



บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งที่มาของสารหนู

สารหนูเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ พบมากเป็นอันดับที่ 20 ของโลก ประมาณว่าที่เปลือกโลกมีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณ 1.5 - 2.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (NAS 1977, WHO 1981) โดยสะสมตัวอยู่ในแหล่งแร่ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งแร่จำพวกซิลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พลวง เงิน และทอง มักปรากฏในรูปของแร่ประกอบอาร์เซนิกซิลไฟด์หรือซิลไฟโซลต์ แร่ประกอบสารหนู ความธรรมชาติเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ

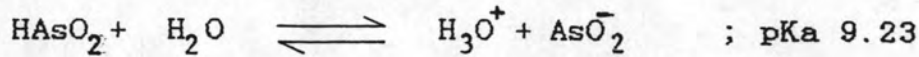
1. แร่ปฐมภูมิที่เกิดภายใต้เปลือกโลก ที่สำคัญได้แก่ อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) และรีอัลการ์ (Realgar, As_4S_4) เป็นต้น
2. แร่ทุติยภูมิ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแร่ปฐมภูมิไปเป็นแร่ชนิดใหม่ ด้วยกระบวนการเติมออกซิเจน แร่สำคัญได้แก่ อาร์เซนไคลต์ (As_2O_3) สโคโรไดต์ (Scorodite, $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เป็นต้น

2.2 สารหนูในสิ่งแวดล้อม

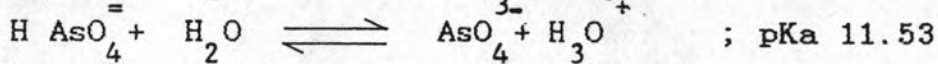
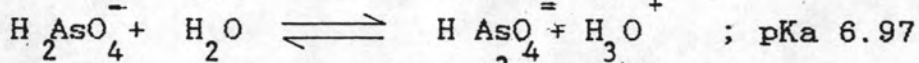
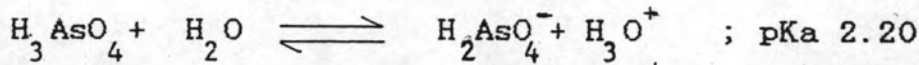
สารหนูที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม จะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ และรูปสารอินทรีย์ (Methylated forms) ส่วนใหญ่จะอยู่ในแร่ธาตุและในน้ำ ในรูปของสารหนูอนินทรีย์ (As (III) และ As (V) acids)

สารหนูอนินทรีย์จะอยู่ในรูป Arsenous acid และ Arsenic acid ซึ่งละลายน้ำได้ และความสามารถในการละลายจะขึ้นกับพีเอชและบางส่วนอาจจะอยู่ในรูปออร์แกนิกสังเคราะห์

Arsenous acid



Arsenic acid



จากสมคูลแสดงให้เห็นว่า สารหนูที่มีได้อยู่ในรูป Complex นั้น ที่พีเอช 4-8 Arsenous acid จะไม่แตกตัว แต่ Arsenic acid เกิดการแตกตัว เป็นหลายรูป

สารหนูอินทรีย์ ในสิ่งแวดล้อม จะเป็นสารประกอบ Methylarsenic ในธรรมชาติตรวจพบหลายชนิด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบ Methylarsenic ในสิ่งแวดล้อม

Name	Formula	Reference
Methylarsenic acid (or salts)	$\text{CH}_3\text{As}(\text{O})(\text{OH})_2$	Braman and Foreback, 1973; Braman et al., 1977; Andreae, 1977
Dimethylarsenic acid	$(\text{CH}_3)_2\text{As}(\text{O})\text{OH}$	Braman and Foreback, 1973; Braman et al., 1977; Andreae, 1977

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Name	Formula	Reference
Trimethylarsine	$(\text{CH}_3)_2\text{As}$	Challenger, 1945; Johnson and Braman, 1977; Braman, 1975
Dimethylarsine	$(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$	Challenger, 1945; Johnson and Braman, 1977; Braman, 1975
Arsenobetaine	$[(\text{CH}_3)_3\text{As}^+\text{CH}_2\text{COO}]$	Edmonds et al., 1977
Arsenocholine	$[(\text{CH}_3)_3\text{As}^+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}]$	Irgolic et al., 1977

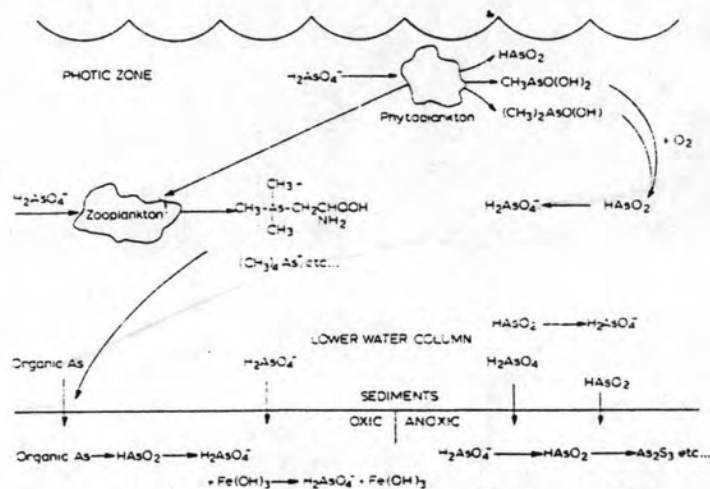
ที่มา : Braman, 1983.

สารประกอบ methylarsenic พบเฉพาะในอากาศบริเวณเหนือพื้นดิน ที่มีสารประกอบสารหนูหลายชนิด เกิดเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันและ biomethylation ในดิน (Johnson and Braman, 1975 a; Braman, 1975, อ้างถึงใน Braman, 1983) แต่โอกาสที่จะพบสารหนูในรูปไอระเหย น้อยมาก เนื่องจากเมื่อเกิดแล้วไอระเหยดังกล่าวจะถูกออกซิไดส์ โดยตัวออกซิแดนต์ ชนิดรุนแรงหลายชนิด เช่น โอโซน, Hydroxy radical, nitrogen oxides และ nitric acid ปฏิกิริยานี้จะเกิดภายในระยะ 2 เมตรเหนือพื้นดิน

สารหนูในดินมีการเปลี่ยนรูปไปได้หลายลักษณะ เช่น สารประกอบ methylarsines เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทาง biomethylation โดยฟังไจ และแบคทีเรีย สารกำจัดวัชพืชชนิด dimethylarsenic acid จะเปลี่ยนแปลงเป็น volatile di-and trimethylarsine ในดินสารหนูบางส่วนจะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของซิลิเกต ส่วน arsenate และ arsenite จะจับกับอิออนโลหะ เช่น เหล็ก กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

2.3 สารหนูในน้ำ

การเปลี่ยนแปลงสารหนูในน้ำแสดง ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสารหนูในน้ำ

ที่มา : Braman, 1983.

