

1. บทนำ

ความรู้เกี่ยวกับสารหนู^{1,2}

1.1 สมบัติของสารหนู

สารหนู (Arsenic, As) เป็นธาตุกึ่งโลหะ (Semimetal) มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33 เป็นธาตุหมู่ 5A ซึ่งประกอบด้วย N, P, As, Sb และ Bi สารหนูมีสีเงินแกมเทา ผิวคล้ำมัว ก่อนข้างเปราะ ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 °C และระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 °C สามารถระเหิดได้ที่อุณหภูมิ 613 °C มีค่าเลขออกซิเดชันหลายค่าคือ -3, 0, +3 และ +5 โดยทั่วไปจะพบอยู่ในเลขออกซิเดชัน+3 และ +5 ในรูปสารประกอบอนินทรีย์และอินทรีย์ ซึ่งสารประกอบอนินทรีย์เลขออกซิเดชัน+3 จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบอินทรีย์ เลขออกซิเดชัน+5 โดยที่ทั้งสองเลขออกซิเดชันนี้ สามารถเปลี่ยนไปมาซึ่งกันและกันได้ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction Process) นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเกิดอยู่ในรูปของก๊าซอาร์ซีน (Arsine)

1.1.1 สารหนูเลขออกซิเดชัน+3 (Arsinite) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ AsO_3^{3-} และเป็นสารอนุพันธ์ของ Arseneous acid (As_2O_3) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน และอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น $\text{Cu}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)(\text{AsO}_3)$ เป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง CuHAsO_3 เป็นส่วนประกอบในการผลิตสี เป็นต้น

1.1.2 สารหนูเลขออกซิเดชัน+5 (Arsinate) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ AsO_4^{3-} และเป็นสารอนุพันธ์ของ Orthoarsenic acid (H_3AsO_4) และมักอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$ และ $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ เป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง

1.1.3 ก๊าซอาร์ซีน (Arsine, AsH_3) เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม ระเหยง่าย มีความเป็นพิษสูงสุด ถ้าสูดดมหรือหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไป จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโลหิต เกิดภาวะโลหิตจาง เนื่องจากก๊าซอาร์ซีนจะจับตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงและทำลายเม็ดเลือดแดงในเวลาต่อมา ก๊าซนี้ไม่เสถียรสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย กล่าวคือ อาร์ซีนจะเกิดได้ในน้ำธรรมชาติที่มีตัวลดออกซิเจน แล้วจะทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ทำให้เกิดธาตุจำพวกซัลไฟด์และอาร์เซไนด์ได้

1. 2 การสะสมตัวและการแพร่กระจายของสารหนู

สารหนูที่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะสะสมตัวอยู่ตามแหล่งแร่ต่าง ๆ โดยเฉพาะแหล่งแร่ซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พลวง เงิน และทอง มักจะพบสารหนูในรูปของแร่อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) รีอัลการ์ (Realgar, As_4S_4) และออร์พิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) เป็นต้นดังตาราง 1.1

ตาราง 1.1 ชนิดของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ³

ชนิดของแร่	องค์ประกอบ	ชนิดของแร่	องค์ประกอบ
Argentite	Ag_2As	Cobaltite	CoAsS
Allemontite	AsSb	Enargite	Cu_3AsS_4
Chloanthite	$(\text{Ni}, \text{Co})\text{As}_{3-x}$	Ternantite	$(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Domeykite	Cu_3As	Pearceite	$(\text{Cu}, \text{Ag})_{16}\text{As}_2\text{S}_{11}$
Loellingite	FeAs_2	Proustite	Ag_3AsS_3
Niccolite	NiAs	Gersdorffite	NiAsS
Safflorite	$(\text{Co}, \text{Fe})\text{As}_2$	Glaucodote	$(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$
Sperrylite	PtAs_2	Arsenolite	As_2O_3
Skuterrudite	$(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})\text{As}_3$	Adamite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
Orpiment	As_2S_3	Olivenite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
Realgar	As_4S_4	Scorodite	$(\text{Fe}, \text{Al})(\text{AsO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$
Arsenopyrite	FeAsS	Pharmacosiderite	$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_3$

สารหนูและสารประกอบของสารหนู สามารถเคลื่อนที่และสะสมตัวตามรอยแตก รอยเลื่อนในหิน โดยการแพร่กระจายในลักษณะของก๊าซ สารละลาย และตกตะกอนตามธรรมชาติในลักษณะต่าง ๆ กัน ได้แก่

1.2.1 ในรูปของสารหนูธรรมชาติ

สารหนูสามารถเปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย โดยค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปในรูปของไอ และตกตะกอนออกมาในรูปของโลหะสารหนูจากการเย็นตัว แต่ถ้าไอทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ ก็ยังผลให้เกิดแร่ประกอบสารหนู เช่น อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite) , นิคโคไลต์ (Niccolite) และโคบอลไทต์ (Cobaltite) เป็นต้น

1.2.2 ในรูปของไฮไดร (Hydride)

สารประกอบอาร์ซีน (AsH_3) จะเกิดในรูปของก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ ไม่มีเสถียรภาพ สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 225°C สารประกอบอาร์ซีนสามารถเกิดได้ในน้ำธรรมชาติที่มีก๊าซออกซิเจน และจะทำปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ทำให้เกิดแร่ประกอบอาร์เซนิกเช่น อาร์เซโนไฟไรต์ (Arsenopyrite) และพรูสไทต์ (Proustite)

1.2.3 ในรูปของคลอไรด์ (Chloride)

สารประกอบ AsCl_3 นี้ ระเหยได้ง่าย และจะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยวิธีไฮโดรไลซิสได้กรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) ดังปฏิกิริยา



