บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 การจำแนกสาร

สารหนูมีเลขอะตอม 33 น้ำหนักอะตอม 74.9216 จัดอยู่ในกลุ่ม VA ของระบบตารางธาตุใช้สัญลักษณ์ As มีลักษณะสมบัติทั้งในประเภทโลหะและอโลหะ สามารถแสดงค่าวาเลนซีได้หลายค่าคือ +3, +5, 0 และ -3 พบได้ในรูปธาตุ รูปสารประกอบโลหะ รูปสารประกอบอินทรีย์และ รูปสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี

สารหนูในรูปธาตุอิสระเป็นรูปสารที่พบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในรูปของสารประกอบของแร่ต่างๆ ในรูป arsenide ของโลหะ เช่น ทองแดง นิเกิล เหล็ก และโคบอลท์ เป็นต้น และพบในรูป arsenic sulfide ได้แก่ realgar (tetraarsenic tetrasulfide, As_4S_4) และ orpiment (arsenic trisulfide, As_2S_3) หรืออาจพบในรูปออกไซด์ สำหรับในน้ำมักพบในรูป arsenate หรือ arsenite ส่วนสารประกอบ methylated arsenic ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาตินั้นเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ ลักษณะสมบัติทางกายภาพทั่วไปของสารหนูแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 โดยจัดแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.1. ประเภทสารประกอบโลหะของสารหนู มีลักษณะเป็นของแข็งหรือผงไม่ละลายน้ำมีทั้งหมด 3 ชนิดคือ

ตารางที่ 2.1 สารหนูและสารประกอบของสารหนูที่สำคัญ (4)

ชื่อสาร	ชื่ออื่นๆ	สูตรของสาร
1. arsenic	metallic arsenic	As_4
2. arsenic trioxide	arsenic trioxides	
	arsenous oxide	As_2O_3
	white arsenic	
3. arsenous acid	-	H_3AsO_3
4. arsenenous acid,		$HAsO_2$
arsenites, salt of	arsenious acid	$H_2AsO_3^{-1}$
arsenous acid		$HAsO_3^{-2}$ or
		AsO_3^{-3}
5. arsenic trisulfide	arsenic trisulfide	As_2S_3
	orpiment	
6. arsenic pentoxide	arsenic pentoxide	As_2O_5
7. arsenic acid	orthoarsenic acid	H_3AsO_4
8. arsenenic acid,		
arsenates, salf of	metaarsenic acid	$HAsO_3$
arsenic acid		
9. methylarsonic acid	methanearsonic acid	$CH_3AsO(OH)_2$
10. dimethylarsinic acid	cacodylic acid	$(CH_3)_2AsO(OH)$
11. methylarsine	-	CH_3ASH_2
12. dimethylarsine	-	$(CH_3)_2ASH$

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพทั่วไปของสารหนู (5)

เลขอะตอม	33
น้ำหนักอะตอม	74.9216
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral
สีผิว	เทา
ความถ่วงจำเพาะ	5.7 (cystalline)
	2.0 (yellow cubic)
	3.7 (black amorphous)
จุดหลอมละลาย	817 °C (28 atm)
จุดเดือด	613 °C (V.P. 1 atm)
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	88.5 cal/g
ความร้อนแฝงของการเดือด	102 cal/g
ความร้อนจำเพาะ	0.082 cal/g/ °C (20 °C)
สัมประสิทธิการขยายตัว	4.7×10^{-6} in/ °C (20 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	33.3 microhm - cm (20 °C)
ความแข็งมาตรา Brinell	147

2.2.1.1 metallic arsenic เป็นผลึกที่มีเสถียรภาพที่สุดภายใต้สภาวะปกติและมีลักษณะสมบัติอื่นดังนี้คือ มีสีเทา จุดหลอมละลาย 817 °C ที่ความดัน 36 บรรยากาศ เมื่อถูกเผาไหม้จะให้เปลวไฟสีน้ำเงินและควันสีขาวของ As_2O_3 พร้อมกลิ่นคล้ายกระเทียมไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับกรด H_2SO_4 หรือกรด HCl ที่เย็น แต่ทำปฏิกิริยากับกรด HNO_3 หรือกรด H_2SO_4 ที่ร้อน เปลี่ยนไปเป็น arsenous acid หรือ arsenic acid

2.2.1.2 yellow arsenic ไม่มีเสถียรภาพลักษณะเป็นผง สีเหลือง ความถ่วงจำเพาะ 1.97 เปลี่ยนแปลงเป็นรูป metallic arsenic ได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดหรือความร้อน

2.2.1.3 amorphous arsenic เป็นสารหนูที่มีรูปผลึกไม่แน่นอน สีดำ ความถ่วงจำเพาะ 3.7 เปลี่ยนแปลงเป็นรูป metallic arsenic ได้ที่อุณหภูมิ 270 °C

2.2.2 <u>ประเภทสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู</u> มีที่สำคัญคือ

2.2.2.1 arsenic trioxide (As_2O_3) หรือ white arsenic มีน้ำหนักโมเลกุล 197.82 ความถ่วงจำเพาะ 3.74-4.15 จุดเดือด 465 °C ละลายน้ำได้น้อยมากประมาณ 2% ที่ 25 °C สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อยและประกอบด้วย arsenous acid (H_3AsO_3) นอกจากนี้ยังละลายได้ดีในกรด HCl และในด่าง ได้สารละลายของสารหนูในรูปของ arsenite

2.2.2.2 arsenic pentoxide (As_2O_5) เป็นผงสีขาวน้ำหนักโมเลกุล 229.82 ความถ่วงจำเพาะ 4.08 จุดหลอมละลาย 315 °C และละลายน้ำได้ดีกว่า arsenic trioxide นอกจากนี้ยังละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และรวมตัวกับน้ำอย่างช้าๆ ไปเป็น arsenic acid (H_3AsO_4)

2.2.2.3 arsenous acid (H_3AsO_3) เกิดขึ้นจากสารละลายของ arsenic trioxide ดังสมการ

$$As_2O_3 \xrightarrow{H_2O} H_3AsO_3 \text{ (ortho - arsenous)}$$

$$H_3AsO_3 \downarrow H_4As_2O_5 \text{ (pyro - arsenous)}$$

$$H_4As_2O_5 \downarrow HAsO_2 \text{ (meta - arsenous)}$$

2.2.2.4 arsenic acid (H_3AsO_4) สังเคราะห์ได้จากการนำ arsenic trioxide ละลายในกรด HNO_3 แล้วนำสารละลายนี้ไประเหยจะได้ผลึกสีขาว ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ และ glycerol

$As_2O_3 \longrightarrow H_3AsO_4$ (ortho - arsenic)

$\downarrow$ 140 °C

$H_4As_2O_7$ (pyro - arsenic)

$\downarrow$ 200 °C

$HAsO_3$ (meta - arsenic)

