ้ารับเข้าสู่ร่างกายครั้งละปริมาณมากสามารถก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ การเกิดพิษแบบเรื้อรังจะมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยสารหนูวาเลนซ์ 3 สามารถจับกับเอนไซม์และโปรตีนได้ดีกว่าสารหนูวาเลนซ์ 5 แต่สารหนูวาเลนซ์ 5 สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปวาเลนซ์ 3 ได้ในร่างกาย ส่งผลให้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันและเมตาบอลิซึม

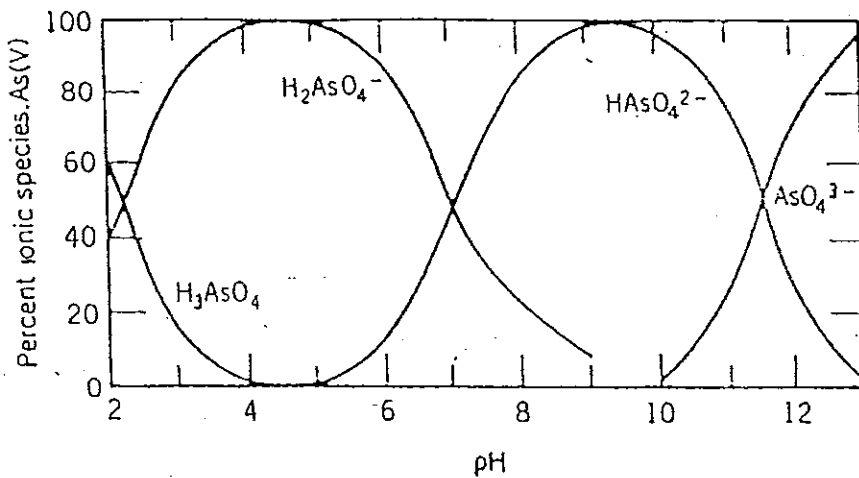
ของเซลล์ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ รวมถึงขัดขวางการสร้างพลังงานของร่างกาย โดยสารประกอบสารหนูบางชนิดสามารถรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และถูกออกซิไดส์กลายเป็นสารที่เป็นพิษต่อเม็ดเลือดแดง ทำให้เม็ดเลือดแดงเกิดการสลายตัว (hemolysis) ส่งผลให้ร่างกายเกิดอาการดีซ่านและโลหิตจางได้ (ไมตรี, 2531)

3. เคมีของสารหนูในน้ำธรรมชาติ

ลักษณะทางเคมีของสารหนูในน้ำธรรมชาติ มีความสำคัญในการศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ สารหนูในน้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ที่เป็นแอนไอออนและมีความเป็นกรด จากการละลายน้ำของสารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปของแข็ง Arsenolite (As_2O_3), Realgar (AsS) และ Claudetite (As_2O_5) เป็นต้น (Mok and Wai, 1994) ความเป็นกรดของสารหนูในน้ำที่พบได้บ่อย คือ Arsenous Acid และ Arsenic Acid สารหนูในน้ำมีได้หลายรูปแบบ ขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน การตกผลึกและการดูดซับ Ligand Exchange รวมถึงปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต โดยที่สารหนูสามารถมีค่าวาเลนซ์ ได้ 4 ค่า คือ -3, 0, 3 และ 5 แต่พบสารหนูวาเลนซ์ 3 และ 5 มากที่สุดในน้ำธรรมชาติ โดยค่าวาเลนซ์ของสารหนูจะขึ้นอยู่กับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) กับค่า pH ของน้ำ สารหนูที่มีวาเลนซ์ 3 จะพบมากในน้ำที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีออกซิเจนอยู่เลย และสารหนูวาเลนซ์ 5 จะอยู่ในน้ำผิวดินที่มีออกซิเจนละลายอยู่ (Gulledge and O'Conner, 1973), (Gupta and Chen, 1978), (Sorg and Logdon, 1978) และ (Ferguson and Gavis, 1972)



ภาพประกอบ 1 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซ์ 3 กับ ค่า pH
(Gupta and Chen, 1978)



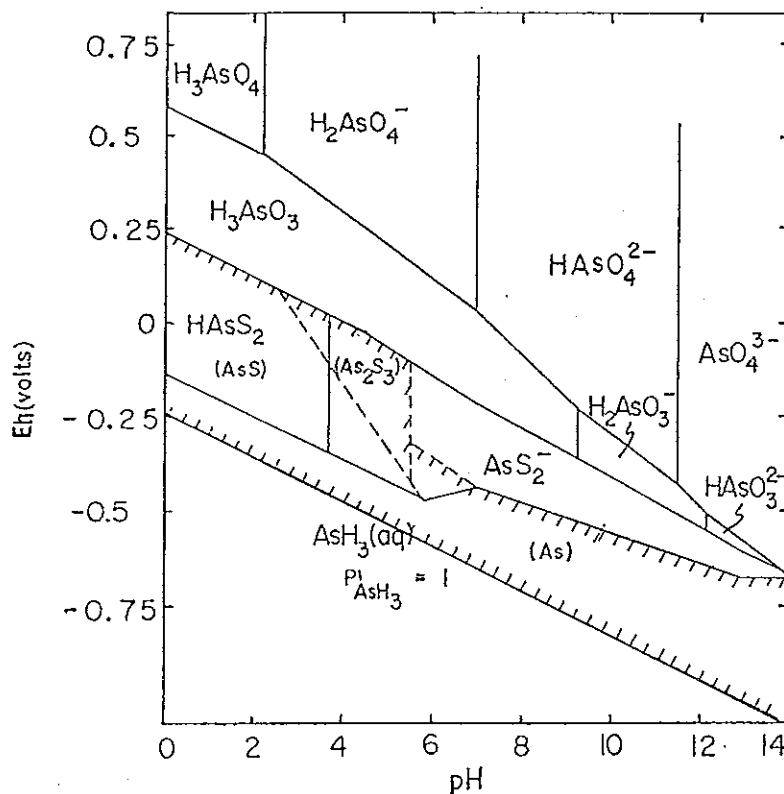
ภาพประกอบ 2 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 5 กับ ค่า pH

(Gupta and Chen, 1978)

จากภาพประกอบ 1 แสดงการแพร่กระจายของสารหนูที่มีวาเลนซี 3 พบว่าที่ pH เป็นกรด สามารถแตกตัวได้น้อยและพบในรูปของ H₃AsO₃ มากกว่าสปีชีส์อื่น ที่ pH 0 - 9 ในภาพประกอบ 2 พบว่าสารหนูวาเลนซี 5 มีอยู่ในรูป H₂AsO₄⁻ ในช่วง pH 3 ถึง 7 ส่วนที่ pH 7 ถึง 11.5 พบในรูป HAsO₄²⁻ มากกว่าสปีชีส์อื่น

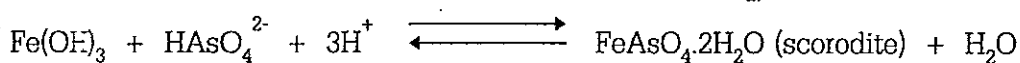
จากการคำนวณหาความสัมพันธ์ของสมมูลของสารหนูแต่ละสปีชีส์โดย Furguson และ Gavis (1972) ดังภาพประกอบ 3 แสดงความสัมพันธ์ของคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียล (Eh) กับค่า pH ที่เกิดเป็นสารประกอบกับ ออกซิเจน, น้ำ และซัลเฟอร์ เช่น Realgar (AsS), Orpiment (As₂S₃) จะคงตัวอยู่ในรูปของแข็ง ที่ Eh ประมาณ 0 โวลต์ และ pH ต่ำกว่า 5.5 ส่วนสารประกอบ HAsS₂ เสถียรที่ pH ต่ำ และค่า Eh ประมาณ 0 โวลต์ มีความสามารถในการละลายน้ำได้เท่ากับ 10^{-6.5} โมลต่อลิตร และสารประกอบ AsS²⁻ จะพบได้ที่ค่า pH มากกว่า 3.7 แต่ถ้าค่า pH มากกว่า 5.5 สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 10⁻⁵ โมลต่อลิตร เมื่อสารประกอบซัลไฟด์อยู่ในสภาพที่มีออกซิเจนจะถูกออกซิเดสได้ง่าย ทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

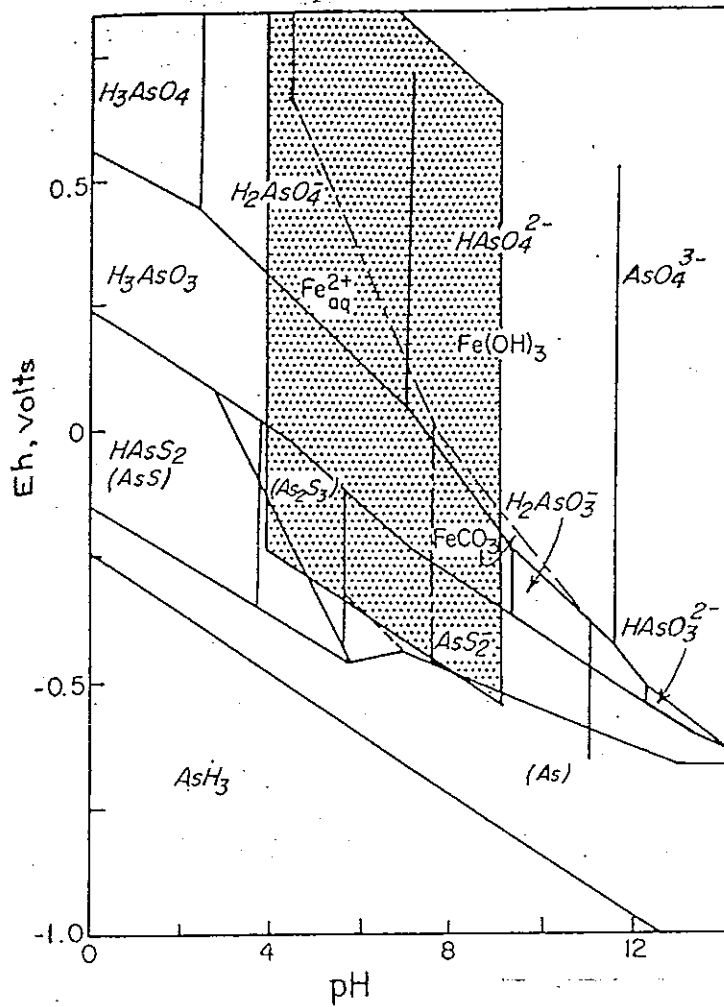
ในน้ำที่มีค่า Eh สูง พบว่าจะมีค่าออกซิเจนละลายสูงด้วย เช่นในน้ำผิวดิน สารหนูที่อยู่ในรูปกรดสารหนูที่มีวาเลนซี 5 จะคงตัวในรูปของ H₃AsO₄, H₂AsO₄⁻, HAsO₄²⁻ และ AsO₄³⁻ ส่วนกรดสารหนูที่มีวาเลนซี 3 ซึ่งได้แก่ H₃AsO₃, H₂AsO₃⁻ และ HAsO₃²⁻ จะเสถียรเมื่อถูกรีดิวซ์ให้ค่า Eh ลดลง ส่วนสารหนูที่อยู่ในรูปโลหะจะละลายน้ำได้น้อยมาก และคงตัวได้ที่ค่า Eh ต่ำๆ ได้ แต่ในสภาวะที่มีค่า Eh ต่ำมากๆ พบว่าสารหนูจะเสถียรในรูป อาร์ซีน (AsH₃) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก



ภาพประกอบ 3 แสดง Eh-pH ไดอะแกรมในแต่ละสปีชีส์ของสารหนูที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ที่ความเข้มข้นสารหนู 10^{-5} M และความเข้มข้นของซัลเฟอร์เท่ากับ 10^{-3} M (Ferguson and Gavis, 1972)

นอกจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและซัลเฟอร์ในน้ำธรรมชาติแล้ว สารหนูสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็ก ที่มีอยู่มากในธรรมชาติ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่ค่อนข้างเสถียร ดังแสดงในภาพประกอบ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูกับเหล็กภายใต้ไดอะแกรม Eh-pH และโดยที่ค่า pH อยู่ในช่วง 4 ถึง 8.5 และค่า Eh อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.75 สารประกอบสารหนูที่มีวาเลนซ์ 5 จะละลายอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ในน้ำที่มีออกซิเจน สำหรับ $HAsO_4^{2-}$ ซึ่งเป็นสารละลายที่อยู่ในสภาวะที่มีค่าของ Eh และ pH ระดับเดียวกับไฮดรอกไซด์ของเหล็ก Wilson and Hawkin (1978) และ Mok *et al* (1994) ได้เสนอสมการที่สามารถทำปฏิกิริยากันได้ คือ





ภาพประกอบ 4 Eh-pH ไดอะแกรมสำหรับแต่ละสปีชีส์ของสารหนูและเหล็ก
(Ferguson and Gavis, 1972)

แต่ในปฏิกิริยาดังกล่าวจะอยู่ในช่วงของ pH ที่เป็นด่างเล็กน้อย ซึ่งมี H^+ ต่ำทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อยในน้ำธรรมชาติ ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่น้อยเกิดเป็นสารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปของวาเลนซ์ 3 เป็นส่วนใหญ่ เช่น H_3AsO_3 และมีเหล็กอยู่ในรูปสารละลาย Fe^{2+} (aq) และถ้าอยู่ในช่วงที่มีค่า pH และ Eh ในระดับเดียวกัน ก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยาร่วมกันได้ และสามารถตกตะกอนเหมือนปฏิกิริยาของ $Fe(OH)_3$ และ $HAsO_4^{2-}$ ดังสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่สารหนูวาเลนซ์ 5 จะเกิดการตกตะกอนร่วมกับ $Fe(OH)_3$ ได้มากกว่าสารหนูวาเลนซ์ 3 ทำให้สารหนูวาเลนซ์ 5 ตกตะกอนได้มากกว่า ส่งผลให้สารหนูวาเลนซ์ 3 สามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากกว่า (Pierce and Moor, 1982)

4. วิธีการลดความเข้มข้นของสารหนู

4.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

ประสิทธิภาพของการลดความเข้มข้นสารหนูขึ้นกับวิธีการที่ใช้ และองค์ประกอบของสารหนูในน้ำ รวมถึงระดับต่ำสุดของความเข้มข้นของสารหนูที่ต้องการ กระบวนการออกซิเดชันมีความสำคัญในการออกซิไดส์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูเพิ่มมากขึ้นและเป็นการฆ่าเชื้อโรค กระบวนการออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสามารถทำได้หลายวิธี แต่สำหรับในการผลิตน้ำดื่มมีข้อจำกัดในการพิจารณา คือ ชนิดของสารเคมี, ปริมาณสารเคมีที่เหลือจากกระบวนการออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเติมสารเคมี และปฏิกิริยาการออกซิเดชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่นในน้ำ

สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน (Jekel, 1994) คือ คลอรีน, สารประกอบไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite), O_3 (Ozone), สารประกอบเปอร์แมงกาเนต (Permanganate), ออกซิเจน (O_2), และ Hydrogen Peroxide/ Fe^{2+} (Fenton's Reagent) เป็นต้น

ความต้องการที่มีลักษณะพิเศษของน้ำดื่ม ทำให้ออกซิเจนมีความเหมาะสมมากที่สุดในการกระบวนการออกซิเดชัน เพราะสามารถหลีกเลี่ยงข้อจำกัดต่าง ๆ ได้เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีตัวอื่น แต่เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ช้าและมีปัญหาการเติมในระบบขนาดเล็กเพราะต้องมีการเติมตลอดเวลา

คลอรีนและสารประกอบไฮโปคลอไรท์ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพราะมีราคาถูกและใช้ง่าย แต่มีผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ (Organic Matter) เกิดเป็นสารประกอบฮาโลมีเทน (Halomethane)

โอโซนใช้มากเพื่อการออกซิเดชันและการฆ่าเชื้อ แต่มีประสิทธิภาพต่ำในการออกซิไดส์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 ส่วนสารออกซิไดส์อื่น เช่น สารประกอบเปอร์แมงกาเนต และ Hydrogen Peroxide/ Fe^{2+} นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อในน้ำมากกว่าการใช้ในการออกซิไดส์สารหนู

Driehaus *et.al.* (1995) ศึกษาการใช้แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ในการออกซิไดส์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิไดส์มากที่สุด คือ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของแมงกานีสออกไซด์ และสารหนู

4.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอน (Precipitation-Coagulation Process)

กระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอน มีความสำคัญในการผลิตน้ำประปาเนื่องจากน้ำดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำประปามีคุณภาพต่ำ การกำจัดความขุ่นหรืออนุภาค สารแขวนลอยในน้ำ โดยการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และเกิดการตกจม (Settling) ซึ่งกระบวนการ

การที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกัน เรียกว่า การโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และเรียกกระบวนการที่ทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน (Floc) ว่า การรวมตะกอน (Flocculation)

กระบวนการโคแอกกูเลชันในระบบผลิตน้ำประปามีจุดประสงค์เพื่อกำจัดอนุภาคสารแขวนลอยในน้ำที่ทำให้เกิดความขุ่น กลิ่น และสีในน้ำดิบ (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2525) และจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าสามารถกำจัดสารอื่นๆ ได้อีก (มันลิน ตันจูลเวศน์, 2538ก) ได้แก่ ใยหิน (Asbestos) สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ สาหร่าย แบคทีเรีย และจุลินทรีย์อื่นๆ รวมถึงสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่เป็นพิษ เช่น PCB และ DDT เป็นต้น โดยสารปนเปื้อนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกโดยการตกตะกอน (Precipitation) พร้อมกับโลหะไฮดรอกไซด์ของสารโคแอกกูแลนต์หรืออนุภาคต่างๆ ในน้ำในลักษณะของการตกตะกอนรวม (Co-Precipitation) และถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกจมและการกรอง

กระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนในระบบประปาส่วนใหญ่จะใช้เกลือของสารประกอบของอลูมิเนียมและเหล็ก เพื่อกำจัดสารแขวนลอยในน้ำ แต่สารที่ละลายอยู่ในน้ำบางชนิด เช่น สารประกอบฟอสเฟต, โลหะหนักและสารอินทรีย์บางชนิด สามารถที่จะสร้างพันธะกับสารประกอบของเหล็กและอลูมิเนียม แล้วเกิดการตกตะกอนโดยการดูดซับประจุของสารเหล่านั้นไว้ที่ผิวหรือเกิดการทำปฏิกิริยาและตกตะกอนได้โดยตรง (Jekel, 1994)

สารหนูเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ และมีค่าออกซิเดชันนัมเบอร์ได้หลายค่า ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดอ็อกซิเจนมาติดไว้ที่ผิวรอบนอกได้ โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำมักชอบดูดอ็อกซิเจนมากกว่าอ็อกซิเจนบวก ทำให้สารหนูถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับอนุภาคของคอลลอยด์

จากการศึกษาของ Stumm และ Morgan (1962) และจาก Committee Report (1971) เกี่ยวกับ Specific Chemical Interaction ที่มีต่อของแข็งละลายน้ำและสารละลาย พบว่า Functional Group เช่น Amino, Hydroxyl, Carboxyl และ Phosphate Group สามารถทำปฏิกิริยากับ Polyvalent Metal ion กลายเป็นสารประกอบคอมเพล็กซ์ที่ไม่ละลายน้ำซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปฏิกิริยาแบบ Specific Chemical Interaction ในกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สามารถกำจัดสารละลายอื่นที่ไม่ใช่อนุภาคคอลลอยด์ได้

4.2.1 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

สารส้มและสารประกอบเหล็ก สามารถทำลายเสถียรคอลลอยด์ได้ ประกอบด้วยกลไก 2 ชนิดคือ (มันลิน ตันจูลเวศน์, 2538ก)

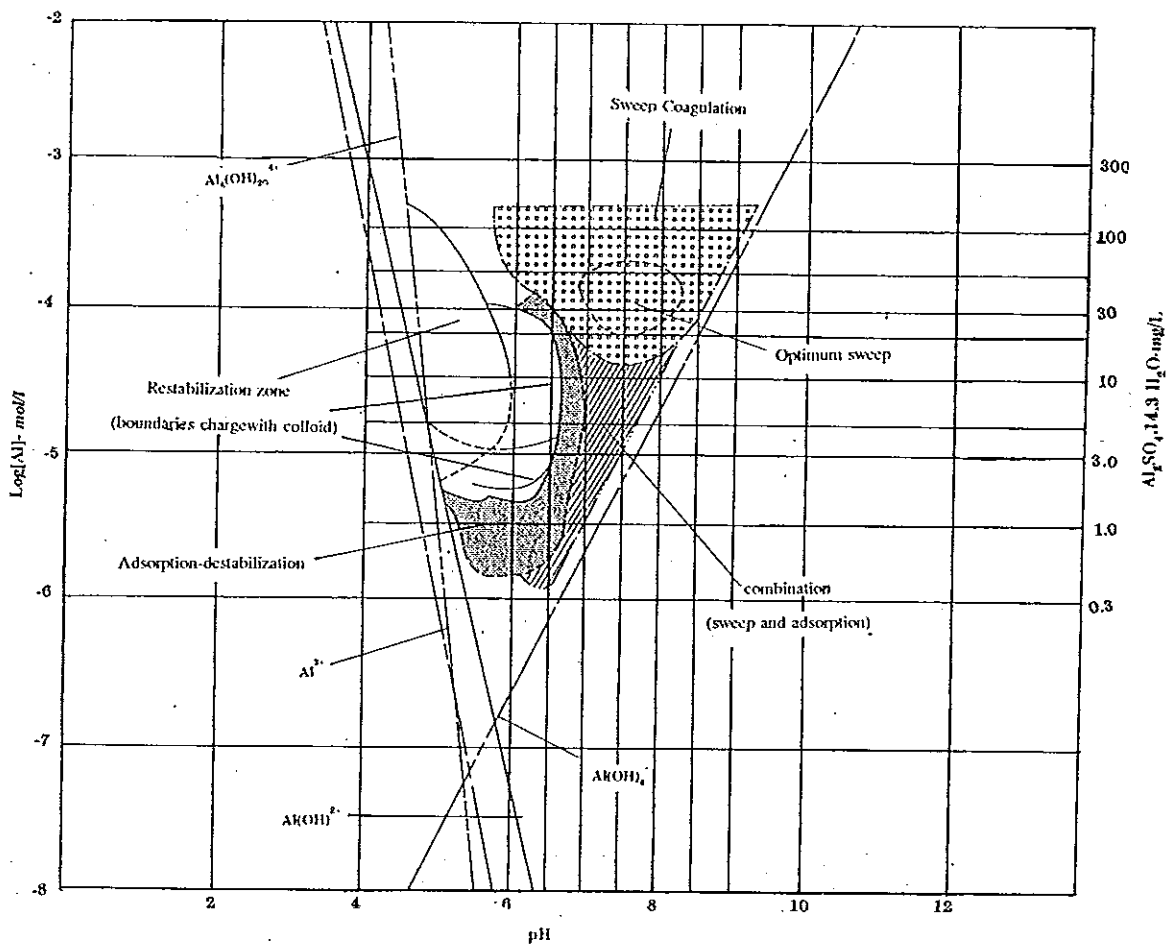
4.2.1.1 กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

สารส้มและสารประกอบเหล็กสร้างกลไกดูดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็น อ็อกซิเจนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ เช่น $Al(OH)^{+2}$ $Al_2(OH)^{+20}$ สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และทำลาย

ประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและรวมตัวกันจนกลายเป็นฟล็อก กลไกนี้สามารถเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 10^{-4} -1 วินาที เมื่อปริมาณสารโคแอกกูแลนต์มีน้อย โดยที่ผลคูณของ (Al^{+3}) หรือ (Fe^{+3}) และ (OH^-) มีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ของสารประกอบนั้น และจะต้องอยู่ในช่วงของ pH ที่เหมาะสมด้วย

4.2.1.2 กลไกโคแอกกูแลนต์แบบห่อหุ้มด้วยอนุภาคด้วยผลึก

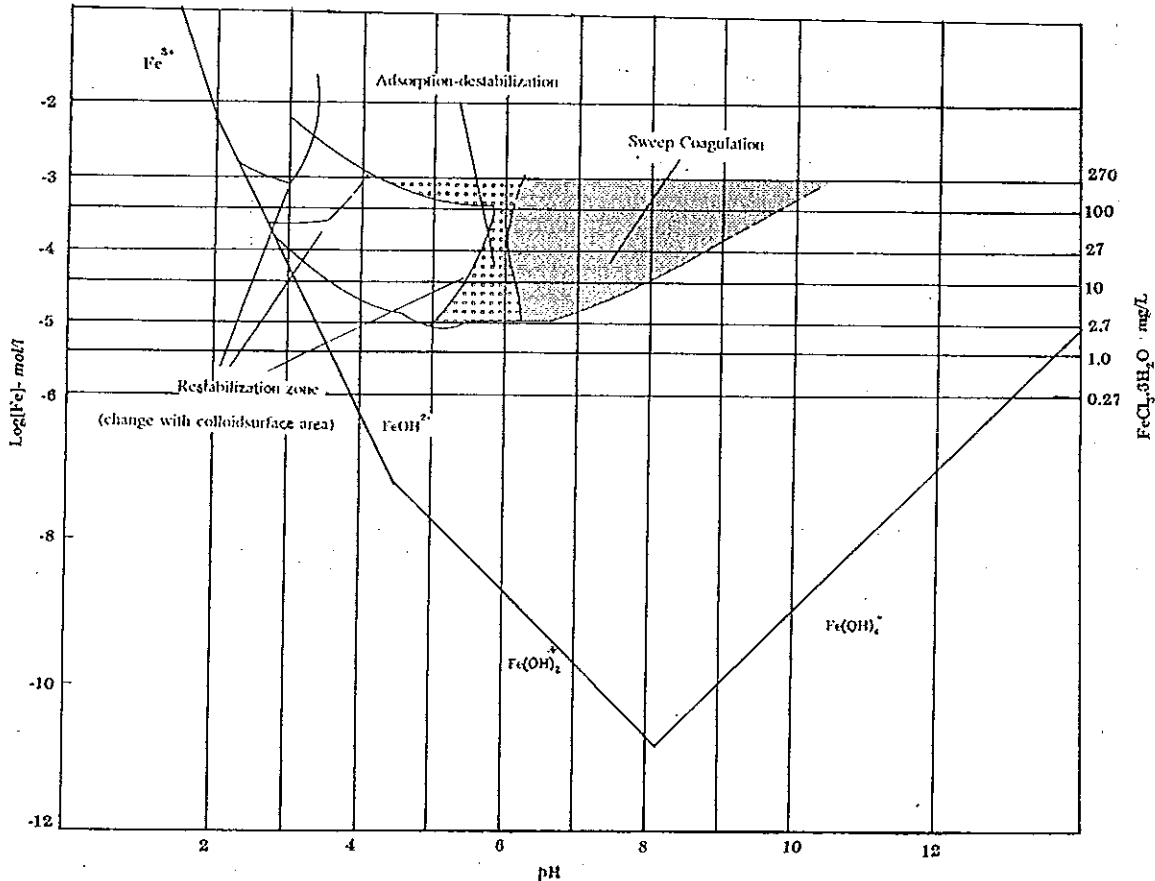
การสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation) เกิดจากการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ หรือ $Fe(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายปุ๋ย (Gelatinous) เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ หรือ $Fe(OH)_3$ ก็จะเกาะตัวจับกับผลึกนั้นจนได้เป็นอนุภาคขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย แต่จะต้องใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณมาก คือจะต้องให้ค่าผลคูณของ (Al^{+3}) หรือ (Fe^{+3}) และ (OH^-) มีค่ามากกว่าค่า K_{sp} ของสารประกอบนั้น



ภาพประกอบ 5 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและความคุมโคแอกกูแลนต์สารส้ม

(Johnson and Amirtharajah, 1983)

จากไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชัน ในภาพประกอบ 5 และ แสดงให้เห็นว่าสารส้มมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อ ลิตร และที่ความเข้มข้นของสารส้ม 20 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเกิดกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาค ด้วยผลึกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด



ภาพประกอบ 6 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันเพอร์ริคคโลไรด์

(Johnson and Amirtharajah, 1983)

กลไกโคแอกกูเลชันของเพอร์ริคคโลไรด์ ในภาพประกอบ 6 ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดกลไกทั้งแบบดูดติดผิวทำลายประจุ และห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก แต่เกิดในช่วงที่ pH แตกต่างกัน โดยกลไกแบบดูดติดผิวทำลายประจุ เกิดในช่วง pH 5-6.0 ส่วนกลไกแบบห่อหุ้มด้วยผลึกจะเกิดตั้งแต่ที่ pH 6-9 และเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเพอร์ริคคโลไรด์เพิ่มขึ้น

ตาราง 1 การลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้สารที่ทำให้ตกตะกอน

สปีชีส์ สารหนู	วิธีการบำบัด	ปริมาณสาร ตกตะกอน (mg/l)	ปริมาณ สารหนู (mg/l)	ประสิทธิ ภาพการ บำบัด(%)	พีเอช	เอกสาร อ้างอิง
As(V)	FeCl ₃	5	0.050	100	7.0	Edward, 1994
As(III)	FeCl ₃	6	.005	72	8	Edward, 1994
As(III)	FeCl ₃	18	.005	84	8	Edward, 1994
*	ให้อากาศ, สารส้ม, ตกตะกอน 6 วัน, กรอง	*	0.8	70	7.4	Shen, 1973
*	ให้อากาศ, สารส้ม ตก ตะกอน 12 วัน, กรอง	21	0.7	46	7.4	Shen, 1973
*	FeCl ₃	30	1	92	6.8	Shen, 1973
*	สารส้ม	30-50	.05	>90	5-7	Gulledge and O'Connor, 1973
*	FeCl ₃	10-50	.05	>95	5.7	Gulledge and O'Connor, 1973
As(V)	สารส้ม	30	1-2	>90	6.4- 7.5	Sorg., and. Logsdon, 1978
As(V)	Ferric sulfate	30	0.5	>90	6.4- 7.5	Sorg, and Logsdon, 1978
*	ปูนขาว	>300	4.5	>90	11.1- 11.4	สมศักดิ์ อินทร- การุณเวช, 2532
*	สารส้ม	>120	4.5	>78	6.6- 6.9	สมศักดิ์ อินทร- การุณเวช, 2532
*	สารส้ม	20	.05	69	7.0	Scott, 1995
*	FeCl ₃	3	.05	>80	7.0	Scott, 1995
*	FeCl ₃	6.5	.05	90	7.0	Scott, 1995

หมายเหตุ : * หมายถึง การทดลองที่ไม่บอกสปีชีส์ของสารหนู

การกำจัดสารหนูโดยตกตะกอนด้วยสารประกอบของโลหะ เป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป และปรับปรุงวิธีการให้มีความเหมาะสม, สะดวก และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาของ Gullidge and O'Connor (1973), Shen (1973), Sorg and Logsdon (1978) พบว่าการกำจัดสารหนูที่อยู่ในวาเลนซ์ 5 จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในช่วง pH ระหว่าง 6.5-7.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้สูงสุด สามารถกำจัดได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความเข้มข้น 0.1 ppm. ถึง 1 ppm. และน้ำที่ผ่านการเติมคลอรีน สามารถกำจัดสารหนูได้ดีกว่าน้ำที่ไม่ได้เติมคลอรีน โดยการออกซิไดส์สารหนูที่อยู่ในรูปของ H_3AsO_2 ที่ pH เป็นกลาง ให้อยู่ในรูปของสารหนูวาเลนซ์ 5 ที่อยู่ในรูปของประจุลบ

Nenov *et.al* (1994) ศึกษาการใช้สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ($Fe_2(SO_4)_3$) เป็นตัวตกตะกอนร่วม เพื่อการลดความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซ์ 3 พบว่าจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH เท่ากับ 9 และที่อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กและสารหนู เท่ากับ 11 ตะกอนที่ได้จะมีความเสถียร

Krause and Ettel (1989) พบว่าตะกอนที่ได้จากสารหนูและสารประกอบเหล็กในรูปของเฟอร์ริคอาร์ซิเนตมีความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออัตราส่วนมวลโมเลกุลของเหล็กและสารหนูเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของมวลโมเลกุลเท่ากับ 8 เฟอร์ริคอาร์ซิเนตจะมีอัตราการละลายต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH อยู่ระหว่าง 3-8 และอัตราการละลายจะไม่เพิ่มขึ้นในระยะเวลา 2-3.7 ปี ส่วนเฟอร์ริคอาร์ซิเนตในธรรมชาติที่มีอัตราส่วนของมวลโมเลกุลเท่ากับ 3-4 จะมีอัตราการละลายน้อยกว่าเฟอร์ริคอาร์ซิเนต ที่ได้จากการทดลองที่อัตราส่วนเดียวกัน

Das (1995) ทำการศึกษาวิธีการลดความเข้มข้นของสารหนูสำหรับใช้ในชนบท โดยการให้อากาศ การตกตะกอนโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์ ร่วมกับการกรอง และใช้คลอรีนแทนการให้อากาศ พบว่าวิธีการเติมคลอรีนร่วมกับเฟอร์ริคคลอไรด์และการกรองเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

Papassiopi and *et.al* (1996) ทำการทดลองกำจัดสารหนูในรูปของเฟอร์ริคอาร์ซิเนต โดยทำการทดลองพร้อมกัน 3 ห้องทดลอง โดยศึกษาถึงอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กและสารหนู, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นสารหนูและความคงตัวของตะกอนเฟอร์ริคอาร์ซิเนต ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กและสารหนูที่มีค่าน้อยกว่า 2 ไม่เหมาะสมที่จะทิ้งตะกอนในธรรมชาติเนื่องจากตะกอนที่ได้มีความคงตัวน้อย ที่อัตราส่วนระหว่างโมเลกุลเหล็กและสารหนูเท่ากับ 3 พบว่าตะกอนที่ได้มีการคงตัวมากขึ้นและสามารถทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ แต่ต้องมีค่า pH ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 7 ส่วนที่อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กและสารหนูเท่ากับ 5.9 สามารถทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมได้ในสภาวะที่เป็นด่างได้ ซึ่งจากผลการทดลองของทั้ง 3 ห้องทดลอง สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความคงตัวของตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากใช้สารประกอบของเหล็กและอลูมิเนียมแล้ว ยังมีการใช้ปูนขาวในการตกตะกอน แต่การลดความเข้มข้นของสารทูลยังมีประสิทธิภาพต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ในน้ำที่มีความกระด้างต่ำ และใช้สารเคมีตัวอื่นในการลดความเข้มข้นของสารทูลต่ออีกขั้นตอนหนึ่ง ซึ่งการบำบัดน้ำที่มีสารทูลปนเปื้อนโดยวิธีการทำให้เกิดการตกตะกอนนั้นเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายประหยัดมากที่สุด