นอกจากนี้สารหนูยังสามารถอยู่ในรูปของคลอไรด์คอมเพลกซ์ (AsCl_2)⁻¹ ชนิดต่าง ๆ ได้

1.2.4 ในรูปของสารประกอบชนิดต่าง ๆ ที่เป็นไอ

สารประกอบชนิดต่าง ๆ ของสารที่ระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ได้แก่ AsCl_3 , As_2O_3 และ AsS เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้จะตกตะกอนเป็นแร่อาร์เซนิกชนิดต่าง ๆ เมื่อเกิดการเย็นตัวหรือทำปฏิกิริยากับธาตุหรือสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในหินที่รองรับน้ำใต้ดิน

1.2.5 ในรูปของ (AsS_2)⁻¹ และ (AsS_4)⁻³

สารประกอบเหล่านี้เกิดอยู่ในแร่จำพวกซิลไฟโซลต์ ซึ่งสามารถคงสภาพอยู่ได้ในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นด่าง สารพวกนี้จะละลายน้ำได้ในสภาวะที่เป็นด่าง และจะตกตะกอนเมื่อมีการลดอุณหภูมิหรือมีการเพิ่มความเป็นกรดหรือโดยการทำให้เจือจาง หรือเกิดจากขบวนการเติมออกซิเจนเมื่อสารละลายไหลมาสัมผัสกับน้ำใต้ดิน นอกจากนี้อาจตกตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารละลายกับหินใกล้เคียง โดยการแลกเปลี่ยนในซิลิเกตกับอัลคาไลด์ในสารละลาย เกิดเป็นแร่อาร์เซโนไฟไรต์



1.2.6 ในรูปของอาร์เซไนต์และอาร์เซเนตชนิดต่าง ๆ

สารประกอบพวกนี้จะคงสภาพอยู่ได้ทั้งในตัวกลางที่เป็นด่างและกรด โดยในสภาวะตัวกลางที่เป็นด่างจะอยู่ในรูปของ AsO_2^- , $(\text{H}_2\text{AsO}_3)^-$, $(\text{As}(\text{OH})_4)^-$, $(\text{H}_2\text{AsO}_4)^-$, $(\text{AsO}_4)^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ส่วนในสภาวะที่เป็นกรดจะอยู่ในรูปของ $(\text{As}(\text{OH})_2)^+$ ทำให้สารหนูส่วนใหญ่คงสภาพอยู่ในรูป As^{+3} ส่วนในสภาพแวดล้อมบนผิวโลกจะมี Oxidation Potential สูง คือมีการเติมออกซิเจน สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป As^{+5}

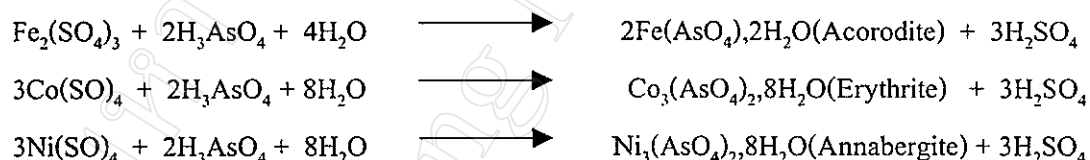
1.2.7. ในรูปของ Colloidal As_2S_3

สารประกอบพวกนี้จะอยู่ในสภาพของ Colloid ในสภาวะแวดล้อมใต้ผิวโลกที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยมีสมบัติทางไฟฟ้า มีประจุเป็นลบ โดยการดูดเอาไอออน SH^- และ OH^- ไว้ที่ผิวการตกตะกอนของ As_2S_3 จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลด pH (เพิ่ม H^+) หรือโดยเอาไอออนประจุบวก เช่น Fe^{2+} , Ag^+ เป็นต้น

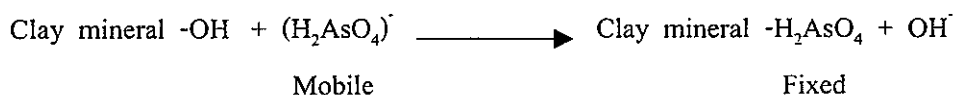
ในระหว่างการผุพังของหินหรือแหล่งแร่ที่มีสารหนูสะสมตัวอยู่ สารหนูจะเคลื่อนที่ไปบนผิวโลกในสภาพของอาร์เซนดซึ่งอยู่ในรูปของ As^{+5} โดยแร่ประกอบของสารหนูต่าง ๆ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบอาร์เซนด เช่น แร่อาร์เซโนไพไรต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนี้



สารประกอบอาร์เซนด ซึ่งอยู่ในรูป H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} จะละลายไปกับน้ำผิวดินและสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดสูง แต่ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือกรดอ่อน ๆ ก็จะเคลื่อนที่ไปได้ไม่ไกลนัก โดยจะตกตะกอนร่วมกับธาตุอื่น ๆ โดยเฉพาะเหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ที่ปะปนอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดแร่ประกอบอาร์เซนดชนิดภูมิขึ้น⁴ เช่น

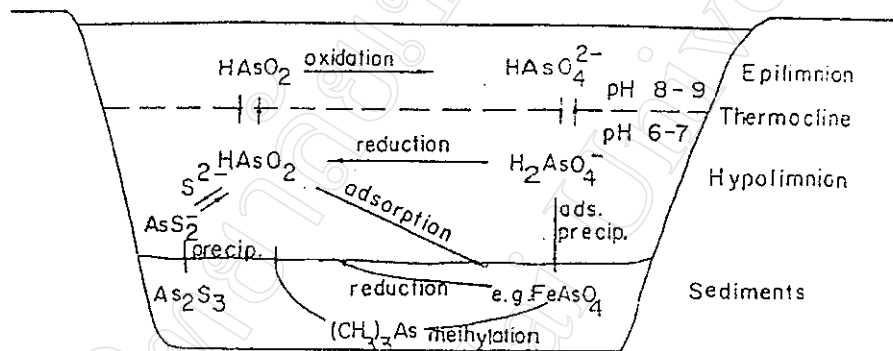


จากขบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่าแร่ประกอบสารหนูเมื่อถูกออกซิไดซ์หรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะเกิดสภาพเป็นอาร์เซนดละลายไปกับน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน แต่ขบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นช้ามาก และสารประกอบอาร์เซนดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยเหล็ก ออกไซด์ที่มีน้ำซัลไฟ และคอลลอยด์ของธาตุอื่น ๆ จะตกตะกอนไปเป็นส่วนใหญ่ นอกจากเหล็กแล้ว แร่ดิน (Clay) หรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ ก็สามารถดูดซับเอาสารหนูไว้ได้ดีโดยสารหนูจะไปแทนที่ OH^- ในแร่ดิน ดังสมการ



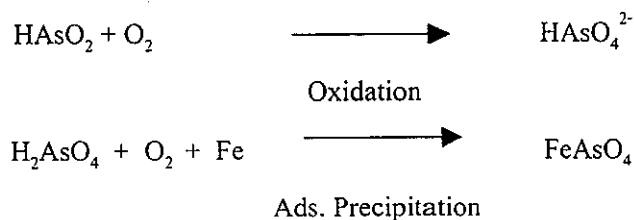
1.3 วัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ^{5,6}

ปฏิกิริยาสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เกิดขึ้นประกอบด้วยการเคลื่อนย้ายระหว่างสภาวะที่อยู่ในรูปของสารละลายและในรูปของแข็ง การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่มีเลขออกซิเดชันหนึ่งไปอยู่ในรูปออกซิเดชันหนึ่ง และมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวภาพ สำหรับวัฏจักรของสารหนูยังศึกษาไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปฏิกิริยาต่างๆ ส่วนใหญ่มักใช้การตั้งสมมติฐาน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาสารหนูในสิ่งแวดล้อม ดังรูป 1.1



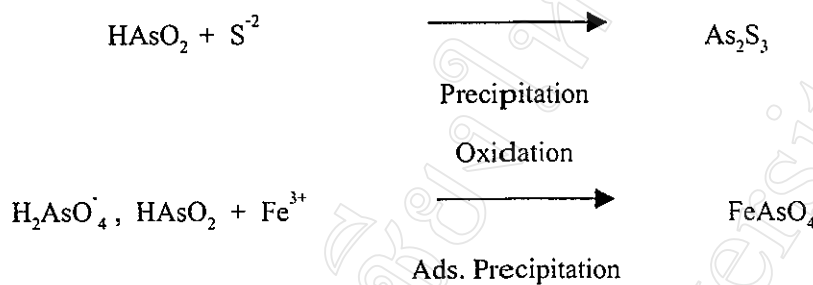
รูป 1.1 วัฏจักรของสารหนูในแหล่งน้ำธรรมชาติ⁵

ในชั้นน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่มาก (Epilimnion) สารหนูส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารประกอบอาร์ซีเนต กระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีส่วนมากเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยที่สารประกอบอาร์ซีเนตสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ แต่ถ้าในแหล่งน้ำมีโลหะพวกเหล็กหรืออลูมิเนียมก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเหล่านี้ และเคลื่อนตัวไปสู่ชั้นน้ำที่ไม่มีออกซิเจน (Hypolimnion) ดังสมการ



นอกจากนี้ในชั้นน้ำนี้มีตะกอนและความขุ่นมากจะสามารถตรึงสารประกอบอาร์ซีเนต บางส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นน้ำที่ไม่มีออกซิเจน แต่เนื่องจากชั้นน้ำนี้ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้นสารประกอบอาร์ซีเนต คือ HAsO_2 และ AsS_2^- สามารถเกิดปฏิกิริยา

รีดักชันกลายเป็นสารประกอบอาร์ซีนีได้ และถ้าหากในน้ำมีปริมาณกำมะถันเพียงพอ และมีค่า Eh กับค่า pH ที่เหมาะสม ก็สามารถตกตะกอนในท้องน้ำในรูปของ As_2S_3 ส่วน H_2AsO_4^- และ HAsO_2^- ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน ก็จะตกตะกอนท้องน้ำได้โดยการดูดซับจาก ไฮดรอกไซด์ อีออนของเหล็ก เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเฟอร์สอาร์ซีนีเตต ดังสมการการเกิดปฏิกิริยา คือ



สำหรับชั้นตะกอนท้องน้ำ (Sediment) มีสิ่งมีชีวิต เช่น แพลงก์ตอน แบคทีเรีย เชื้อรา และ จุลินทรีย์อื่นๆ สามารถเปลี่ยนสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ได้และกระบวนการทางชีวภาพ Bioreduction สารหนูอนินทรีย์จะเกิดขึ้นในรูปสารประกอบ Trimethylarsenic acid $[(\text{CH}_3)_3\text{As}]$ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic organisms) หรือ อยู่ในรูปสารประกอบ Dimethylarsenic acid ซึ่งเกิดจากกระบวนการของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic organisms) โดยที่ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอาร์ซีนีเตตถูกออกซิไดส์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนเป็นสารประกอบอาร์ซีนีเตตก่อนที่จะมีการเติมหมู่เมทิล (CH_3) แต่อย่างไรก็ตาม สารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ดังกล่าวจะถูกแบคทีเรียออกซิไดส์และดึงหมู่เมทิลออก (Demethylation) ให้กลับไปอยู่ในรูปของสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ได้อีก

1.4 การใช้ประโยชน์ของสารหนู¹

สารหนูได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. ทางด้านการเกษตรกรรม เช่น สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง สารกำจัดวัชพืช สารรักษาเนื้อไม้และเนื้อดิน ผสมในอาหารสัตว์
2. ทางด้านปศุสัตว์ เช่น สารช่วยป้องกันโรคพยาธิหัวใจ (Canine heartworm) และโรคบิดในสุกร (Swine dysentery)
3. ทางด้านการแพทย์ เช่น รักษาโรคที่เกิดจาก Protozoa และพยาธิบางชนิด ผสมในยาปฏิชีวนะ โลหะอัลลอยด์ในการผ่าตัด
4. ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ประยุกต์ใช้ในเซมิคอนดักเตอร์ ไดโอดเรืองแสง
5. ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ผลิตตัวเร่งเคมี (Catalysts) สีกันเชื้อรา สีย้อมผ้า เครื่องแก้ว และสบู่ เป็นต้น
6. ทางด้านทหาร เช่น ใช้ในสงคราม และปราบจลาจล

