

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว(Lead :Pb)

2.1.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน (Transition Elements) ในตารางธาตุ (Periodic Table) เป็นธาตุหมู่ 4 A มีเลขอะตอม (Atomic Number) เท่ากับ 82 และน้ำหนักเชิงอะตอม (Atomic Weight) เท่ากับ 207.19 พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ส่วนมากจะอยู่ในรูปของแร่กาลีนา (Galena, PbS) เซอร์ไซต์ (Cerussite, $PbCO_3$) และแองกลีไซต์ (Anglesite, $PbSO_4$) โดยพบอยู่ในหินอัคนีบางชนิด ในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ ตะกั่วเป็นโลหะหนัก มีความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว $327.4^{\circ}C$ และจุดเดือด $1,740^{\circ}C$ ตะกั่วเมื่อบริสุทธิ์จะมีลักษณะด้าน และมีสีเทาแก่ รอยขีดและผิวบนจะเป็นสีเทาฟ้า เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง เป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถตัด รีด และตีได้ง่าย ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่างๆ ได้หลายชนิด สารประกอบตะกั่วส่วนมากไม่ละลายน้ำ โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ไดออกไซด์จะมีสีเทาหรือสีดำ ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ได้ ซึ่งสารประกอบตะกั่วอินทรีย์บางอย่างสามารถละลายน้ำได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.1.2 ประโยชน์ของตะกั่ว

การใช้ตะกั่วในวงการอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารประกอบอินทรีย์ตะกั่ว

1.1 โลหะตะกั่วใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะ นำมาทำเป็นแผ่น หรือท่อโลหะใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน แผ่นกรองในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำลูกปืนจากกันสารกัมมันตรังสี

1.2 ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่

- ตะกั่วมอนอกไซด์ (Lead monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน

- ตะกั่วออกไซด์ (Lead dioxide) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร

- ตะกั่วออกไซด์ หรือตะกั่วทองแดง (Leadred oxide) ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ สีทาโลหะเพื่อกันสนิม เครื่องแก้ว ยาง และเครื่องเคลือบ

1.3 สารประกอบของเกลือตะกั่ว คุณสมบัติมีสีต่างๆ กัน จึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมสี เช่น

- ตะกั่วเหลือง (Lead cromate) ตะกั่วขาว (Lead carbonate) ใช้ในการทำสี
- ตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfat) ใช้ในอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์
- ตะกั่วอะซิเตท (Lead acetate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม

2. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว ได้แก่

- เตตราเอทิลเลด (Tetramethyl lead) และเตตราเมทิลเลด (Tetramethyl lead) โดยใช้เป็น "สารกันน็อก" หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน โดยใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อให้เชื้อเพลิงมีค่าออกเทนสูงขึ้น (สารอนุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 22, 2540)

2.1.3 ผลกระทบต่อสุขภาพอันเนื่องมาจากสารตะกั่ว

2.1.3.1 การดูดซึมของตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ ๓ ทางคือ

1. การดูดซึมจากระบบทางเดินอาหาร แหล่งสำคัญ คือ การปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร น้ำ เครื่องดื่ม ยาสมุนไพรแผนโบราณและภาชนะเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อน พบว่าร้อยละ 70-85 ของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายคนปกติได้จากอาหาร

2. การดูดซึมจากระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาควัน หรือฟุ้งของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น จากการหลอมตะกั่วหรือเชื่อมโลหะ ซึ่งเป็นทางเข้าสู่ร่างกายอันดับแรกของผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสตะกั่ว เช่น คนงานในโรงงานหลอมตะกั่ว แบตเตอรี่ โรงงานผลิตสี เป็นต้น

3. การดูดซึมทางผิวหนัง เกิดเฉพาะตะกั่วอินทรีย์เท่านั้น ผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนังได้แก่ คนงานที่ทำงานในปั้มน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์ เนื่องจากในอุตสาหกรรมน้ำมันมีการเติม เตตราเอทิลเลด (Tetraethyl lead) หรือ เตตราเมทิลเลด (Tetramethyl

lead) ผสมในน้ำมันเบนซิน ดังนั้นเมื่อคนงานถูกน้ำมันหกรดผิวหนัง หรือใช้น้ำมันเบนซินล้างมือ เตตราเอทิลสามารถละลายชั้นไขมันของผิวหนังได้ ตะกั่วจึงสามารถซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกายไปสู่ตับ และจะเปลี่ยนเป็นไตรเอทิลเลด (Triethyl lead) ได้ช้ามาก โดยมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 200 - 350 วัน ตะกั่วจึงสามารถสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นเวลานาน

2.1.3.2 พิษตะกั่วต่อร่างกาย

อาการพิษตะกั่วในผู้ใหญ่

1. อาการทางระบบทางเดินอาหาร พบได้บ่อยในผู้ใหญ่ โดยเริ่มจากมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก บางรายมีอาการท้องเสีย อาการ ที่สำคัญ คือ ปวดท้องอย่างรุนแรงมาก ที่เรียกว่า "โคลิค" เป็นสาเหตุให้ผู้ป่วยมาโรงพยาบาลผู้ป่วยอาจปวดท้องจนคืนตัวงอ โดยอาการปวดท้องนี้อาจทำให้แพทย์วินิจฉัยโรคผิดว่าเป็นอาการปวดท้องเนื่องจากสาเหตุทางศัลยกรรมได้ เช่น ไส้ติ่งอักเสบ นอกจากนี้การดื่มสุรา หรือภาวะเจ็บป่วยอื่นๆ จะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกั่วจากที่เก็บสะสมไว้ออกมาขึ้น นอกจากนี้อาจตรวจพบแนวเส้นตะกั่วบริเวณเหงือก (Lead line) มีลักษณะเป็นเส้นสีน้ำเงิน-ดำ จับอยู่ที่ขอบเหงือกต่อกับฟันห่างจากฟันประมาณ 1 มิลลิเมตร พบ บ่อยบริเวณฟันหน้ากราม และฟันกราม
2. อาการทางระบบประสาทส่วนปลาย ผู้ป่วยจะมีอาการอ่อนแรงของกล้ามเนื้อแขนและขา บางครั้งมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อ และข้อต่อ ต่างๆ ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วปริมาณมากๆ เป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดอัมพาตของกล้ามเนื้อได้ ซึ่งมักจะเกิดกับกล้ามเนื้อที่ใช้เหยียดข้อ มืออ่อนแรง ทำให้เกิดอาการที่เรียกว่า ข้อมือตก หรือข้อเท้าตก การเป็นอัมพาตมักจะไม่ใช่ประสาทความรู้สึกละเอียดส่วนมากมักจะเป็นเฉพาะกล้ามเนื้อข้างใดข้างหนึ่งของแขนหรือขาเท่านั้น และมักจะมีอาการข้างที่ถนัดก่อน
3. อาการทางสมอง เป็นอาการแสดงที่พบว่ารุนแรงที่สุด มักพบในเด็กโตที่ได้รับตะกั่วอนินทรีย์ หรือสูดเอาไอและละอองฝุ่นตะกั่วเข้าไปมาก สำหรับผู้ใหญ่พบได้น้อย โดยมากเกิดจากตะกั่วอนินทรีย์
4. อาการทางโลหิต ผู้ป่วยมักจะมีอาการซีดเลือดจาง อ่อนเพลีย นอกจากอาการดังกล่าวแล้วผู้ป่วยมักมีอาการปวดศีรษะ มึนงง ในรายที่เป็นเรื้อรัง พบว่ามีอาการตัวเหลืองตาเหลือง ได้ด้วย