4.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นการใช้สารที่มีอำนาจในการดูดโมเลกุลให้มาติดที่ผิวได้ ซึ่งอาจเป็นสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดุก หรือสารอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica), ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) เป็นต้น โดยสารที่มีอำนาจดูดติดผิวแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน โดยที่ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

4.3.1 แอ็คติเวตเต็ดอลูมินา สารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ (Activated Alumina and Other Oxide / Hydroxide)

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากสำหรับการบำบัดน้ำที่มีสารทูลปนเปื้อน แอ็คติเวตเต็ดอลูมินา เป็นชื่อเรียกทางการค้า Porous Oxide มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 200-300 ตารางเมตร/กรัม สำหรับใช้ในการกำจัด ฟอสเฟต, ฟลูออไรด์ และโลหะบางตัว โดยใช้วิธี Fixed-Bed ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงสำหรับประจุลบ การกำจัดสารทูลด้วยแอ็คติเวตเต็ดอลูมินามีความเหมาะสมในช่วง pH ระหว่าง 5.5-6 เพราะแอ็คติเวตเต็ดอลูมินาจะอยู่ในรูปของประจุบวก สามารถดูดซับสารทูลวาเลนซ์ 5 ได้มากกว่าสารทูลวาเลนซ์ 3 ซึ่งจะถูกรักษาได้น้อยมากหรือแทบจะกำจัดไม่ได้เลย

4.3.2 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange)

สารทูลอยู่ในวาเลนซ์ 5 ในรูปของประจุลบ $H_2AsO_4^-$ หรือ $HAsO_4^{2-}$ ในช่วง pH ที่เป็นกลางสามารถที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับเรซินได้ ทำให้สามารถแยกสารทูลวาเลนซ์ 3 ออกจากสารทูลวาเลนซ์ 5 ได้ เนื่องจากสารทูลวาเลนซ์ 5 ไม่สามารถผ่านคอลัมน์ได้ในขณะที่สารทูลวาเลนซ์ 3 สามารถผ่านคอลัมน์ของเรซินที่มีประจุลบได้ Clifford and *et al.*(1986)

Elson *et al.* (1980) ได้ศึกษาการกำจัดสารทูลวาเลนซ์ 3 โดยใช้ไคโตแซน (Chitosan) และไคติน (Chitin) ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นสารทูลจาก 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพของเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์

Singh *et al.* (1988) สามารถกำจัดสารหนูวาเลนซี 3 โดยใช้ฮีมาไทท์ (Haematite) ซึ่งสามารถกำจัดสารหนูได้สูงสุด 96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นสารหนู 13.34 ไมโครโมลต่อลิตร ที่ pH 7 และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

Kuhlmeier and Sherwood (1996) บำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจากยาฆ่าแมลง ซึ่งอยู่ในรูป Monomethyarsenic Acid, Dimethyarsenic Acid, Arsenate และ Arsenite โดยใช้วิธีการบำบัดหลายวิธี คือ การดูดซับ การออกซิเดชัน และการตกตะกอน จากการทดลองพบว่าการดูดซับโดยใช้สาร 4 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ แอ็คติเวตเตดอลูมินา เฟอร์รัสซัลไฟด์ และการแลกเปลี่ยนประจุ มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ ส่วนการตกตะกอนโดยไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันจะมีความเข้มข้นที่เหลือเท่ากับ 260 ไมโครกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการออกซิไดซ์ก่อนการตกตะกอน พบว่ามีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 110 ไมโครกรัมต่อลิตร

Joshi และ Chaudhuri (1996) ศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้ออกไซด์ของเหล็กเคลือบบนผิวของทรายเพื่อใช้ในระบบกำจัดสารหนูขนาดเล็ก หรือใช้สำหรับบ้านเรือนในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งสามารถกำจัดสารหนูจากน้ำบาดาลที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นเท่ากับมาตรฐานของน้ำดื่มได้ (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร)

4.3.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น เพื่อให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น โดยการทำให้มีรูพรุนภายในเนื้อคาร์บอนให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ให้เป็นถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด เช่น ถ่านหินบางชนิด กะลามะพร้าว กระดุกสัตว์ เปลือกของผลไม้บางชนิดฯ ขั้นตอนของการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย การไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ (Dehydration) และนำวัตถุดิบไปเผาให้เป็นถ่าน (Carbonization) การกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือความร้อนเพื่อให้ความพรุนในเนื้อถ่านเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC) และแบบเม็ด (Granular Activated Carbon หรือ GAC)

4.3.2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง มีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอน ซึ่งใช้เติมร่วมกับสารที่ทำให้ตกตะกอน ทำให้กระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลหรือคอลลอยด์สามารถสัมผัสกับผิวถ่านได้ง่ายและรวดเร็วและสามารถถูกแยกออกมาจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรสในน้ำ มีปริมาณความเข้มข้นของสารที่ต้องการกำจัดไม่สูงมาก แต่ถ้าต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงมากจะต้องใช้ถ่านในปริมาณมากและไม่คุ้มค่า

4.3.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของทรายหยาบ และการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดนั้น มีลักษณะคล้ายกับการใช้ทรายในการกรองน้ำ คือ ต้องมีการบรรจุลงในถังและปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่าน ซึ่งอาจใช้ร่วมกับทรายได้ในลักษณะของการกรองแบบ 2 ชั้น คือ มีการกรองผ่านทรายก่อน แล้วจึงผ่านถ่านกัมมันต์ หรืออาจใช้ถ่านกัมมันต์อย่างเดียวก็ได้ ถ่านที่ใช้นั้นจะนำมาผ่านนั้นมีความขุ่นไม่มากนัก ถ่านที่ผ่านการใช้และเสื่อมคุณภาพสามารถนำกลับไปฟื้นฟูใหม่ (regeneration)

โดยทั่วไปการเกาะติดที่ผิวในระบบประปาจะเป็นกระบวนการทางกายภาพ เพราะโมเลกุลของสารถูกดูดให้เกาะบนผิวของของแข็งโดยแรงทางกายภาพและอาจมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นร่วมด้วย การดูดซับบนพื้นผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่งในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำหลังจากมีการตกตะกอนและการกรองแบบธรรมดาแล้ว (Metcalf & Eddy, 1991)

ในประเทศไทยการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำหรือใช้ในระบบประปานั้นยังไม่แพร่หลายมาก และการใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในระบบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ยังไม่มีหน่วยงานที่รับฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมสภาพแล้ว ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมสภาพแล้วจะถูกทิ้งและนำถ่านใหม่มาใช้เลย

ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (มันลิน ตันฑุลเวศน์, 2538ข) ได้แก่ สี กลิ่น รส คลอรีนในน้ำ โลหะหนักชนิดต่างๆ ยาฆ่าแมลง ผงซักฟอก แอลกอฮอล์บางชนิด ฟีนอลและสารประกอบฟีนอล รวมถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วย

การกำจัดสารหนูโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งที่ pH ระหว่าง 3-6 สารหนูจะอยู่ในรูปวาเลนซ์ 5 (H_2AsO_4) มากที่สุด ทำให้สามารถถูกกำจัดได้ง่าย และสารหนูวาเลนซ์ 3 จะอยู่ในรูปของ H_3AsO_3 ในช่วง pH 0-9 ซึ่งสัมพันธ์กับการอธิบายของ Huang และ Fu (1984) ที่ว่า Monovalent จะสามารถจับกับ Oxo-Functional Groups บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ รวมถึง Nonionic, Divalent และ Trivalent ด้วย โดยที่สารหนูวาเลนซ์ 5 จะถูกดูดซับโดยโมเลกุลที่มีประจุลบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีประจุเป็นกลางหรือพื้นผิวของประจุที่เป็นบวก ส่วนสารหนูที่มีวาเลนซ์ 3 จะถูกดูดซับโดยพื้นผิวที่มีประจุเป็นกลาง หรือมีประจุลบและบวกเล็กน้อย

Rajakovic and Mitrovic (1992) ทำการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ Ag^+ , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} และ Fe^{3+} ในการลดความเข้มข้นสารหนูพบว่า Cu^{2+} มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้สูงสุด

Huang and Fu (1984) พบว่าถ่านกัมมันต์บางชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้สูงที่ ค่า pH ระหว่าง 4-5 และพบว่ากรดแก่สามารถที่จะดึงสารหนูวาเลนซ์ 5 ให้ออกจากถ่านกัมมันต์ได้ ส่วนต่างสามารถดึงสารหนูออกจากถ่านกัมมันต์ที่ถูกฝังประจุของเกลือ Fe^{2+} ส่วนเกลือของ Fe^{3+} , Ca^{2+} , Al^{3+} และ Mg^{2+} สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้น้อย

Huang and Vane (1989) พบว่า ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับเกลือของสารประกอบเหล็ก และประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารประกอบเหล็ก, pH, ระยะเวลาของการบำบัดและความเข้มข้นของสารหนู

4.5 วิธีการอื่น ๆ

การกำจัดสารหนูส่วนใหญ่เป็นการกำจัดในกรณีที่มีความเข้มข้นสารหนูสูง (Jekel, 1994) ซึ่งได้แก่วิธี รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis), อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) ซึ่งสามารถกำจัดสารหนูวาเลนซ์ 5 ได้ 98-99 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ppm. ในกรณีของสารหนูวาเลนซ์ 3 สามารถกำจัดได้ 46-75 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออยู่ในรูปของ H_3AsO_3

การลดความเข้มข้นของน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูวาเลนซ์ 3 และสารหนูวาเลนซ์ 5 สามารถสรุปได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำที่มีสารหนูวาเลนซ์ 3 และวาเลนซ์ 5 ปนเปื้อน

วิธีการบำบัด	สารหนูวาเลนซ์ 3	สารหนูวาเลนซ์ 5
Aeration and Stripping	P	P
Coagulation, Sedimentation, Filtration	F-G	G-E
Lime Softening	F-G	G-E
Membrane Processes		
- Reverse Osmosis	F-G	G-E
- Eletrodialysis	F-G	G-E
- Chemical Oxidation and Disinfection	P	P
Adsorption		
- GAC	F-G	F-G
- PAC	P-F	P-F

ตาราง 2 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำที่มีสารหนูวาเลนซี 3 และวาเลนซี 5 ปนเปื้อน (ต่อ)

วิธีการบำบัด	สารหนูวาเลนซี 3	สารหนูวาเลนซี 5
Ion Exchange		
- Anion	G-E	G-E
- Cation	P	P
- Activated Alumina	G-E	E

ที่มา : Hamann *et.al.*(n.d.) quoted in Viraraghavan *et.al.* (1996)

หมายเหตุ : P = Poor (ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ)

F = Fair (ประสิทธิภาพในการบำบัดพอใช้)

G = Good (ประสิทธิภาพในการบำบัดดี)

E = Excellent (ประสิทธิภาพในการบำบัดดีมาก)

จากตารางจะเห็นได้ว่าวิธีการลดความเข้มข้นสารหนูมีหลายวิธี แต่วิธีที่สามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสถานที่จริงอย่างมีประสิทธิภาพ คือ กระบวนการดูดซับและการตกตะกอนร่วม (Adsorption-Coprecipitation) (Inorganic Contamination Research Committee, 1993) โดยใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม โดยที่สารประกอบเหล็กสามารถกำจัดสารหนูได้ดีกว่าสารประกอบอลูมิเนียม นอกจากนั้นการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการกำจัดสารหนูโดยการแลกเปลี่ยนประจุและรีเวอร์สออสโมซิสอยู่ในระหว่างการทดลองและพัฒนา เพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ทำให้มีความสะดวกและประหยัดมากยิ่งขึ้น

วิธีการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนมีหลายวิธี ในการเลือกวิธีการในการลดความเข้มข้นของสารหนูขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำก่อนบำบัด ความเข้มข้นของสารหนูที่ต้องการหลังการบำบัด วาเลนซีของสารหนูในน้ำ อุปกรณ์และต้นทุนในการบำบัด เป็นต้น และในการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากตำบลร่อนพิบูลย์ จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัย คือ ให้มีความเข้มข้นของสารหนูและสารเคมีตกค้างน้อยที่สุด รวมถึงต้องเป็นวิธีการบำบัดที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีบำบัดหลายวิธีร่วมกัน คือ การออกซิไดส์สารหนูจากวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 ใช้คลอรีน เนื่องจากน้ำที่จะนำมาบำบัดเป็นน้ำบ่อ หรือน้ำบาดาลซึ่งมีสารหนูวาเลนซี 3 ปนอยู่ และยังเป็น

การฆ่าเชื้อโรคด้วย หลังจากนั้นทำการทดลองตกตะกอนโดยใช้เกลือของสารประกอบเหล็ก และสารส้ม โดยมีเหตุผลในการเลือกสารประกอบเหล็ก คือ จากการศึกษาจากเอกสารพบว่า การตกตะกอนด้วยสารประกอบเหล็กมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูได้สูงสุด และเหตุผลในการเลือกสารส้มเป็นตัวตกตะกอนในการลดความเข้มข้นของสารหนู เนื่องจากระบบประปาในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้สารส้มในการผลิตน้ำประปา น้ำที่ได้หลังจากการตกตะกอนผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ เพื่อลดความเข้มข้นของสารหนูให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูเพิ่มขึ้นและมีความปลอดภัยมากที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาวิธีการในการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ โดยกระบวนการคลอรีนชัน กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำโดยใช้ กระบวนการคลอรีนชัน กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง และ สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ระดับคุณภาพสำหรับวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1.1 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

1.1.1 น้ำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

1.1.2 น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนู ในเขต อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำตัวอย่าง การทดลองและการวิเคราะห์ทางเคมี มีระดับของคุณภาพสำหรับวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

2. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

2.1 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง

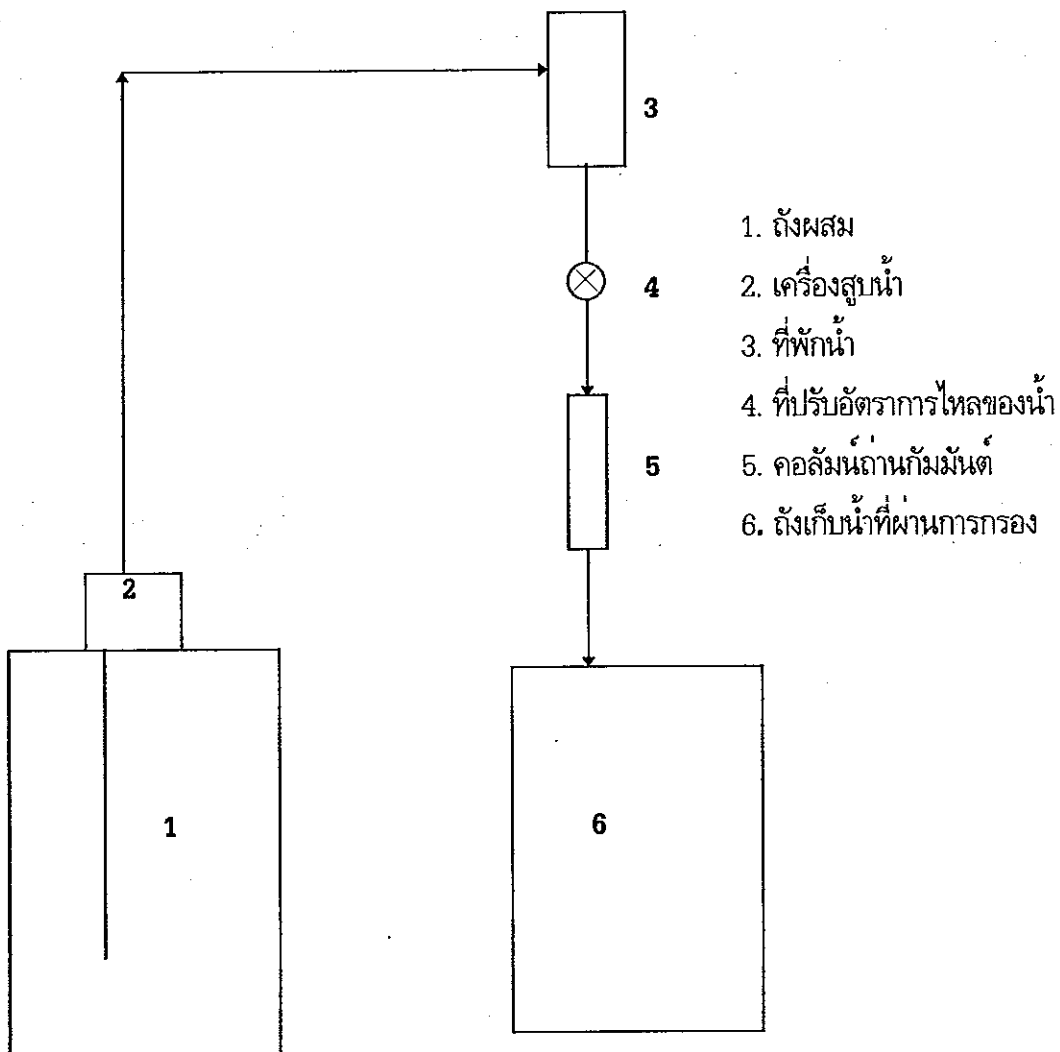
- ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร
- ถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

- เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น มงคลสุข ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) UVIDEC-320 (Digital Double beam Spectrophotometer)
- ชุดเครื่องมือวิเคราะห์สารหนู ด้วยวิธี Silver diethyldithiocarbamate