1.5 ทางเข้าสู่สิ่งแวดล้อม⁷

แหล่งสำคัญที่แพร่กระจายสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อม คือ

1.5.1 แหล่งธรรมชาติ

เกิดขึ้นจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลก หรือจากกาซของภูเขาไฟ ซึ่งสารหนูจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อม และจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลก คาดว่ามีสารหนูจากแหล่งธรรมชาติประมาณปีละ 72,000 ตัน ในรูปของ Arsenious oxide

1.5.2 จากการใช้สารพิษป้องกันกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร

จากการใช้ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต ซึ่งในปุ๋ยจะมีสารหนูประกอบอยู่ประมาณ 0.1% ส่วนการใช้ Pesticides ที่สำคัญ คือ Lead arsenate และสารประกอบสารหนูชนิดอื่นๆ ทำให้สารหนูเข้าไปปนเปื้อนในดินโดยเฉพาะดินสวนผลไม้ที่มีการใช้ Lead arsenate มาก นอกจากนั้นสารหนูบางส่วนจะถูกพืชดูดซับเข้าไป บางส่วนเข้าไปปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน และในสัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู

1.5.3 จากกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม

ได้แก่ จากการเผาถ่านหิน โรงงานถลุงโลหะ เช่น ในตาราง 1.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ และในตาราง 1.3 ปริมาณสารหนูที่ออกสู่บรรยากาศจากแหล่งต่างๆ

ตาราง 1.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ ⁷

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้ง (mg/l)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.10-0.80
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22
โรงงานโลหะผสมทั้งสเตน-โมลิบดีนัม	0.90
โรงงานนิเกิล	0.04-1.40
เหมืองทั้งสเตน	0.20-1.35
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06
โรงงานดีบุก	0.50

ตาราง 1.3 ปริมาณสารหนูที่ออกสู่บรรยากาศ⁷

แหล่งที่ปล่อยสารหนู	ปริมาณสารหนู
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 ล้านบาร์เรล

1. 6 ปริมาณความเข้มข้นในสิ่งแวดล้อม

1.6.1 ในหิน ดิน และตะกอนดิน⁸

สารหนูพบได้ทั่วไปในแร่หลายชนิด เช่น ในรูป Arsenides หรือ Sulfide ของทองแดง ตะกั่ว เงิน ทอง สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในแร่ Arsenopyrite (Fe AsS), Realgar (As_4S_4) และ Orpiment (As_2S_3) ปริมาณสารหนูบริเวณพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลกประมาณ 1.5 – 2 mg/kg ซึ่งนับว่ามีมากเป็นอันดับที่ 20 เมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบมากในถ่านหิน ปริมาณถ่านหินในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 1500 mg/kg และถ่านหินในบางเหมืองในประเทศเซเชลโกสโลวาเกียมีปริมาณสารหนูถึง 1500 mg/kg

ในดินทั่ว ๆ ไปจะมีสารหนูประมาณ 0.2 – 40 mg/kg เช่นจากรายงานการสำรวจดินที่เมือง Antofagasta ประเทศชิลี พบว่ามีสารหนูประมาณ 3.2 mg/kg และจากการรายงานการสำรวจดินที่เมือง Comarca Langunera ประเทศเม็กซิโก พบว่ามีปริมาณสารหนูในบริเวณผิวดินประมาณ 3 – 9 mg/kg และในดินระดับลึกลงไปมีปริมาณสารหนูมากกว่า 20 mg/kg ส่วนดินบริเวณที่ได้รับการปนเปื้อนมีปริมาณสารหนูสูงถึง 550 mg/kg

ปริมาณสารหนูในตะกอนดินโดยธรรมชาติที่เคยตรวจพบมีค่าน้อยกว่า 10 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) ส่วนตะกอนดินจากบริเวณที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู เช่น บริเวณใกล้แหล่งถลุงทองแดงในเมืองวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกามีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูสูงถึง 10000 mg/kg (น้ำหนักแห้ง)

1.6.2 ในอากาศ⁹

อนุภาคของสารหนูในบรรยากาศมีทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในบรรยากาศบริเวณที่ไม่มีการปนเปื้อน (Nonpolluted area) มีค่าต่ำมากคือน้อยกว่า $1 - 2 \text{ mg/m}^3$ ส่วนบริเวณที่ใกล้เคียงกับแหล่งถลุงแร่ทองแดง ตะกั่ว ปริมาณสารหนูในบรรยากาศที่ตรวจวัดได้มากกว่า 1 mg/m^3 เช่นที่ประเทศสหภาพแห่งสาธารณรัฐโซเวียตสังคมนิยม (ในบริเวณรัศมี 4 กิโลเมตรจากโรงงานถลุงแร่ทองแดง) ตรวจวัดได้ $0.7 - 2.5 \text{ mg/m}^3$ และที่เมืองวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา (ใกล้โรงงานถลุงทองแดง ตรวจวัดตลอดเดือนมีค่าเฉลี่ย 1.4 mg/m^3)

1.6.3 ในน้ำ^{10,11}

สารหนูในน้ำมีทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ ได้แก่ Arsenide และ Arsenate ส่วนในรูปของสารประกอบอินทรีย์พบได้น้อยกว่าสารประกอบอนินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ Methylarsonic acid และ Diethylarsinic acid

ปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำผิวดินโดยทั่วไปมีปริมาณต่ำ จากการรายงานการสำรวจคุณภาพน้ำแม่น้ำท่าจีน ปี 2525 ของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติพบว่าสารหนูในแม่น้ำท่าจีนมีค่าโดยเฉลี่ยตลอดปี อยู่ในช่วง $1.2 - 6.8 \text{ } \mu\text{g/l}$

1.6.4 ในน้ำดื่ม^{12,13,14}

ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูโดยธรรมชาติในน้ำดื่ม มีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละส่วนของโลก เช่น จากการสำรวจน้ำประปาจากชุมชนต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 18000 แห่ง พบว่าน้อยกว่า 1% ที่มีปริมาณสารหนูในน้ำประปาเกิน 0.01 mg/l หรือจากการสำรวจน้ำบ่อในเมือง Nova Scotia ประเทศแคนาดาประมาณ 800 บ่อ พบว่า 13% ที่มีปริมาณสารหนูเกิน 0.05 mg/l ซึ่งปรากฏว่าบ่อเหล่านี้บางบ่อเคยได้รับการปนเปื้อนเหมืองทองในอดีตที่ผ่านมา ส่วนในบางพื้นที่ที่มีปัญหาเกี่ยวกับโรคพิษสารหนูเรื้อรังพบว่า ปริมาณสารหนูในน้ำบ่อบริเวณนี้มีค่าเกิน 1 mg/l หรือแถบเมือง Cordoba ประเทศอาร์เจนตินา ปริมาณสารหนูสูงสุดที่พบในน้ำมีค่าในช่วง $0.9 - 3.4 \text{ mg/l}$ หรือน้ำบ่อบาดาลในเมือง Tainan ประเทศไต้หวัน มีปริมาณสารหนูถึง 1.8 mg/l ดังนั้นแหล่งน้ำดื่มใดที่มีปริมาณสารหนูค่อนข้างสูง ก็ควรจะต้องมีการขจัดสารหนูออกไปบ้าง โดยการใช้ Aluminium หรือ Ferric salts เพื่อตกตะกอนสารหนู ซึ่งวิธีนี้สามารถขจัดเอาอาร์ซีนิก (V) ออกไปได้

สำหรับปริมาณสารหนูในน้ำดื่มในประเทศไทย จากการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดื่ม จำนวน 4 ตัวอย่าง จากจังหวัดนครราชสีมา ในปี 2526 โดยกรมอนามัยพบว่า มีสารหนูใน ช่วง 0.07 – 0.12 mg/l

1.7 ความเป็นพิษของสารหนู^{1, 2}

ความเป็นพิษของสารหนูมีทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง อาการของพิษเฉียบพลันเกิดจากการรับสารหนูในปริมาณมาก ๆ ในคราวเดียว ซึ่งจะพบอาการตามระบบต่าง ๆ เกือบทุกระบบ เช่น เลือด หัวใจ ไต และระบบทางเดินอาหาร อาการที่เกิดขึ้นได้แก่ ระบายท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย ไตถูกทำลาย ไอ เจ็บหน้าอก และหายใจลำบาก ซีฟรเด้นเบา มีความดันเลือดต่ำ แขนขาไม่มีแรง ชัก หมคสติ และอาจถึงตายได้

อาการของพิษเรื้อรังเกิดเมื่อได้รับสารหนูเป็นเวลานานจนมีปริมาณมากพอ อาการมักจะเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ผิวหนัง และระบบประสาทส่วนปลาย ได้แก่ อ่อนเพลีย ปวดเมื่อย ปากอักเสบ ระบบทางเดินอาหารปั่นป่วน เป็นไข้ ผิวหนังเข้มขึ้นตามท้องแขนและท้องขา มีตุ่มแข็งเล็กๆ ตามฝ่ามือ ฝ่าเท้า หรือ ลำตัว และอาจกลายเป็นมะเร็งผิวหนังในที่สุด เส้นผมหยาบ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาต และหดรัดฝิบ มองเห็นไม่ชัดอาจรุนแรงถึงตาบอด มีความผิดปกติของสมอง ตับ และไตถูกทำลาย หายใจมีกลิ่นกระเทียม และเป็นโลหิตจางชนิด Aplastic anemia

1.8 การลดปริมาณสารหนูในน้ำ¹⁵

การลดปริมาณสารหนูในน้ำซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1.8.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันมีความสำคัญในการออกซิไดซ์สารหนูเลขออกซิเดชัน+3ให้เป็นสารหนูเลขออกซิเดชัน+5 สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรด์ โอโซน สารประกอบเปอร์แมงกาเนต ออกซิเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นต้น

คลอรีนและสารประกอบไฮโปคลอไรด์มีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะใช้ง่ายและราคาถูก แต่เกิดผลพลอยได้จากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำเกิดเป็นสารประกอบฮาโลมีเทน(Halomethane)

โอโซนใช้มากในการออกซิเดชันและการฆ่าเชื้อ แต่มีประสิทธิภาพต่ำในการออกซิไดซ์สารหนูเลขออกซิเดชัน+3ให้เป็นสารหนูเลขออกซิเดชัน+5 ส่วนสารประกอบเปอร์แมงกาเนตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเหล็ก (Fe^{2+}) นิยมในการฆ่าเชื้อในน้ำมากกว่าในการออกซิไดซ์สารหนู

1.8.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอน (Precipitation – Coagulation process)

กระบวนการนี้เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันเกิดการจับตัวเป็นก้อนและตกตะกอนจมลง โดยวิธีการนี้สามารถกำจัดสารหนูซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ ด้วยการใช้เกลือของสารประกอบอลูมิเนียม หรือเหล็ก ปูนขาวหรือสารส้ม โดยสารหนูจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับอนุภาคของสารประกอบดังกล่าวแล้วเกิดการตกตะกอน โดยดูดซับประจุไว้ที่ผิว หรือทำปฏิกิริยาและตกตะกอนโดยตรง วิธีนี้ทำให้สารหนูถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับอนุภาคของคอลลอยด์

การโคแอกกูเลชันด้วยเกลือของเหล็กหรือสารส้มนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมทั้งด้านเทคโนโลยีและราคา มีค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ตามอาจมีปัญหาในการกำจัดสลัดจ์ (Sludge)

1.8.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นการใช้สารที่มีอำนาจในการดูดโมเลกุลให้มาติดที่ผิวได้ซึ่งอาจจะเป็นสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก หรือสารอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated silica) และสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange resin) เป็นต้น โดยสารแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน

สารหนูเลขออกซิเดชัน+5 สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับเรซินได้ ทำให้สามารถแยกสารหนูเลขออกซิเดชัน+3 ออกจากเลขออกซิเดชัน+5 ได้ หรือใช้คลอรีนเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจาก +3 เป็น +5 ก่อน แล้วจึงกำจัดด้วยแอ็คติเวตเต็ดคลูมินา ก็สามารถลดปริมาณสารหนูในน้ำได้

นิภา มหารัษฎพงศ์¹⁶ ทำการศึกษาการลดความเข้มข้นของอาร์ซีนิกด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และกระบวนการดูดซับ สามารถลดความเข้มข้นของอาร์ซีนิกในบ่อน้ำตื้นได้จาก 3.72 มิลลิกรัม/ลิตร ลงเหลือ 0.24 มิลลิกรัม / ลิตร สามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้ประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นกรองผ่านถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็ก พบว่าความเข้มข้นลดลงเหลือน้อยกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มเพื่อการอนามัยโลกกำหนดไว้ (<0.05 มิลลิกรัม / ลิตร)

Singh et al.¹⁷ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำโดยใช้เรซินมาไทต์และเฟลด์สปาร์ โดยนำสารตัวอย่างไปเข้าในสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ค่า pH อุณหภูมิและขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับ¹⁸ นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีซิลเวอร์ไดเมทิลไทโอคาร์บอเมต (Silver Dimethylthiocarbamate methods) สามารถลดความเข้มข้นของ อาร์ซีนิกได้ จากความเข้มข้น 13.35 ไมโครโมล สามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้ 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฮีมาไทต์ และ 97 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเฟลด์สปาร์

Hlavay et al.¹⁹ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิก ในน้ำโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ผสมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ จากนั้นทำการเติมไอออน (III) ไฮดรอกไซด์ไปบนผิวของสารทั้งสอง นำสารที่เตรียมได้บรรจุในคอลัมน์ ทำการผ่านสารตัวอย่างไปในคอลัมน์นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีซิลเวอร์ไดเอริลไทโอคาร์บอเมต พบว่าสามารถลดปริมาณอาร์ซีนิกได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Tokunaga et al.²⁰ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้แทนทานัมไฮดรอกไซด์ (Lanthanum hydroxide) แทนทานัมคาร์บอเนต (Lanthanum carbonate) และเบสิกแทนทานัมคาร์บอเนต (Basic Lanthanum carbonate) เป็นตัวดูดซับ นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ Inductively Coupled Plasma Atomic Emission spectrometer (ICP-AES) พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของอาร์ซีนิกได้น้อยกว่า 0.001 มิลลิโมล

Wasay et al.²¹ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำโดยใช้เบสิกอิตเทียมคาร์บอเนต (Basic Yttrium carbonate) โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสม คือ pH ความเข้มข้นของแอนไอออน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา นำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วย ICP-AES ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Manju et al.²² ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำโดยใช้โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยนำสารตัวอย่างเดิมลงไป ในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ pH และ เวลา จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีซิลเวอร์ไดเมธิลคาร์บอเมต พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Pierce and Moore^{23,24} ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำโดยใช้ไฮดรอกไซด์ (Iron Hydroxide) เป็นตัวดูดซับ โดยนำสารละลายตัวอย่างไปแยกตามสภาวะที่เหมาะสม นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย Atomic Absorption spectrophotometer (AAS) พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Bruce and Goldbery²⁵ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้ดินเป็นตัวดูดซับ โดยนำสารตัวอย่างไปแยกตามสภาวะที่เหมาะสม นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High performance Liquid Chromatography-Hydride Generation Atomic Absorption spectrometer (HPLC-HGAAS) พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Raven et al.²⁶ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้เฟอร์ไรไฮไดรต์(Ferrihydrite)เป็นตัวดูดซับ นำสารละลายตัวอย่างเติมลงไปในเฟอร์ไรไฮไดรต์ตามสภาวะที่เหมาะสม นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วย AAS พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Frost and Grittin²⁷ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้แร่คาโอลินไนท์(Kaolinite)และมอนโมลิไนท์(Montmorillonite)มาเป็นตัวดูดซับ โดยทำการปรับสภาพ pH ให้เหมาะสมทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วย AAS พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Elkhatib et al.²⁸ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้ดินมาเป็นตัวดูดซับ โดยใช้ pH ที่เหมาะสม ทำการเขย่านำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ AAS พบว่า สามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้ 80-90 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Lin and Wu²⁹ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้แอคทีเวเต็ดอะลูมินา(Activated Alumina) เป็นตัวดูดซับ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ AAS พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้ 98-100 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Wilkie and Hering³⁰ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำโดยใช้ไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์(Hydrous Ferric Oxide)โดยเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเฟอร์ริกไนเตรดเติมสารตัวอย่างเขย่าในสภาวะที่เหมาะสม กรองนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ AAS พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Vagliasindi and Benjamin³¹ ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin , Ionac ABS-1) นำสารตัวอย่างผ่านเข้าไปในคอลัมน์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม นำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วย ICP-AES ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นเริ่มต้น

Diamadopoulos et al.³² ทำการศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิก โดยใช้ Fly ash โดยนำสารตัวอย่างเติมลงไปใน Fly ash ทำการเขย่าในสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นกรองสารละลายนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีซิลเวอร์ไดเมทิลคาร์บอเมต พบว่าสามารถกำจัดอาร์ซีนิกได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นเริ่มต้น