อาการพิษตะกั่วในเด็ก

1. ระบบประสาท โดยตะกั่วจะทำลายทั้งระบบประสาทส่วนกลาง และระบบประสาทส่วนปลาย ยิ่งอายุน้อยระบบประสาทยิ่งถูกทำลายมาก ดังนั้นในเด็กเล็กจึงเป็นอันตรายอย่างยิ่ง
2. ระบบทางเดินปัสสาวะ ตะกั่วทำลายไตโดยตรง ทำให้เกิดการฟ่อลีบของบริเวณที่กรองปัสสาวะ
3. ระบบเลือดนอกจากจะทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่ายแล้วตะกัวยังขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินทำให้มีอาการซีด โลหิตจางได้
4. พิษต่อหัวใจ ทำให้เกิดกล้ามเนื้อหัวใจอักเสบ
5. ระบบทางเดินอาหาร ทำให้กล้ามเนื้อเรียบมีการเกร็ง เกิดอาการปวดท้องมาก
6. นอกจากนี้ระดับตะกั่วในเลือด ตั้งแต่ 25 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตรขึ้นไป มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ดีเอที ทำให้การทำงานของเอนไซม์ดีเอทีไม่สมอายุ (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 22, 2540)

ซึ่งโดยสรุปอาการแพ้พิษในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ชนิดเฉียบพลัน จะมีอาการปวดท้องคลื่นไส้ อาเจียน บางครั้งมีอาการท้องร่วง มีอาการทางประสาท และกล้ามเนื้ออ่อนเพลีย ปวดเป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขา แสดงอาการของระบบประสาทส่วนกลาง ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หงุดหงิด ความรู้สึกและตายได้ ส่วนอาการชนิดเรื้อรัง มีอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ท้องผูก ซึม กระสับกระส่าย อาเจียนเป็นบางครั้ง พบเส้นตะกั่วสีม่วงคล้ำที่เหงือก โลหิตจาง และมีอาการระบบประสาทเข้าร่วม ซึม ไม่รู้สึกตัว สมอบวม ชัก มือ และเท้าตก เป็นอัมพาต (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.1.4 ทางเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว

การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว เกิดได้ทั้งโดยธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ การระเบิดของภูเขาไฟ และการสึกกร่อนของแหล่งแร่ เป็นสาเหตุหลักของการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วที่เกิดขึ้น โดยธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นรวมกันประมาณ 19,000 ตันต่อปี

การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว จากการกระทำของมนุษย์เกิดขึ้นได้จาก

1. การทำเหมืองแร่ ประมาณร้อยละ 70 ของสินแร่ตะกั่วมักเกิดร่วมกับสังกะสี ดังนั้นการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว จึงเกิดร่วมกับสังกะสีโดยการทำเหมืองแร่ทำให้ตะกั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังทำให้มีการปนเปื้อนในอากาศจากการฟุ้งกระจายของ

ผงแร่ การถูแร่และการทำแร่ให้บริสุทธิ์ ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในน้ำ อากาศ การนำเศษแร่มากองทับถม ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน

2. การผลิตสารประกอบของตะกั่ว หรือการผสมปรุงแต่งผลิตภัณฑ์และการบรรจุที่เกี่ยวข้องกับตะกั่ว ซึ่งโรงงานที่ไม่มีการควบคุมฝุ่นละอองที่ดี จะทำให้ตะกั่วฟุ้งกระจายเข้าสู่บรรยากาศ และถ้าโรงงานไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพดีพอจะทำให้ตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้

3. การเก็บรักษาและการขนส่ง ซึ่งเกิดอุบัติเหตุ เกิดการหกหรือรั่วไหลของตะกั่วออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

4. การใช้ตะกั่วเนื่องจากถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ในทางอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสารประกอบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งสารประกอบตะกั่วหลายชนิดเป็นส่วนประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายในบ้านเรือน เช่น ยาข้อมผม สีทาบ้าน ลูกปืน สารกำจัดแมลง และแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำให้ตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้

5. การจัดการกากของเสียของโรงงาน ซึ่งมีระบบบำบัดที่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติและตะกอนดิน การจัดการกากของเสียที่มีตะกั่วโดยการเผาในเตาเผาที่มีระบบกำจัดอากาศเสียที่ไม่ดีพอทำให้ตะกั่วปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.1.5 การศึกษาเคมี ของตะกั่วในน้ำ

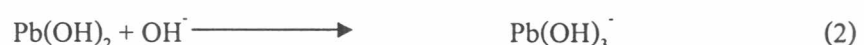
จากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติ หรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ พอจะสรุปได้ว่าการละลายของตะกั่วในน้ำขึ้นอยู่กับพีเอช ความกระด้าง ความเป็นด่าง และสารเคมีในน้ำเสียโดยผลของพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

2.1.5.1 ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช คือที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปของสารละลาย และช่วงพีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (1)



และคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการที่ (2)



2.1.5.2 ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ซึ่งจะทำการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ที่พีเอชช่วงนี้ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปของตะกั่วออกไซด์ ซึ่งไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียม จะมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

2.1.5.3 ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอเนตไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอช และความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน โดยที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปของสารละลาย ที่ช่วงพีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการที่ (3)



ที่ช่วงพีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ (1) หรือ อาจจะตกตะกอนในรูป Basic Lead Carbonate ดังสมการที่ (4)



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ตามสมการที่ (2)

2.1.5.4 ผลของสารอินทรีย์

ความสามารถในการละลายของตะกั่วจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีสารอินทรีย์โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารคีเลตติ้งเอเจนต์ (Chelating Agent) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วได้ ทำให้ความสามารถในการละลายของตะกั่วเพิ่มมากขึ้น (ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์, 2543)

2.2 การกำจัดตะกั่วในน้ำ

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำมีหลายวิธี ซึ่งการพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในหลายๆ ด้าน ดังนี้คือ

1. คุณสมบัติของน้ำก่อนบำบัด
2. คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
3. พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
4. วิธีดำเนินการและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำ
5. ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