สารหนูในน้ำจืด มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงโดย biomethylation ส่วนสารหนูในทะเลจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสารหนูอนินทรีย์ กลายเป็นสารหนูอินทรีย์ โดยที่สารหนูเข้าแทนที่ไนโตรเจน(arsenic-containing biochemicals) จะพบสารหนูในรูป methylate ในน้ำบริเวณที่แสงแดดส่องถึง เกิดเนื่องจากแพลงตอนเปลี่ยนสารหนูไปเป็นสารประกอบ methylarsenic แต่กลไกของการเปลี่ยนแปลงยังไม่ชัดเจน

มีผู้ศึกษาอัตราการเกิด methylation และ demethylation ในน้ำ พบว่าเมื่อใส่ As (III) ในทะเลสาบ สารหนูบางส่วนจะเปลี่ยนแปลงไปเป็น mono- and dimethylarsenic acid ภายในเวลา 3-7 วัน การเปลี่ยนแปลงนี้ เกิดเนื่องจากแบคทีเรียและฟังไจบางชนิด (Challenger, 1945 อ้างถึงใน Braman, 1983)

จากการสำรวจของ Andreae, 1980 (อ้างถึงใน Braman, 1983) พบสารหนูอนินทรีย์ในน้ำฝน ที่เก็บตัวอย่างจากแคลิฟอร์เนีย วอชิงตัน และสวาทซ์ แต่ยังไม่พบสาเหตุของการปนเปื้อน ยกเว้น ตัวอย่างจากวอชิงตัน ซึ่งคาดว่า อาจมาจากโรงงานกลูทองแดง

ในน้ำผิวดิน จะพบได้ทั้งสารหนูในรูป As (III) และ As (V) เนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่มีสภาวะรีดิวซ์และพีเอชเป็นกลาง อาจเกิดปฏิกิริยา oxygenation ของอาร์เซไนต์เป็นอาร์เซเนตอย่างช้าๆ หรืออาจจะเกิดจากการรีดักชันของแบคทีเรียเพื่อเปลี่ยนอาร์เซเนตเป็นอาร์เซไนต์ ในน้ำทะเลจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงประมาณ $8.6 \times 10^{-5} \mu\text{M}$ ของ As (III) oxidized/ลูกบาศก์เดซิเมตร/วัน แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงจะลดลงเมื่อความเค็ม (salinity) ลดลง (Johnson, 1972 อ้างถึงใน Gupta et al., 1978)

2.4 ปริมาณที่ตรวจพบในน้ำและการเกิดโรคพิษสารหนูเรื้อรัง

Bergoglio (1964, อ้างถึงใน Pershagen, 1983) ศึกษาที่ประเทศอาร์เจนตินา พบว่ามีคนตายถึง 565 ราย เนื่องจากการได้รับสารหนูจากน้ำบ่อ ปริมาณที่ตรวจพบมีค่าระหว่าง 0.9-3.4 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร และมีอัตราตายด้วยมะเร็งระบบทางเดินหายใจและระบบทางเดินอาหารสูงถึง 24 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังมีผู้ป่วยอีกเป็นจำนวนมาก ส่วนใหญ่มีอาการผิดปกติทางผิวหนัง

Tseng, 1977 (อ้างถึงใน Pershagen, 1983) สำรวจคุณภาพน้ำบ่อ 114 บ่อ พบว่ามีสารหนูในระดับ 0.01-1.82 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร บ่อส่วนใหญ่มีปริมาณสารหนูในช่วง 0.4-0.6 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร มีรายงานว่า 370 คนเป็นไข้ดำ (Blackfoot disease) และอีก 428 ราย เป็นมะเร็งผิวหนัง

มีผู้ศึกษาที่ โอเรกอน สหรัฐอเมริกา ระหว่างปี ค.ศ. 1968 - 1974 พบว่าในน้ำดื่มของ Lane County มีปริมาณสารหนูเฉลี่ย 0.0086 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปริมาณสูงสุดที่ตรวจพบ เท่ากับ 2.15 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ส่วนน้ำบ่อที่นำมาบริโภคพบว่ามีสารหนู 1.2 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร 2 ใน 3 ของตัวอย่างพบสารหนูอนินทรีย์เท่านั้น ไม่พบสารหนูอินทรีย์ แต่ไม่ได้จำแนกวาเลนซี ส่วนที่เหลือพบทั้งรูปสารหนูอนินทรีย์และสารหนูในรูป dimethylarsenic acid

จากการศึกษาที่ Fairbanks, Alaska (Harrington et al., 1978 อ้างถึงใน Pershagen, 1983) พบสารหนูในน้ำบ่อ มีปริมาณ 1-2.45 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร มีค่าเฉลี่ย 0.224 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ได้ตรวจวิเคราะห์รูปของสารหนูใน 5 ตัวอย่าง พบว่าทั้งหมดเป็นสารหนูอนินทรีย์ และพบสารหนูในรูปอาร์เซไนต์ ระหว่าง 3-39 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูรวมทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปอาร์เซเนต ไม่พบผู้ป่วยที่มีอาการผิดปกติ ผู้ศึกษาได้สรุปว่าอาจเนื่องจากได้รับสารหนูในช่วงเวลาไม่นานนัก (น้อยกว่า 10 ปี)

ที่รัฐท่าห์ สหรัฐอเมริกา (Southwick et al., 1980, อ้างถึงใน Pershagen, 1983) พบว่าในน้ำบ่อ (Culinary well) พบสารหนูมีค่าเฉลี่ย 0.18 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร และ 90 เปอร์เซ็นต์เป็นสารหนูในรูปอาร์เซเนต ส่วนที่เหลืออยู่ในรูปอาร์เซไนต์ แต่ไม่พบสารหนูอินทรีย์ จากการศึกษาค้นการเจ็บป่วย เปรียบเทียบกับพื้นที่ควบคุมพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

แคนาดา ศึกษาโรคจากพิษสารหนูเรื้อรัง ที่ Nova Scotia พบว่า มีสารหนูในปริมาณ 0.05 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปริมาณสูงสุดตรวจพบ 1.4 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร พบผู้ป่วยมีอาการสัมพันธ์กับการได้รับสารหนู

สำหรับประเทศไทย มีรายงานจากการศึกษาทางระบาดวิทยา ในพื้นที่ที่มีผู้ป่วยด้วยโรคสารหนูเป็นพิษเรื้อรัง พบว่าปริมาณสารหนูในบ่อน้ำมีค่าตั้งแต่ น้อยกว่า 0.05 - 4.0 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร (ธาดา เปี่ยมหงส์สานต์, 2531)