2.3 อุปกรณ์สำหรับใช้เป็นแบบทดลองในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย

- ถังพลาสติกมีฝาปิดขนาด 120 ลิตร
- เครื่องสูบน้ำ ProMinent Fluid Cout type. ALPA 1003pp 1000A2



ภาพประกอบ 7 แบบจำลองที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อลดความเข้มข้นสารหนูในน้ำตัวอย่าง

3. ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาเพื่อหาวิธีการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำโดย กระบวนการคลอรีนชั้น กระบวนการโคแอกกูเลชันและการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ โดยในการเติมสารเคมีในกระบวนการต่างๆ จะคำนึงถึงปริมาณของสารตกค้างให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย

3.1.1 ศึกษาถึงระดับความเข้มข้นของ คลอรีน สารส้ม และเพอร์ริคคลอไรด์ ที่เหมาะสมในการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการลดความเข้มข้นของสารหนู

3.1.3 นำน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนู ในเขตอำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มาทำการศึกษาดมผลการทดลองที่ได้ใน ข้อ 3.1.1 และข้อ 3.1.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของผลการทดลอง

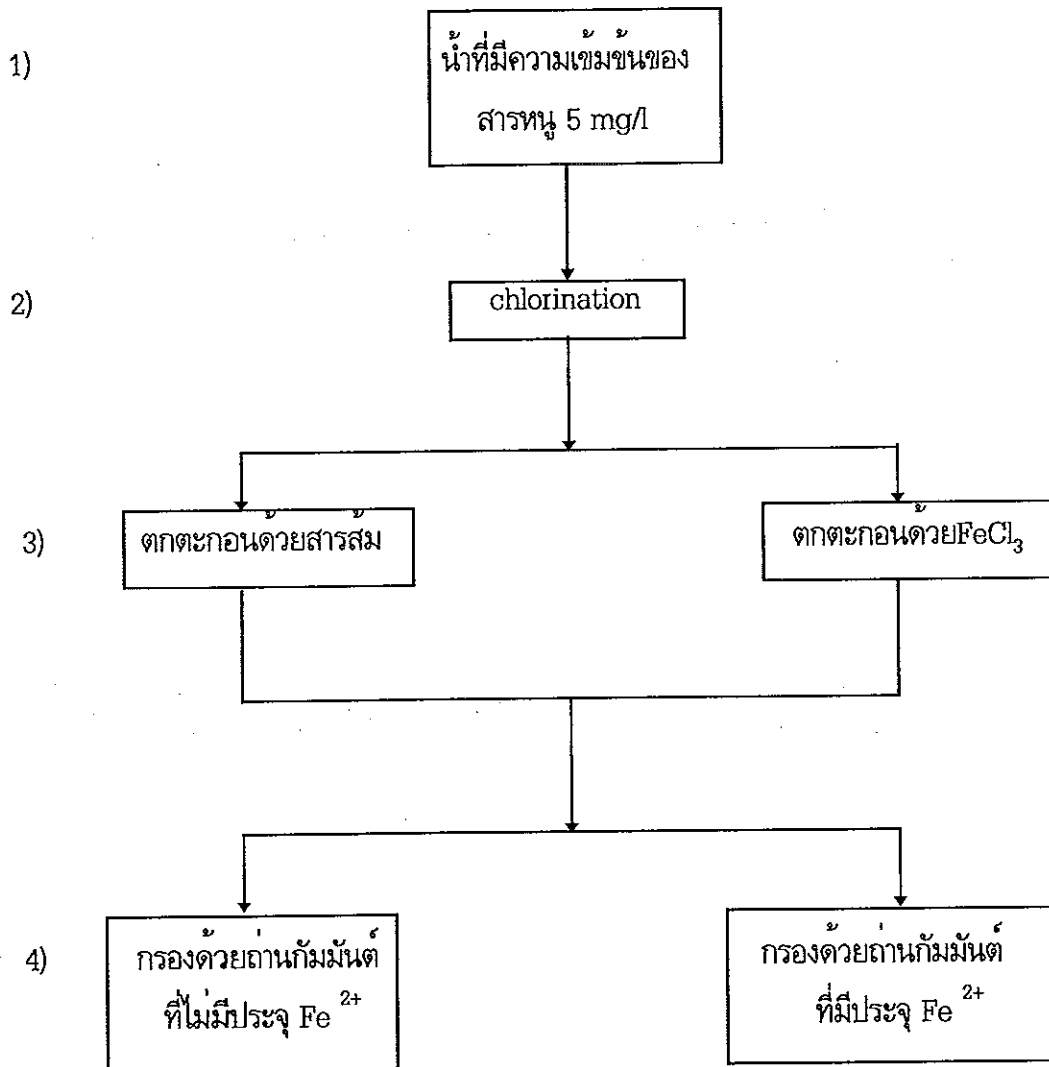
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 เตรียมน้ำที่มีความเข้มข้นของสารหนู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการค้นคว้ารายงาน การศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในแหล่งน้ำและบ่อน้ำตื้น เขตอำเภอรัตนพิบูลย์ พบว่าค่าความเข้มข้นของสารหนูสูงสุดจะอยู่ระหว่าง 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉะนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารหนูที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการทดลอง

3.2.2 ศึกษาผลของการใช้คลอรีนในการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ โดยเติมคลอรีนที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันลงในน้ำที่มีความเข้มข้นของสารหนู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากันโดยการกวนแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัด ค่าปริมาณคลอรีนที่ตกค้าง pH และปริมาณสารหนู

3.2.3 ศึกษาผลของการใช้สารส้ม และเพอร์ริคคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำที่มีความเข้มข้นของสารหนู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการนำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.2 มาเติมสารส้มและสารประกอบเพอร์ริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ได้เติม นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่า pH และปริมาณสารหนู

3.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ Fe^{2+} และถ่านกัมมันต์ที่มีประจุ Fe^{2+} นำน้ำที่ได้หลังจากการกรองไปวัดค่า pH และปริมาณสารหนู ซึ่งวิธีการทดลองแสดงได้ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แผนภาพแสดงวิธีการศึกษาการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน

1) เตรียมน้ำที่มีความเข้มข้นของสารหนู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจาก As_2O_3 ซึ่งเป็นสารหนูวาเลนซ์ 3 เนื่องจากในน้ำบาดาลและน้ำบ่อตื้นจะมีสารหนูวาเลนซ์ 3 ปนอยู่ด้วย

2) การเติมคลอรีน (chlorination) เป็นการออกซิไดส์สารหนูจากสารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 เนื่องจาก จากการศึกษาพบว่าสารหนูวาเลนซี 5 สามารถกำจัดได้ง่ายกว่าสารหนูที่มีวาเลนซี 3 โดยทำการเติมคลอรีนให้มีความเข้มข้นของคลอรีน เท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเลือกความเข้มข้นของคลอรีนที่มีปริมาณคลอรีนตกค้าง ให้อยู่ในระดับที่มีความปลอดภัยต่อการบริโภค

3) การศึกษาการทำให้ตกตะกอน โดยนำผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนการเติมคลอรีน มาเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน คือสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และพิจารณาเลือกสารที่ทำให้ตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูมากที่สุด เพื่อการทดลองขั้นต่อไป

4) การกรองด้วยถ่านกัมมันต์ โดยนำน้ำที่ได้จากขั้นตอนการตกตะกอนผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ ด้วยความเร็วประมาณ 2 - 3 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสารหนูของถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ Fe^{2+} และถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุของ Fe^{2+} ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ Fe^{2+} สามารถเตรียมโดยการแช่ถ่านกัมมันต์จำนวน 12.5 กรัม ในสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ที่ความเข้มข้น 10^{-2} โมล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปล้าง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Huang and Vane, 1989) และถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุของ Fe^{2+} เตรียมโดยการนำไปล้าง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ที่สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูได้มากที่สุด เพื่อทำการทดลองในข้อ 3.2.5

3.2.5 นำน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนู ในเขต อำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเลือกจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ตำบลรอนพิบูลย์ อำเภอรอนพิบูลย์ เนื่องจาก จากการศึกษาของประกาย บริบูรณ์ (2539) พบว่าน้ำบ่อตื้นจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 มีค่าความเข้มข้นของสารหนูสูงที่สุด มาทำการศึกษาตามผลการทดลองที่ได้ใน ข้อ 3.2.2, 3.2.3 และ 3.2.4 รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำ โดยทำการวัด ปริมาณสารหนู pH ความกระด้าง และความเป็นด่าง

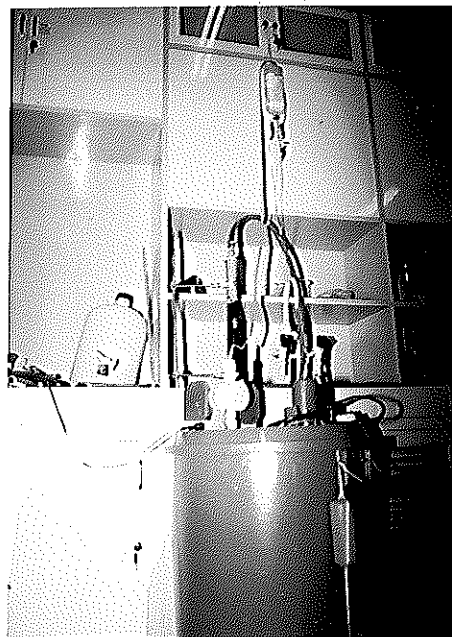
4. วิธีการวิเคราะห์

ตาราง 4 วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณสารหนู	Silver diethyldithiocarbamate ^a
ปริมาณคลอรีน	Orthotolidine Arsenite ^b
พีเอช	pH meter
ความกระด้าง	EDTA Titration ^a
ค่าความเป็นด่าง	Direct Titration ^a

ที่มา : a APHA, AWWA, and WPCF, 1989

: b APHA, AWWA, and WPCF, 1971



ภาพประกอบ 9 ชุดการทดลองที่ใช้ในการลดความเข้มข้นสารหนูในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 3

ผลการวิจัย

การเสนอผลการทดลองจะทำการเสนอเรียงตามภาพประกอบที่ 8 และเสนอแยกเป็นการทดลองย่อย ๆ ตามลำดับความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งเรียงจากค่าความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนทีน้อยไปหามาก

การทดลองที่ 1 ศึกษาปริมาณของคลอรีนที่เหมาะสมในการลดความเข้มข้นของสารหนูเพื่อออกซิไดส์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 โดยคำนึงถึงความเข้มข้นของคลอรีนที่ตกค้าง โดยเตรียมสารละลายคลอรีนจากแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ (Ca(OCl)_2) และเติมลงในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่มีสารหนูวาเลนซี 3 เข้มข้นประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยให้ความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการคนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของคลอรีนตกค้าง และความเข้มข้นของสารหนู

ตาราง 4 ผลการทดลองใช้คลอรีนในการลดความเข้มข้นสารหนู และความเข้มข้นของคลอรีนตกค้าง

ความเข้มข้น คลอรีนเริ่มต้น (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของคลอรีน ตกค้าง (mg/L)				ความเข้มข้นของ สารหนู (mg/L)			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	6.8	0	0	0	0	5.49	5.48	5.48	5.48
0.5	6.8	0.02	0.02	0.03	0.023	5.41	5.46	5.43	5.43
1.0	6.6	0.06	0.03	0.05	0.047	5.36	5.42	5.41	5.40
2.0	6.6	0.2	0.2	0.3	0.23	5.31	5.40	5.38	5.36
3.0	6.4	0.5	0.6	0.5	0.53	5.23	5.38	5.35	5.32
5.0	6.4	1.5	1.3	1.2	1.33	5.26	5.35	5.19	5.27

การใช้คลอรีนในการออกซิไดส์สารหนูเลขที่ 3 ให้เป็นสารหนูเลขที่ 5 พบว่า ค่า pH ของสารละลายลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของคลอรีนเพิ่มมากขึ้น และหลังจากตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง พบว่าค่าความเข้มข้นของสารหนูไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้นของคลอรีน ส่วนปริมาณของคลอรีนที่ตกค้าง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของคลอรีนที่เติมเพิ่มมากขึ้น จะมีปริมาณของคลอรีนที่ตกค้างเพิ่มมากขึ้นด้วย คือ ที่ความเข้มข้นของคลอรีนเริ่มต้นเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณของคลอรีนตกค้าง เท่ากับ 0.23, 0.047, 0.23, 0.53 และ 1.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองที่ 1 พบว่าที่ความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณคลอรีนตกค้างเท่ากับ 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป

การทดลองที่ 2 ศึกษาการใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อลดความเข้มข้นของสารหนู โดยให้ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองในการทดลองที่ 1 เป็นน้ำตัวอย่าง และเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ความเข้มข้นเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 3, และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง 5 ผลการทดลองใช้สารส้มในการลดความเข้มข้นของสารหนูที่ ความเข้มข้นของสารส้ม 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

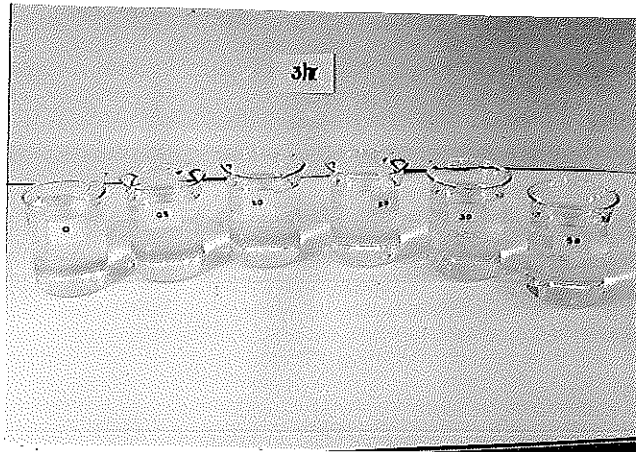
ความเข้มข้นของสารส้ม (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)				%removal
		1	2	3	เฉลี่ย	
0	6.8	5.51	5.62	5.51	5.55	0
0.5	6.8	5.37	5.52	5.41	5.44	2
1	6.8	5.25	5.33	5.27	5.28	4.8
2	6.6	5.28	5.31	5.19	5.25	5.4
3	6.5	5.10	5.19	5.14	5.14	7.4
5	6.4	5.08	4.98	5.08	5.05	9

จากการศึกษา การใช้สารส้มเป็นตัวทำให้ตกตะกอน พบว่าหลังจากเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไปในน้ำตัวอย่างแล้ว ไม่มีความเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตได้ ดังภาพประกอบ 10 และ ค่า pH ลดลงเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น คือที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร มี pH เท่ากับ 6.8 และที่ความเข้มข้นของสารส้ม 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ลดลงเป็น 6.4 ส่วน ค่าความเข้มข้นของสารหนูในทุกความเข้มข้นของสารส้ม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันหลังจากตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง คือ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 5.55, 5.44, 5.28, 5.25, 5.14 และ 5.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

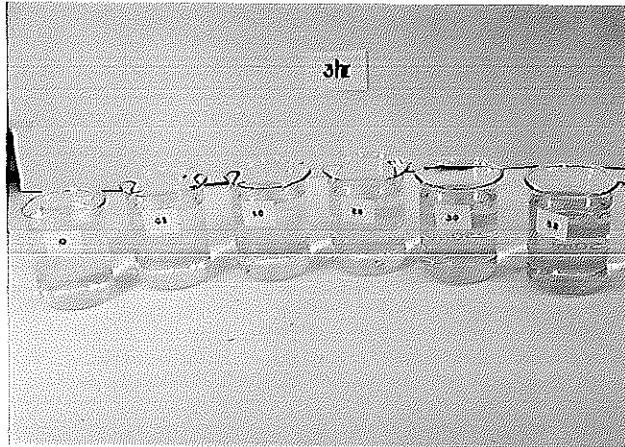
ตารางที่ 6 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นของสารหนู ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น ของ FeCl ₃ (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู(mg/L)				%removal
		1	2	3	เฉลี่ย	
0	6.4	6.63	6.60	6.28	6.50	0
0.5	6.3	5.66	5.62	5.78	5.69	12.46
1	6.3	5.40	5.47	5.38	5.42	16.62
2	6.2	5.40	5.46	5.28	5.38	17.25
3	6.1	5.22	5.35	4.88	5.15	20.80
5	6.0	4.81	4.69	5.10	4.87	25.08

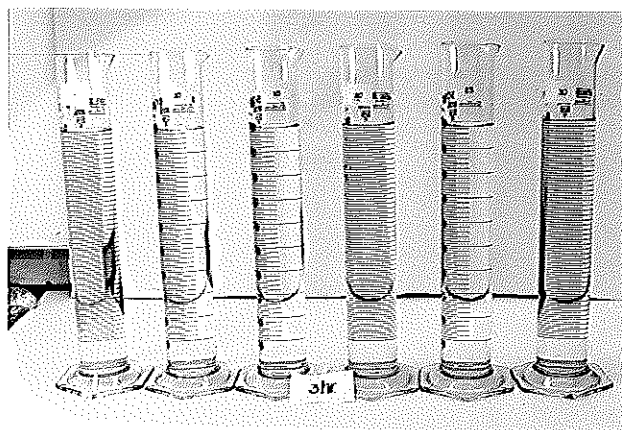
การใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวทำให้ตกตะกอน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น สีของสารละลายจะเข้มขึ้น ดังภาพประกอบ 11 คือ ที่เฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้นต่ำ น้ำตัวอย่างจะมีสีเหลืองปนส้ม ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำตัวอย่างจะมีสีส้ม และค่า pH จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น คือค่า pH จะลดลงจาก 6.4 เป็น 6.0 เมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าความเข้มข้นของสารหนูหลังจากตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารหนูไม่มีความแตกต่างกันในทุกความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สีของน้ำตัวอย่างจะเข้มขึ้น