ซึ่งวิธีการกำจัดโลหะหนัก มีหลายวิธีที่นำมาใช้ในการกำจัดตะกั่ว ดังต่อไปนี้

2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

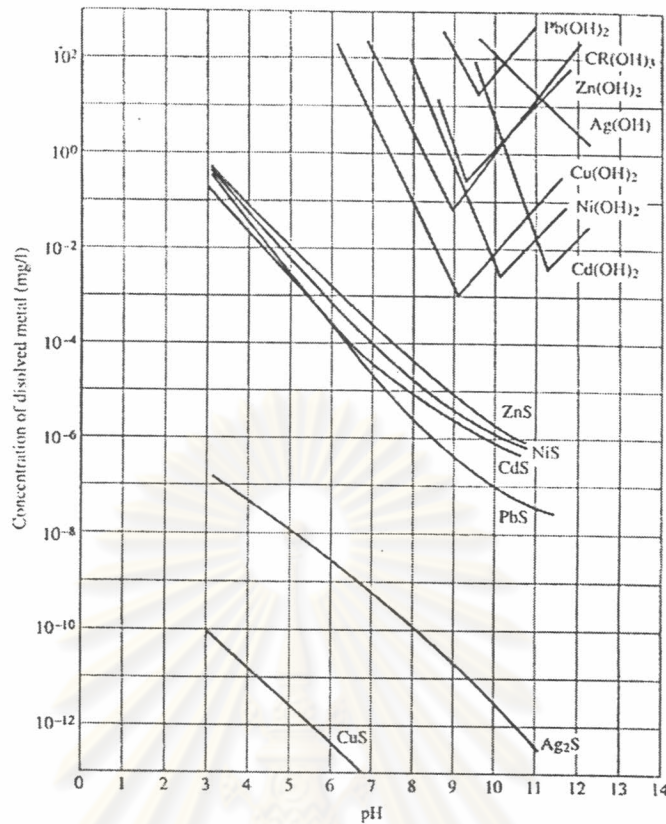
วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้วทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ให้เกิดตะกอนแยกออกได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีแต่นิยมคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

2.2.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั่งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (5) โดยกำหนดให้ M^{2+} คือ โลหะไอออน



โลหะหนักสามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่าง (Amphoteric) และจากผลการทดลองจากชุดเครื่องมือจาร์เทสต์ พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ปกติจะอยู่ในช่วงพีเอช 9-11 ซึ่งสัมพันธ์กับจุดที่เหมาะสมในการตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะชนิดต่างๆ (Eckenfelder, 2000)

2.2.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ส่วนใหญ่ใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) เป็นสารเคมีทำให้ตกตะกอน จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (6) โดยกำหนดให้ M²⁺ คือ โลหะไอออน



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์จะเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดในเรื่องกลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

ในกรณีที่ลักษณะน้ำเสีย เป็นน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนเกินมาตรฐาน (50 ไมโครกรัมต่อลิตร) ซึ่งส่วนใหญ่ความเข้มข้นตะกั่วจะมีปริมาณต่ำ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ดังนั้นจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.1 จะสังเกตได้ว่าการตกตะกอนตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่ำด้วยการตกผลึกไฮดรอกไซด์ค่อนข้างยากในการดำเนินการ ส่วนการตกตะกอนผลึกในรูปของตะกอนซัลไฟด์นั้นมีข้อเสียคือตะกอนที่ได้จะมีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณซัลไฟด์ที่มากเกินไป ซึ่งจะต้องทำการกำจัดต่อไป นอกจากนี้แล้วยังมีข้อเสียของการกำจัดด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีคือ จะต้องมีการเก็บสารเคมีและตกตะกอนขนาดใหญ่พอสมควร และนอกจากนี้แล้วจะต้องทำการจัดการกับตะกอนที่เกิดขึ้นอีกด้วย (Esalah, Weber และ Vera, 2000)

2.2.2 การกรองผ่านเมมเบรน (Membrane Process)

วิธีการนี้เป็นการแยกตะกั่วออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยหลักการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ซึ่งใช้ความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-Permeable Membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น การพิจารณาเลือกวิธีการกำจัดโลหะหนักวิธีนี้ไปใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้องใช้แรงดันสูงมากเนื่องจากโมเลกุลโลหะหนักมีขนาดเล็ก อาจใช้ความดันสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนจึงต้องทนความดันสูง และต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน จึงทำให้ค่าดำเนินการและค่าบำรุงรักษาสูง นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์วิธีกำจัดโดยใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติในการบำบัดขั้นต่ำกว่า เช่น Ultrafiltration และ Microfiltration แต่ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการกำจัดโลหะหนักที่มีขนาดเล็ก จะต้องทำการเพิ่มขนาดของโลหะหนักด้วยการเติมสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นสารเกลือไปในน้ำ เพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะที่ต้องการกำจัดออกและมีขนาดใหญ่ขึ้น จนไม่สามารถลอดผ่านรูเมมเบรนไปได้

2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งได้จากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการบำบัดอีกวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถึงเรซินเพื่อทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นในการบำบัดจึงต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง ซึ่ง

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินนิยมใช้ในการบำบัดน้ำใช้ เพื่อกำจัดความกระด้างมากกว่าที่จะนำมาใช้การกำจัดตะกั่วปนเปื้อนในน้ำธรรมชาติ เนื่องจากปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนมีระดับความเข้มข้นต่ำ เมื่อเทียบกับความกระด้างหรือสารปนเปื้อนอื่นที่อยู่ในน้ำ และนอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดยังขึ้นอยู่กับความชอบของเรซิน เช่น เลือกลับแคลเซียมในน้ำก่อน เป็นต้น ดังนั้นหากนำมาใช้กำจัดจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงหรืออาจกำจัดได้น้อยมาก ส่วนเรซินชนิดที่สามารถกำจัดตะกั่วได้จะเป็นเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นพิเศษสำหรับเลือกลับโลหะหนัก ซึ่งจะสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีเมื่อกำหนดสถานะของน้ำเสียตามคุณสมบัติ และลักษณะการใช้งานของเรซินที่กำหนดไว้ และเรซินชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง นอกจากนี้เมื่อใช้ซ้ำในระยะยาวยังคงมีข้อเสียด้านการบวมตัว ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงจนหมดไปในที่สุด

นอกจากนี้ยังมีหลายวิธีที่มักนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น การสกัดกั้นด้วยไฟฟ้า และการระเหย แต่ในกรณีที่จะกำจัดตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่ำ วิธีเหล่านี้จะไม่เหมาะในการนำมาใช้กำจัดเนื่องจากค่าดำเนินการสูง แต่ทั้งนี้ยังมีอีกวิธีที่สามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการและติดตั้งอุปกรณ์ง่าย คือ การดูดซับ (Adsorption)

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ อาทิ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลของคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งการดูดซับขึ้นอยู่กับพื้นผิวของของแข็ง และความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว

2.3.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งการดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้และยึดติดที่ผิวของแข็ง เป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

การดูดซับทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนจะเป็นผลให้เกิดการคายสารที่ดูดซับ (Desorption)