2.5 การปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย บริเวณอำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา แถบเทือกเขารอนนา - เขาสรวงจันทร์ เป็นสายแร่ควอทซ์ - ดิบุก - วุลแฟรม - ไพไรต์-อาร์เซโนไพไรต์ ตัดผ่านเข้าไปในหินอัคนีประเภท มีสโคไลท์-ไบโอไทต์ - แกรนิต ขนาดกว้าง 10 - 40 เซนติเมตร เป็นแนวยาวไม่ต่อเนื่องกัน ส่วนใหญ่ยาวประมาณ 10 - 30 เมตร ความลึกเฉลี่ยของการทำเหมืองในบริเวณนี้ประมาณ 10 - 30 เมตร (กรมทรัพยากรธรณี, 2531) เมื่อมีการทำเหมืองในบริเวณนี้ อาจทำให้มีการแพร่สารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากการทำเหมืองแร่จะเกิดการออกซิเดชันของหินซึ่งมีซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ เช่น ไพไรต์ หรืออาร์เซโนไพไรต์ แล้วจะได้กรดซัลฟูริก สารประกอบที่ละลาย เช่น เหล็ก สารหนู มีแนวโน้มที่จะละลายลงสู่หน้าใต้ดินได้ นอกจากนี้ ผิวหน้าของทางแร่ คินหรือหินที่เหลือจากการทำเหมืองอาจเกิดการออกซิไดส์ รวมทั้งอาจมีแบคทีเรียบางชนิด เช่น Sulphur-reducing bacteria ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (transformation) ของสารหนู สู่พื้นดินและน้ำใต้ดินตามลำดับ หรือทางแร่เหล่านี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แต่เมื่อทางแร่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบแพร่กระจายอยู่ที่ผิวคิน จึงทำให้สารหนูบนเปลือกสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน จากการศึกษาที่ Nova Scotia ประเทศแคนาดา พบว่าบ่อบาดาลบางบ่อได้รับสารหนูจากน้ำใต้ดิน ซึ่งปนเปื้อนสารหนูจากการทำเหมืองใต้ดินโดยตรง (Grantham and Jones, 1978)

นอกจาก การทำเหมืองแร่แล้ว สารหนูอาจปนเปื้อนเนื่องจากกิจกรรมอื่นอีก ได้แก่ เป็นสารประกอบของสารเคมีกำจัดแมลง กำจัดวัชพืช กำจัดหนู ปนเปื้อนในปุ๋ยบางชนิด เช่น Calcined phosphate ใช้ประโยชน์ในการอุตสาหกรรม เช่น เป็นสารรักษาคุณภาพเนื้อไม้ หนังสัตว์ ใช้เป็นสารกำจัดสีในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว จากการหลอมหรือเผาไหม้แร่ธาตุที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ เช่น การหลอมทอง เงิน ตะกั่ว การเผาไหม้ของถ่านหิน น้ำมัน เชื้อเพลิง การผลิตเหล็ก เหล็กกล้า และโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในเขตเมือง รวมทั้งการใช้สารหนูเป็นสารประกอบของยารักษาโรค

จะเห็นได้ว่า สารหนูปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายวิธี แต่สำหรับกรณีที่อาเภอร้อนพิบูลย์นั้น เชื่อว่าการทำเหมืองแร่ในบริเวณนี้ มีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการปนเปื้อนสารหนูในสิ่งแวดล้อม แต่ยังไม่อาจจะระบุได้แน่ชัดว่า กระบวนการแพร่กระจายของสารหนู เกิดจากการทำเหมืองและแต่งแร่ในอดีตหรือในปัจจุบัน แต่จากการศึกษาของ Emrich and Merritt (1968) พบว่าการทำเหมืองในสหรัฐอเมริกา นั้น จะทำให้เกิดมลพิษค่อนข้างได้คั้น เมื่อหยุดทำเหมืองแล้ว น้ำใต้คั้นนั้นก็ยังคงมีสารหนูปนเปื้อน บางกรณีอาจใช้เวลาหลายสิบปีกว่าจะนำน้ำใต้คั้นขึ้นมาใช้ใหม่ได้

2.6 กลไกการเกิดพิษสารหนู

การก่อให้เกิดพิษของสารหนูในร่างกายคนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างทางกายภาพและเคมีของสารประกอบ ทางเข้าสู่ร่างกาย ปริมาณและระยะเวลาที่ได้รับ อายุและเพศของผู้ได้รับสารหนู รูปของสารหนู ธาตุหรือสารประกอบอื่น ๆ ที่ได้รับพร้อมกัน

ส่วนใหญ่แล้วสารหนูอนินทรีย์ จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ สารหนูที่มีวาเลนซี 3 จะมีความเป็นพิษมากกว่าวาเลนซี 5 และถ้าอยู่ในรูปสารละลายจะมีความเป็นพิษมากกว่าในรูปของแข็ง (กรมอนามัย, 2531) ดังนี้

สารหนูที่มีวาเลนซี 3 จะมีโอกาสอยู่ในร่างกายนานกว่าวาเลนซี 5 เนื่องจากมีการขับถ่ายได้ช้ากว่า ดังนั้น จึงก่อให้เกิดความเป็นพิษ ได้มากกว่า สารหนูวาเลนซี 5 จากการศึกษาของ Mappes (1977, อ้างถึงใน WHO 1981) ทดลองกับตัวเอง โดยกินสารละลายสารหนูในรูป Arsenic (III) Oxide ทุกวัน วันละ 0.8 มิลลิกรัม พบว่าอัตราการกำจัดสารหนูทางปัสสาวะจะคงที่ภายในเวลา 5 วัน ปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของที่ได้รับในแต่ละวัน และจากการศึกษาของ Crecelius (1977, อ้างถึงใน WHO 1981) พบว่า เมื่อคนได้รับสารหนูจากไวน์ (As (III) 50 ไมโครกรัม และ As (V) 13 ไมโครกรัม) จะขับถ่าย

ออก 80 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 61 ชั่วโมง และจากการคัมน์้ำที่มี As (V) 0.2 มิลลิกรัม จะมีการขับถ่าย 50 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 70 ชั่วโมง หลังจากได้รับสารหนู

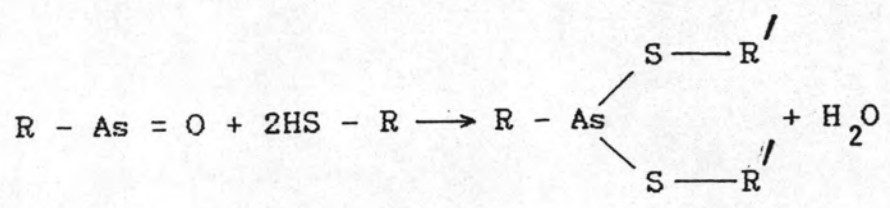
ส่วนสารหนูที่อยู่ในรูปสารละลายจะมีความเป็นพิษมากกว่าในรูปของแข็ง เนื่องจากคูดซิมเข้าสู่ร่างกายได้ดีกว่า จากการศึกษาของ Holland (1904, อ้างถึงใน NAS 1977) พบว่าผู้ที่ได้รับสารหนูในรูปสารละลายปริมาณมาก จะแสดงอาการภายในเวลาประมาณ 8 นาที แต่ถ้าได้รับสารหนูในรูปของแข็ง ซึ่งรับประทานพร้อมอาหารชนิดอื่น จะมีอาการแสดงภายในเวลาประมาณ 10 ชั่วโมง