ภาพประกอบ 10 การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพประกอบ 11 การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพประกอบ 12 การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)

และมีตะกอนสีส้มเกิดขึ้นเล็กน้อย ความเข้มข้นของสารหนูมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้น คือมีความเข้มข้นของสารหนู 6.50, 5.69, 5.42, 5.38, 5.15 และ 4.87 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 0, 0.5, 1, 2, 3, และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าต่ำมาก แต่มีแนวโน้มที่จะลดความเข้มข้นของสารหนูได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองที่ 3 จึงใช้ความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของสารหนูของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

การทดลองที่ 3 ศึกษาการใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้น้ำที่ได้จากการทดลองที่ 1 เป็นน้ำตัวอย่าง ทำการทดลองโดยการเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่ปรับ pH น้ำตัวอย่างหลังจากเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์

ตาราง 7 ผลการทดลองใช้สารส้มในการลดความเข้มข้นของสารหนู ที่ความเข้มข้นของสารส้ม เท่ากับ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารส้ม (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)	%removal
0	7.0	5.41	0
10	3.9	5.24	3.14
15	3.5	5.12	5.36
20	3.1	4.98	7.95
25	2.8	4.92	9.06
30	2.6	4.85	10.35

การใช้สารส้มเป็นตัวทำให้ตกตะกอนพบว่าไม่มีความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตได้ หลังจากเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ลงไปในน้ำตัวอย่าง ดังภาพประกอบ 12 และค่า

pH ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มมากขึ้น คือ ค่าของ pH จะลดลงจาก 6.5 ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น pH เท่ากับ 3, 2.8, 2.7, 2.6 และ 2.4 ที่ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และหลังจากตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารหนูมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย คือลดลงจาก 5.41 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 4.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง 8 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นของสารหนู ที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของ FeCl ₃ (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)	%removal
0	6.5	4.96	0
10	3.0	4.84	2.42
15	2.8	4.48	9.68
20	2.7	4.45	10.28
25	2.6	4.61	11.49
30	2.4	4.29	13.51

การใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ในการลดความเข้มข้นของสารหนูที่ความเข้มข้น เท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่ปรับ pH หลังจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า สารละลายจะเป็นสีส้ม ดังภาพประกอบ 13 และค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น คือ pH จะลดลงจาก 6.5 เป็น 3, 2.8, 2.7, 2.6 และ 2.4 ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนค่าความเข้มข้น ของสารหนูลดลงเพียงเล็กน้อย คือ มีค่าลดลงจาก 4.96 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกคลอไรด์ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้น 4.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองที่ 3 พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยไม่ปรับ pH ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นในการทดลองที่

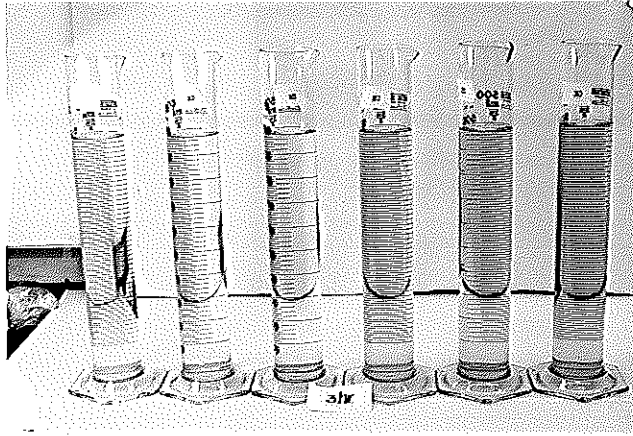
4 จึงทำการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 3 แต่ทำการปรับ pH ของน้ำตัวอย่างหลังจากการเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์

การทดลองที่ 4 การศึกษาการใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนู ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับ pH หลังการเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยใช้น้ำที่ได้จากการทดลองที่ 1 เป็นน้ำตัวอย่าง และเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 1% โดยให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7.5

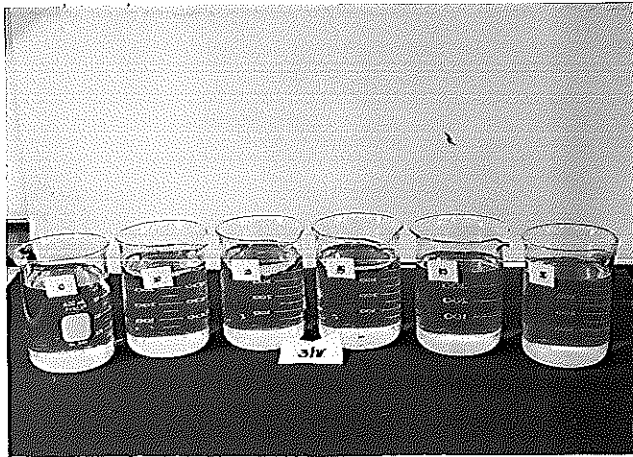
ตาราง 9 ผลการทดลองใช้สารส้มในการลดความเข้มข้นของสารหนู ที่ความเข้มข้นสารส้ม เท่ากับ 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่า pH

ความเข้มข้นของสารส้ม (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)	%removal
0	7.1	4.98	0
10	7.0	4.51	9.44
15	7.2	3.67	26.31
20	7.2	2.30	53.82
25	7.1	2.14	57.03
30	7.0	2.06	58.63

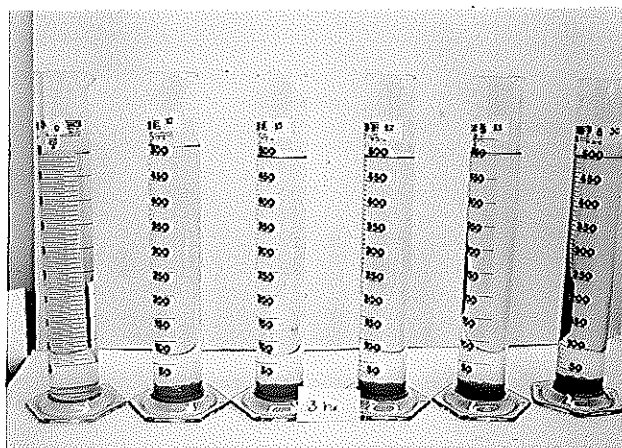
จากการทดลองใช้สารส้มเป็นตัวตกตะกอน พบว่าในน้ำตัวอย่างมีความเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตเห็นได้ตั้งแต่ในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากตั้งทิ้งไว้ คือมีตะกอนเกิดขึ้น โดยตะกอนจะมีลักษณะสีออกขาวใสคล้ายวุ้นและเกิดการจับตัวกับเป็นกลุ่มก้อน ตะกอนบางส่วนจะลอยขึ้นข้างบนโดยเฉพาะที่เป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก แต่ตะกอนส่วนใหญ่จะตกลงสู่ข้างล่าง ดังภาพประกอบ 14 หลังจากตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงตะกอนส่วนใหญ่จะตกลงสู่ข้างล่างแยกออกจากส่วนใสอย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะตะกอนจะเกาะตัวกันแบบหลวมๆ ส่วนความเข้มข้นของสารหนูมีค่าลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้มตั้งแต่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพประกอบ 13 การลดความขุ่นของสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)



ภาพประกอบ 14 การลดความขุ่นของสารหนู โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)



ภาพประกอบ 15 การลดความขุ่นของสารหนู โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)

ตาราง 10 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนูที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่า pH

ความเข้มข้น ของFeCl ₃ (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)				%removal
		1	2	3	เฉลี่ย	
0	7.2	5.15	5.25	5.20	5.20	0
10	7.1	4.56	4.67	4.78	4.67	10.19
15	7.2	4.05	4.10	3.98	4.04	22.31
20	7.1	1.56	1.50	1.45	1.50	71.15
25	7.1	1.45	1.42	1.57	1.48	71.53
30	7.2	1.21	1.09	1.28	1.19	77.12

การใช้เฟอร์ริคคลอไรด์เป็นตัวทำให้ตกตะกอน พบว่ามีตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 1 นาที ตะกอนมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กและสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์สูง ตะกอนที่ได้จะมีขนาดใหญ่และสามารถตกได้เร็วกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ และหลังจากตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง น้ำตัวอย่างในทุกความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์จะใสเป็นสีส้มอ่อน และตะกอนจะเกาะตัวกันแน่นเป็นสีน้ำตาลแดง ดังภาพประกอบ 15 ความเข้มข้นของสารหนูลดลงมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์ตั้งแต่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ ค่าความเข้มข้นสารหนูลดลงจาก 5.2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นของสารหนู 1.5, 1.48 และ 1.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของเฟอร์ริคคลอไรด์ 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองที่ 4 พบว่าประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสารหนูของสารส้มมีค่าสูงสุดเพียง 58 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์ริคคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูสูงสุดเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการทดลองที่ 5 จึงเลือกใช้เฉพาะเฟอร์ริคคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูที่อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็กเท่ากับ 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนมวลโมเลกุลสารหนูและเหล็ก เท่ากับ 1:1 ในการทดลองที่ 5

เนื่องจากที่ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ ประมาณ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้ทำการทดลองไปแล้วในการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 5 ศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของ สารหนูและเหล็ก โดยใช้หน้าที่ได้จากการทดลองที่ 1 เป็นน้ำตัวอย่างในการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นตัวทำให้ ตกตะกอน โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลระหว่างของความเข้มข้นของสารหนู ต่อ ความเข้มข้นของ เฟอร์ริกคลอไรด์ (As:Fe) ที่อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุล สารหนูกับเหล็ก เท่ากับ 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 เนื่องจากความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นที่ ที่อัตราส่วนระหว่าง มวลโมเลกุล สารหนูกับเหล็ก เท่ากับ 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปรับ pH ของน้ำหลังจากเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ ด้วย สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตให้มีค่า pH ในช่วง 6.5-7.5

ตาราง 11 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้ Molar ratio ระหว่าง As:Fe เท่ากับ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5

ความเข้มข้น Fe (mg/L)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)			
		1	2	3	เฉลี่ย
0	7.3	5.45	4.95	5.31	5.20
10	7.5	1.25	1.65	1.36	1.44
15	7.4	1.3	1.45	0.80	1.18
20	7.4	0.6	0.46	0.40	0.51
25	7.5	0.5	0.48	0.49	0.49

ผลการทดลองจากการใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก หลังจากทำการปรับค่า pH พบว่ามีลักษณะของกลุ่มก้อนตะกอนสีส้มเกิดขึ้นโดยที่ความเข้มข้นเหล็ก 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีขนาดของตะกอนขนาดเล็กกว่าที่ความเข้มข้นของเหล็ก 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ส่งผลให้ที่ความเข้มข้นของเหล็กสูงตะกอนจะตกเร็วกว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กต่ำ รวมถึงที่ปริมาณ ความเข้มข้นของเหล็กสูงจะมีปริมาณของตะกอนมากกว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กต่ำ และหลังจากทิ้งไว้ 3

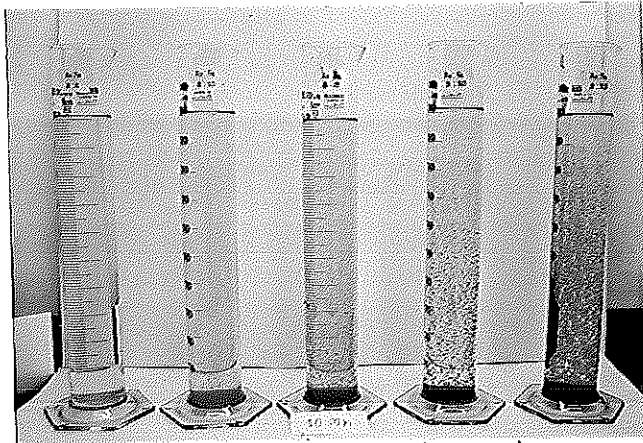
ชั่วโมง น้ำตัวอย่างที่เติมเหล็ก จะมีสีส้มจางๆ เท่ากันทุกความเข้มข้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตัวอย่างชุดควบคุมที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพประกอบ 15 และพบว่าที่ความเข้มข้นของเหล็ก 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู 72 และ 77 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นของเหล็ก 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูใกล้เคียงกันที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

การทดลองที่ 6 การศึกษาประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของสารหนูในแต่ละช่วงเวลา โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก เท่ากับ 1:0, 1:3, 1:4 และ 1:5 และทำการวัดความเข้มข้นของสารหนู หลังจากเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เวลา 10 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง

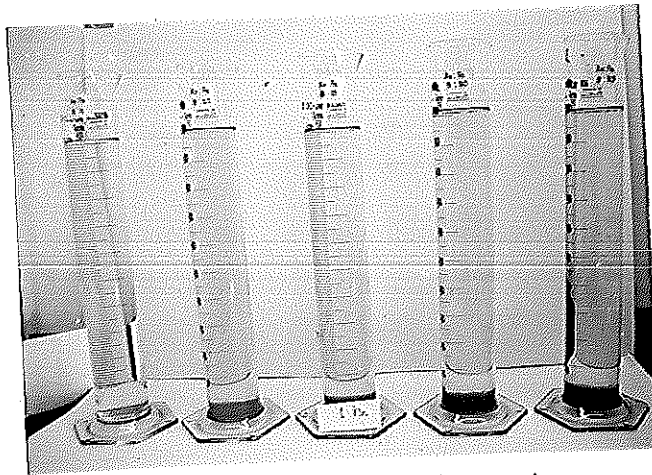
ตาราง 12 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนูโดยใช้ Molar ratio ระหว่าง As:Fe ที่ 1:0, 1:3, 1:4 และ 1:5 ในแต่ละช่วงเวลา

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นสารหนู (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (%)			
	ความเข้มข้นของเหล็ก (mg/L)				ความเข้มข้นของเหล็ก (mg/L)			
	0	15	20	25	0	15	20	25
0	5.45	5.45	5.45	5.45	0	0	0	0
0.16		2.56	2.07	1.82		53.03	62.02	66.61
0.5		1.90	1.47	1.10		65.14	73.03	79.82
1		1.52	1.06	0.95		72.11	80.55	82.57
2		1.25	0.92	0.78		77.06	83.12	85.69
3		1.22	0.61	0.58		77.61	88.81	89.36

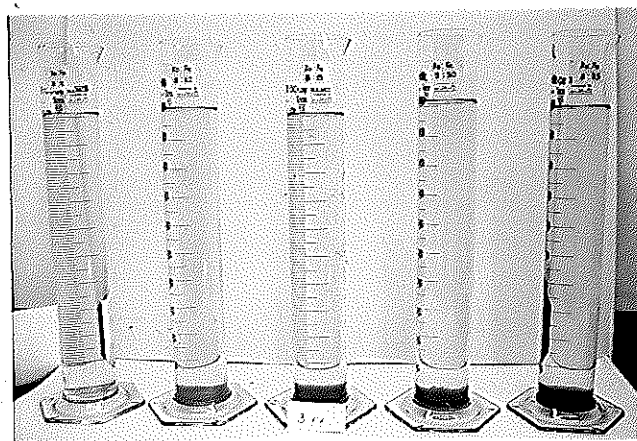
พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ตะกอนที่มีขนาดเล็กในตอนแรกจะเริ่มเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีบางส่วนที่เกิดการตกตะกอน ดังภาพประกอบ 16 ความเข้มข้นของสารหนูจะลดลงจากความเข้มข้นเดิมมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นที่มีเหล็กอยู่ ที่เวลา 30 นาที มีปริมาณตะกอนมากขึ้นโดยน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นของเหล็กสูงจะมีปริมาณของตะกอนมากกว่าน้ำที่มีความเข้มข้นของเหล็กต่ำ และผิวน้ำด้านบนจะใสขึ้นรวมทั้งน้ำในบริเวณผิวด้านบนจะมีปริมาณสารหนู



ภาพประกอบ 16 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 10 นาที



ภาพประกอบ 17 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 18 การลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่ 1:0, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 หลังจากตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 3 ชั่วโมง

ลดลงมากกว่า 65 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้น และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง น้ำในกระบอกตวง จะมีส่วนใสมากขึ้น ดังภาพประกอบ 17 ที่เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณของสารหนูลดลงประมาณ 77, 83 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของเหล็ก 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง น้ำตัวอย่างทุกความเข้มข้นจะใสดังภาพประกอบ 18 โดยการทดลองที่มีความเข้มข้นของเหล็ก สูงจะมีปริมาณของตะกอนมากกว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กต่ำ และมีปริมาณของสารหนูเหลืออยู่เท่ากับ 1.22, 0.61 และ 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของเหล็ก 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 77, 88 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการ ทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 10 นาทีแรก อัตราการลดลงของสารหนูจะสูงที่สุดในทุกความเข้มข้น และอัตราการลดลงของสารหนูจะลดลงเมื่อเวลาที่ตั้งให้ตกตะกอนเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองที่ 5 และการทดลองที่ 6 พบว่าอัตราส่วนมวลโมเลกุลของสารหนูและ เหล็ก เท่ากับ 1:4 และ 1:5 จะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสารหนูใกล้เคียงกัน คือมีค่า ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลระหว่างสารหนูและเหล็กเท่ากับ 1:4 เพื่อทำการทดลอง ในการทดลองที่ 7 ซึ่งเน้นการใช้น้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูจากตำบลรอนพิบูลย์เป็น น้ำตัวอย่างในการทดลอง