2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

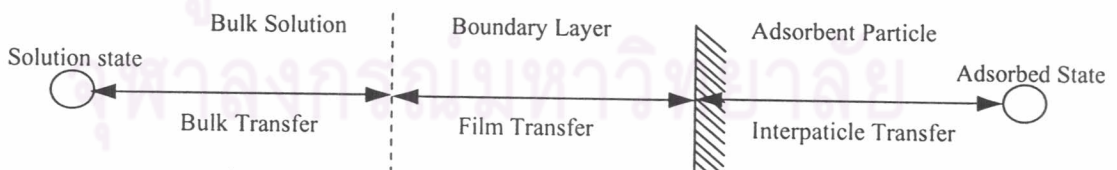
อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน(Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ โดยขั้นตอนการขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวชั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ทีผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน

ภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อยนั้น การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการแพร่สู่รูพรุน (Pore Diffusion) จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน (Eckenfelder, 1989)

2.3.3 ตัวกลางในการดูดซับ

กระบวนการบำบัดน้ำด้วยวิธีการดูดซับหรือดูดซับนั้น มีตัวกลางที่นิยมในการดูดซับหรือดูดซับหลายชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกระชุก โคลโคเซน และวัสดุอนินทรีย์ที่มีพื้นผิวในรูปออกไซด์ต่างๆ เช่น อลูมินา ซิลิกา และเหล็กออกไซด์ต่างๆ เป็นต้น

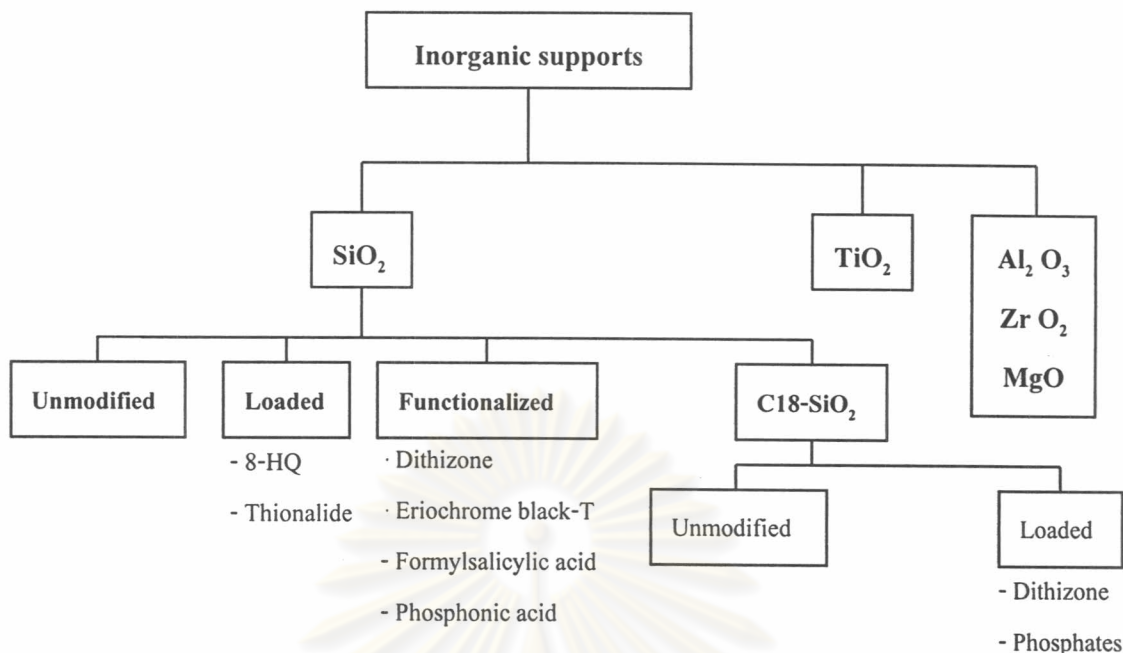
ตารางที่ 2.1 ตัวกลางดูดซับที่นำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

ตัวกลาง	การประยุกต์ใช้	งานวิจัยของ
ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)	<ol style="list-style-type: none"> ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cr^{6+} โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cu^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} และ Pb^{2+} โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกถั่วลิสงเป็นตัวดูดซับ ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} และ Hg^{2+} โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกข้าวเป็นตัวดูดซับ ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cu^{2+}, Cd^{2+}, Co^{2+} และ Pb^{2+} โดยใช้ถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} โดยใช้ถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วย SO_2 	<p>Selvi, Pattabhi และ Kadirvelu (2001)</p> <p>Brown และคณะ (2000)</p> <p>Feng และคณะ (2004)</p> <p>Puziy และคณะ (2004)</p> <p>Macias-Garcia และคณะ (2004)</p>
ถ่านกระดูก (Bone Char)	<ol style="list-style-type: none"> ศึกษาความสามารถในการดูดซับ Cu^{2+}, Zn^{2+} และ Cd^{2+} โดยใช้ถ่านกระดูก ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก 	<p>Ko และคณะ (2004)</p> <p>อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ (2544)</p>
เปลือกออกไซด์	<ol style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดซับผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเปลือกออกไซด์ 	<p>ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์ (2543)</p>
ไคโตแซน (Chitosan)	<ol style="list-style-type: none"> ศึกษาการดูดซับอาร์เซนิตด้วยไคโตแซนแบบเม็ด ศึกษาความแรงไอออนและสารคีเลตที่มีต่อการดูดซับตะกั่วด้วยไคโตแซน 	<p>รามนรี เนตรวิเชียร (2543)</p> <p>ปรีดา นันทพูลทรัพย์ (2544)</p>

อย่างไรก็ตาม การกำจัดโลหะหนักด้วยตัวกลางดูดซับต่างๆ ในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ กลไกในการดูดซับจะเกิดขึ้นช้า ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ และโดยเฉพาะตัวดูดซับที่ไม่มีคุณสมบัติเลือกจับโลหะหนัก เมื่อใช้กำจัดน้ำที่มีโลหะหลายชนิดจะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง

ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาตัวกลางดูดซับให้มีคุณสมบัติในการเลือกจับโลหะหนักชนิดต่างๆอย่างหลากหลาย เพื่อให้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงเรซิน แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของวัสดุรองรับที่ใช้เป็นตัวกลางดูดซับ เช่น โพลีเมอร์ของเรซิน ซึ่งมีข้อเสียคือ จะเกิดการผันกลับการดูดซับสารอินทรีย์ที่นำมาปรับปรุง เกิดการบวมตัว ไวต่อสภาวะแวดล้อมทางเคมีที่เปลี่ยนแปลง ปัญหานี้จึงนำมาสู่การเลือกใช้ตัวกลางดูดซับที่เป็นอนินทรีย์วัตถุแทน ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่เกิดการบวมตัว ดูดซับไอออนโลหะได้เร็ว และกลไกที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะคงตัว ทำให้เลือกจับโลหะหนักได้ดี