สารหนูส่วนที่ตกค้างในร่างกาย ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่ผิวหนัง เล็บ ผมและขน เนื่องจากอวัยวะเหล่านี้มีสาร keratin เป็นองค์ประกอบ โดยที่สารหนูจะเข้าทำปฏิกิริยากับ Sulfhydryl group (-SH) ของ keratin ในโปรตีนหรือเอ็นไซม์ในเซลล์ซึ่งจะทำให้กระบวนการก่อให้เกิดพลังงานของเซลล์ผิดปกติไป และรบกวนการสร้างดีเอ็นเอ (DNA) ที่เกี่ยวกับการสร้างเซลล์ใหม่ของร่างกาย โดยขัดขวางการทำงานของเอ็นไซม์ชนิด DNA polymerase ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ เชื่อว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคมะเร็ง (สุจินต์ ผลากรกุล และคณะ, 2531)

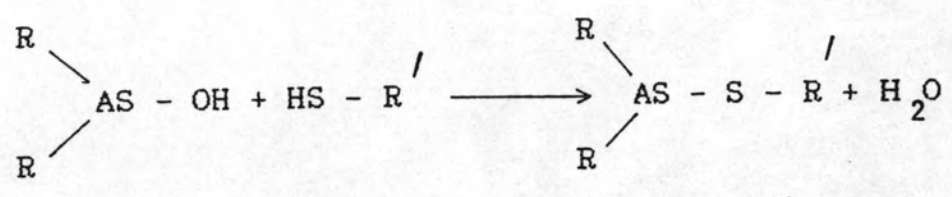
ในสิ่งมีชีวิต As (III) จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า As (V) และในสัตว์ชั้นสูง As (V) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็น As (III) ส่วนในสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ ดังนั้น As (III) จึงมีความเป็นพิษมากกว่า As (V) (Squibb and Fowler, 1983)

พิษของ As (III) เกิดเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับ Sulfhydryl group (-SH) ของเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็น Chemoreceptors ที่สำคัญ ของ As(III) ทั้งนี้ Sulfhydryl group เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์หลายชนิดเช่น Lactase dehydrogenase , Cytochrome Oxidase, Glucose Oxidase เป็นต้น กลไกการเข้าทำปฏิกิริยากับเอ็นไซม์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป โดยที่ As (III) จะทำปฏิกิริยากับ Sulfhydryl group ของเอ็นไซม์โดยตรง หรืออาจทำปฏิกิริยากับ -SH group ของ Substrate หรือ Intermediate substance ของเอ็นไซม์ก็ได้ ดังปฏิกิริยา

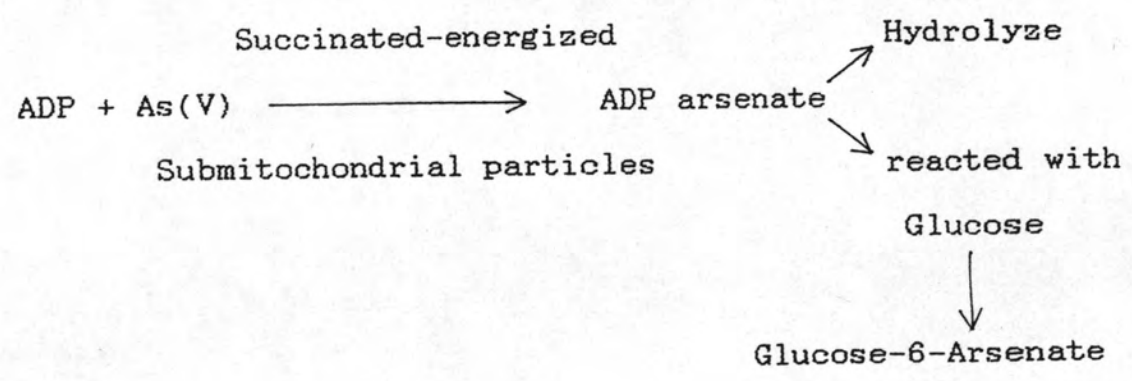
ก. Monosubstituted Arsenical Reaction



ข. Disubstituted Arsenical Reaction



พิษของ As (V) แม้ว่า As (V) บางส่วนจะถูกรีดิวซ์ไปเป็น As (III) แล้ว แต่บางส่วนของ As (V) ที่ยังเหลืออยู่ก็ยังสามารถเกิดพิษได้เช่นกัน ส่วนใหญ่ As (V) จะเข้าแทนที่ฟอสเฟตใน enzyme catalyzed reaction เช่น ในกระบวนการสร้างพลังงานของเซลล์ คังปฏิกิริยา



ผู้ป่วยด้วยพิษสารหนู จะมีอาการแสดง 2 ลักษณะคือ ลักษณะเฉียบพลัน และ ลักษณะเรื้อรัง

1. พิษเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับสารหนูในปริมาณมาก เมื่อได้รับทางปากจะทำลายระบบทางเดินอาหาร เช่น แสบร้อนในปาก ลาคอ คลื่นไส้ อาเจียน ความดันเลือดต่ำ หายใจลำบาก อาจมีอาการไตวาย ชัก หมคสติหรือถึงแก่ความตาย ในเวลาไม่กี่ชั่วโมง มีรายงานถึงปริมาณที่ทำให้คนตาย คือ ถ้าได้รับสารหนู ในรูป As (III) oxide โดยระบบทางเดินอาหารในปริมาณ 70-180 มิลลิกรัม (Vallee et al., 1960, อ้างถึงใน WHO, 1981)

ถ้าได้รับสารหนูปริมาณน้อยประมาณ 3 มิลลิกรัม/วัน เป็นเวลานาน (Mizuta et al., 1956, อ้างถึงใน WHO 1981) มักแสดงอาการภายใน เวลา 1 - 3 สัปดาห์ คือกล้ามเนื้ออ่อนแรง ปวดเมื่อย ชาตามปลายมือปลายเท้า มีส่วนน้อยที่มีอาการแสดงทางผิวหนัง อาจมีตุ่มนูนแดง ตุ่มหนอง เป็นต้น มีรายงานจากประเทศญี่ปุ่นว่าเด็กที่ได้รับนมผงที่มีสารหนูปนเปื้อน 15 - 24 มิลลิกรัม (สารหนู)/กิโลกรัม (นมผง) ร้อยละ 20 จะมีระดับสติปัญญาต่ำกว่าปรกติ

2. พิษเรื้อรัง ภายหลังได้รับสารหนุนาน 2 - 8 สัปดาห์ หรือกรณีได้รับสารหนูปริมาณน้อยเป็นระยะเวลาหลายปี แม้จะไม่ได้รับเพิ่มเติมไปนานแล้วก็ตาม แต่ก็มักจะปรากฏความผิดปกติของผิวหนังและเล็บได้ เช่น ผิวมีสีแดงและเปลี่ยนสีขา ผิวชั้นบนสุดหนาตัวเป็นสะเก็ดที่ผิวหนัง รอยที่มีฝ่ามือ ฝ่าเท้าเป็นตุ่มแข็ง มักพบเมื่อได้รับสารหนูเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ปีครึ่ง บางส่วนอาจกลายเป็นมะเร็งผิวหนัง