การทดลองที่ 7 การศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้น้ำตัวอย่าง จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ที่ 12 ตำบลรอนพิบูลย์ อำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีความเข้มข้นของสารหนู 2.24 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมคลอรีนให้มีความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุล ของสารหนูและเหล็ก เท่ากับ 1:4 ดังนั้นใช้ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 8.96 มิลลิกรัมต่อลิตร และตั้ง ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แต่เนื่องจากตะกอนที่ได้สามารถตกได้เร็วกว่าตะกอนที่ได้จากน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงใช้เวลาในการตกตะกอนเพียง 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำน้ำที่ได้หลังจากการ ตกตะกอนมาผ่านการกรองด้วย ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 (Activated carbon) และถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็กที่มีวาเลนซี 2 (Activated carbon corresponding with Fe^{2+})

การนำน้ำได้หลังจากการตกตะกอน ผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ใช้ความเร็ว ในการกรองประมาณ 2-3 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดที่ไม่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 มี น้ำหนักประมาณ 180 กรัม และถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็กที่มีวาเลนซี 2 หนักประมาณ 200 กรัม บรรจุในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร

ตาราง 13 ผลการทดลองการลดความเข้มข้นของน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ตำบลรอนพิบูลย์ อำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)	
	ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ Fe ²⁺	ถ่านกัมมันต์ที่ประจุ Fe ²⁺
เริ่มต้น(0)	nd*	nd*
1	nd*	nd*
5	nd*	nd*
10	0.01	nd*
15	0.01	nd*

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของสารหนูหลังการตกตะกอนเท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร

detection limit เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

* ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

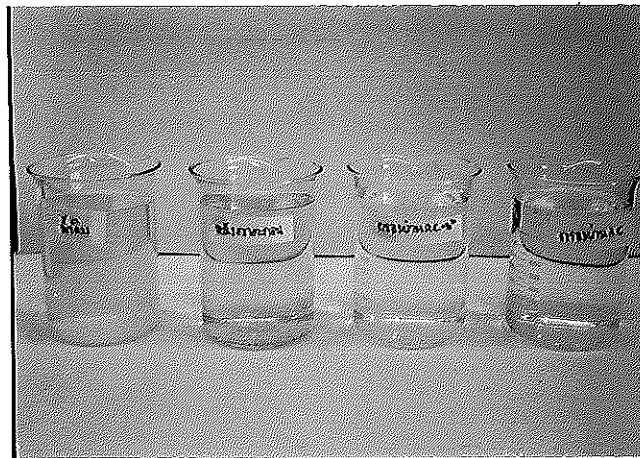
ผลจากการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำตัวอย่าง จาก ตำบลรอนพิบูลย์ ซึ่งสามารถแสดง ความแตกต่างของสีของน้ำที่สามารถสังเกตเห็นได้ ดังภาพประกอบ 19 ที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของสี ของน้ำดิบ, น้ำที่ผ่านการตกตะกอน และการกรองด้วยถ่านกัมมันต์

ผลการทดลองจากตาราง 13 การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดที่ไม่ ประจุของเหล็กที่มีวาเลนซ์ 2 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี silver diethyldithiocarbamate ซึ่งสามารถ วัดความเข้มข้นของสารหนูต่ำสุดได้เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าน้ำที่ได้หลังจากการผ่านถ่าน กัมมันต์ มีสารหนูเข้มข้นเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และตรวจไม่พบสารหนู จำนวน 3 ตัวอย่าง

การลดความเข้มข้นของสารหนู โดยการกรองน้ำที่ได้จากการตกตะกอนผ่านคอลัมน์ถ่าน กัมมันต์ที่มีประจุเหล็กวาเลนซ์ 2 พบว่าการวิเคราะห์วิธี silver diethyldithiocarbamate ไม่สามารถ วัดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำที่ผ่านการกรองได้ ซึ่งแสดงว่ามีความเข้มข้นของสารหนู ต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง 14 ผลการวิเคราะห์ น้ำตัวอย่าง จากบ้านเลข 28/5 หมู่ที่ 12 ตำบลร่อนพิบูลย์
อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

Parameter	ผลการวิเคราะห์	
	น้ำก่อนตกตะกอน	น้ำหลังตกตะกอน
pH	6.8	6.5
Alkalinity	725 mg/L as CaCO ₃	261 mg/L as CaCO ₃
Hardness	185 mg/L as CaCO ₃	138 mg/L as CaCO ₃
ความเข้มข้นสารหนู	3.72 mg/L	0.24 mg/L



ภาพประกอบ 19 การลดความเข้มข้นของสารหนู ในน้ำตัวอย่างจากตำบลร่อนพิบูลย์

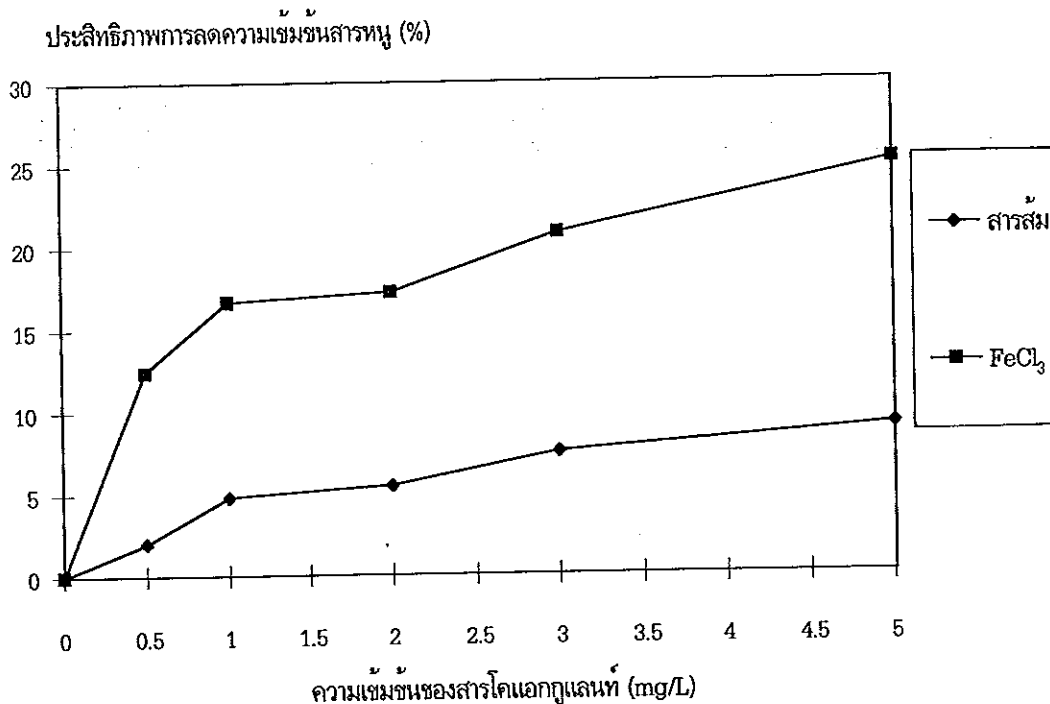
บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 เป็นการเติมคลอรีนลงในน้ำ เพื่อฆ่าเชื้อโรคและออกซิไดส์สารหนูที่อยู่ในวาลวนที่ 3 ให้เป็นสารหนูวาลวนที่ 5 เนื่องจากสารหนูวาลวนที่ 5 สามารถกำจัดได้ง่ายกว่าสารหนูวาลวนที่ 3 ทำการทดลองโดยเติมคลอรีนในรูปของสารละลาย ทำให้ pH มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลทำให้ความเข้มข้นของสารหนูลดลงได้ และในกรณีของประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารหนูวาลวนที่ 3 ให้เป็นสารหนูวาลวนที่ 5 นั้น ไม่สามารถระบุความเข้มข้นของคลอรีนที่เหมาะสมได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูในแต่ละวาลวนที่ได้อ้างอิงถึงเฉพาะระดับความเข้มข้นคลอรีนตกค้างให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยจากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของคลอรีนตกค้าง ประมาณ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งองค์การอนามัยโลกได้เสนอแนะว่า ควรมีความเข้มข้นของคลอรีนตกค้างประมาณ 0.3 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (นพรัตน์ สุรพฤกษ์, 2529) รวมถึงจากการศึกษา การลดความเข้มข้นสารหนูในน้ำดื่มของ Shen (1973) ซึ่งใช้คลอรีนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นที่ระดับความเข้มข้นของคลอรีน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงเป็นระดับที่มีความปลอดภัยในการบริโภค รวมทั้งการนำน้ำที่ได้หลังจากการเติมคลอรีน ไปผ่านการบำบัดด้วยขั้นตอนการตกตะกอนและการกรอง จึงทำให้น้ำที่ได้หลังการบำบัดมีความปลอดภัยจากคลอรีนตกค้างมากยิ่งขึ้น

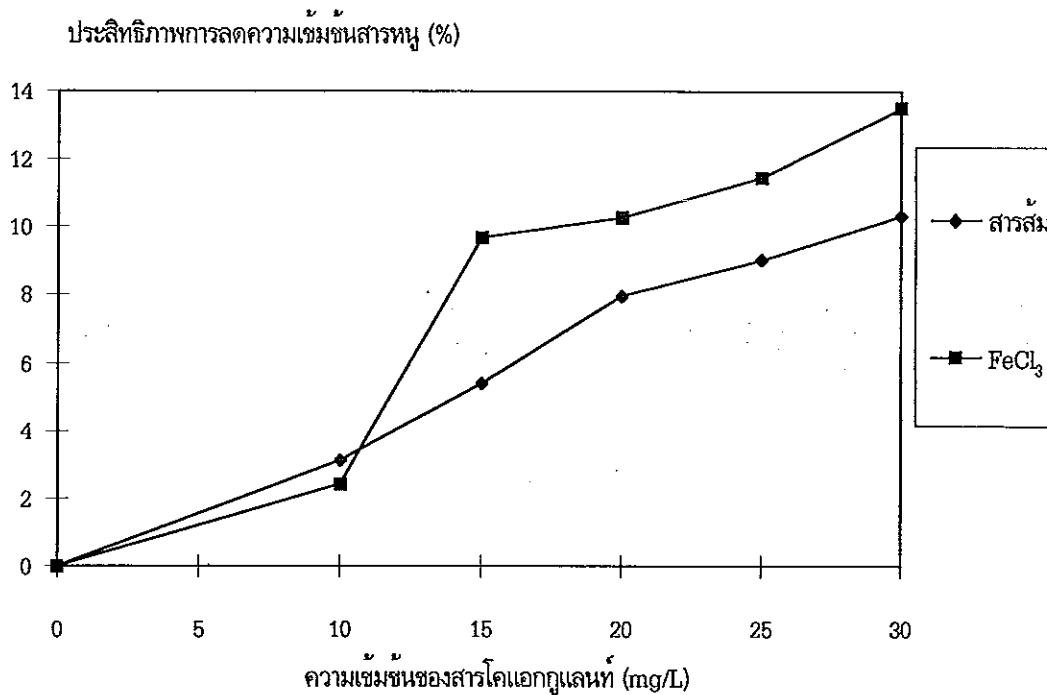
การทดลองที่ 2 จากการทดลองใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าทำให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์เพิ่มมากขึ้น แต่การลดลงของ pH ยังอยู่ในช่วงของค่าที่เป็นกลาง ส่วนค่าความเข้มข้นของสารหนูจากการใช้สารโคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิดไม่มีความเปลี่ยนแปลงเมื่อตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และเมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง พบว่ามีค่าความเข้มข้นของสารหนูลดลงเล็กน้อย โดยที่การทดลองที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูได้มากกว่า การทดลองที่ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์

จากการทดลองที่ตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงและไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารหนู เนื่องจากความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์มีค่าน้อย ทำให้การรวมตัวตกตะกอนเกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงจึงไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารหนู แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สารหนุมีปริมาณลดลง เนื่องจากสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถตกตะกอนได้เล็กน้อย ซึ่งจากภาพประกอบ 5 แสดงให้เห็นว่าสารส้มจะเกิดตกตะกอนอย่างช้าๆ ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และจากภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นว่าเฟอร์ริกคลอไรด์เกิดการตกตะกอนน้อยมากที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถลดความเข้มข้นสารหนูได้มากกว่าสารส้ม เนื่องจากการตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำให้เหล็กบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ทำให้เกิดเป็น $Fe(OH)_3(s)$ ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นสารหนูของเฟอร์ริกคลอไรด์สูงกว่าสารส้ม ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 การลดความเข้มข้นสารหนูโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

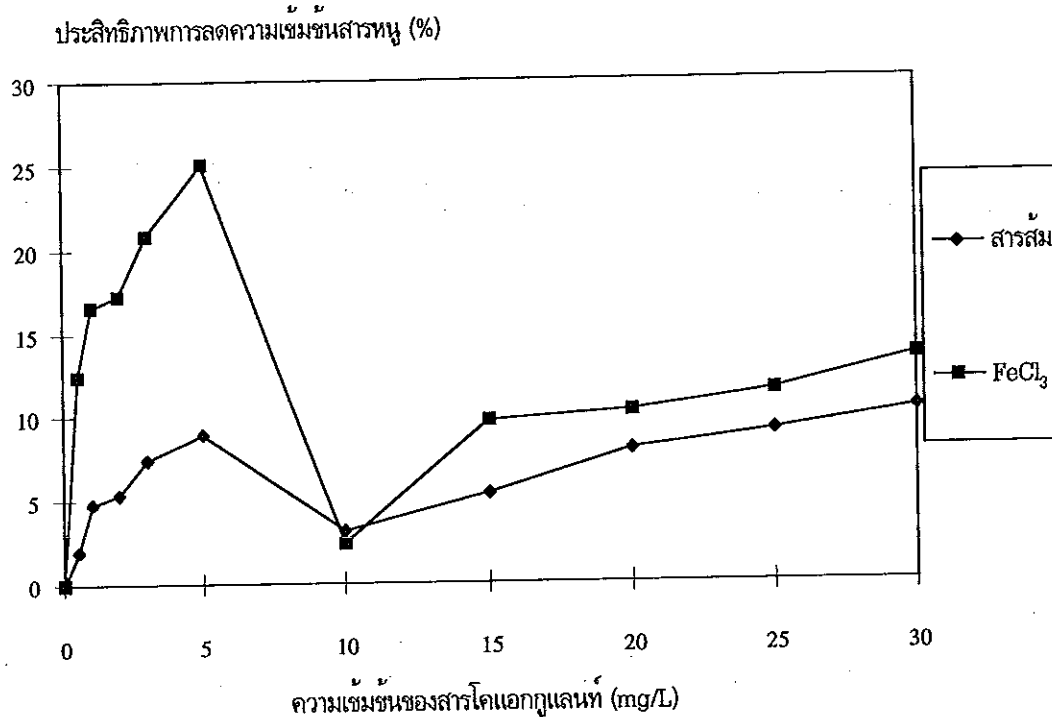
การทดลองที่ 3 เป็นการทดลองโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว หลังเติมสารโคแอกกูแลนต์ คือมี pH ประมาณ 2-3 แต่มีความเปลี่ยนแปลงของตะกอนและความเข้มข้นสารหนูเพียงเล็กน้อย ดังภาพประกอบ 21 ซึ่งจากภาพประกอบ 6 สามารถอธิบายได้ว่าที่ pH 2-2.5 เฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่เกิดการตกตะกอน และสารส้มที่ pH ต่ำกว่า 4 และมีความเข้มข้นต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะอยู่ในรูปของ Al^{3+} ที่ไม่ตกตะกอน ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าต่ำมาก



ภาพประกอบ 21 การลดความเข้มข้นสารหนูโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)

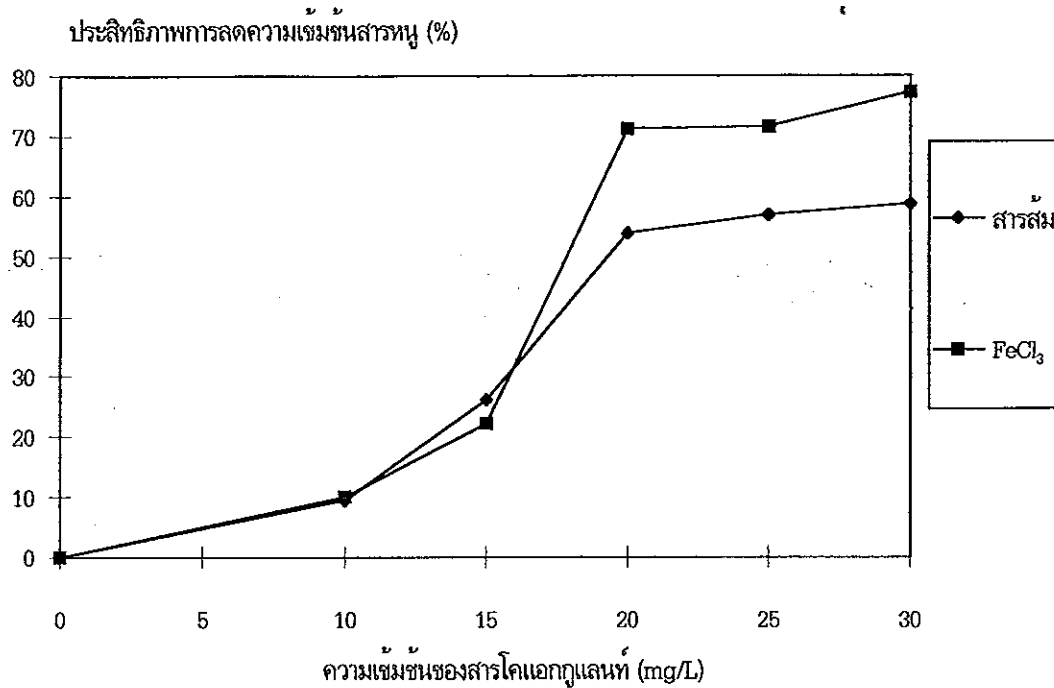
จากการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 พบว่าในช่วงความเข้มข้นของสารส้มและความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 0 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจาก ค่า pH ลดลงอย่าง

รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 22



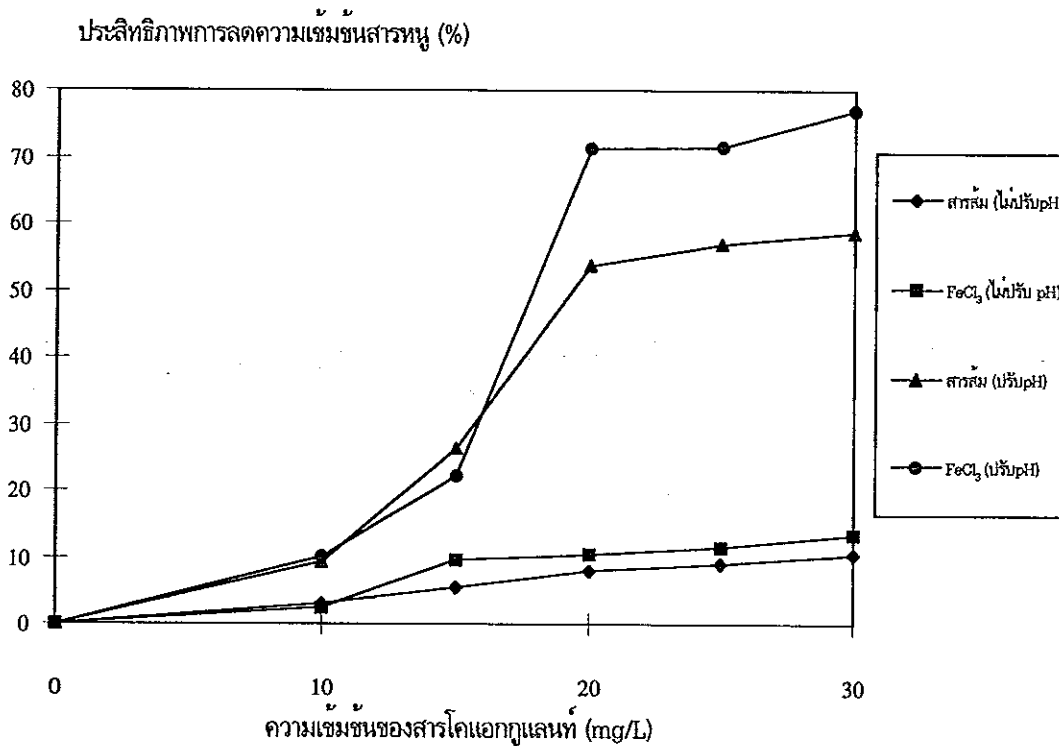
ภาพประกอบ 22 การลดความเข้มข้นสารหนูโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยไม่ปรับ pH)

การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเหมือนการทดลองที่ 3 คือใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปรับค่า pH ให้อยู่ในค่าช่วงที่เป็นกลาง หลังจากเติมสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โดยที่ตะกอนที่ได้จากสารส้มสามารถตกได้ช้ากว่าตะกอนที่ได้จากเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งตะกอนจากเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถตกได้อย่างรวดเร็วและมีการอัดแน่นของตะกอนมากกว่าตะกอนที่ได้จากสารส้มที่เกาะตัวกันแบบหลวมๆ ซึ่งจากดังภาพประกอบ 5 และ 6 แสดงให้เห็นว่า เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถตกตะกอนได้ที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนได้มากกว่าที่ความเข้มข้นเดียวกัน รวมทั้งการตกตะกอนของเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถตกได้ในช่วง pH ที่กว้างกว่าสารส้ม ตะกอนที่ได้จากเฟอร์ริกคลอไรด์จึงมีมากกว่าตะกอนที่ได้จากสารส้ม ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูงกว่าสารส้ม ดังภาพประกอบ 23



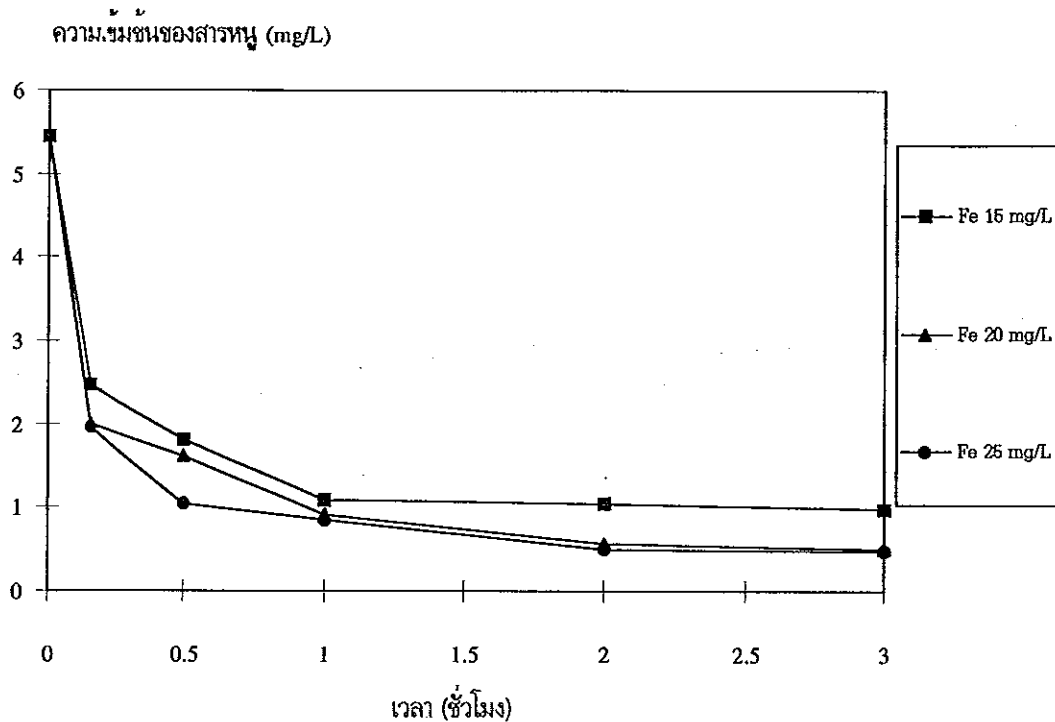
ภาพประกอบ 23 การลดความเข้มข้นสารหนูโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0,10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยปรับ pH)

จากภาพประกอบที่ 24 แสดงให้เห็นความแตกต่างของ การทดลองที่ 3 และการทดลองที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ค่าความเข้มข้นของสารโคเอกกุลแลนท์ที่เท่ากัน แต่มีค่า pH ต่างกัน ทำให้มีประสิทธิภาพแตกต่างกันมาก เนื่องจากสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถเปลี่ยนรูปได้เมื่อค่า pH เปลี่ยนแปลง และจากภาพประกอบ 24 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูของเฟอร์ริกคลอไรด์ มีค่ามากกว่าสารส้มในทุกความเข้มข้น ดังนั้นจึงเลือกใช้เฉพาะเฟอร์ริกคลอไรด์ ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพประกอบที่ 24 การเปรียบเทียบการลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปรับ pH และ ไม่ปรับ pH

การทดลองที่ 5 และการทดลองที่ 6 เป็นการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารโคเอกกูแลนต์ ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลที่ 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 พบว่าที่อัตราส่วน 1:4 และ 1:5 ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูมีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพประกอบที่ 25 ดังนั้นในการทดลองลดความเข้มข้นสารหนูของน้ำตัวอย่างที่มีสารหนูปนเปื้อนจากท่าบรอนพิบูลย์ จึงเลือกใช้อัตราส่วนที่ 1:4 เนื่องจากที่อัตราส่วน 1:4 มีประสิทธิภาพมากกว่าที่อัตราส่วน 1:3 อย่างชัดเจน แต่มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วน 1:5 ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลเท่ากับ 1:4 เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูมากที่สุด



ภาพประกอบ 25 ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นสารหนูของเฟอร์ริคคลอไรด์ ในแต่ละช่วงเวลา

การทดลองที่ 6 เป็นการทดลองเหมือนการทดลองที่ 5 แต่ทำการลดความเข้มข้นของสารหนูหลังจากทิ้งไว้ให้มีการตกตะกอน ที่ช่วงเวลา 10 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารหนูจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และการลดลงของสารหนูจะต่ำลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

การทดลองที่ 7 เป็นการใช้น้ำตัวอย่างจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ตำบลรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งตั้งอยู่ในที่ลุ่มและมีน้ำท่วมขังทุกปี โดยจากการศึกษาของ ประกาย บริบูรณ์ (2539) พบว่ามีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 3.31 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ พบว่ามีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 3.72 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่น้ำที่นำมาใช้ในการทดลองลดความเข้มข้นของสารหนูนั้น มีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 2.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำตัวอย่างที่เก็บมาเพื่อวิเคราะห์ เนื่องจากน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไม่มีการเติมกรดเพื่อรักษาสภาพ ทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมกับสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำและติดกับผิวภาชนะส่งผลให้มีความเข้มข้นของสารหนูต่ำกว่าน้ำตัวอย่างที่เก็บมาเพื่อวิเคราะห์

การใช้น้ำตัวอย่างจากตำบลรอนพิบูลย์ เพื่อลดความเข้มข้นของสารหนูตามวิธีการที่ได้ คือ การเติมคลอรีนให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมเฟอร์ริคคลอไรด์ ให้มีอัตรา

ส่วนความเข้มข้นของสารหนูและความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 1 ต่อ 4 และปรับ pH ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางพบว่า การเติมคลอรีนและเพอร์ริคคลอไรด์ ทำให้ pH ของน้ำตัวอย่างมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย และสามารถตกตะกอนได้เร็วกว่าน้ำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีค่าความเป็นด่างสูง ทำให้มีความสามารถในการทนกรดได้ดีกว่ารวมทั้งสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำทำให้สามารถตกตะกอนได้เร็วกว่า น้ำที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งหลังจากการตกตะกอนพบว่าน้ำตัวอย่างมีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของสารหนูได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

การกรองน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ พบว่าน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านถ่านกัมมันต์มีความเข้มข้นของสารหนูประมาณ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำที่กรองผ่านถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ Fe^{2+} ไม่สามารถวัดความเข้มข้นของสารหนูได้ด้วยวิธีที่ใช้อยู่ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ต่ำกว่าการกรองด้วยถ่านกัมมันต์แบบธรรมดา เนื่องจากถ่านที่มีประจุของ Fe^{2+} จะมีประจุเป็นบวกทำให้สามารถจับกับสารหนูในรูปของ $HAsO_4^{2-}$ ได้ดีกว่า และจากการศึกษาของ Huang and Vane (1989) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ Fe^{2+} จะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ Cu^{2+} , Al^{3+} และ Fe^{3+} .

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทสรุป

การปนเปื้อนสารหนูในเขตอำเภอรัตนพิบูลย์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการทำเหมืองแร่ดีบุกและแร่พลูมในอดีตร ส่งผลให้แหล่งน้ำอุปโภคและบริโภคมีการปนเปื้อนของสารหนูในระดับที่สูงกว่าความเข้มข้นที่มาตรฐานกำหนด การศึกษาการลดความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่มีการปนเปื้อน จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำได้

จากการศึกษา การลดความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่มีการปนเปื้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการลดความเข้มข้นสารหนู ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเติมคลอรีน การเติมสารโคแอกกูแลนต์ และการกรองโดยใช้ถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการทดลองที่ 1 เป็นการเติมคลอรีนเพื่อออกซิไดส์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 โดยเลือกความเข้มข้นที่มีคลอรีนตกค้างในระดับที่มีความปลอดภัยมากที่สุด พบว่าที่ความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณคลอรีนตกค้างคือ มีค่าประมาณ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตรงกับค่าความเข้มข้นที่องค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ คือ ควรมีความเข้มข้นของคลอรีนตกค้างประมาณ 0.3 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดลองที่ 2 ถึงการทดลองที่ 6 เป็นการเติมสารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิด คือ เพอร์ริคโคลไรด์และสารส้ม และจากผลการทดลองที่ 2 ถึง การทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเพอร์ริคโคลไรด์และสารส้ม พบว่าเพอร์ริคโคลไรด์มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสารหนูสูงกว่าการใช้สารส้ม ในเกือบทุกความเข้มข้น ดังนั้นในการทดลองที่ 5 และการทดลองที่ 6 จึงใช้เฉพาะเพอร์ริคโคลไรด์ในการลดความเข้มข้นสารหนู โดยใช้อัตราส่วนมวลโมเลกุลระหว่าง สารหนูและเหล็ก ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนมวลโมเลกุลระหว่างสารหนูและเหล็กเท่ากับ 1 ต่อ 4 และ 1 ต่อ 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ใกล้เคียงกัน คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการทดลองขั้นที่ 3 จึงเลือกใช้ที่อัตราส่วนมวลโมเลกุลระหว่างสารหนูและเหล็ก ที่ 1 ต่อ 4

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดลองโดยใช้น้ำดิบจาก บ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ตำบลร่อนพิบูลย์ เป็นน้ำตัวอย่างในการลดความเข้มข้นของสารหนู ซึ่งน้ำดิบมีความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 2.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการลดความเข้มข้นสารหนู โดยเติมคลอรีน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์ริคโคลไรด์ 8.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ตั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารหนูลดลงเหลือเท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำน้ำที่ได้กรองผ่านถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 และถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 ซึ่งการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2

การทดลองลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำที่มีการปนเปื้อน พบว่า การเติมคลอรีนให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการเติมเพอร์ริคโคลไรด์ที่อัตราส่วนของมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก เท่ากับ 1 ต่อ 4 และกรองด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็กวาเลนซี 2 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ดีที่สุด และมีความปลอดภัยมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาการลดความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่มีการปนเปื้อน จากตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้น้ำดิบที่เตรียมในห้องปฏิบัติการเป็นส่วนใหญ่ โดยใช้น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนูจาก ตำบลร่อนพิบูลย์ ในการทดลองในครั้งสุดท้ายเพียงครั้งเดียว และเป็นทดลองที่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เป็นไปตามความต้องการได้ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้ในสถานที่จริง ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อทำการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. ควรปรับปรุงระบบการบำบัดสารหนู เพื่อให้มีความเหมาะสมและง่ายในทางปฏิบัติ สำหรับคนในพื้นที่ศึกษามากยิ่งขึ้น
2. ควรนำสารตกตะกอนชนิดอื่น ๆ มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนู
3. ควรศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของมวลโมเลกุลของสารหนูและเหล็ก ที่มีผลต่อการละลายออกสู่สิ่งแวดล้อม และความสามารถในการละลายของตะกอนที่ได้จากการตกตะกอน กลับไปสู่สิ่งแวดล้อมในสภาวะต่างๆ
4. ควรศึกษาชนิดของตัวกรอง ที่สามารถทำได้ง่ายในห้องถิ่นและราคาถูกมาประยุกต์ใช้
5. ควรศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับสารหนูได้

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. 2530. รายงานเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาพิษสารหนูที่ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัด นครศรีธรรมราช. กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ(สำเนา).
- กรมอนามัย กองอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 2531. "รายงานผลการศึกษาเรื่องสารหนูเป็นพิษที่ รัตนพิบูลย์", การอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 11 (มกราคม-เมษายน 2531), 7-30.
- กรณีการ์ สิริสิงห. 2525. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. มหาวิทยาลัยมหิดล., กรุงเทพฯ. หน้า 86-98.
- กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2530. สารหนู. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ: กรุงเทพฯ(สำเนา)
- เกษม จันทจรรยาพงษ์. 2519. "ธรณีเคมีของสารหนูและประโยชน์ในการสำรวจแหล่งแร่". วารสารธรณี. 21(12);36-43.
- ณรงค์ ณ เชียงใหม่. 2534. "ปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำ พืช ผัก ผลไม้ และผมของชาวบ้าน ตำบล รัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช", ว.สงขลานครินทร์. 13 (มกราคม-มิถุนายน 2534), 59-67.
- ประกาย บริบูรณ์. 2539. "การศึกษาการได้รับสารหนูจากการบริโภคอาหารประจำวัน. เอกสารประกอบ คำบรรยาย การประชุม" ความก้าวหน้าของการศึกษาและวิจัยและแนวทางป้องกันโรคพิษ สารหนูเรื้อรัง ตำบลรัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 11 มิถุนายน 2539 จัดโดยกองระบาดวิทยา กระทรวงสาธารณสุข

ไพชยนต์ เจริญไชยศรี. 2536. "สรุปผลการปฏิบัติงานปัญหาพิษสารหนู ที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัด นครศรีธรรมราช." กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี. (สำเนา)

มงคล ณ สงขลา และ จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2539 "สถานการณ์ปัจจุบันและแนวทางการจัดการ ปัญหาพิษสารหนูที่ อำเภอรัตนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช เอกสารประกอบคำบรรยาย การประชุม" ความก้าวหน้าของการศึกษาและวิจัยและแนวทางป้องกันโรคพิษสารหนู เรื้อรัง ตำบลรัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 11 มิถุนายน 2539 จัดโดยกองระบาดวิทยา กระทรวงสาธารณสุข; 6หน้า.