2.2.2.5 arsenites สูตรโมเลกุลของ arsenites คือ MH_2AsO_3, M_2HAsO_3 และ M_3AsO_3 โดยที่ M คืออิออนของโลหะวาเลนซี 1 หรือกลุ่มอิออนที่มีวาเลนซี 1 ลักษณะสมบัติการละลายน้ำของเกลือ arsenites พอจัดแบ่งได้เป็น alkali-metal arsenites ซึ่งละลายน้ำได้ดี alkaline-earth arsenites ละลายน้ำได้เล็กน้อย ส่วน heavy-metal arsenites ไม่ละลายน้ำ เกลือ arsenites ที่สำคัญคือ cupric arsenite ($CuHAsO_3$) lead arsenite ($Pb(AsO_2)_2$) และ sodium arsenite ($NaAsO_2$) เป็นต้น

2.2.2.6 arsenate เป็นเกลือของ arsenic acid ที่สำคัญคือ calcium arsenate ($Ca_3(AsO_4)_2$) และ lead arsenate ($PbHAsO_4$) เป็นต้น

2.2.2.7 halides of arsenic โดยทั่วไปไม่พบในธรรมชาติแต่จะพบในการวิเคราะห์ทางเคมี สารประกอบที่สำคัญคือ $AsCl_3$, $AsBr_3$ และ AsF_3 เป็นต้น

2.2.2.8 arsenic sulfides เป็นสารหนูที่มีลักษณะสมบัติในการละลายน้ำต่ำ เมื่ออยู่ในสภาวะของน้ำที่ไม่มีออกซิเจนและตัวกลางที่มี hydrogen sulfide สารประกอบนี้จะตกตะกอนลงมา สารประกอบที่สำคัญของพวก arsenic sulfides ได้แก่ realgar, orpiment และ arsenic pentasulfide เป็นต้น

2.2.3 <u>ประเภทสารประกอบอินทรีย์ของสารหนู</u> ที่สำคัญและใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ methanearsonic, cacodylic acid, dimethylhydroxyarsine, trimethylarsine

2.2.4 ประเภทก๊าซ สารหนูที่ออกมาในรูปก๊าซคือ arsine หรือ arsenic hydride (AsH_3) เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ ทำปฏิกิริยากับ nascent hydrogen หรือเกิดขึ้นเมื่อ metallic arsenide ทำปฏิกิริยากับน้ำให้ก๊าซ arsine ออกมา ก๊าซนี้มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี เป็นก๊าซที่ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง ละลายได้ในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์และด่าง

2.3 การใช้ประโยชน์ของสารหนู

สารหนูจัดอยู่ในประเภทโลหะและอโลหะ ประกอบกับลักษณะสมบัติตามธรรมชาติของสารหนูที่มีความเปราะ ดังนั้นสารหนูประเภท metallic arsenic จึงไม่นิยมนำมาใช้ดังเช่นโลหะบริสุทธิ์อื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม สารหนูถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของโลหะอัลลอยด์ เช่น เมื่อเติมสารหนูลงไปประมาณ 3 เปอร์เซนต์กับโลหะอัลลอยด์ของตลับลูกปืน สารหนูจะช่วยเพิ่มความแข็งให้กับตลับลูกปืน ถ้าเติมสารหนูกับโลหะทองแดง สารหนูจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและช่วยเพิ่มความเหนียว สารหนูที่มีความบริสุทธิ์สูงมีความสำคัญมากในการนำไปใช้เป็นประกอบของการผลิตอุปกรณ์เซมิคอนดัคเตอร์ในเครื่องมือทางด้านอีเลคทรอนิคเช่น ทรานซิสเตอร์ โซล่าแบตเตอรี่ และไดโอด เป็นต้น สารหนูที่ใช้คือ gallium และ indium arsenides สารหนูในรูปอาร์เซนิคไตรออกไซด์ (As_2O_3) มีความสำคัญในการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบของสารหนูตัวอื่น ๆ อาร์เซนิคไตรออกไซด์ถูกนำไปใช้เป็น fining agent ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์แก้วทำให้แก้วหลอมละลายและขจัดสีในเนื้อแก้ว สารหนูในรูป cromate copper arsenate และ pentavalent arsenic compounds ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำยารักษาสภาพเนื้อไม้ ใช้ป้องกันเชื้อราและแมลงที่มาทำลายเนื้อไม้ สารประกอบของสารหนูหลายอย่างมีผลร้ายต่อสิ่งที่มีชีวิต ซึ่งพบเห็นได้จากการนำเอาสารประกอบของสารหนูไปใช้อย่างแพร่หลายในการเกษตรกรรม เช่น ใช้เป็นสารพิษป้องกันและกำจัดแมลง ได้แก่ paris green, lead arsenate, calium arsenate และ sodium arsenite เป็นต้น ใช้เป็นสารพิษฆ่าวัชพืชได้แก่ monosodium methanearsonate, disodium methanearsonate และ cacodylic acid เป็นต้น นอกจากนี้สารประกอบของสารหนูบางชนิดถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคทั้งในมนุษย์และสัตว์ เช่น โรคที่เกิดจากโปรโตซัว และโรคที่

เกิดจากพยาธิบางชนิด ได้แก่ filariasis, frambesis เป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงถึงปริมาณและ การใช้ประโยชน์ของสารหนูในปี 1974 ตารางที่ 2.4 แสดงถึงสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูที่ใช้ในด้านเกษตรกรรม

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารหนูที่ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ปี 1974 (6)

การใช้ประโยชน์	เมตริกตัน	อัตราส่วน (เปอร์เซ็นต์)
สารพิษกำจัดศัตรูพืช	34,000	65
น้ำยารักษาสภาพเนื้อไม้	9,500	18
อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์แก้ว	5,000	10
โลหะอัลลอยด์ และอิเลคทรอนิค	1,500	3
อื่น ๆ	2,000	4

ตารางที่ 2.4 สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูที่ใช้ในด้านเกษตรกรรม (7)

สารประกอบสารหนู	สูตรเคมี
lead arsenate	$Pb_5(PbOH)(AsO_4)_4$
acid lead arsenate	$PbHAsO_4$
arsenic trioxide	As_2O_3
arsenic pentoxide	As_2O_5
sodium arsenate	Na_2HAsO_4
sodium arsenite	Na_3AsO_3
calcium arsenate	$Ca_3(AsO_4)_2$
paris green	$3Cu(AsO_2)_2 . Cu(C_2H_3O_2)_2$

2.4 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งสำคัญที่แพร่กระจายสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมคือ

2.4.1 แหล่งธรรมชาติ สารหนูพบได้แพร่หลายตลอดทั่วเปลือกโลกและน้ำทะเลประมาณว่าถึง $5x10^{-5}$% ของเปลือกโลกทั้งหมด และประมาณ 14 ตันต่อ 1 ล้านลูกบาศก์เมตรของน้ำทะเล หลังจากผ่านการสึกกร่อนของเปลือกโลก สารหนูจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อม คาดว่าสารหนูจากแหล่งธรรมชาติมีประมาณ 72,000 ตันต่อปีในรูปของ arsenious oxide ตารางที่ 2.5 แสดงถึงค่าทั่วไปของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในดินและหินบางชนิด (4, 7)

2.4.2 จากการใช้สารพิษป้องกันกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร การใช้ในด้านการป้องกันกำจัดศัตรูพืชที่สำคัญคือ lead arsenate ทำให้สารหนูเข้าไปปนเปื้อนในดิน, ในน้ำ เป็นต้น

2.4.3 จากกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ จากการเผาถ่านหินที่มีไพไรต์ผสมอยู่ โรงงานถลุงโลหะ, อุตสาหกรรมผลิตสี และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์แก้ว เป็นต้น ตารางที่ 2.6

แสดงถึงปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ และตารางที่ 2.7 แสดงถึงปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่ออกสู่บรรยากาศจากแหล่งต่าง ๆ (4)

ตารางที่ 2.5 ค่าทั่วไปของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในดินและหินบางชนิด (7)

ชนิดหิน, ดิน	ความเข้มข้นของสารหนู (ส่วนในล้านส่วน)
หินอัคนี	1-9
ดิน (สหรัฐอเมริกา)	7.1
หินฟอสเฟต	20.9
ถ่านหิน (ยุโรป, สหรัฐอเมริกา)	45
ไฟไรต์ (สหรัฐอเมริกา)	5,650

ตารางที่ 2.6 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ (4)

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นของสารหนู (มก./ล.)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3,000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1-0.8
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22
โรงงานโลหะผสมทังสเตน-โมลิบดินัม	0.9
โรงงานผลิตนิเกิล	0.04-1.4
เหมืองทังสเตน	0.2-1.35
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06
โรงงานดีบุก	0.5

ตารางที่ 2.7 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่ออกสู่บรรยากาศ (4)

ประเภทกิจกรรม	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนู (ส่วนในล้านส่วน)
เหมืองแร่	0.45 ตันต่อแร่ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี เงิน ทอง หรือ ยูเรเนียม 1 ล้านตัน
การถลุงโลหะ	955 ตันต่อทองแดงที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	591 ตันต่อสังกะสีที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	364 ตันต่อตะกั่วที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
ถ่านหิน	1.4 ตันต่อการเผาถ่านหิน 1 ล้านตัน
น้ำมัน	5.2 กิโลกรัมต่อน้ำมัน 1 ล้านบาเรล

2.5 ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในสิ่งแวดล้อม

2.5.1 ในหิน ดิน และตะกอนดิน สารหนูพบได้ทั่วไปในแร่หลายชนิด เช่น ในรูป arsenides หรือ sulfide ของทองแดง ตะกั่ว เงิน ทอง สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในแร่ arsenopyrite (FeAsS), realgar (As_4S_4) และ orpiment (As_2S_3) ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูบริเวณพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลกประมาณ 1.5-2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งนับว่ามีมากเป็นอันดับที่ 20 เมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบมากในถ่านหิน ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในถ่านหินของประเทศสหรัฐอเมริกามีประมาณ 45 ส่วนในล้านส่วน ในดินทั่ว ๆ ไปจะมีปริมาณจะมีปริมาณความเข้มข้นสารหนูประมาณ 0.2-40 ส่วนในล้านส่วน เช่น รายงานการสำรวจดินที่เมือง Antofagasta ประเทศชิลีพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นสารหนูประมาณ 3.2 ส่วนในล้านส่วน และในดินระดับลึกลงไปมีปริมาณความเข้มข้นสารหนูมากกว่า 20 ส่วนในล้านส่วน ส่วนดินบริเวณที่ได้รับการปนเปื้อนมีปริมาณความเข้มข้นสารหนูสูงถึง 550 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณสารหนูในตะกอนดินโดยธรรมชาติที่เคยตรวจพบมีค่าน้อยกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน (น้ำหนักแห้ง) ส่วนตะกอนดินจากบริเวณที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู เช่น บริเวณแหล่งถลุงทองแดงในวอชิงตันประเทศสหรัฐอเมริกามีปริมาณความเข้มข้นสารหนูสูงถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน (น้ำหนักแห้ง) (1, 4)

ในประเทศไทย อาร์เซโนไพไรต์เป็นแร่ ซึ่งอยู่รวมกับแร่ดีบุก พลวงและวุลแฟรมสายแร่ในบริเวณเขาร่อนนา และเขาสรวงจันทร์ ซึ่งอยู่ในท้องที่อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีปริมาณแร่ไพไรต์อาร์เซโนไพไรต์รวมกันร้อยละ 0-1 แร่อาร์เซโนไพไรต์ (FeAsS) หรือเพชรหน้าแท่น มีส่วนประกอบของธาตุเหล็กร้อยละ 34.3 ธาตุอาร์เซนิคร้อยละ 46 และซัลเฟอร์ร้อยละ 19 แร่ดังกล่าวผุพังได้ง่ายตามธรรมชาติ จากนั้นเมื่อสัมผัสกับอากาศและน้ำจะกลายเป็นสารประกอบอาร์เซเนต, AsO_4^{3-} ซึ่งละลายน้ำได้ดี (1)

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ตรวจดินจำนวน 40 ตัวอย่างและรายงานว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นในดิน 28.34 ส่วนในล้านส่วน กองระบาดวิทยา รายงานค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นในดินเป็น 22.95 ส่วนในล้านส่วน และมีพิสัย 8.90-32.60 ส่วนในล้านส่วน การตรวจสอบที่เหมืองแร่ดีบุกเก่าซึ่งตั้งอยู่บริเวณเชิงเขาห่างจากบริเวณชุมชนในหมู่ที่ 2 ประมาณ 4 กิโลเมตรพบสารหนูมีปริมาณความเข้มข้น 140.35 ส่วนในล้านส่วน ตะกอนแร่ที่เรียกว่าลาง

โกงมีปริมาณความเข้มข้นสารหนูในพิสัย 34.20-54.76 ส่วนในล้านส่วน (1)

2.5.2 ในน้ำผิวดิน สารหนูในน้ำผิวดินมีทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ได้แก่ อาร์เซเนต อาร์เซไนต์ ส่วนในรูปของสารประกอบอินทรีย์พบได้น้อยกว่าสารประกอบอนินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ methylarsonic acid และ dimethylarsinic acid ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในแหล่งน้ำผิวดินของประเทศไทยโดยทั่วไปมีค่าต่ำ จากรายงานการสำรวจคุณภาพน้ำแม่น้ำท่าจีน ปี 2525 ของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พบว่าปริมาณความเข้มข้นสารหนูในแม่น้ำท่าจีนมีค่าเฉลี่ยตลอดปีอยู่ในพิสัย 1.2-6.8 ไมโครกรัมต่อลิตร (4) สำหรับการสำรวจในต่างประเทศนั้น ปี 1970 Kopp และ Kroner รายงานว่า 7% ของตัวอย่างน้ำจากจำนวน 1500 ตัวอย่างที่เก็บจากแม่น้ำ 150 สายในประเทศสหรัฐอเมริกา มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ และปี ค.ศ. 1971 Durum รายงานว่า 21% ของตัวอย่างน้ำจากจำนวน 727 ตัวอย่างจากแม่น้ำและทะเลสาป มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ และในเกือบทุกกรณีของตัวอย่างน้ำที่พบว่ามีสารหนูปนเปื้อนอยู่ จะมีปริมาณความเข้มข้นสารหนูเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีค่ามากกว่า 2 เท่าของค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน เพื่อการผลิตน้ำประปาของประเทศสหรัฐอเมริกา (12, 13)