Jar, Patel และ Mishra (2004) กล่าวว่าไว้ว่าการพัฒนาปรับปรุงตัวกลางดูดซับ เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือใช้ในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่มีความเข้มข้นต่ำเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารต่ออีก (Preconcentration) นั้นจะใช้หลักการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับวัสดุตัวกลาง ส่วนใหญ่ที่เคยทำกันมา จะประกอบด้วยกระบวนการอิมแพกเนชันเรซินและการสังเคราะห์คีเลตติ้งโพลีเมอร์เรซิน เพื่อนำมาใช้สกัดความเข้มข้นของโลหะออกจากน้ำ โดยสารที่จะนำมาใช้ในการสกัดโลหะหนักหรือกลุ่มของสารคีเลตติ้ง จะถูกนำมาตรึงให้อยู่บนพื้นผิวตัวกลางหรือวัสดุรองรับ โดยการอิมแพกเนตลงบนรูพรุนของโพลีเมอร์ที่เป็นวัสดุรองรับของเรซิน หรือถูกนำมาทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับพื้นผิวโพลีเมอร์ อย่างไรก็ตาม การเลือกพื้นผิววัสดุรองรับให้เหมาะสมกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่นำมาตรึงบนพื้นผิวเพื่อจับโลหะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ขนาด ปฏิกิริยาหรือกลไกของสารที่นำมาปรับปรุงบนพื้นผิว ลักษณะของความเป็นกรดหรือด่าง ซึ่งการเลือกนำหมู่ฟังก์ชันมาตรึงลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโพลีเมอร์ได้อย่างเหมาะสม จะต้องเลือกให้สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะชนิดนั้น และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ในหลายสภาวะ ซึ่งตัวกลางที่เป็นโพลีเมอร์ ยังคงมีข้อเสียเรื่องการบวมตัวและอาจเกิดการผันกลับการดูดซับอินทรีย์สาร ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาหาตัวกลางชนิดอื่นที่ง่ายมาปรับปรุงแทนการใช้โพลีเมอร์ เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับดีขึ้นและเหมาะสมกับการใช้ในการกำจัดต่อไป จึงมีการพัฒนาปรับปรุงตัวดูดซับโดยนำเอาสารคีเลตติ้งเอเจนท์ที่เป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ มาเคลือบลงบนพื้นผิวตัวกลางที่เป็นวัสดุรองรับจำพวกอนินทรีย์ต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติการเลือกจับโลหะได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งตัวกลางที่นิยมใช้กันแพร่หลายคือ ซิลิกาเจล



รูปที่ 2.3 ตัวกลางดูดซับจำพวกอนินทรีย์ที่นิยมนำมาปรับปรุงพื้นผิว (Camel, 2003)

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าซิลิกาเจลเป็นตัวกลางที่นิยมในการนำมาปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากซิลิกาเจลมีข้อดีคือ สามารถใช้กับสารเพิ่มการดูดซับที่นำมาปรับปรุงได้หลากหลาย และไม่เกิดการบวมตัวหรือยัดตัว มีความแข็งแรง เกิดกลไกดูดซับได้ดี และสามารถทนความร้อนได้ดี และในการเพิ่มสารที่เล็ดลงบนซิลิกาเจลทำได้ง่ายและมีความเสถียรหรือคงตัวสูง (Camel, 2003)

ดังนั้น ซิลิกาเจลจึงเป็นตัวกลางที่เหมาะสม ควรแก่การนำมาใช้ปรับปรุงเป็นตัวกลางดูดซับในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำที่มีระดับความเข้มข้นต่ำ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดีขึ้น

2.4 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเป็น โมเลกุลที่ซ้ำๆกันของกรดซิลิซิก (Silicic Acid) ประกอบกันเป็นโครงข่ายของ SiO_4 ที่มีโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอลมีสูตรองค์ประกอบทางเคมีทั่วไปเป็น SiO_2 ซิลิกาเจล (Silica Gels) มีลักษณะเป็นทรงกลมสีขาว มีผิวที่ค่อนข้างขรุขระ มีความพรุนภายในสูง ซึ่งเป็นแกร์ด (Granular) ของซิลิกา สังเคราะห์มาจาก โซเดียมซิลิเกต หรือซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Jar, Patel และ Mishra, 2004)

ซิลิกาเจลใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับได้ดี และมีคุณสมบัติที่ดี ดังนี้

- ไม่เกิดการบวมตัว
- มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง
- ทนต่อตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic Solvents)
- ทนความร้อนได้ดี
- สามารถนำสารมาปรับปรุงพื้นที่ผิวได้หลากหลาย ปรับปรุงได้ง่ายกว่าตัวกลางที่เป็นอินทรีย์สาร

นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระจก หรือแก้วได้อีกด้วย

2.4.1 เคมีพื้นผิวของซิลิกา

ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาเจลโดยทั่วไป จะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ($\equiv \text{Si}-\text{OH}$) การปรับปรุงพื้นผิวบางกรณีจะเปลี่ยนส่วนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล โดยจะเกิดการจับกับหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ใหม่ที่เข้ามาเชื่อมต่อและทำให้มีลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไปเป็นหมู่ซิลอกเซน ($\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv$)

2.4.2 วิธีการปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาเจล

2.4.2.1 การปรับปรุงด้วยวิธีอิมแพกเนชัน (Impregnation)

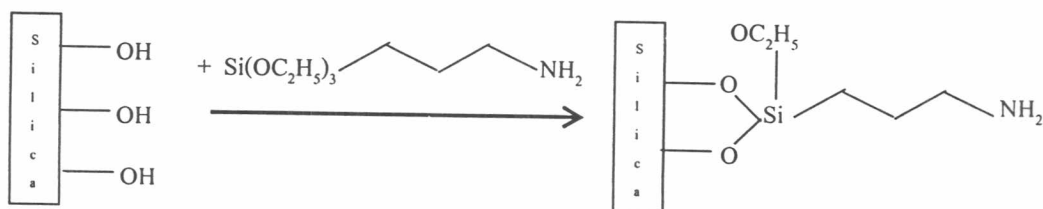
วิธีอิมแพกเนชันตัวดูดซับ เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งเป็นกระบวนการเคลือบผิวระหว่างสารที่นำมาปรับปรุงกับตัวกลางดูดซับโดยตรงด้วยการทำให้เข้าไปอยู่ในรูพรุนภายในวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลาง โดยอาศัยกระบวนการทำให้ติดแน่นบนผิวหรือใช้แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Jar, Patel และ Mishra , 2004)

2.4.2.2 การปรับปรุงด้วยวิธีการเชื่อมต่อดัวยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Grafting)

มีลักษณะของวิธีการเชื่อมต่อดัวยกัน 2 วิธีดังนี้

2.4.2.2-1 การตรึงด้วยสารที่มีหมู่ซิลเลน (Silane Reagent)

เป็นการนำสารที่มีส่วนประกอบของหมู่ซิลเลน มาตรึงบนผิวซิลิกาเจลโดยตรง ซึ่งจะเกิดการเชื่อมต่อระหว่างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่พื้นผิวซิลิกากับสารที่นำมาปรับปรุง ดังที่ได้แสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกระบวนการตรึงด้วยสารหมู่ซิลเลน (Jar, Patel และ Mishra, 2004)

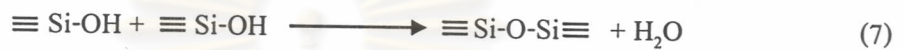
2.4.2.2-2 การปรับปรุงด้วยกระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process)