มันสิน ตัณฑุลเวศน์. 2538ก. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 147-170.

_____. 2538ข. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 133-138.

ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัว. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 93-95.

รวพิน วิทยวราวัฒน์. 2537. การปนเปื้อนของสารหนู แคดเมียม และตะกั่ว ในลุ่มแม่น้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

รัชย์ เอกพลากร และ อมรา ทองหงษ์. 2539. ระบาดวิทยาโรคพิษสารหนู ต.รัตนพิบูลย์ อ.รัตนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช เอกสารประกอบคำบรรยาย การประชุม" ความก้าวหน้าของการศึกษา และวิจัยและแนวทางป้องกันโรคพิษสารหนูเรื้อรัง ตำบลรัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 11 มิถุนายน 2539 โดยกองระบาดวิทยา กระทรวงสาธารณสุข.

สมพร ภาวการคำดี และ อุดมลักษณ์ ศรีทัศน์. 2531. "สารหนูในสิ่งแวดล้อม", การอนามัยและ สิ่งแวดล้อม. 11 (มกราคม-เมษายน 2531), 79-91.

สมศักดิ์ อินทรการุณเวช. 2532. การลดปริมาณสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับ
ชนบท วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

สำนักวิจัยและพัฒนา ฝ่ายข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.
2539. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดสร้างระบบข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการ
วางแผนสุขภาพสิ่งแวดล้อม: เรื่องการแพร่กระจายของสารหนูในแหล่งน้ำอุปโภค
บริโภคบริเวณ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช.โดย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เสนอ
ต่อ สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.(สำเนา)

อรพรรณ เมชาติลกุล และ คณะ. 2531. "โรคพิษอาร์เซนิกในคนงานร่อนแร่ จังหวัดนครศรีธรรมราช
พศ. 2530", การอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 12 (มกราคม-เมษายน 2531), 83-98.

APHA, AWWA, and WPCF. 1971. Standard Methods for the Examination of Water
and Wastewater. 13th ed. New York : American Public Health
Association.

APHA, AWWA, and WPCF. 1989. Standard Methods for the Examination of Water
and Wastewater. 18th ed. New York : American Public Health
Association.

Clifford,D., Subramonian S. and Sorg T.J. 1986. "Removing Dissolved Inorganic
Contaminants from Water", Enviromental Science and Technology. 20
(11), 1072-1080.

Committee Report. 1971. "State of Art of Coagulation Mechanisms and Stoichiometry."
Journal American Water Work Association 63(2), 99-107.

- Das, D. 1995. "Arsenic Species Along with Other Metal/Metalloid Present and Responsible for Arsenic Episode in Groundwater of the West Bengal and Cheap Technique to Removal Arsenic, Thus Making the Groundwater Suitable for Drinkind and Cooking". Thesis Submitted for the Degree of Doctor for Philosophy (Science) of Jadavpur University, India. 219-234 pp.
- Driehaus, W., Seith, R. and Jekel M. 1995. "Oxidation of Arsenate (III) with Manganese Oxides in Water Treatment." Water Research 29(1),297-305.
- Edward, M. 1994. "Chemistry of Arsenic Removal During Coagulation and Fe-Mn Oxidation." Journal American Water Work Association. 86(11), 64-78.
- Elson, C.M., Davis, D.H. and Hayes, E.R.. 1980. "Removal of Arsenic from Contaminated Drinkwater by Chitosan/Chitin Mixture." Water Research. (14), 1367-1311.
- Ferguson, J.F. and Gavis, J.. 1972. "A Review of the Arsenic Cycle in Natural Water". Water Research. (6), 1259-1274.
- Fordyce, F.M., Williams, T.M., Paijitprapapon, A. and Charoenchaisri, P. 1995. Hydrochemistry of Arsenic in an Area of Choric Mining-Related Arsenism, Ronphibon Distric, Nakhon Si Thammarat Province, Thailand: Preliminary results. Bristish Geology Survey Technical Report WC/94/79R Nottingham, U.K.. 72 p.
- Gulledge, J.H. and O'Connor, J.T.. 1973. Removal of Arsenic(V) from Water by Adsorption on Aluminium and Ferric Hydroxides. Journal American Water Work Association. 65(8); 548-552.

- Gupta, S.K. and Chen, K.Y.. 1978. "Arsenic Removal by Adsorption" Journal of Water Pollution Control and Federation. 50(3), 493-506.
- Huang, C.P. and Fu, P.L.K.. 1984. "Treatment of Arsenic(V) Containing water by Activated Carbon Process". Journal of Water Pollution Control and Federation 56(3), 233-242.
- Huang, C.P. and Vane, L.M.. 1989. "Enhancing As⁵⁺ Removal by Fe²⁺-treated Activated Carbon". Journal of Water Pollution Control and Federation 61 (11), 1596-1603.
- Inorganic Contaminants Research Committee. 1993. "Committee Report: Research needs for Inorganic Contaminant. Journal American Water Work Association 85(4), 106-113.
- Jekel, R.M. 1994. "Removal of Arsenic in Drinkwater Treatment" Arsenic in Environmental Part 1: Cycling and Characterization. John Wiley & Sons Inc., New York., 119-132.
- Johnson, P.N. and Amirtharajah, A.. 1983. "Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants." Journal American Water Work Association (Research and Technology) 75(3), 232-239.
- Joshi, A. and Chaudhuri, M.. 1996. Removal of Arsenic from Ground Water by Iron Oxide-Coated Sand", Journal of Environmental Engineering 122(8),769-771.
- Krause, E. and Ettel, V.A.. 1989. Solubilities and Stabilities of Ferric Arsenate Compounds." Hydrometallurgy 22, 311-337.

- Kuhlmeier, P.D. and Sherwood, S.P.. 1996. "Treatability of Arsenic and Organoarsenicals in Groundwater" Water Environment Research. (68)5, 946-951.
- Metcalf & Eddy. 1991. Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse. 3rd ed. Tchobanoglous, G. ed. Singapore : McGraw-Hill., 314-317pp.
- Mok, M.W., Riley, J.A. and Wai, C.M.. 1988. "Arsenic Speciation and Quality of Groundwater in Lead-Zinc Mine, Idaho." Water Resource 22, 769.
- Mok, M.W. and Wai, C.M.. 1994. "Mobilization of Arsenic in Contaminated River Water" Arsenic in Environmental Part 1: Cycling and Characterization. John Wiley & Sons Inc., New York. p 99-117.
- Nenov, V., Zouboulis, A.I.Z., Dimitrova, N. and Dobrevsky, T.. 1994. "As(III) Removal from Aqueous Solution Using Non-Stoichiometric Coprecipitation with Iron(III) Sulphate and Filtration or Flotation" Environmental Pollution. 83, 283-289.
- Papassiopi, N., Vircikova, E., Nenov, V., Kontopoulos, A and Molnar, L. 1996. "Removal and Fixation of Arsenic in form of Arsenate : Three Parallel Experimental Studies." Hydrometallurgy. 41, 243-253.
- Pierce, M.L. and Moor, C.B.. 1980. "Adsorption of Arsenite on Amorphous Iron Hydroxide from Dilute Aqueous Solution." Environmental Science and Technology. 14(2), 214-216.
- Pontius, F.W., Brown, K.G. and Chen, C.J.. 1994. "Health Implications of Arsenic in Drinking Water." Journal American Water Works Association. 86(11), 52-63.

- Rajakovic, L.V. and Mitrovic, M.M.. 1992. "Arsenic Removal from Water by Chemisorption Filters." Environmental Pollution. 75(1), 279-287.
- Scott, K.N., Green, J.F., Do, H.D. and McLean, S.J.. 1995. "Arsenic Removal by Coagulation." Journal American Water Work Association. 87(4), 114-126.
- Shen, Y.S.. 1973. "Study of Arsenic Removal from Drinking Water." Journal American Water Work Association 65(8), 543-548.
- Singh, D.B., Prasad, G., Rupainwar, D.C. and Singh, V.N.. 1988. "As³⁺ Removal from Aqueous Solution by Adsorption", Water Air and Soil Pollution 42,373-386.
- Sorg, T.J. and Logsdon, G.S.. 1978. "Treatment Technology to Meet the Interim Primary Drinking Water Regulations for Inorganics: Part 2." Journal American Water Work Association 70(7), 379-393.
- Stumm, W. and Morgan, J.J.. 1962. "Chemical Aspect of Coagulation." Journal American Water Work Association 54(8),971
- Viraraghavan, T., Subramanian, K.S. and Swaminathan, T.V.. 1996. "Drinking Water Without Arsenic : A Review of Treatment Technology, Environmental systems Reviews No. 37 Environmental Systems Information Center Asian Institute of Technology, 28p.
- Vircikova, E. Molnar, L., Lech, P. and Reitznerova, E.. 1995. "Solubilities of amorphous Fe-As precipitates." Hydrometallurgy 38, 111-123.

Willey, R.B.. 1987. "Finding Treatment Options for Inorganics." Water Engineering & Management. 10, '28- 31.

Wilson, F.H. and Hawkins, D.P.. 1978. Arsenic in Streams, Stream Sediment and Groundwater, Fairbanks Area, Alaska. Environmental Geology 2(4), 195-202

ภาคผนวก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

1. **ความเป็นด่าง (Alkalinity)** โดยวิธี Direct Titration Method (APHA, AWWA and WPCF, 1989)

สารละลายที่ใช้

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้เตรียมสารต่างๆ
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
3. สารละลายกรดมาตรฐาน กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.02 นอร์มัล ทาคาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก โดยไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต 0.02 นอร์มัล ซึ่งเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต อบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียส 1.06 กรัม ในน้ำกลั่นและเติมให้เป็น 1 ลิตร สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร จะมีค่าเท่ากับ 1.00 มิลลิกรัม CaCO_3
4. สารละลายเมทิลออเรนจ์ อินดิเคเตอร์
5. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล ละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเติมจนปริมาตรเป็น 1 ลิตร

วิธีการ

1. ดูดตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Erlenmeyer Flask และดูตุน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Erlenmeyer Flask อีกใบหนึ่ง
2. หยดฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ ลงไป Flask ละ 3 หยด
3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ไตเตรทด้วยกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล จนกระทั่งสีชมพูหายไป (=P)
4. หยดเมทิลออเรนจ์ อินดิเคเตอร์ ลงไป Flask ละ 3 หยด
5. ไตเตรทด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเรื่อๆ เป็น สีส้มโดยเทียบกับสีของน้ำกลั่น
6. ปริมาตรกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล ทั้งหมดที่ใช้ (+T)

การคำนวณ

ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) = ปริมาตรกรดที่ใช้ทั้งหมด $\times 10$

ให้ P = ปริมาตร (มิลลิลิตร) กรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล ที่ใช้ในการไตเตรท สำหรับ ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

T = ปริมาตร (มิลลิลิตร) กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล

1. ถ้า $P = T$ ไฮดรอกไซด์ = $P \times 10$
2. ถ้า $P > 0.05T$ ไฮดรอกไซด์ = $(2P-T) \times 10$
คาร์บอเนต = $(2P-T) \times 10$
3. $P = 0.5T$ คาร์บอเนต = $T \times 10$
4. $P < 0.5T$ คาร์บอเนต = $2T \times 10$
ไบคาร์บอเนต = $(T-2P) \times 10$
5. $P = 0$ ไบคาร์บอเนต = $T \times 10$

หมายเหตุ หน่วยความเข้มข้นเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร as CaCO_3

2. ความกระด้าง (Hardness) โดย EDTA Titration Method (APHA, AWWA and WPCF, 1989)

สารละลายที่ใช้

1. สารละลายบัฟเฟอร์ เตรียมโดย ละลาย 16.9 กรัม NH_4Cl ใน 143 มิลลิลิตร conc. NH_4OH เติม 1.25 กรัมเกลือ Mg ของ EDTA เติมน้ำกลั่นจนครบ 250 มิลลิลิตร

2. อินดิเคเตอร์ เตรียมโดย ผสม 0.5 กรัม Eriochromme Black T และ 100 กรัม NaCl จะได้เป็นผงแห้งของอินดิเคเตอร์

3. สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยละลาย 3.723 กรัม ของผง EDTA disodium salt ละลายในน้ำจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 2-3 วัน และ standardize กับสารละลายมาตรฐานแคลเซียม ที่ทราบความเข้มข้น ปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA ให้ 1.00 มิลลิลิตร = 1.00 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต

4. สารละลายมาตรฐานแคลเซียม ชั่ง 1.00 กรัมผง CaCO_3 ใส่ใน Erlenmeyer Flask 500 มิลลิลิตร เติม 1+1 HCl จน ผง CaCO_3 ละลายหมด เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด

ประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ให้เย็น เติม 2-3 หยด เมทิลเรดอินดิเคเตอร์
ปรับให้เป็นสีส้ม ด้วย 3 นอร์มัล NH_4OH sinv 1+1 HCl ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

วิธีการ

1. บีบตัวอย่างน้ำ 25 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer Flask เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1-2 มิลลิลิตร
3. เติมผงอินดิเคเตอร์ลงไปพอประมาณ สารละลายจะกลายเป็นสีม่วงแดง
4. ไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนสารละลายกลายเป็นสีน้ำเงิน

การคำนวณ

$$\text{Hardness (EDTA) as mg/l CaCO}_3 = (A \times B \times 100) / \text{ml sample}$$

A = มิลลิลิตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง

B = มิลลิกรัม CaCO_3 ซึ่งสมมูลย์ กับ 1.00 มิลลิลิตร EDTA

3. ความเข้มข้นคลอรีน โดยวิธี Orthotolidine Arsenite Method (APHA, AWWA and WPCF, 1971)

สารละลายที่ใช้

1. สารละลายออร์ทอโกลิดีน โดยละลาย O-Thotolidine dihydrochloride 1.35 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และเติมลงในสารละลายกรดเกลือ (น้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร + HCl (conc.))
2. สารละลายโซเดียมอาร์ซีไนต์ โดยละลาย NaAsO_2 5 กรัมในน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร
3. สารละลายคลอรีนมาตรฐาน

การ Standardization สารละลายคลอรีน

เติม KI จำนวน 1-2 กรัม ในขวดรูปกรวยที่มีน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เขย่าจน KI ละลายจนหมด เติมคลอรีนที่จะหาความเข้มข้น 50 มิลลิลิตร และ Glacial Acetic Acid 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที แล้วไทเตรตด้วย 0.025 นอร์มัล $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป

เนื่องจาก 1 มิลลิลิตร ของ 0.025 นอร์มัล $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ สมมูลกับ 0.886 มิลลิกรัมคลอรีน
 ดังนั้น $\text{mg chlorine / ml solution} = \text{ml Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 0.886$

50

วิธีการ

เติมสารละลายอโรโทลิติน 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร
 และเติมสารละลายโซเดียมอาร์ซีไนต์ 0.5 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปวัด absorbance ที่ 490 มิลลิ
 ไมครอน และเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน

4. ความเข้มข้นสารหนู โดยวิธี Silver Diethyldithiocarbamate Method (APHA, AWWA and WPCF, 1989)

สารละลายที่ใช้

1. สารละลาย Potassium Iodide ละลาย KI 10.5 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. สารละลาย Stannous Chloride ละลาย SnCl_2 ใน HCl (conc.) ที่ร้อน 250 มิลลิลิตร
 และ เติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร
3. Zinc 20 ถึง 30 mesh
4. สารละลาย Lead Acetate ละลาย $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
5. สารละลาย Silver Diethyldithiocarbamate เตรียมโดยละลาย 1-Ephedrine 410 มิลลิกรัม
 ใน คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) 200 มิลลิลิตร และ เติม $\text{AgSCSN}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ และปรับปริมาตรเป็น 250 ,
 มิลลิลิตร ด้วยคลอโรฟอร์ม
6. สารละลายมาตรฐานสารหนู

วิธีการ

1. เติมน้ำตัวอย่างในขวดรูปกรวย 35 มิลลิลิตร เติม HCl (conc.) 5 มิลลิลิตร สารละลาย
 Potassium Iodide 2 มิลลิลิตร และสารละลาย Stannous Chloride 8 หยด แล้วจึงตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
2. เตรียม Absorber และ Scrubber ชุบสำลี ด้วยสารละลาย Lead Acetate และใส่ใน
 Scrubber และเติม สารละลาย Silver Diethyldithiocarbamate 4 มิลลิลิตร ใน Absorber
3. เติม Zinc 3 กรัม ลงในขวดรูปกรวย และปิดด้วย Scrubber ที่ต่อกับ Absorber เรียบร้อย
 แล้ว อย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปวัดค่า Absorbance ที่ 535 มิลลิไมครอน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวนิภา มหารัชพงษ์
วัน เดือน ปีเกิด 25 สิงหาคม 2514
วุฒิการศึกษา
สถานที่เกิด จังหวัดกระบี่

วุฒิ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขา วาริชศาสตร์

สถาบัน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่

ปีที่สำเร็จการศึกษา
2537