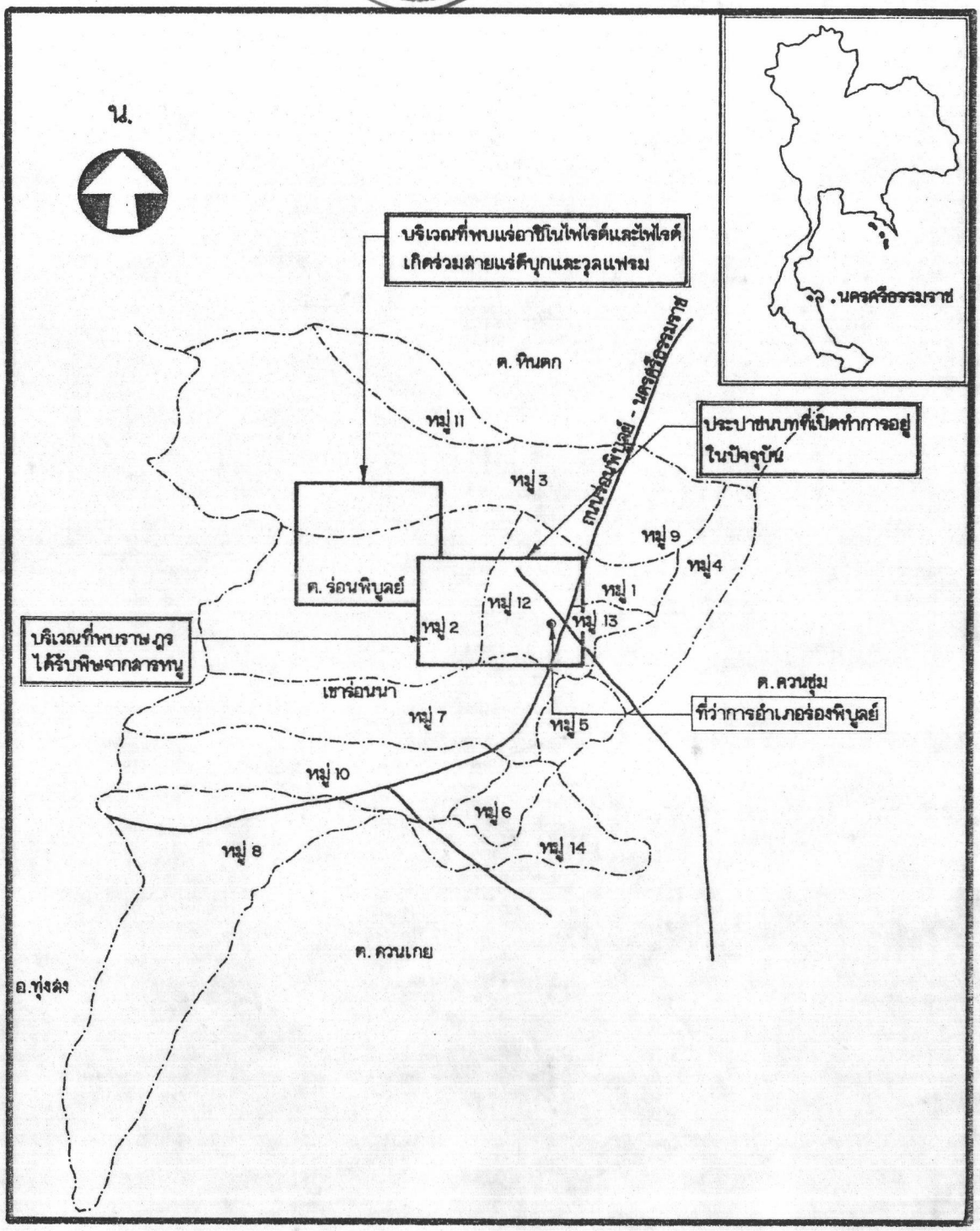
2.5.3 ในน้ำดื่ม ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูโดยธรรมชาติในน้ำดื่มมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละส่วนของโลก จากการสำรวจน้ำประปาในสหรัฐอเมริกาปี ค.ศ. 1943 จำนวน 37 ตัวอย่างพบว่าสารหนูมีปริมาณความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด (0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูสูงสุดที่พบคือ 0.008 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปี ค.ศ. 1969 จากการสำรวจของ McCabe รายงานว่า 0.5% ของตัวอย่างน้ำประปาจากจำนวน 969 ตัวอย่างมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.2% ของตัวอย่างน้ำประปามีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (13,14) จากการสำรวจน้ำบ่อในเมือง Nova Scotia ประเทศแคนาดาประมาณ 800 บ่อ พบว่า 13% ที่มีปริมาณความเข้มข้นสารหนูเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรากฏว่าบ่อเหล่านี้บางบ่อเคยได้รับการปนเปื้อนจากเหมืองทองในอดีตที่ผ่านมา ส่วนในบางพื้นที่ที่มีปัญหาเกี่ยวกับโรคพิษสารหนูเรื้อรังพบว่า ปริมาณสารหนูในน้ำบ่อบริเวณนี้มีค่าเกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่น น้ำบ่อบาดาลในเมือง Tainan ประเทศไต้หวัน มีปริมาณความเข้มข้นสูงถึง 1.8 มิลลกรัมต่อลิตร (4, 15)

015877

10303789

ประเทศไทยสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (1, 3) ได้รายงานปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำบ่อตื้นในบริเวณใกล้ขุมเหมืองเก่าของหมู่ที่ 12 มีค่าสูงสุดถึง 4.45 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นพบว่าปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำบ่อบริเวณขุมเหมืองเก่าในหมู่ที่ 12 มีค่าสูงสุดคือ 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ย 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดนครศรีธรรมราช (8) รายงานผลการตรวจน้ำใช้อุปโภคและบริโภคในตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวน 575 ตัวอย่าง พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนด (0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร) จำนวน 202 ตัวอย่าง

ในการประเมินประสิทธิภาพระบบประปาสุขาภิบาลร่อนพิบูลย์ หมู่ที่ 12 ตำบลร่อนพิบูลย์ (3) พบว่า น้ำดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา มีปริมาณความเข้มข้นสารหนูปนเปื้อน 0.063 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการตกตะกอนในระบบการผลิตน้ำประปาพบว่าสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนูลงเหลือ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการกรองปริมาณความเข้มข้นจะลดลงอีกจนเหลือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณความเข้มข้นสารหนูของน้ำดื่มในประเทศไทย จากการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดื่มจำนวน 4 ตัวอย่าง จากจังหวัดนครศรีธรรมราชในปี พ.ศ. 2526 โดยกรมอนามัย (4) พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นสารหนูในพิสัย 0.07-0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตารางที่ 2.8 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช (3) ตารางที่ 2.9 แสดงถึงผลการตรวจน้ำใช้อุปโภคและบริโภค ในตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช (8)