เป็นการทำให้ผิวซิลิกา เกิดการสร้างพันธะซิลโอเซน(Si-O-Si) บนพื้นผิว ซึ่งกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้สังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์และแก้ว สามารถอธิบายกลไกได้ ก็คือจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตามด้วยปฏิกิริยากอนเดนเซชันโพลิเมอไรเซชันของซิลิกอนอัลคอกไซด์ (Si-O-R) ซึ่งจากหมู่อัลคอกไซด์ (OR) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) จะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโซล-เจล ตามสมการที่ (7), (8) และ (9) ดังนี้

ไฮโดรไลซิส



คอนเดนเซชัน

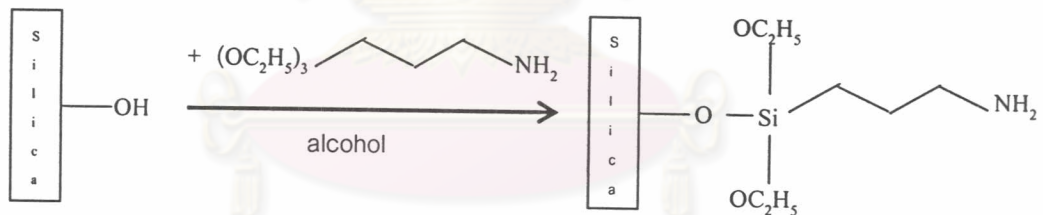


คอนเดนเซชัน



เมื่อ R เป็นหมู่อัลคิล, C_xH_{2x+1}

เนื่องจากน้ำและซิลิกอนอัลคอกไซด์ไม่ละลายเข้ากันจึงนิยมใช้อัลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายร่วมด้วย (วาทีนิ จุลสารพิมล, 2543) ซึ่งสามารถยกตัวอย่างลักษณะการเชื่อมต่อบนผิวซิลิกาเจลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการปรับปรุงด้วยกระบวนการเกิดโซล-เจล (Jar, Patel และ Mishra, 2004)

2.5 สารที่นำมาปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาเจลเพื่อกำจัดโลหะหนัก

การปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาเจลทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีกลไกในการปรับปรุงต่างกันออกไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ปัจจุบันได้มีการนำหลักการของกลไกเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงตัวกลาง และสารที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวก็มีหลายชนิดซึ่งมีทั้งสารที่หาง่าย หรือสารที่ต้องสังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีหลายชนิดเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นการเลือกสารที่จะนำมาปรับปรุงจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติสาร และการนำไปใช้ประโยชน์ กล่าวคือความสามารถของหมู่ฟังก์ชันบนผิวซิลิกาหลังการเคลือบในการเลือกจับโลหะที่ต้องการ ซึ่งการปรับปรุงโดยการเคลือบผิวซิลิกาเจลแบบที่มีขั้นตอนในการเตรียมง่าย ๆ ที่เคยนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ สามารถรวบรวมไว้ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของซัลโฟนาเจลด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ

สารเคมี	การประยุกต์ใช้	งานวิจัยของ
Dithizone	<ol style="list-style-type: none"> นำซัลโฟนาเจลมาเคลือบด้วย Dithizone และหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เช่น Ag^+, Hg^{2+} และ Pb^{2+} ในน้ำเสีย นำซัลโฟนาเจลมาเคลือบด้วย Dithizone และหาความสามารถในการดูดซับ Hg^{2+} ในน้ำเสีย นำซัลโฟนาเจลมาเคลือบด้วย Dithizone และหากลไกการดูดซับ และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการดูดซับ Hg^{2+} 	<p>Zaporozhets, Petruniok และ Sukhan (1999)</p> <p>Mahmoud, Osman และ Amer (2000)</p> <p>Cestari และคณะ (2004)</p>
Eriochrome Black-T	<ol style="list-style-type: none"> นำซัลโฟนาเจลมาเคลือบด้วยสาร Eriochrome Black-T และใช้เป็นตัวกลางในการสกัด Zn^{2+}, Mg^{2+} และ Ca^{2+} ออกจากน้ำ 	Mahmoud (1997)
8-Hydroxyquinoline	<ol style="list-style-type: none"> เตรียมตัวกลางโดยใช้ 8-Hydroxyquinoline ตรึงบนผิวซัลโฟนาเจลเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น (Preconcentration) โดยสกัด Cd^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+} และ Co^{2+} ออกจากน้ำทะเล และชะละลายเอาโลหะที่สกัดมาได้โดยตัวกลางไปตรวจหาปริมาณความเข้มข้นได้ง่ายขึ้น เตรียมตัวกลางโดยใช้ 8-Hydroxyquinoline ตรึงบนผิวซัลโฟนาเจลเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น (Preconcentration) โดยสกัด Cu^{2+}, Pb^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{2+}, Cd^{2+} และ Co^{2+} และชะละลายเอาโลหะที่สกัดมาได้โดยตัวกลางไปตรวจวัดหาปริมาณความเข้มข้นได้ง่ายขึ้น 	<p>Slurgeon และคณะ (1981)</p> <p>Goswami, Singh และ Venkataramani (2003)</p>

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของซลิคาเจลด้วยสารเคมี
ชนิดต่างๆ (ต่อ)

สารเคมี	การประยุกต์ใช้	งานวิจัยของ
Polyethyleneimine	1.นำซลิคาเจลมาทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Polyethyleneimine และศึกษาความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} และ Ni^{2+}	Ghoul, Bacquet และ Morcellet (2003)

จากการศึกษาวิจัยที่รวบรวมไว้ข้างต้น จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวซลิคาเจลได้หลายวิธี ในงานศึกษาวิจัยนี้จะเลือกศึกษาถึงการนำตัวดูดซับที่เป็นซลิคาเจลมาปรับปรุงเพื่อนำมาใช้ในกำจัด ตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงได้พิจารณาสนใจการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้โพลีเอทธิลีนไอมิน เนื่องจากมีขั้นตอนการเตรียมตัวกลางง่ายและสะดวก อีกทั้งยังใช้สารเคมีน้อยชนิดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และในงานวิจัยได้ทดลองใช้ตัวกลางในกำจัดโลหะหนักหลายชนิดพบว่าสามารถกำจัดได้ดี โดยกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด ทั้งสามารถกำจัดโลหะหนักต่างๆ ได้ดีที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อ ลิตร และนอกจากการเตรียมตัวกลางโดยวิธีนี้สามารถใช้น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายได้ ซึ่ง ประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ดังนั้นการเตรียมตัวกลางโดยวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ และในการทดลองจะทำการประยุกต์การเตรียมตัวกลางตามวิธีของ Ghoul, Bacquet และ Morcellet (2003) โดยจะนำกระบวนการอิมแพกเนชันแบบแห้ง (Dry Impregnation) เข้ามาใช้ในขั้นตอน เตรียมตัวกลางด้วย ซึ่งจะอ้างอิงหลักการเตรียมจากขั้นตอนเตรียมตัวกลางซึ่งเป็นการเคลือบ สารละลายโลหะลงบนพื้นผิวอนุภาคนาของ พิชาญ ดันดิชัยปกรณ (2541) เนื่องจากจะเป็นวิธีที่ใช้สาร ในปริมาณน้อยกว่า และสะดวกต่อขั้นตอนการเตรียมเพราะการเตรียมแบบวิธีของ Ghoul, Bacquet และ Morcellet (2003) มีปัญหาเรื่องการควบคุมปริมาณตัวกลางกับสารละลายที่เคลือบให้คงที่ เพราะตัวกลางจะติดอยู่กับภาชนะที่ใช้กวนผสมสารทำให้สูญเสียตัวกลางไปปริมาณหนึ่ง