ผู้ป่วยที่อาศัยอยู่ในเขตคาบหลร้อนหิบูลย์มีอาการสำคัญที่ปรากฏเด่นชัดว่าเป็นลักษณะของโรคพิษสารหนูเรื้อรัง คือผิวหนังเข้มจนเป็นสีดำเป็นจุดๆ ถ้าเป็นมากจะมีผื่นสีดำเป็นบริเวณกว้าง ที่ฝ่ามือและฝ่าเท้า จะมีผิวหนังหนาขึ้นเป็นหย่อมๆ หรือหนังลอกเป็นแผ่นเล็กๆ มีอยู่ 4 ราย ที่มีอาการของมะเร็งผิวหนัง นอกจากนี้ยังพบอาการอื่น คือน้ำหนักลด อ่อนเพลีย และ เบื่ออาหาร

2.7 การกำจัดสารหนูในน้ำ

วิธีการกำจัดสารหนูในน้ำมีหลักการสำคัญ 5 ประการ ดังรายละเอียดแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกันไป ดังนี้

1. การทำให้เกิดตะกอนกับซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)
2. การตกตะกอนกับโลหะหนักที่มีหลายวาเลนซ์ เช่น อีออนของเหล็ก และอลูมิเนียม
3. การกรองด้วยชั้นกรองถ่านหรืออลูมิน่า (Charcoal or Alumina packed Bed)
4. การดูดซับที่แอคติเวตเตด คาร์บอน หรืออลูมิน่า (Activated Carbon or Alumina)
5. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

1. การเกิดตะกอนกับซัลไฟด์ กำจัดสารหนูในรูป As (V) ได้ แต่กำจัด As (III) ไม่ได้ จากการศึกษาของ Rosehart and Lee (1972) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดน้ำทิ้งจากเหมืองทองที่มีสารหนูในรูป As (V) 132 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร เหลือเพียง 26.4 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร โดยใช้วิธีการตกตะกอนกับซัลไฟด์ ที่พีเอช 7.0 และมีสัดส่วนของซัลไฟด์ : สารหนู = 0.5

2. การตกตะกอนกับโลหะหนักที่มีหลายวาเลนซ์ ส่วนใหญ่จะใช้อีออนของอลูมิเนียม เช่น สารส้ม หรืออีออนของเหล็ก เช่น เพอร์ริสซัลเฟต เพอร์ริคซัลเฟต และเพอร์ริคคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการตกตะกอนด้วยปูนขาว และ การทำให้เกิดการออกซิเคชันก่อนแล้วจึงตกตะกอนด้วยโคแอกกูแลนต์ดั่งที่กล่าวมา พอสรุปได้ดังนี้

: เพอร์ริสซัลเฟต กำจัดสารหนูในรูป As (V) ได้ 62 - 94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสารหนูในรูป As (III) กำจัดได้ 24 - 52 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียดตารางที่ 2.2

: เพอร์ริคซิลเพค กากจัดสารหนูในรูป As (III) ได้ 30 - 48 เปอร์เซ็นต์ และกากจัด As (V) ได้ 46 - 96 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.3

: เพอร์ริคคโลไรด์ กากจัดสารหนูได้ 53 - 98 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.4

: สารส้ม กากจัดสารหนูในรูป As (V) ได้ 14 - 23 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสารหนูในรูป As (III) กากจัดได้ 1 - 95 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.5

: ปูนขาว กากจัดสารหนูในรูป As (V) ได้ 76.8-100 เปอร์เซ็นต์ และกากจัดสารหนูในรูป As (III) ได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.6

นอกจากนี้ ได้มีผู้ศึกษา การออกซิเคชันด้วยสารออกซิแดนต์ก่อน แล้ว จึงทำให้ตกตะกอน โดยการออกซิเคชันด้วยคลอรีน หรือ โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต พบว่าวิธีนี้กากจัดสารหนูได้ดีกว่าการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว และการออกซิไคส์ด้วย คลอรีนจะมีประสิทธิภาพดีกว่า ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.7

3. การกรองด้วยชั้นกรองถ่านหรืออลูมิน่า กากจัดสารหนูได้ 40 - 90 เปอร์เซ็นต์ ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.8

4. การดูดซับที่แอคทิเวตเต็คคาร์บอน หรืออลูมิน่า วิธีนี้กากจัดสารหนูได้ 2 - 50 เปอร์เซ็นต์ กากจัด As(V) ได้ดีกว่า As(III) และเมื่อใช้ Activated Alumina จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.9

5. การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีนี้กากจัดสารหนูได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของ เรซิน ดังรายละเอียด ตารางที่ 2.10

จากการศึกษาเอกสารเกี่ยวกับการกำจัดสารหนูในน้ำ ผู้วิจัยจึงเลือก กระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี เพื่อประยุกต์กับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบ ประปา ทั้งนี้กระบวนการกำจัดสารหนูด้วยวิธีการตกตะกอนนั้นจำเป็นต้องมีการ ควบคุมระบบปรับปรุงคุณภาพเป็นอย่างดี

ตารางที่ 2.2 การตกตะกอนด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulphate)

ผู้ศึกษา/ปี	ปริมาณโคแอกกูแลนต์/ Conditions	รูปของสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Rosehart and Lee, 1972	Fe(II) : As = 1.5, pH8	-	-	-	94
Shen, 1973	20 มก./ลบ.ทม.	-	1.0	0.76	24
Sorg and	33 มก./ลบ.ทม., pH 7	As (III)	23	-	40
Logsdon, 1978	10 มก./ลบ.ทม., pH 8.5	As (III)	0.20	-	52
	30 มก./ลบ.ทม., pH 8.6	As (V)	0.81	-	62

ตารางที่ 2.3 การตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกซัลเฟต (Ferric Sulphate)

ผู้ศึกษา/ปี	ปริมาณโคแอกกูแลนต์/ Condition	รูปของสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Buswell et al., 1943	10 grain per gallon, pH<6	As (V)	25	-	96
Gulledge and O'Connor, 1973*	30 มก./ลบ.คณ., pH 5 - 7	As (V)	0.05	-	> 90
	30 มก./ลบ.คณ., pH 8	As (V)	0.05	-	>95
Sorg and Logsdon, 1978	33 มก./ลบ.คณ., pH 5	As (III)	0.22	-	48
	30 มก./ลบ.คณ., pH 6.4	As (III)	0.19	-	30
	26 มก./ลบ.คณ., pH 8.8	As (V)	0.33	-	46
	25 มก./ลบ.คณ., pH 6.7	As (V)	0.39	-	81
	19 มก./ลบ.คณ. pH 8.4	As (V)	0.50	-	75

* อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

ตารางที่ 2.4 การตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride)

ผู้ศึกษา/ปี	ปริมาณโคเออกูแลนต์/ Conditions	รูปของสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Irukayama., 1964 *	-	-	3.0	0.05	~98
Rosehart and Lee, 1972	Fe(III):As=4.0, pH9	AsO_4^{-3}	-	-	90
	Fe(III):As=4.0, pH8	AsO_2^-	-	-	95
Shen, 1973	10 มก./ลบ.ตม.	-	1.0	0.47	53
	20 มก./ลบ.ตม.	-	1.0	0.18	82
	30 มก./ลบ.ตม.	-	1.0	0.08	92
	40 มก./ลบ.ตม.	-	1.0	0.12	88
	50 มก./ลบ.ตม.	-	1.0	0.10	90

* อ้างตาม Patterson, 1977

ตารางที่ 2.5 การตกตะกอนด้วยสารส้ม (Alum, Aluminum Sulphate)

ผู้ศึกษา/ปี	ปริมาณโคแอกกูแลนต์/ Conditions	รูปของสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Rosehart and Lee, 1972	Al(III):As= 4.0, pH 7-8	AsO_4^{-3}	-	-	90
		AsO_3^{-}	-	-	95
Shen, 1973	20 มก./ล.	-	1.0	0.68	32
Gulledge and O'Connor, 1973	30 มก./ล., pH 5-7	As(V)	-	-	90
	30 มก./ล., pH 8	As(V)	-	-	47
Logsdon et al., 1974 *	30 มก./ล.	As(III)	0.30	-	5-15
Sorg and Logsdon, 1978	27 มก./ล., pH 8.5	As(III)	0.39	-	1
	20 มก./ล., pH 7.5	As(III)	0.47	-	3
	15 มก./ล., pH 6.5	As(III)	0.46	-	8
	26 มก./ล., pH 7.4 (น้ำประปา)	As(V)	0.41	-	56
	26 มก./ล., pH 7.4 (น้ำประปา)	As(V)	0.39	-	31
	24 มก./ล., pH 8.9 (น้ำแม่น้ำ)	As(V)	0.37	-	14
	27 มก./ล., pH 8.1 (น้ำแม่น้ำ)	As(V)	0.17	-	17
สมศักดิ์, 2532	110 มก./ล. pH 7.4	As(V)	1.21	-	93.4
	110 มก./ล. pH 7.4	As(V)	4.58	-	93.0
	120, 140 มก./ล. pH 6.8-6.9 (น้ำธรรมชาติ)	-	1.16	-	95.7

* อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

มก./ล. = มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

ตารางที่ 2.6 การตกตะกอนคัลเซียมออกไซด์ (Lime, Calcium Oxide)

ผู้ศึกษา/ปี	ปริมาณโคแอกกูแลนต์/ Conditions	รูปของสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Magnusen, 1970*	-	-	0.2	0.03	~85
Rosehart and Lee, 1972	Ca(II): As=9.8, pH 12	AsO_4^{3-} , AsO_2^-	-	-	95
Shen, 1973	20มก./ล., pH (น้ำดิบ) 6.8	-	1.0	0.80	20
Logsdon et al., 1974**	pH ≥ 11.1 ความกระด้าง 300 มก./ล. pH ≥ 10.5 ความกระด้าง 300 มก./ล.	As(III) As(V)	- 0.40	-	~80 ~100
สมศักดิ์, 2532	300มก./ล. pH 11.2	As(V)	1.42	-	94.4
	300มก./ล. pH 11.2	As(V)	4.62	-	76.8
	300, 400 มก./ล. (น้ำบอ)	-	1.18	-	95.8

* อ้างตาม Patterson, 1977

** อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

มก./ล. = มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

ตารางที่ 2.7 การออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอน

ผู้ศึกษา/ปี	Conditions	รูปสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Bugwell et al., 1943	$\text{Ca}(\text{HOC1})_2, \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 < 12 \text{ gpg}$	As(III)	25	≤ 5	≥ 80
Shen, 1973	Cl_2 5มก./ล., FeCl_3 50 มก./ล.	-	0.8	0.12	82.5
	Cl_2 10มก./ล., FeCl_3 50 มก./ล.	-	0.8	0.08	90.0
	Cl_2 15มก./ล., FeCl_3 50 มก./ล.	-	0.8	0.05	93.7
	Cl_2 20มก./ล., FeCl_3 50 มก./ล.	-	0.8	0.01	98.7
	Cl_2 30มก./ล., FeCl_3 50 มก./ล.	-	0.8	tr	~ 100
	Cl_2 40มก./ล., FeCl_3 50มก./ล.	-	0.8	tr	~ 100
Shen, 1973	KMnO_4 2มก./ล., FeCl_3 40มก./ล.-	-	-	0.22	72.5
	5 มก./ล., FeCl_3 70มก./ล.-	-	-	0.09	88.8
	5 มก./ล., FeCl_3 100มก./ล.-	-	-	0.04	95.0
	5 มก./ล., FeCl_3 150มก./ล.-	-	-	0.02	97.4
	5 มก./ล., FeCl_3 200มก./ล.-	-	-	0.01	98.7
Logsdon et al., 1974 *	Cl_2 2 มก./ล., Alum 30มก./ล. pH 5 - 7 (น้ำบ่อ)	As(III)	0.3	-	≥ 80
	Cl_2 2 มก./ล., $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 30มก./ล. pH 5 - 7 (น้ำบ่อ)	As(III)	0.3	-	≥ 80

* อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978.

มก./ล. = มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

ตารางที่ 2.8 การกรองด้วยชั้นกรองถ่านหรืออลูมินา

(Charcoal or Alumina packed bed)

ผู้ศึกษา/ปี	Conditions	รูปสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Magnusen, 1970 *	Charcoal Bed	-	0.2	-	70
Bellack, 1971 **	Alumina Packed Bed	-	0.06	0.006	90
Rosehart and Lee, 1972	Activated Carbon	As(III)	0.5-0.3	-	40
Patterson and Minear, 1973 *	Charcoal Packed Bed	-	0.2	-	70

* อ้างตาม Patterson, 1977

** อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

ตารางที่ 2.9 การกักจับด้วยแอกติเวทเค็ดคาร์บอนหรืออลูมินา (Adsorption)

ผู้ศึกษา/ปี	Conditions	รูปสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Logsdon et al., 1974 *	Powdered Activated Carban(PAC) 300 มก./ลบ.คม., pH 6.0 - 8.2 PAC 100 มก./ลบ.คม.	As(III)	0.5	-	<8
		As(V)	0.5	-	<3
Rubel, 1978 *	Activated Alumina (น้ำไตคีน)	-	1.0	< 0.005	-
Gupta and Chen, 1978	Activated Alumina, pH4-9	AS(III)	0.0124	-	6
	Activated Bauxite, pH4-9	As(III)	0.0126	-	2
	Activated Alumina, pH4-7	As(V)	0.0534	-	50
	Activated Bauxite, pH4-7	As(V)	0.0534	-	40
	Activated Carbon, pH3-5	As(V)	0.0264	-	23

* อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

ตารางที่ 2.10 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

ผู้ศึกษา/ปี	ชนิดเรซิน	รูปสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)		ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
			เริ่มต้น	คงเหลือ	
Lee and Rosehart, 1972	Strong - base resin, Weak - base resin	As(III)	100	-	~100
Calmon, 1973	Weak - base resin	As(V)	68*	-	82-100
	Cation resin	As(V)	68	-	0
Shen, 1973	Weak - base resin (น้ำสังเคราะห์)	As(III)	1.06	-	20.7
	Weak - base resin (น้ำธรรมชาติ)	-	0.84	-	100

* อ้างตาม Sorg and Logsdon, 1978

2.8 การตกตะกอน

กระบวนการตกตะกอน มีความสำคัญในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาและน้ำทิ้ง เนื่องจากจะช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ได้ เช่น ความขุ่น สี แบคทีเรีย และสาหร่าย เป็นต้น โดยใช้อิออนของโลหะที่มีหลายวาเลนซ์ เช่น เหล็ก หรืออลูมิเนียม เพื่อทำให้เกิดคอลลอยด์กระจายอยู่ในน้ำแล้วจับกับสิ่งสกปรกต่าง ๆ กลายเป็นกลุ่มฟลอคขนาดใหญ่ ซึ่งต้องกำจัดต่อไป เช่น โดยการกรอง การดันด้วยพองอากาศ เป็นต้น

กลไกการตกตะกอนอธิบายได้ด้วย 2 ทฤษฎีคือ

1. ทฤษฎีฟิสิกส์ (Physical or Double - layer Theory) อธิบายถึงประจุในน้ำที่อยู่รอบอนุภาคคอลลอยด์ในสารละลาย จะมีส่วนช่วยในการตกตะกอน และยังมีผลต่อการดูดซับและการลด Zeta - potential

2. ทฤษฎีเคมี (Chemical Theory) ทฤษฎีนี้อธิบายว่า การตกตะกอนของคอลลอยด์ เป็นผลมาจากการตกตะกอนของ Complex ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมี

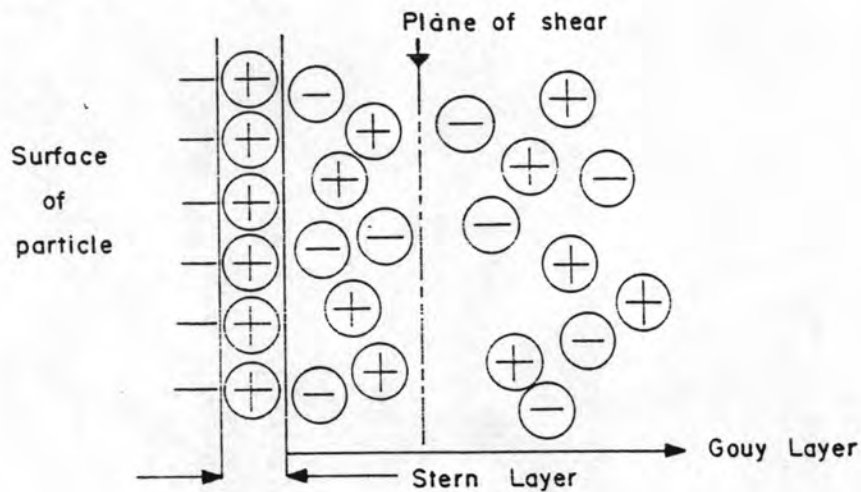
ทั้งสองทฤษฎีมีการอธิบายเพิ่มเติมดังนี้คือ

กลไกทางฟิสิกส์

Electrical Double - layer จะอธิบายการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ารอบๆ อนุภาคที่มีประจุ เมื่ออนุภาคคอลลอยด์อยู่ในสารละลาย จะเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคและน้ำ การเกิดประจุไฟฟ้านี้จะเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

- อนุภาคคอลลอยด์มีกลุ่มที่สามารถแตกตัวเป็นอิออนได้เอง
- เกิดจากการดูดซับอิออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ผิวของคอลลอยด์

เมื่อผิวของคอลลอยด์มีประจุแล้วจะเกิดความไม่สมดุล เพื่อทำให้เกิดความเป็นกลางจึงเกิดการดึงดูดระหว่างอนุภาคใกล้เคียง อธิบายได้โดย Stern - Gouy Double layer ดังรูป



ประจุของผิวอนุภาคจะเกิดเป็นประจุบวกหรือประจุลบ และจะดึงดูดประจุตรงข้าม (counter ions) ให้เข้ามาอยู่ใกล้ตามรูปข้างบน ประจุตรงข้ามที่เข้ามาสัมผัสนั้นจะอยู่ในชั้นที่เรียกว่า Stern layer ประจุเหล่านี้ดึงดูดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่ค่อนข้างเหนียวแน่น เช่น Van Der Waals ส่วนประจุนั้น ๆ ยังคงอยู่ในสารละลาย จะอยู่ในชั้นที่เรียกว่า Gouy-Chapman diffuse layer ความแข็งแรงของแรงดึงดูดเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนทั้งหมดในสารละลาย และเกือบไม่ขึ้นกับขนาดของคอลลอยด์

จาก Stern - Gouy double - layer model นี้จะอธิบายถึงการแพร่กระจายของความต่างศักย์ที่อยู่รอบอนุภาคที่มีประจุ ซึ่งความต่างศักย์ชนิด electrokinetic หรือ Zeta potential จะมีความสำคัญที่สุด และใช้อธิบายถึงคุณลักษณะของ electrokinetic และ Stability ของ คอลลอยด์ได้ โดยที่การตกตะกอนจะเกิดได้เมื่อลด Zeta - potential ซึ่งเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

1. การลด Zeta - potential ซึ่งเรียก double - layer interaction mechanism เกิดโดยการเติมไอออนที่ไม่เกิดการไฮโดรไลซิสลงไป เช่น ไอออนโซเดียม และแคลเซียม จะทำให้ความหนาของ double-layer ลดลง

2. การเกิดการดูดซับของไอออนใกล้เคียงที่ผิวของอนุภาค เรียก Specific surface - interaction phenomena จะทำให้เกิดการลด surface potential ของอนุภาคคอลลอยด์ เกิดขึ้นโดยการที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถเปลี่ยนประจุไฟฟ้าได้ เมื่อมีอนุภาคอื่นซึ่งมีประจุไฟฟ้ามาก และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น อนุภาคที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสของออลูมิเนียมและเหล็ก อนุภาคที่มีการเปลี่ยนประจุได้นี้จะทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง พร้อมทั้งทำให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวและ Zeta potential ของอนุภาคเป็นกลาง

จากการศึกษาต่อไปนี้จะทำให้เกิดการตกตะกอน โดยการเติมออลูมิเนียมและเหล็กลงไป ดังนั้น จึงอาจอธิบายการเกิดการตกตะกอนได้ด้วย Stern - Gouy double - layer model ซึ่งเกิดการลด Zeta potential ด้วยปรากฏการณ์ Specific surface - interaction ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เข้ามาอยู่ใกล้กันมากขึ้น (Singlely et al., 1971)

กลไกทางเคมี

การตกตะกอนนั้นเกิดเนื่องจากการไม่คงตัวของคอลลอยด์ (destabilization) ในสารละลายซึ่งเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง colloid - solvent, coagulant - solvent และ specific coagulant - colloid การตกตะกอนของสารบนเบื่อนั้นเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน (Stumm and Melio, 1968) ดังนี้คือ

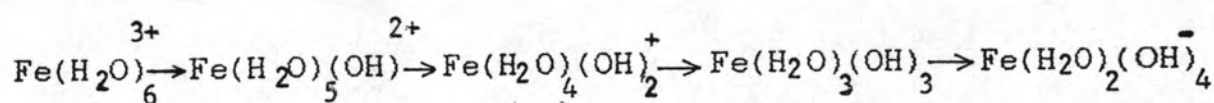
- ขั้นที่ 1 เกิดการไฮโดรไลซิสของออลูมิเนียมที่มีหลายวาเลนซ์ และทำให้เกิด polymerization กลายเป็น multinuclear hydrolysis species
- ขั้นที่ 2 การดูดซับของไอออนที่ไฮโดรไลซ์แล้วที่ผิวของ solid - solution ซึ่งจะทำให้เกิดการไม่คงตัวของคอลลอยด์
- ขั้นที่ 3 การรวมอนุภาคที่ไม่คงตัวเหล่านั้น โดยการเกิด interparticle bridging

- ชั้นที่ 4 การรวมอนุภาคที่ไม่คงตัวโดย particle transport และ van der Waals forces
- ชั้นที่ 5 การ Aging ของตะกอน เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมีของ Me - OH - Me linkage แล้วจะ เปลี่ยน flocculability พร้อมทั้งเกิดการแพร่กระจาย ของ flocculation
- ชั้นที่ 6 การตกตะกอน (precipitation) ของโลหะไฮดรอกไซด์

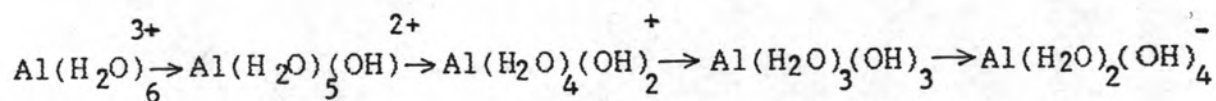
ชั้นก่อนเหล่านี้ บางชั้นก่อน เกิดตามลำดับ บางชั้นก่อนเกิดซ้อนกัน (ชั้นที่ 1 และ 2) บางชั้นก่อนเกิดเมื่อมีสภาวะเหมาะสม (ชั้นที่ 3 และ ชั้นที่ 4 หรือชั้นที่ 6 จะเกิดเมื่อผ่านชั้นที่ 1 - 5 แล้ว)

การเกิดไฮดรอกไซด์ของอออนโลหะที่มีหลายวาเลนซี เช่น อลูมิเนียม และ เหล็ก หมายถึง การที่ไฮดรอกไซด์อออน (OH^-) เข้าไปแทนที่โมเลกุลน้ำใน hydration shell ดังนี้

เหล็ก



อลูมิเนียม



hydrated ion เหล่านี้จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียก hydroxo - metal complex โดยจะมีได้ทั้งประจุบวก ประจุลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงมาถึงขั้นตอนนี้แล้วจะพบว่าในระบบตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย multimeric hydroxo - metal complexes การเกิด hydrolysis species ใดนั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือพีเอช และความเข้มข้นของสารโคออร์ดิเนต

เมื่อเติมเกลือของ Fe (III) หรือ Al (III) ลงในน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น Free aquo - metal ions เมื่อเติมต่อไปจนกระทั่งเกิดการตกตะกอน จะเกิดปฏิกิริยา hydroxidation และ condensation แล้วจะเกิด multimeric hydroxo complex ถ้าอยู่ในสารละลายที่มีพีเอชต่ำกว่าที่โลหะไฮดรอกไซด์จะตกตะกอน (Zero point of charge, ZPC) จะเกิด hydroxo - metal polymers ที่มีประจุบวก แต่ในสารละลายที่มีพีเอชสูงกว่า ZPC จะเกิด hydroxo - metal polymers ที่มีประจุลบ ท้ายสุดจะเกิดโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ แล้วตกตะกอน (Precipitate) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเกิด Polynuclear complexes

เมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการตกตะกอน ทั้งทางด้านพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนโลหะ และระยะเวลา จะพบว่าไอออนโลหะที่เกิดการไฮโดรไลซ์แล้วกลายเป็นมีประจุหลายประเภ่นั้น จะถูกดูดซับกับ particle - water interfaces ได้ดีกว่าไอออนโลหะที่ยังไม่เกิดไฮโดรไลซ์ ด้วยเหตุผลดังนี้

1. hydrolyzed species จะมีขนาดใหญ่ และมีน้ำเป็นส่วนประกอบน้อยกว่า nonhydrolyzed species
2. การดูดซับ (adsorption) จะเกิดได้ดีเมื่อมี Coordinated hydroxide group ดังนั้น hydroxo - metal complexes จะถูกดูดซับได้ที่ผิวของ solid ได้ดี
3. การดูดซับของ poly hydroxo - polymetal species จะเกิดได้ดี เนื่องจากอาจมีกลุ่มของไฮดรอกไซด์มากกว่า 1 ตัวมาจับกับโมเลกุลของแข็งได้

2.9 แนวทางการกำจัดกากตะกอนที่มีสารหนู

จากกระบวนการตกตะกอน เพื่อกำจัดสารหนู โดยใช้โคแอกกูแลนต์ ชนิดต่างวานั้น จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นปริมาณมาก และมีสารหนูความเข้มข้นสูงกว่า น้ำดิบเกิดขึ้นด้วย เพื่อมิให้ออกไซด์เกิดภาวะมลพิษต่อไป จึงมีแนวทางการกำจัดกากตะกอน ดังต่อไปนี้ คือ

1. นากากตะกอนไปกำจัดน้ำออก เช่น โดยการตากตะกอนให้แห้ง แล้วจึงนากากตะกอนแห้งไปทิ้งในหลุมกำจัดขยะ (Sanitary Landfill)
2. นากากตะกอนไปกำจัดน้ำออก อาจจะใช้การตากตะกอนบนชั้นทราย จากนั้นจะนากากตะกอนที่เหลือผสมกับซีเมนต์ เพื่อทำเป็นช่องแข็ง แล้วนำไปฝังต่อไป
3. นากากตะกอนไปกำจัดโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยผสม Fe^{2+} กับ M^{2+} เข้าด้วยกัน จากนั้นปรับพีเอชเป็นด่างและนำไปออกซิไดส์ด้วยอากาศ พีเอช และอุณหภูมิที่เหมาะสม จะ เกิดเป็นตะกอนเฟอร์ไรต์ นำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (สุรภี, 2530)