รูปที่ 2.1 แผนที่สังเขป ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช (3)

ตารางที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจาก ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ นครศรีธรรมราช (3)

ตัวอย่างที่	หมู่ที่	ปริมาณความเข้มข้นสารหนู (มก./ล.)
1	12	1.40
2	2	0.80
3	2	0.08
4	2	0.01
5	2	1.79
6	2	0.92
7	12	4.40
8	12	0.38
9	13	0.39
10	13	0.07
11	-	0.46
12	-	0.13
13	-	0.12
14	-	0.38
15	13	<0.01
16	13	0.22
17	-	1.50
18	-	4.45
19	-	0.063
20	-	0.06
21	-	0.02
22	-	0.03
23	2	0.14

ตารางที่ 2.9 ผลการตรวจสอบน้ำใช้อุปโภคและบริโภคในตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช (8)

จำนวนตัวอย่างน้ำ	หมู่บ้าน														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	รวม
1. ที่ส่งตรวจสอบ	49	45	31	22	29	11	26	6	11	11	1	221	105	7	575
2. ที่ตรวจพบปริมาณความเข้มข้นสารหนูเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่ม (0.05 มก./ล.)	9	19	3	-	13	1	3	-	-	1	-	108	44	1	202

2.6 มาตรการควบคุมของสารหนู

2.6.1 มาตรฐานน้ำดื่ม ตารางที่ 2.10 แสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของสารหนู ที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยประเทศหรือองค์กรต่าง ๆ (4) และตารางที่ 2.11 แสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของสารหนู ที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ ของประเทศไทย(4)

2.6.2 มาตรฐานน้ำทิ้ง ประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง มีสารหนูหรือสารประกอบสารหนูไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (4) สำหรับประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ได้กำหนดค่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ประเทศสิงคโปร์กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งมีสารหนูไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประเทศอังกฤษโดย Mersey and Weaver River Authority กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งสารหนูไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (10)

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยประเทศหรือองค์กรต่าง ๆ (4)

ประเทศหรือองค์กรที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นสารหนูที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม (มก./ล.)
สหรัฐอเมริกา	0.05
สหภาพแห่งสาธารณรัฐโซเวียตสังคมนิยม	0.05
กลุ่มประชาคมยุโรป	0.05
องค์กรอนามัยโลก	0.05

ตารางที่ 2.11 มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ ของประเทศไทย (4)

หน่วยงานที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นสารหนูที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม (มก./ล.)
กระทรวงสาธารณสุข	0.05
กรมทรัพยากรธรณี	0.05
การประปานครหลวง	0.01-0.05
กรมโยธาธิการ	0.05
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	0.05

2.6.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน องค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำดิบ เพื่อการประปาไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร สหรัฐอเมริกากำหนดค่ามาตรฐานน้ำดิบ เพื่อการประปาไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (9) นอกจากนี้ประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดค่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในแหล่งน้ำไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (4)

2.7 ความเป็นพิษของสารหนูต่อมนุษย์

สารหนูและสารประกอบของสารหนูเป็นที่รู้จักกันดีว่า เป็นสารพิษต่อสิ่งที่มีชีวิต ความเป็นพิษของสารประกอบสารหนูอนินทรีย์จะมีมากกว่าสารประกอบของสารหนูอินทรีย์ สารประกอบของสารหนูอนินทรีย์ที่มีวาเลนซี +3 จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบของสารหนูอนินทรีย์ที่มีวาเลนซี +5 ถึง 60 เท่า และสารประกอบของสารหนูที่สามารถละลายน้ำได้จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบของสารหนูที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้แล้วความเป็นพิษของสารหนูและสารประกอบของสารหนูยังขึ้นอยู่กับ ความถี่ในการสัมผัส ปริมาณความเข้มข้นและระยะเวลาในการสัมผัส เป็นต้น (4, 7, 12, 13, 14, 15)

พิษของสารหนูในน้ำดื่มนั้น ส่วนใหญ่มักจะเป็นพิษแบบเรื้อรังมากกว่าพิษแบบเฉียบพลัน พิษแบบเรื้อรังของสารหนูนั้น Wyllie, Bado และ Fairhall (15) รายงานว่ามีสาเหตุเกิดมาจากการบริโภคน้ำดื่มที่มีสารหนูปนเปื้อนอยู่เป็นปริมาณความเข้มข้นสูงถึง 0.4-10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่ Mckee และ Wolf (15) รายงานว่า การบริโภคน้ำดื่มที่มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ในปริมาณความเข้มข้น 0.05-0.25 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น ไม่เกิดผลทางด้านการป่วยแต่อย่างใด นอกจากนี้แล้ว Neubauer (15) รายงานว่าการสัมผัสกับพิษของสารหนูมีส่วนเกี่ยวข้องกับโรคมะเร็ง

ศักยภาพของความเป็นพิษของสารหนู เกิดขึ้นจากการบริโภคน้ำดื่มที่มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ในปริมาณความเข้มข้นสูง มากกว่าที่จะเกิดจากการบริโภคพืชน้ำหรือสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน แม้ว่าสารหนูจะสะสมอยู่ในพืชน้ำและสัตว์น้ำ แต่ไม่มีรายงานว่าการบริโภคพืชน้ำหรือสัตว์น้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจะเป็นสาเหตุให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ นอกจากนี้แล้วสารหนูที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ในพืชน้ำหรือสัตว์น้ำยังมีความเป็นพิษต่ำ และไม่เกิดการสะสมหรือเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของพิษสารหนูผ่านทางลูกโซ่อาหารอีกด้วย (11, 15)

ลักษณะการเกิดพิษ เนื่องจากสารหนูส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษแบบเรื้อรัง จากการสัมผัสสารหนูเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานติดต่อกัน ซึ่งอาการที่แสดงออกทางระบบต่างๆ อาจแยกเป็น (4)

2.7.1 <u>ที่ผิวหนัง</u> ผิวหนังส่วนที่สัมผัสกับสารหนูจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็นโรคผิวหนัง โดยเฉพาะผิวหนังที่อยู่ตามซอกมุมต่าง ๆ เช่น มุมปาก บางที่จะเป็นตุ่มแข็งใสพองหรือผิวหนังแข็งด้าน อาจหลุดออกมาคล้ายกับใบไม้สลัด และต่อไปอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนัง

2.7.2 <u>ที่เยื่อเมือก</u> เมื่อสัมผัสกับฝุ่นผง หรือก๊าซจะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนนั้น และฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปในปอด มีอาการคล้ายกับเป็นหวัดคัดจมูก

2.7.3 <u>ตา</u> จะเกิดตาแดง ตาอักเสบ

2.7.4 <u>ระบบหายใจ</u> สารหนูจะไปสะสมที่ปอดทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบอาจจะมีผลทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด

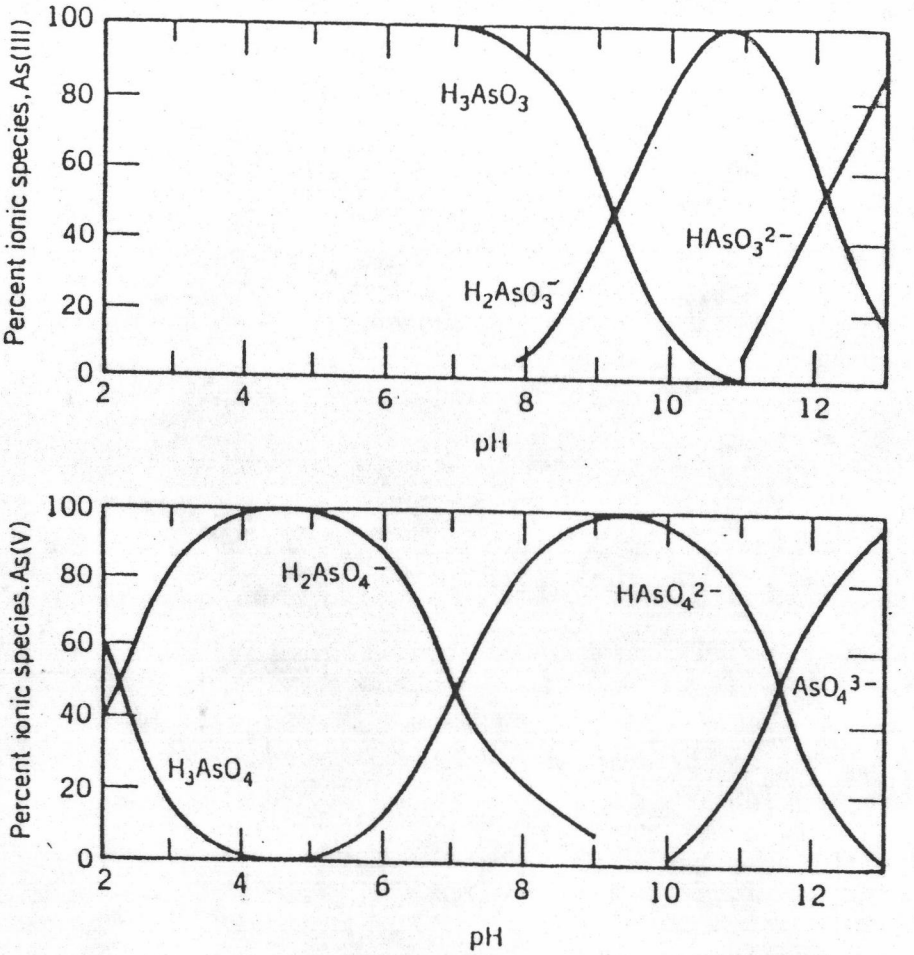
2.7.5 ระบบประสาท สารหนูเมื่อเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิต จะส่งผลกระทบต่อน้ำย่อย (cellular enzyme) ที่ช่วยในการเมตาโบลิซึม ทำให้หน้าที่ในการทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร อาจจะเป็นอัมพาต

2.7.6 สมอง ไปทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมองกระสับกระส่าย ความจำเสื่อม

2.7.7 อื่น ๆ เช่น เกิดโลหิตจาง อาการทางตับไต

2.8 เคมีของสารหนูในน้ำธรรมชาติ

ก่อนที่จะกล่าวถึงกระบวนการบำบัดที่นำมาใช้ในการลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำ สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จำเป็นต้องกล่าวถึงคือ ลักษณะทางเคมีบางประการที่เกิดขึ้นหลังจากสารหนูละลายน้ำ ส่วนใหญ่พบว่า สารหนูในน้ำจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ที่เป็นแอนไอออนและมีลักษณะเป็นกรด ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายน้ำของสารประกอบสารหนูที่อยู่ในรูปของแข็ง เช่น arsenolite (As_2O_3), arsenic anhydride (As_2O_5) และ realgar (AsS_2) เป็นต้น ลักษณะที่เป็นกรดของสารหนูในน้ำที่พบได้บ่อยก็คือ arsenious acid และ arsenic acid สารหนูในน้ำมีลักษณะซับซ้อนมากกว่าปกติ โดยมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์ด้านเคมีทั้งกับปฏิกิริยาของการออกซิเดชัน-รีดักชัน การตกผลึก การดูดซับ ligand exchange และหรือทั้งหมดรวมกัน สารหนูในน้ำสามารถแสดงค่าวาเลนซีได้ถึง 4 ค่า คือ -3, 0, +3 และ +5 และจะมีเสถียรภาพทั้ง 4 ค่าวาเลนซี แต่โดยทั่วไปจะพบสารหนูในน้ำเพียงวาเลนซี +3 และวาเลนซี +5 ในแหล่งน้ำธรรมชาติค่าวาเลนซีและสปีชีส์ของสารหนูจะขึ้นอยู่กับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) และค่าพีเอชของแหล่งน้ำ อาร์เซไนต์ (สารหนูที่มีวาเลนซี +3) ส่วนใหญ่พบในแหล่งน้ำใต้ดินที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่และอาร์เซเนต (สารหนูที่มีวาเลนซี +5) พบในแหล่งน้ำผิวดินที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ รูปที่ 2.2 แสดงถึงการกระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูที่มีวาเลนซี +3 และ +5 กับค่าพีเอช (7, 12, 14, 15, 18)



รูปที่ 2.2 การกระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูที่มีวาเลนซี+3 และ +5 กับค่าพีเอช (12)

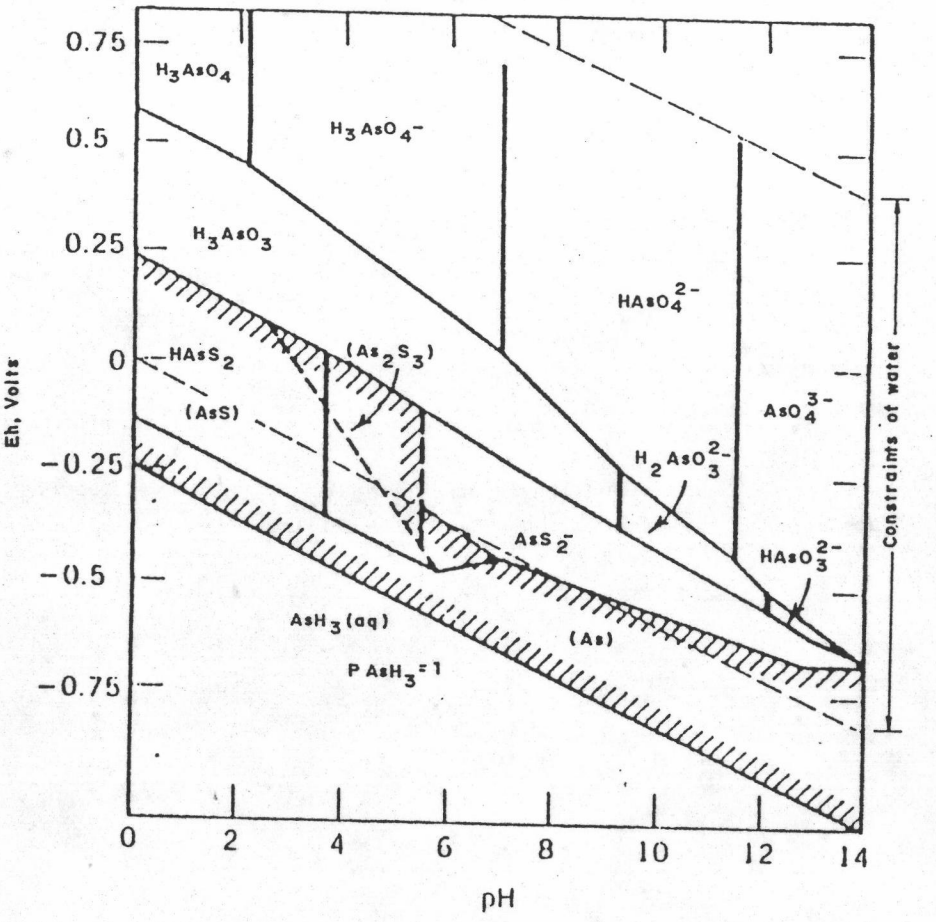
arsenious acid มีวาเลนซี+3 เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ต่ำ และจะพบ H_3AsO_3 ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 2-9 ในทางตรงกันข้าม arsenic acid ที่มีวาเลนซี +5 จะปรากฏในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี พบว่า $HAsO_4^{-2}$ พบได้มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ ในช่วงพีเอช 7-11.5 และ $H_2AsO_4^-$ พบได้มากกว่าสปีชีส์อื่น ๆ ในช่วงพีเอชต่ำกว่า 7 (12)

Ferguson และ Gavis (15) ได้คำนวณหาความสัมพันธ์ของสมดุลย์ของสารหนูแต่ละสปีชีส์โดยใช้ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิค ดังแสดงในตารางที่ 2.12 แล้วเขียนเป็นไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) กับค่าพีเอชสำหรับสารหนูในระบบที่ประกอบขึ้นด้วยออกซิเจน, น้ำ และซัลเฟอร์ ดังรูป 2.3

ตารางที่ 2.12 ค่า Free energies ของสารหนูแต่ละสปีชีส์ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ (ΔG_f, kcal $mole^{-1}$) (15)

สปีชีส์	สถานะ	G_f
H_3AsO_4	ของเหลว	-184.0
$H_2AsO_4^-$	ของเหลว	-181.0
$HAsO_4^{2-}$	ของเหลว	-171.5
AsO_4^{3-}	ของเหลว	-155.8
H_3AsO_3	ของเหลว	-154.4
$H_2AsO_3^-$	ของเหลว	-141.8
$HAsO_3^{2-}$	ของเหลว	-125.3
$HAsS_2$	ของเหลว	-11.61
AsS_2	ของเหลว	-6.56
AsS	ของแข็ง	-16.81
As_2S_3	ของแข็ง	-40.25
As	ของแข็ง	0
AsH_3	ของเหลว	23.8
AsH_3	ก๊าซ	16.5
As_2O_3	ของแข็ง	-140.8
As_2O_5	ของแข็ง	-186.9

พอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 Eh-pH ไดอะแกรมสำหรับแต่ละสปีชีส์ของสารหนูที่อุณหภูมิ 25 °C และความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ กับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด 10^{-5}M และความเข้มข้นของซัลเฟอร์ทั้งหมด 10^{-3}M สปีชีส์ของสารหนูที่เป็นของแข็งถูกเขียนไว้ในวงเล็บในพื้นที่ที่แรเงา และมีค่าคงที่ในการละลายน้ำต่ำกว่า $10^{-5.3}$M เสถียรภาพของสปีชีส์สารหนูในน้ำแสดงโดยเส้นจุดไข่ปลา (15)

ค่า Eh ที่มีค่าสูงจะพบได้ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่ เช่นน้ำผิวดิน จะพบว่า arsenic acid ซึ่งได้แก่ H_3AsO_4, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} จะมีเสถียรภาพ arsenious acid ซึ่งได้แก่ H_3AsO_3, $H_2AsO_3^-$ และ $HAsO_3^{2-}$ จะเริ่มเกิดเสถียรภาพเมื่อถูกรีดิวซ์ให้ค่า Eh ลดลง ภายใต้สภาวะที่ซัลไฟด์ (S^{-2}) เกิดเสถียรภาพ, realgar (AsS), orpiment (As_2S_3) ซึ่งมีค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำ โดยปรากฏออกมาในรูปของแข็งที่มีเสถียรภาพที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 5.5 และค่า Eh ประมาณ 0 โวลท์

ประโยชน์บางส่วนที่ได้รับจากข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิคของสารหนู พบว่าที่ค่า Eh มีค่าต่ำ และมีซัลไพด์รวมอยู่ด้วย สารหนูที่มีค่าวาเลนซี+3 ควรจะถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิผล ดังเช่น Shen และ Chen (25) ได้ทดลองใช้ชั้นกรองที่ทำด้วยเฟอรัสซัลไพด์ (ferrous sulfide) ในการลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จนเหลือเพียง 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันของการเปลี่ยนอาร์เซไนต์ไปเป็นอาร์เซเนต โดยใช้ออกซิเจน มีรายงานว่า เกิดขึ้นช้ามากที่ค่าพีเอชมีค่าปกติ แต่ผลของปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหลาย ๆ วัน และต้องอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างหรือกรดแก่ (15)

2.9 การศึกษาที่ผ่านมา

กระบวนการบำบัดที่ใช้ลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำ ประกอบด้วยกลไกหลายอย่าง เช่น การทำให้เกิดสารคอมเพล็กซ์กับโลหะที่เป็น polyvalent การตกตะกอนร่วมกับโลหะไฮดรอกไซด์บางชนิด (20) การถูกดูดซับบนผิวฟล้อคของโคแอกกูแลนท์ (21,22) บนผิวของแอ็คติเว้ตเต็ดคาร์บอน (23) การตกตะกอนให้อยู่ในรูปของซัลไพด์ (25) เป็นต้น การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้ทำมาแล้วพอสรุปได้ดังนี้

Buswell (20) ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันและใช้สารส้มกับสารประกอบเฟอริคซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนท์ ทำการทดลองโดยใช้จาร์เทสต์และใช้แบบจำลองกับน้ำที่ถูกเติมด้วยสารประกอบโซเดียมอาร์เซไนต์ และสารประกอบโซเดียมอาร์เซเนตเป็นปริมาณมาก ผลการทดลองสรุปว่าสารประกอบเฟอริคซัลเฟตจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูงกว่าสารส้ม และอาร์เซไนต์ก็สามารถถูกกำจัดได้ในลักษณะเดียวกับอาร์เซเนต ถ้ามีการออกซิไดส์เปลี่ยนอาร์เซไนต์เป็นอาร์เซเนตด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรต์

Mackenthun (14) ได้ทำการทดลองกำจัดสารหนูที่เกิดจากการใช้สารประกอบโซเดียมอาร์เซไนต์ในการกำจัดวัชพืชในทะเลสาป พบว่า กำจัดได้ยาก

La Peintre (14) รายงานว่า อาร์เซเนตจะตกตะกอนร่วมหรือถูกดูดซับลงบนผิวของฟล้อคเหล็กไฮดรอกไซด์

Orish และ Sandell (14) รายงานว่า อาร์เซเนตสามารถถูกกำจัดโดยการดูดซับลงบนผิวของฟล้อคอลูมินัมไฮดรอกไซด์

Irkayama (25) ทดลองกำจัดสารหนูโดยใช้สารประกอบเฟอริคคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ สามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงเหลือเพียง 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเติมสารประกอบเฟอริคคลอไรด์ภายหลังจากมีการปรับค่าพีเอชของน้ำให้เท่ากับ 10.3 ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดตะกอนของเฟอริคไฮดรอกไซด์ขึ้นและถูกกำจัดออกโดยการกรองผ่านชั้นทราย

Magnusen (22) ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นโคแอกกูแลนท์ และรายงานว่าสามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรลงเหลือประมาณ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 85 เปอร์เซนต์ การกรองผ่านชั้นกรองที่ทำด้วยถ่านสามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรลงเหลือ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร

Lund (26) รายงานว่า ในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารหนูและโลหะหนักละลายอยู่นั้น สารหนูสามารถถูกกำจัดได้พร้อม ๆ กับการตกตะกอนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียและมีประสิทธิภาพสูงถึง 90 เปอร์เซนต์ Lund แนะนำว่า หลักการที่ใช้ในการกำจัดสารหนูคือ สารหนูจะจับหรือรวมตัวเป็นสารคอมเพล็กซ์กับโลหะหนัก และถูกกำจัดออกเมื่อเกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก

Shen (17) ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน และใช้โคแอกกูแลนท์กับสารออกซิไดส์หลายชนิดกับน้ำบาดาลที่มีสารหนูปนเปื้อนอยู่สูง (0.6-2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและในโรงผลิตน้ำประปาขนาดเล็กซึ่งมีกำลังการผลิต 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน Shen พบว่า การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดเพียง 32 เปอร์เซนต์ และ 20 เปอร์เซนต์ตามลำดับ กับสารหนูที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าเท่ากับ 6.8 แต่ถ้าใช้สารประกอบเฟอริคคลอไรด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงเหลือเพียง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอช 6.8 และการเติมสารออกซิไดส์ก่อนการทำโคแอกกูเลชันจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 95-98 เปอร์เซนต์ แต่การเติมอากาศเพียงอย่างเดียวก่อนการทำโคแอกกูเลชันนั้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เมื่อนำ

ผลการทดลองไปใช้ในโรงผลิตน้ำประปาที่มีสารหนูปนเปื้อนในช่วง 0.6-0.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดจะอยู่ในช่วง 82-100 เปอร์เซนต์

Gulledge O'Connor (7) ศึกษาผลของการดูดซับอาร์เซเนตกับปริมาณและชนิดของโคแอกกูแลนท์ และกับค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดพบว่า การดูดซับอาร์เซเนตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร บนผิวของฟล้อคเฟอริคไฮดรอกไซด์จะมีค่าสูงกว่าฟล้อคของอลูมินัมไฮดรอกไซด์ และในทั้งสองกรณีการเพิ่มปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์ก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดให้มีค่าสูงขึ้นด้วย ผลของค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการกำจัดเป็นดังนี้คือ ที่ค่าพีเอช 5-7 ทั้งสารส้มและเฟอริคซัลเฟตจะมีประสิทธิภาพการกำจัดถึง 90 เปอร์เซนต์ ที่ค่าพีเอชสูงกว่า 7 ประสิทธิภาพการกำจัดของสารส้มจะมีค่าลดลงมาก แต่ในทางตรงกันข้ามเฟอริคซัลเฟตยังมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า 90 เปอร์เซนต์

Muruyama (27) ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบโซเดียมอาร์เซไนต์ และมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองในแบบจำลองและใช้โคแอกกูแลนท์ 3 ชนิดคือ ใช้เฟอริคซัลเฟต 45 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 6.8 ใช้ปูนขาว 60 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเฟอริคซัลเฟต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 10.0 และใช้ปูนขาวอย่างเดียว 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 11.5 ผลการทดลองพบว่า การใช้เฟอริคซัลเฟตอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัด 90 เปอร์เซนต์ การใช้ปูนขาวกับเฟอริคซัลเฟตมีประสิทธิภาพการกำจัด 80 เปอร์เซนต์ การใช้ปูนขาวอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัด 76 เปอร์เซนต์

Logsdon (14) ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของค่าวาเลนซีกับชนิดของโคแอกกูแลนท์ต่อการกำจัดอาร์เซไนต์ในน้ำบ่อที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเฟอริคซัลเฟตจะมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วง 40-60 เปอร์เซนต์ และสารส้มจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเพียง 5-15 เปอร์เซนต์ ซึ่งถ้าเทียบกับผลการทดลองของ Gulledge O'Connor จะพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่ามาก Logsdon อธิบายว่า ค่าวาเลนซีมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของโคแอกกูแลนท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์หลัก นอกจากนี้ Logsdon ยังทำการทดลองถึงผลของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์

และผลของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารหนูตั้งต้น ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดพอสรุปได้ดังนี้คือ ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ และประสิทธิภาพการกำจัดที่คิดเป็นเปอร์เซนต์จะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น และเมื่อนำผลการทดลองจาร์เทสต์ของ Logsdon ไปใช้ในแบบจำลองกับน้ำที่ถูกเติมด้วยโซเดียมอาร์เซไนต์ และโซเดียมอาร์เซเนต พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูโดยใช้แบบจำลองนั้น ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลองที่ทำด้วยจาร์เทสต์

กองอนามัยสิ่งแวดล้อม กระทรวงสาธารณสุข (1) ทดสอบการลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำด้วยการกรองผ่านถ่านกระดูก (bone char) พบว่า สามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูจาก 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตรลงได้จนถึงระดับที่ไม่อาจตรวจพบได้

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข (28) รายงานว่า การปรับค่าพีเอชด้วยปูนขาว สามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำลงได้

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน (29) ทดลองลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน และใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ ใช้น้ำจากตาบลร่อนพิบูลย์ที่มีปริมาณความเข้มข้นสารหนูตั้งต้น 5.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองสามารถลดปริมาณความเข้มข้นสารหนูลงเหลือ 0.68 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 87.6 เปอร์เซนต์ และเมื่อกรองผ่านแอ็คติเว้ตเต็ดคาร์บอน จะเหลือปริมาณความเข้มข้นสารหนู 0.41 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด 92.6 เปอร์เซนต์