1.9.4 วิธีการอื่น ๆ ¹⁵

นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการบำบัดสารหนูด้วยกระบวนการใช้แผ่นเยื่อเมมเบรน (Membrane processes) ซึ่งมีทั้งรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) โดยการแยกระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายออกจากกัน โดยผ่านแผ่นเยื่อเมมเบรน นั่นคือ สารหนูจะถูกแยกออกจากน้ำ วิธีนี้ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดแต่มีต้นทุนที่สูงมาก

การบำบัดสารหนูในน้ำสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูเลขออกซิเดชัน+3 และ +5 สามารถสรุปได้ดังตาราง 1.4

ตาราง 1.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน ¹⁵

วิธีการบำบัด	สารหนู เลขออกซิเดชัน-3	สารหนู เลขออกซิเดชัน+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
- Electrodialysis	F - G	G - E
- Chemical Oxidation and Disinfection	P	P
Adsorption		
- Granular Activated Carbon (GAC)	F - G	F - G
- Powder Activated Carbon (PAC)	P - F	P - F
Ion Exchange		
- Anion	G - E	G - E
- Cation	P	P
- Activated Alumina	G - E	E

หมายเหตุ : E = Excellent (ดีมาก)

G = Good (ดี)

F = Fair (พอใช้)

P = Poor (เลว)

1.9 ชนิดของดินและแร่ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาว่าดินและแร่ที่มีในประเทศ จำนวนมากจะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารหนูได้หรือไม่เพียงใด

1.9.1 ดินแดง หรือ ดินลูกรัง (Red clay or Laterite soil)³³

ดินแดงหรือดินลูกรัง เป็นดินธรรมชาติสีแดงที่จัดอยู่ในหมู่ดินตกร้าง พบได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศไทยส่วนใหญ่นำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างถนนต่างๆ มาเป็นเวลานานแล้ว ปัจจุบันได้มีการนำดินลูกรังจากทั่วประเทศมาศึกษา และ สามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้หลายด้าน ได้แก่

ดินลูกรังชนิดที่มีอะลูมินา ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารส้ม ซึ่งนำไปใช้ในการทำให้น้ำตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานต่างๆ หรือ ในโรงผลิตน้ำประปา

ดินลูกรังที่ใช้ก่อสร้าง นำไปผสมกับดินท้องถิ่นและทรายละเอียด โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะได้อิฐก่อสร้างที่มีความทนทานและสวยงาม

ดินลูกรังที่ใช้เป็นเครื่องเคลือบดินเผา หรือ สโตนแวร์ คือผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาที่มีเนื้อแข็งแกร่งดูดซึมน้ำได้น้อย และมีสีต่างๆ มากมาย อาทิ สีเทา เหลือง น้ำตาล และสีแดง โดยนำดินลูกรังไปเป็นส่วนผสมของเครื่องเคลือบดินเผาในอัตราส่วน 50 % เฟลด์สปาร์ 20 % ดินขาว 15 % และหินดินดาน 15 % โดยนำส่วนผสมเหล่านี้ไปผ่านความร้อนที่ 1230 องศาเซลเซียส

1.9.2 ศิลาแลง (Laterite)³³

เป็นดินที่มีสีสนิมเหล็กและมีรูพรุนอยู่ทั่วเนื้อหิน โดยมีองค์ประกอบของสารที่เป็นเหล็กออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ร่วมกัน พบมากในบริเวณที่มีความชื้นและสูงโดยเฉพาะพื้นที่นาข้าวที่มีศิลาแลงฝังตัวอยู่ใต้ดิน หากต้องการจะนำศิลาแลงมาใช้ประโยชน์จะต้องทำการเปิดหน้าดินเสียก่อน จากนั้นจึงใช้เหล็กสกัด หรือ อุปกรณ์ต่างๆ สกัดศิลาแลงมาใช้งาน ซึ่งสภาพศิลาแลงตอนนี้มีความชื้นและเนื้อของศิลาแลงจะไม่แข็งเกินไปนัก จึงจำเป็นต้องนำเอาศิลาแลงที่ได้ไปผึ่งลม ผึ่งแดดให้แห้งเพื่อให้ศิลาแลงแข็งตัวก่อนนำไปใช้งานด้านต่างๆ

1.9.3 ฮีมาไทต์ (Hematite)^{34, 35}

ฮีมาไทต์มีรูปผลึกแบบเฮกซะโกนาลในลักษณะแผ่นบางน้อยๆ ถึงหนามากจนเนื้อเสมานแน่น ชนิดที่บางมากขนาดแผ่นไมกา และมีสีเทาแบบโลหะเหล็ก และมีความแวววับแบบโลหะเรียกสเปคูลาไรต์ (Specularite) ผลึกจะแข็ง 6.5 ถ.พ. 5.3 สีแดงเลือดหมูเข้มจนเกือบดำ หรือเทาแบบเหล็ก สีผงละเอียดสีเลือดหมู ถ้าเนื้อเสมานแน่นจะมีผิวด้านคล้ายดิน ถ้าเป็นผลึกจะวาว

คล้ายโลหะ มีสูตรเคมี Fe_2O_3 ละลายได้ช้าๆ ในกรดเกลือเข้มข้นร้อน มีประโยชน์ที่สำคัญในการถลุงโลหะเหล็ก

1.10 ทฤษฎีการดูดซับ^{36,37}

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) หรือเป็นการลดลงของความเข้มข้นที่พื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbate) สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำ (Lower Surface Free Energy) จะถูกดูดซับได้ ในขณะที่สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ โดยที่พลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (Surface Tension) และพื้นที่ผิว (Surface Area) ดังสมการ (1-1)

$$\Delta G_{\text{ผิว}} = \gamma A \quad \dots\dots\dots(1-1)$$

เมื่อ $G_{\text{ผิว}}$ = พลังงานอิสระที่ผิว
 γ = ความตึงผิว
 A = พื้นที่ผิว

เมื่อความตึงผิวหรือพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงาน $\Delta G_{\text{ผิว}}$

การดูดซับจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารที่จะถูกดูดซับ (Adsorbate) ปริมาณสารที่จะถูกดูดซับขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดัน และขึ้นอยู่กับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็งกับสารดูดซับซึ่งเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน หรือความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

1.10.1 การดูดซับบนพื้นผิวของแข็ง (Adsorption on Solid Surface)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) และการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

1.10.1.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมี ส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้และเป็นการดูดซับที่มีค่าพลังงานศักย์ของอันตรกิริยามาก ทำให้มีค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) สูงประมาณ 50 kJ/mol หรือมากกว่า ซึ่งอยู่ในช่วงพลังงานศักย์ของพันธะเคมี จากการศึกษาทางอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance) และการวัดค่าซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility) สามารถที่จะยืนยันได้ว่า การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้

จริง และมักเกิดเมื่ออุณหภูมิที่สูงกว่า อุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะ

1.10.1.2 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption หรือ Physisorption)³⁸

เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่าและไม่ทำให้โครงสร้างของผิวของ Adsorbent เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการดูดซับ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ การดูดซับทางกายภาพจะไม่เกิดขึ้น หรือ เกิดขึ้นน้อยมาก จึงสามารถทำให้ผิวของตัวดูดซับสะอาดได้และสามารถหาพื้นที่ผิวได้อย่างถูกต้อง การดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะทำให้เกิดการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งสามารถศึกษาได้ทั้งกระบวนการดูดซับและคายออก (Desorption) นอกจากนี้ สารที่ถูกดูดซับสามารถที่จะเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลาย ๆ ชั้น (Multilayer) สามารถเปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพได้ดังตาราง 1.5

ตาราง 1.5 การเปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ³⁹

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนการดูดซับประมาณ 50 kJ/ mol หรือ มากกว่า	ค่าความร้อนการดูดซับประมาณ 20 kJ/ mol หรือ น้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า
ส่วนมากไม่ผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน

1.10.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความดันของแก๊สที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ สำหรับการดูดซับบนผิวของแข็ง ส่วนกรณีการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวของแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลาย ที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งออกได้ดังนี้

1.10.2.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)^{40, 41}

เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งเสนอขึ้นโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 มีสมมติฐานดังนี้ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับ (adsorption sites) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียง 1 โมเลกุลเท่านั้นและในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับแก๊สกับสารดูดซับได้ดังสมการ (1.2)

$$\frac{p}{Y} = \frac{1}{k_1 k_2} + \frac{p}{k_2} \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

เมื่อ p = ความดันย่อยของแก๊ส
 Y = ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับหนัก 1 กรัม
 $k_1 k_2$ = ค่าคงที่

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง p/Y กับ p จะได้กราฟเส้นตรง จุดตัดแกน Y (Y-intercept) เป็น $1/k_1 k_2$ และมีความชัน (slope) เท่ากับ $1/k_2$

สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวของแข็ง แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{C}{Y} = \frac{1}{k W_m} + \frac{C}{W_m} \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

เมื่อ Y = จำนวนโมลของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับบนสารดูดซับหนัก 1 กรัม
 C = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับสมดุล
 W_m = จำนวนโมลของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับที่คลุมผิวแบบชั้นเดียวอิ่มตัว
 k = ค่าคงที่

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง C/Y กับ C จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน Y เป็น $1/k W_m$ และมีความชันเท่ากับ $1/W_m$

1.11.2.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิก (Freundlich isotherm)^{42,43}

ฟรอนด์ลิกได้ศึกษาปรากฏการณ์การดูดซับตัวถูกละลาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์
ดังสมการ

$$\frac{X}{m} = kC^{1/n} \quad \dots\dots\dots(1.4)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับสมบูรณ์แล้ว
 X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
 k, n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น

จากสมการฟรอนด์ลิก เมื่อใส่ลอการิทึมจะได้สมการ

$$\log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(1.5)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรง จุดตัดแกน Y
สามารถนำมาหาค่า k ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารถหา n ได้

ในกรณีที่พลอตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C$ แล้วไม่ได้เส้นตรง แสดงว่าเกิดการ
เบี่ยงเบนไปจากสมการฟรอนด์ลิก เช่น การดูดซับในสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของ
ตัวดูดซับ แต่คำนวณจากตัวถูกดูดซับในตัวทำละลายที่ปริมาณมาก ดังนั้นตัวถูกดูดซับที่เหลือที่
ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

1.10.2.3 สมการบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller Equation)³⁷

สมการบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ หรือเรียกว่า B.E.T equation เป็นการศึกษา
การดูดซับหลายชั้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad \dots\dots\dots(1.6)$$

เมื่อ V = ปริมาตรที่ดูดซับที่ความดัน P ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์
 V_m = ปริมาตรที่ดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียวที่อิ่มตัว
 P = ความดันสมดุลของตัวถูกดูดซับ
 P_0 = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
 C = ค่าคงที่

1.11 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (Purposes of the Study)

เพื่อพัฒนาวิธีการกำจัดอาร์จีนิกที่มีอยู่ในน้ำ โดยใช้วัสดุธรรมชาติ ได้แก่ ดินแดง สีลาแลง และ แร่ฮีมาไทต์ ซึ่งเป็นวัตถุที่มีอยู่ในประเทศไทยจำนวนมากและราคาไม่แพง ทำการตรวจวัดปริมาณสารหนูด้วยเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตเมตรี วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้จะต้องเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสารอาร์จีนิกได้ในเปอร์เซ็นต์สูง และ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยต่ำ