2.6 โพลีเอทธิลีนไอมิน (Polyethyleneimine หรือ PEI)

โพลีเอทธิลีนไอมิน (Polyethyleneimine หรือ PEI) เป็นสารคีเลตดั้งเอนเจนท์ ที่มีคุณสมบัติ รวมตัวกับไอออนของโลหะเกิดกระบวนการคีเลชันเป็นสารคีเลต ซึ่งเป็นการรวมตัวของกลุ่มธาตุ กับอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง ทำให้เกิด Heterocyclic ring ที่มีลักษณะเหมือนกำมปูยึดเกาะโลหะ เอาไว้ได้ (Molinari, Gallo และ Argurin, 2004)

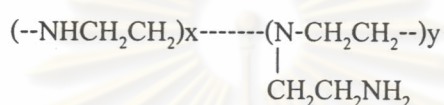
ดังนั้น การใช้สารโพลีเอทธิลีนไอมิน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาพัฒนาเป็นสารดูดซับ ชนิดใหม่ด้วยการรวมคุณสมบัติระหว่างโพลีเอทธิลีนกับซลิคาเจลเพื่อให้ได้ตัวกลางดูดซับที่มี ความสามารถในการดูดซับโลหะได้ดีขึ้น

2.6.1 คุณสมบัติและสูตรโครงสร้างทั่วไปของโพลีเอทิลีนไอมิน

โพลีเอทิลีนไอมินที่ใช้เป็นชนิด Branched chain polymer ซึ่งมีอัตราส่วนของ primary : secondary : tertiary amines เท่ากับ 1 : 2 : 1 ตามลำดับ

2.6.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

1. น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ย 25,000
2. จุดวาบไฟประมาณ 230 °ฟ
3. ความหนาแน่นประมาณ 1.03 กรัม/มิลลิลิตร ที่ 25 °ซ
4. สูตรโครงสร้างทั่วไป

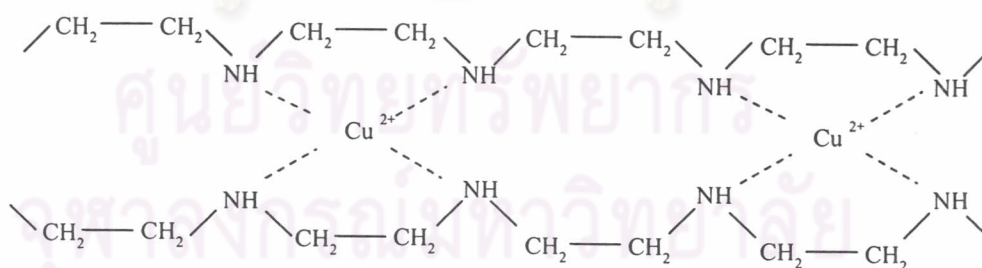


2.6.1.2 การนำมาใช้ประโยชน์

เป็นสารคีเลตติ้งเอเจนต์ สามารถใช้ในงานบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารทำความสะอาด เป็นสารในการตรึง (Fixative Agent) ใช้เป็นสารฟล็อกกูแลนต์ ใช้กำจัดสารที่มีประจุบวกเป็นตัวกระตุ้นพื้นผิว (Surface Activator) เป็นต้น

2.6.2 ตัวอย่างกลไกการเกิดคีเลชันของโพลีเอทิลีนไอมินกับโลหะหนัก

กรณีที่เป็น โพลีเอทิลีนชนิด Linear Polymer ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าหมู่เอมีนจะยึดจับไอออนของโลหะหนักไว้ ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันของเอมีนน่าจะเป็นตัวสำคัญที่จะช่วยให้เกิดการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของโพลีเอทิลีนในการจับตัวกับโลหะหนัก

(Molinari, Gallo และ Argurin, 2004)

2.7 ทบทวนงานวิจัย

Chanda และ Rempel (1995) ทดลองปรับปรุงผิวซิติกาโดยใช้โพลีเอทรีนไอมิน(PEI) เคลือบเป็นชั้นบางๆลงบนผิวซิติกาที่ได้เตรียมเคลือบไอออนของทองแดงเกาะเอาไว้ เพื่อให้โพลีเอทรีนไอมินยึดจับหรือเกิดพันธะกับทองแดง และใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารในการเชื่อมต่อ (Cross-linking agent) ให้โพลีเอทรีนไอมินเชื่อมต่อกัน จากนั้นกำจัดทองแดงออกโดยการล้างด้วยกรด และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับพบว่าผลการปรับปรุงซิติกาด้วยโพลีเอทรีนไอมินและเชื่อมต่อกับกลูตารัลดีไฮด์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมและเหล็ก และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง ออกซิเจนต่อไนโตรเจน(O/N) ของซิติกาเคลือบด้วยโพลีเอทรีนไอมินมีค่าประมาณ 0.7 จะมีความสามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุดประมาณร้อยละ 75 จากการศึกษาดูดซับยูเรเนียมที่ความเข้มข้นช่วง 0.1-0.4 มิลลิโมลต่อลิตร พีเอชประมาณ 4-5 ซิติกาที่เคลือบผิวจะมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าเรซินชนิด Dowex-1X8 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเพียงร้อยละ 49 โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นต่ำ 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร ซิติกาที่เคลือบผิวจะมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าเรซินชนิด Dowex-1X8 มากที่สุด

Gailliez-Degremont และคณะ (1996) ศึกษาลักษณะทางกายภาพ-เคมี ของพื้นผิวซิติกาเจลที่เคลือบด้วยสารพวกโพลีเอมีน โดยเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและคุณสมบัติทางเคมีจากการเคลือบซิติกาเจลหลายชนิดซึ่งมีขนาดของรูพรุนภายในที่แตกต่างกันคือ 1,000 Å และ 100 Å ซึ่งผลการเคลือบพบว่าการเคลือบซิติกาเจลขนาดรูพรุนใหญ่มากเกินไป 1,000 Å มีความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบ ส่วนผลการเคลือบโพลีเมอร์บนโครงสร้างซิติกาเจล ซึ่งได้ทดลองเคลือบทั้งโพลีเมอร์ชนิดโพลี-4-ไวนิลไพรีดีน (P4VP) และ โพลีเอทรีนไอมิน (PEI) พบว่าการดูดซับโพลีเมอร์บนผิวซิติกาเจลทั้งด้านปริมาณและความสม่ำเสมอ จะเกิดดีที่สุดกับซิติกาเจลขนาด 100 Å

Gailliez-Degremont และคณะ (1997) ศึกษาการเตรียมตัวกลางดูดซับโดยใช้สารกลุ่มพวกโพลีเอมีน เช่น โพลีเอทรีนไอมิน (PEI) และโพลี-4-ไวนิลไพรีดีน (P4VP) เคลือบลงบนซิติกาเจล 2 แบบคือที่มีขนาดโพรงภายใน 100 Å และ 1,000 Å ในปริมาณต่างๆ ผลปรากฏว่า ซิติกาเจลขนาด 100 Å มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าซิติกาเจลขนาด 1,000 Å และจากการเคลือบซิติกาเจลด้วย P4VP หมู่ไฮดรอกซิลถูกจับแบบครบสมบูรณ์ ส่วนการเคลือบด้วยโพลีเอทรีนไอมินพบว่ายังมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่างอยู่ และจากการศึกษาพบว่าการเคลือบโพลี-4-ไวนิลไพรีดีน และโพลีเอทรีนไอมินบนซิติกาเกิดโพลีเมอร์ตรึงบนผิวซิติกาขึ้น 2 แบบ คือแบบดูดซับทางเคมี และ ดูดซับทางกายภาพซึ่งการปรับปรุงซิติกาโดยที่โพลีเมอร์ เกิดกระบวนการดูดซับทางเคมีกับผิวซิติกาจะมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ

Delacour และคณะ (1998) ทำการศึกษาทดลองเตรียมตัวดูดซับโดยเคลือบโพลีเอทิลีนไอมินบนซลิกาเจลและทดสอบความสามารถในการดูดซับตะกั่วกับปรอทในน้ำ โดยได้ทดลองแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับมีอัตราการดูดซับได้เร็ว ซึ่งพบว่าการดูดซับปรอทจะเร็วกว่าตะกั่วโดย ใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที ส่วนตะกั่วก็ใช้เวลาดูดซับน้อยกว่า 1 ชั่วโมง และพบว่าการประยุกต์ใช้ในคอลัมน์ จะต้องทำการเชื่อมยึดโพลีเอทิลีนไอมินให้จับอยู่บนซลิกา ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) จะมีความแข็งแรงกว่าการเชื่อมยึดด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (Epichlorhydrin) ซึ่งในการทดลองจะใช้ตัวกลางเดิมดูดซับซ้ำทั้งหมด 3 รอบ และจากการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดแล้วนำมาดูดซับซ้ำอีกทั้ง 2 รอบ พบว่าตัวกลางเดิมยังมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีและประสิทธิภาพคงที่

Beatty และคณะ (1999) ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Co^{2+} โดยใช้ซลิกาที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน(WP-1) กับโพลีสไตรีนทีเลเตอร์เรซิน (ชนิด Amberlite IRC-718) พบว่าภายใต้การทดลองแบบทีละเท IRC-718 มีความสามารถในการกำจัดโลหะได้ดีกว่า WP-1 แต่ภายใต้สภาวะไดนามิกส์หรือทดลองแบบต่อเนื่องพบว่า WP-1 มีความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิดข้างต้นได้ดีกว่า IRC-718 โดยเรียงลำดับความสามารถในการกำจัดได้ดังนี้ Cu^{2+} มากกว่า Co^{2+} และ Ni^{2+} แต่ในกรณีที่ในน้ำมี EDTA ความสามารถในการกำจัด Cu^{2+} ของ WP-1 และ IRC-718 ลดลงประมาณร้อยละ 48 และ 45 ตามลำดับ แม้ว่าประสิทธิภาพของ WP-1 จะลดลงมากกว่า IRC-718 แต่ผลการทดลองกำจัดโลหะในระยะยาวพบว่า WP-1 สามารถรักษาความสามารถในการกำจัด Cu^{2+} ไว้ได้ดีกว่า IRC-718 โดยจากการทดลองกำจัดซ้ำ 3,000 รอบ พบว่า WP-1 ยังคงรักษาความสามารถในการกำจัดได้ร้อยละ 94 ของความสามารถเริ่มต้น ส่วน IRC-718 ความสามารถในการกำจัดลดลงเป็นร้อยละ 64 ของความสามารถเริ่มต้น

Ghoul, Bacquet และ Morcellet (2003) ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก เช่น Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} และ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้ตัวกลางดูดซับที่เป็นซลิกาเจลและปรับปรุงพื้นผิวให้มีประสิทธิภาพการกำจัดมากขึ้นด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน ซึ่งได้เตรียมตัวกลาง 2 ชนิดคือ ซลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินและซลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน ซึ่งมีการเชื่อมยึด (Crosslink) ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เพื่อป้องกันการละลายกลับเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดของซลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมินสูงกว่าซลิกาเจลที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนไอมิน ซึ่งมีการเชื่อมยึด(Crosslink) ด้วยกลูตารัลดีไฮด์ แต่ไม่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับกลับมาใช้อีกได้ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะแบบเป็นตัวดูดซับที่ใช้เติมในส่วนกำจัดโลหะ ซึ่งใช้ในงานท่อน้ำดื่ม ส่วนผลการศึกษาพบว่า

ส่วนใหญ่สามารถกำจัดโลหะ Pb^{2+} ได้มากกว่า Zn^{2+} ได้มากกว่า Cd^{2+} ได้มากกว่า Ni^{2+} ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัด Pb^{2+} มากกว่าร้อยละ 90 โดยเฉลี่ย กำจัด Zn^{2+} มากกว่าร้อยละ 61 โดยเฉลี่ย กำจัด Cd^{2+} มากกว่าร้อยละ 32 โดยเฉลี่ย และกำจัด Ni^{2+} มากกว่าร้อยละ 31 โดยเฉลี่ย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ และความเข้มข้นเริ่มต้น (ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อทำการทดลองฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับซึ่งมีการเชื่อมยึดด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยล้างด้วยกรดไนตริก (ซึ่งเมื่ออิมตัวก็จะฟื้นฟูสภาพและนำตัวกลางดูดซับมาใช้กำจัดซ้ำอีกจนครบ 3 รอบ) พบว่าหลังจากฟื้นฟูสภาพแล้วนำตัวดูดซับมาใช้กำจัดต่อประสิทธิภาพการดูดซับไม่ลดลงจากเดิมมากนัก และจากการศึกษาผลกระทบของปริมาณไอออนบวกชนิดอื่นที่อยู่ในน้ำ เช่น Na^+ และ Ca^{2+} พบว่าไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ และได้ทดลองกำจัดที่ความเข้มข้นต่ำ (1 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับดีเป็นที่ยอมรับ คือ Pb^{2+} (ร้อยละ 79) ได้มากกว่า Zn^{2+} (ร้อยละ 64) ได้มากกว่า Cd^{2+} (ร้อยละ 62) ได้มากกว่า Ni^{2+} (ร้อยละ 23) ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย