

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



แนวคิดและทฤษฎี

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักจะมีอยู่ 68 ธาตุจากธาตุต่าง ๆ ที่ค้นพบในโลกประมาณ 105 ธาตุ โลหะหนักจะมีสภาวะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้นปรอทที่เป็นโลหะหนักชนิดเดียวที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้และสะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญก็คือ มีค่าออกซิเดชันหลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ที่เสถียรเรียกว่า โลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งจะสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมในร่างกายสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท แคดเมียม บางชนิดเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ เช่น เหล็ก บางชนิดเป็นสารอาหารจำเป็นต่อร่างกายที่ปริมาณน้อย ๆ แต่หากเข้าสู่ร่างกายเป็นปริมาณมากจะเป็นอันตราย เช่น ซีลีเนียม โคโรเนียม เป็นต้น แหล่งที่มาของโลหะหนักโดยทั่วไปแล้ว แบ่งออกเป็น 2 แหล่งคือ แหล่งตามธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ ปฏิกิริยาทางชีวเคมีตามธรรมชาติ และแหล่งที่มนุษย์เกี่ยวข้อง เช่น การทำเหมืองแร่ การเผาไหม้ และอุตสาหกรรม

อันตรายจากโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของโลหะนั้น ๆ เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ และรูปแบบของสารประกอบทางเคมี
- ปริมาณที่ได้รับ
- ระยะเวลาที่ได้รับ
- ความแตกต่างของความต้านทานในแต่ละบุคคล

- อายุ
- มาตรการป้องกันในการใช้สารเคมี

ซึ่งโลหะเหล่านี้เมื่อแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม จะเกิดการปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ พืช จากนั้นจะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ไม่ว่าทางร่างกาย ทางผิวหนัง หรือทางการรับประทาน เข้าไป เมื่อโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลต่อเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตผิดไป ทำให้เกิดอาการแพ้ หรืออาจถึงตายได้ ซึ่งอาจปรากฏในรูปอาการเฉียบพลัน หรือเรื้อรังแล้วแต่ปริมาณที่รับเข้าไป และบางส่วนอาจถูกขับถ่ายออกทางปัสสาวะ อุจจาระ หรือเหงื่อ ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยอมให้ได้สำหรับการอุปโภคและบริโภค โดยสถาบัน EPA.

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม น้ำใช้ ,EPA (Laws,1981)

Metal	Chemical Symbol	Maximum Permissible Concentration	
		µg/l	µmole/l
Mercury	Hg	2	0.01
Cadmium	Cd	10	0.09
Selenium	Se	10	0.13
Lead	Pb	50	0.24
Arsenic	As	50	0.67
Manganese	Mn	50	0.91
Chromium	Cr	50	0.96
Iron (As Fe ²⁺)	Fe	300	5.37
Barium	Ba	1000	7.28
Copper	Cu	1000	15.74
Zinc	Zn	5000	76.49

ในปัจจุบันกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งไม่ให้เกินค่าที่กำหนดซึ่งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ได้กำหนดว่า

ปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ไม่มากกว่า 0.2 มก./ลิตร
ปริมาณซีเลเนียมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ไม่มากกว่า 0.02 มก./ลิตร

2.1.1 ตะกั่ว

2.1.1.1 สมบัติโดยทั่วไป

ตะกั่วเป็นธาตุทรานสิชัน (Transition elements) ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Pb มีเลขอะตอมเท่ากับ 82 มวลอะตอมเท่ากับ 207.19 จุดหลอมเหลว 1740 องศาเซลเซียส จุดเดือด 327.5 องศาเซลเซียส พบกระจายอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีหลายไอโซโทป (Isotope) แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียรมีเพียงชนิดเดียวคือ Pb-208 เป็นโลหะหนักสีเทา มีสีผงเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีความอ่อนตัว สามารถดัด รีด หรือตีได้ง่าย เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นโลหะที่ทนทานต่อการกัดกร่อน มีความหลอมละลายในตัวเองขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิด ตะกั่วเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในกรดไนตริกเข้มข้นร้อนและในกรดเกลือ กรดกำมะถันและกรดน้ำส้มที่เข้มข้นเดือด สารประกอบตะกั่วโดยทั่วไปมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ไดออกไซด์จะมีสีเทาหรือสีดำ ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วและสารประกอบแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วและสารประกอบ (George, 1981)

Material	Chemical symbol	At.or Mol.Wt	Sp.gr.	M.P. (°C)	B.P. (°C)	Solubility g/liter
Lead, Metal	Pb	207.19	11.3437	327.5	1740	Insol. cold, hot H ₂ O
Lead acetate	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	325.28	3.25	280	-	44.3(20 °C)
Lead arcenate(ortho)	Pb ₂ (AsO ₄) ₂	899.4	7.80	1042	-	V.so.sol.cold H ₂ O

ตารางที่ 2.2(ต่อ) แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วและสารประกอบ

Material	Chemical symbol	At.or Mol.Wt	Sp.gr.	M.P. (°C)	B.P. (°C)	Solubility g/liter
Lead azide	Pb(N ₃) ₂	291.23	-	-	Explodes at 350	0.023 (18°C)
Lead carbonate	2PbCO ₃ ·Pb(OH) ₂	775.6	6.14	Dec.400	-	44.3(20 °C)
Lead Chloride	PbCl ₂	278.1	5.85	501	950	0.99(20°C)
Lead Chromate	PbCrO ₄	323.18	6.12(15°C)	844	Dec.	0.0000058(25°C)
Lead Molybdate	PbMoO ₄	367.13	6.92(25°C)	1060 -1070	-	Insol.
Lead Nitrate	Pb(NO ₃) ₂	331.2	4.53(20°C)	Dec.470	-	37.65(0°C)

2.1.1.2 การใช้งาน

ตะกั่วเป็นธาตุที่มนุษย์รู้จักและใช้กันมาตั้งแต่โบราณ เพราะมีคุณสมบัติเป็นโลหะอ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และทดแทนต่อการผูกเรือนได้ดีทำให้มีการนำตะกั่วมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น โลหะตะกั่วและตะกั่วไดออกไซด์ในแบตเตอรี่, ปลอกเคเบิล, กระสุนปืน, สารปรับแต่งคุณภาพน้ำมัน, วัสดุดูดซับเสียง, ม่านกันรังสี สำหรับป้องกันกัมมันตรังสี, อุตสาหกรรมสี และหมึกพิมพ์, อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก, โลหะอัลลอยและยาฆ่าแมลง (Webelement.com, 2001 อ้างจาก Mark Winter, 1993)

2.1.1.3 การเข้าสู่ร่างกายและระดับอันตราย

ตะกั่วที่ปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางตรงคือ การที่มนุษย์หรือสัตว์สูดหายใจหรือกินอาหารที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนเข้าไป ส่วนทางอ้อมคือตะกั่ว จะเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกาย ร่างกายจะขับออกมาช้ามาก ส่วนใหญ่จะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงและจะหมุนเวียนอยู่ในกระแสโลหิตและกระจายไปทั่วร่างกาย เข้าสู่เนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตมากที่สุด รองลงมาคือตับ หลังจากนั้นช่วงระยะเวลาหนึ่ง

ก็จะแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่ง โดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายไปอยู่ในเส้นผมและฟัน ระดับอันตรายของตะกั่วที่มีผลต่อมนุษย์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงระดับอันตรายของตะกั่วที่มีผลต่อมนุษย์ (George, 1981)

Test	Normal	Acceptable	Biologic TLV	Excessive	Dangerous
Blood Test	<40 µg/100ml	40-80 µg/100ml	80 µg/100ml	80-120 µg/100ml	>120 µg/100ml
Urinary lead	<80 µg/1000ml	80-150 µg/1000ml	150 µg/1000ml	150-250 µg/1000ml	>250 µg/1000ml
Urinary Coproporphyrin	<150 µg/1000ml	150-500 µg/1000ml	500 µg/1000ml	500-1500 µg/1000ml	>1500 µg/1000ml
Urinary δ-aminolevulinic acid	<0.6 mg/100ml	0.6-2 mg/100ml	2 mg/100ml	2-4 mg/100ml	>4 mg/100ml

ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายหลายระบบดังนี้

- ระบบการสร้างเม็ดเลือด ตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจาง โดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีโม (Hem) หลายชนิดทำให้ระดับฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ลดลง
- ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าได้ง่าย เป็นอัมพาต ข้อมือข้อเท้าตกรึง เวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัว นอนไม่หลับ และอาจเกิดอาการชักได้
- ไต ตะกั่วจะทำลายความเสียหายต่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาล และฟอสเฟตออกมากับปัสสาวะมากกว่าปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วจะรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไต ทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ
- ระบบอื่นๆ ตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจและเส้นเลือด และยังเป็นสารชักนำให้เกิดโรคมะเร็งได้ด้วย

2.1.2 ซีเลเนียม

2.1.2.1 สมบัติโดยทั่วไป

ซีเลเนียมเป็นสารอโลหะ อยู่หมู่เดียวกับกำมะถัน น้ำหนักอะตอม 78.96 จุดหลอมเหลว 221 องศาเซลเซียส จุดเดือด 685 องศาเซลเซียส ซีเลเนียมเตรียมได้ทั้งในรูปอสัณฐานและในรูปผลึก (Crystalline structure) ซีเลเนียมปกติมีการจัดรูปแบบอยู่ 3 แบบ คือเป็นผงสีแดง, ของแข็งสีเทา, ผลึกสีแดง ซีเลเนียมในรูปของ crystalline monoclinic เป็นผลึกสีแดงเข้ม ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรที่สุดในทั้งหมด เรียกโดยทั่วไปว่า Metallic gray selenium ซีเลเนียมบริสุทธิ์ไม่เป็นพิษ และยังเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายตัวหนึ่งด้วย แต่สารประกอบซีเลเนียมจะมีพิษต่อร่างกายอย่างมากเช่นเดียวกับสารหนู (Arsenic) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีเลเนียมและสารประกอบแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของซีเลเนียมและสารประกอบ (George, 1981)

Material	Chemical symbol	At.or Mol.Wt	Sp.gr.	M.P. (°C)	B.P. (°C)	Solubility g/liter
Selenium	Se	78.96	4.3-4.8	217	688	-
Selenium Dioxide	SeO ₂	110.96	3.95	340	-	Readily sol n hot or cold water
Selenium trioxide	SeO ₃	126.96	3.6	-	-	Readily sol n hot or cold water
Sodium Selenite	Na ₂ SeO ₃ ·5H ₂ O	263.04	-	-	-	Freedy sol.in water
Sodium selenate	Na ₂ SeO ₄	188.95	-	-	-	Very sol.in water

2.1.2.2 การใช้งาน

เนื่องจากซีเลเนียมมีคุณสมบัติสามารถเป็นทั้ง Photovoltaic และ Photoconductive เมื่อมีแสงมากระทบ ด้วยคุณสมบัติเด่นข้อนี้ จึงนำซีเลเนียมมาใช้ใน

อุตสาหกรรมผลิตโฟโตเซลล์ (Photocell) หรือที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายว่าเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell), ซีเลเนียมยังสามารถเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จึงนำไปใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า, เป็นสารให้สีสำหรับอุตสาหกรรมแก้วและกระจก, ใช้เป็นสารปรับแต่งคุณภาพสแตนเลส

2.1.2.3 การเข้าสู่ร่างกายและระดับอันตราย

ร่างกายสามารถดูดซึมสารประกอบซีเลไนท์, ซีเลเนท และซีเลไนท์เฟอรัสได้อย่างรวดเร็ว ส่วนอินทรีย์ซีเลเนียมและซีเลไนท์จะดูดซึมได้ช้ากว่า ซีเลเนียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะแพร่เข้าสู่กระแสเลือดโดยจะสะสมอยู่ในตับและไต ร่างกายจะขับซีเลเนียมออกทางปัสสาวะ อุจจาระ เหงื่อและทางลมหายใจ ผลเฉียบพลันของซีเลเนียมต่อร่างกายจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อกล้ามเนื้อ ตาแดง ใจ หากรับเข้าไปเป็นปริมาณมากจะหายใจขัด ปวดศีรษะอย่างรุนแรง และอาจเสียชีวิตได้ ซีเลเนียมสามารถสะสมในร่างกายได้เช่นเดียวกับตะกั่ว หากมีปริมาณมากจะทำให้เกิดการอักเสบของหลอดเลือด กินอาหารลำบาก หายใจขัด เหนื่อยง่าย และทำให้เกิดอาการเกิดมะเร็งสูงกว่าปกติ

2.2 เทคนิคการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียุหลายวิธี การพิจารณาเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัด และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การตกตะกอนโลหะหนักมักจะทำให้เกิดการตกตะกอน ในรูปของคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรตามธรรมชาติ

2.2.1.1 การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

การตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์เป็นวิธีปกติที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ละลายน้ำ กระบวนการนี้จะไปอย่างอัตโนมัติและสามารถควบคุมได้ด้วยเครื่องควบคุมค่าพีเอช โดยการปรับระดับความเป็นกรด-เบส จากสารประเภทเบสทั่ว ๆ ไป เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ ให้เกิดเป็นรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่

ละลายน้ำ สมการที่ (2.1) จะอธิบายถึงปฏิกิริยาที่ทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และตกตะกอน



การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric Property) คือจะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชกว้าง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์จะสามารถละลายกลับมาได้อีก ถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

2.2.1.2 การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตมักใช้โซเดียมคาร์บอเนตในการตกตะกอน ข้อเสียของการตกตะกอนแบบนี้คือจะมีปริมาณสลัดจ์เกิดขึ้นมากกว่าการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ แต่โดยส่วนใหญ่โลหะหนักส่วนมากจะตกตะกอนรูปคาร์บอเนตที่พีเอชต่ำกว่า การตกตะกอนรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ตัวอย่างเช่น ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตที่พีเอชประมาณ 7.8-8.5 แต่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ต้องใช้พีเอชมากกว่า 10 สมการที่ 2.2 อธิบายการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตมาใช้ในการอธิบาย โดย M จะเป็นโลหะที่มีประจุ +2



สำหรับกระบวนการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตนี้มักจะไม่มีประสิทธิภาพสำหรับโลหะหนักทุกตัว จากการทดลองโดย Patterson (1987) กล่าวไว้ว่า ไม่สามารถที่จะเพิ่มคุณภาพของน้ำที่ออกจากกระบวนการตกตะกอนในรูปของโลหะหนักเกิดและสังกะสีได้

2.2.1.3 การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ มักใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) , โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($NaHS$) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) 10 สมการที่ 2.3 อธิบายการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์มาใช้ในการอธิบาย โดย M จะเป็นโลหะที่มีประจุ +2



ข้อดีของการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือ กลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากอิออนของซัลไฟด์มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.2.2 การระเหย (Evaporation)

เป็นการใช้ความร้อนทำให้น้ำระเหยออกไป ทำให้น้ำเสียมีความเข้มข้นมากขึ้น หรือกลายเป็นตะกอน การระเหยมีทั้งกระทำที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และกระทำภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักมาก เป็นวิธีง่ายต่อการควบคุม แต่ต้องลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง

2.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบ หรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้ เป็นไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้า การแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออน เอกเชนเจอร์ (Cation Exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออน เอกเชนเจอร์ (Anion Exchanger) วิธีการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

2.2.4 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออก

ก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ใช้ความดันสูงประมาณ 20-30 บาร์ ส่วนระบบบำบัดอีกระบบที่คล้ายกับระบบออสโมซิสย้อนกลับคือ ระบบกรองอัลตรา(Ultrafiltration) จะใช้เมมเบรนที่มีรูขนาดใหญ่กว่า จึงใช้แรงดันน้อยกว่า คือประมาณ 1-9 บาร์ เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับแยกโมเลกุลที่มีขนาดต่างกัน น้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีความบริสุทธิ์น้อยกว่า น้ำที่ผ่านระบบออสโมซิสย้อนกลับ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เพื่อบำบัดขั้นต้น

2.2.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากน้ำเสียโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด(Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีนี้ เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนในการก่อสร้างและการดำเนินงานที่สูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.2.6 การสกัดกลับด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลาย ให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งปัจจุบันไม่นิยมใช้ เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานสูงมาก และมีค่าการดำเนินงานสูง

2.2.7 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

วิธีนี้จะเกิดโดยโลหะหนักในน้ำเสียจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน กับสารเคมีที่เติมเข้าไป ทำให้เปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์มังกาเนต โครเมตและไนเตรท ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชันได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.2.8 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

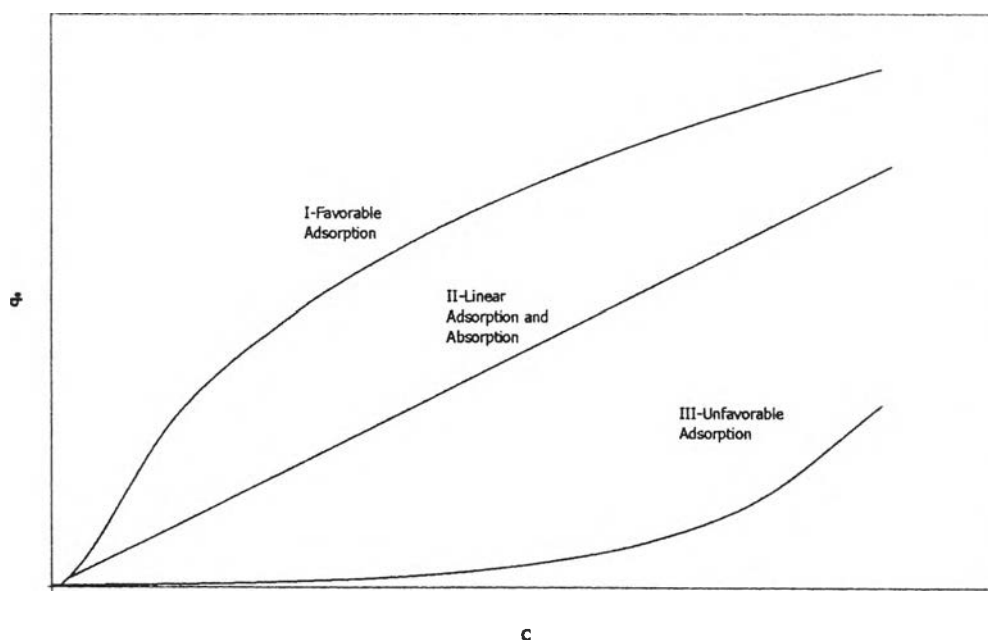
วิธีนี้จะใช้ตัวทำละลาย ซึ่งสามารถละลายโลหะหนักออกมาได้ดี แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสูง

2.2.9 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลทินของสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โโลหะหนักจะถูกจับไว้ในรูพรุนของสารดูดซับ(Adsorbent) สารดูดติดผิวที่นิยมใช้คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด รูพรุนหรือโพรง จะมีขนาดตั้งแต่ 20 Å ถึง 20,000 Å กระบวนการนี้เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำ

2.3 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็ง ที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ สารถูกดูดซับ จะเรียกว่าสารดูดซับ(Adsorbent) รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายโมเลกุลของสารระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนตั้ง หมายถึงความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็ง และ q_s บนแกนนอนจะหมายถึงจำนวนของสารที่ดูดติดบนผิวของของแข็ง



รูปที่ 2.1 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง (Weber,1972)

เส้นโค้ง I และ III แสดงการดูดติดผิวโดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งที่ I แสดงรูปแบบการดูดติดผิวที่ดี (Favorable) และเส้นโค้งที่ III แสดงรูปแบบการดูดติดผิวที่ไม่ดี (Unfavorable) เส้นโค้งที่ 2 แสดงรูปแบบการดูดติดผิวแบบเส้นตรง จะเกิดเมื่อความเข้มข้นของสารบนผิวของของแข็ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว

การดูดติดผิวโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ ได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ ทางเคมี และการแลกเปลี่ยนประจุ

การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล หรือที่เรียกกันว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ในที่นี้การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติด ในจุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิว แต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลาย ๆ ชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพโดยทั่วไปสามารถเกิดย้อนกลับได้ นั่นคือ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย

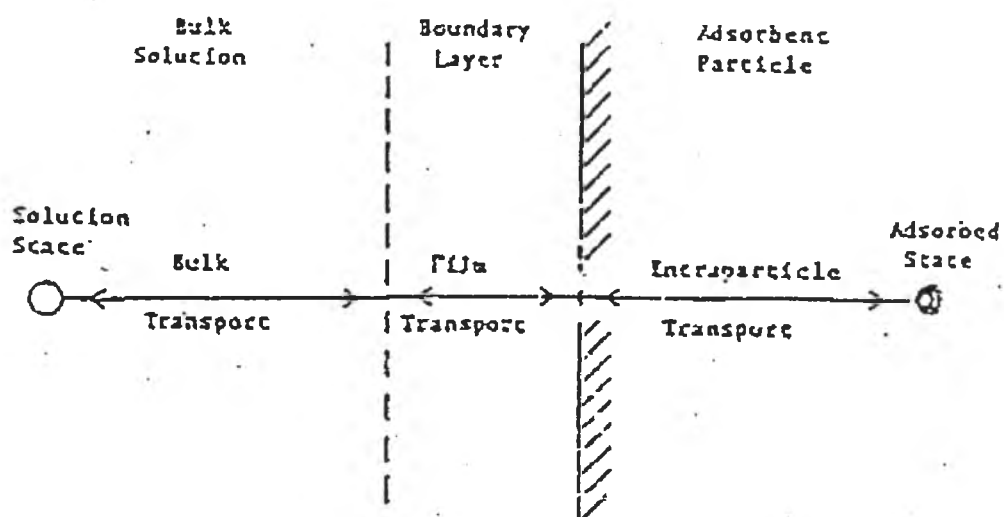
การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อกำเนิดบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน

การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุก็จะรวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสารปนเปื้อนจะสะสมบนพื้นผิว โดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่นมีประจุสาม จะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจน้อยกว่า เช่นไอออนประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ก็จะมีขีดความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะทราบว่า การดูดติดผิวมีรูปแบบที่สำคัญอยู่สามรูปแบบ แต่ก็เป็นการยากที่จะชี้เฉพาะเจาะจงไปว่า การดูดติดผิวเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในสามรูปแบบนี้

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) หรืออัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติด

ผิวจะถูกควบคุมโดยชั้นที่มีความต้านมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งชั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ชั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมีอยู่ 3 ชั้นตอนคือ

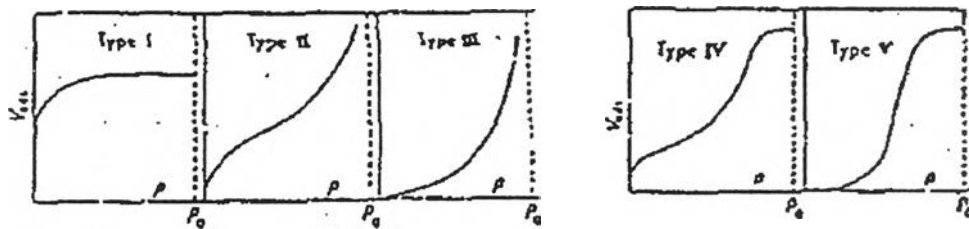
- การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นชั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกขับ จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลว บาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
- การขนส่งชั้นฟิล์ม(Film Transport) เป็นชั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการ ที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวชั้นตอนหนึ่ง
- การขนส่งผ่านอนุภาค(Interspace Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายใน ชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวชั้นตอนหนึ่งเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว (Eckenfelder, 1989)

สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

กล่าวคือเมื่อมีการดูดติดผิวบนพื้นผิวของของแข็งขึ้น ในขณะที่เดียวกันตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวก็จะมีหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการดูดติดผิวและอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium State) จะเรียกสภาวะนี้ว่าสมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลาย บนผิวสารดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ และอื่น ๆ โดยปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในการละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดติดผิวและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบแสดงดังรูป 2.3 ซึ่งไอโซเทอมรูปที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (Faust and Aly, 1987)

มีการนำสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายข้อมูลการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและจากการทดลองมีดังนี้

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีสมมุติฐานของแบบจำลองดังนี้

1. โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บนผิวบริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

$$X = (X_m B C_0) / (1 + b C_0) \quad (2.4)$$

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนัก ของสารดูดซับ (mg/g, mole/g)

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนัก ของสารดูดซับที่ต้องการในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (mg/g, mole/g)

C_0 = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (mg/l, mole/l)

B = ค่าคงที่พลังงานในการดูดติดผิว

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที (BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบบีอีทีพัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ มาใช้สำหรับการดูดติดผิว แบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานของแบบจำลองคือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรก จะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อ ๆ ไป สมการการดูดติดผิว แบบบีอีทีแสดงดังสมการที่ 2.5

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) \{ 1 + (B-1) C_e / C_s \} \quad (2.5)$$

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนัก ของสารดูดซับ (mg/g, mole/g)

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนัก ของสารดูดซับที่ต้องการในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (mg/g, mole/g)

C_0 = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (mg/l, mole/l)

C_s = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ (mg/l, mole/l)

B = ค่าคงที่พลังงานในการดูดติดผิว

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิว ในระบบของของเหลวซึ่งมี สมการ แสดงดังสมการที่ 2.6

$$X/M = KC_e^{1/n} \quad (2.6)$$

โดยที่

X = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว (mg/l ,mole/l)

M = น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (mg/l ,mole/l)

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (Factors influencing adsorption)

2.3.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ(Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิว เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับ เส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการ เคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกเรียกว่า การขนส่งผ่าน ฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้น อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูด ซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิว จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ Diamadopoulos และคณะ(1992) ได้ ศึกษาการดูดติดผิวของฟินอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านลิกไนต์ พบว่าปริมาณของฟินอลที่ถูก ดูดติดมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถึง 3.5 เท่า Mathews และ Zayas(1989) กล่าวว่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลภายนอกประมาณได้ว่าคงที่ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ ในช่วง 300 มิลลิเมตร ถึง 900 มิลลิเมตร (50/70 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน ถึง 20/25 ขนาด ตะแกรงมาตรฐาน) สำหรับการวัดค่าจากพื้นที่ผิวเท่ากัน และจะลดลงเมื่อเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลาง ของคาร์บอน Randtke และ Snoeyink (1983) กล่าวว่า ความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ เม็ดจะมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของเม็ดถ่านกัมมันต์

2.3.1.2 ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate)

สิ่งที่สำคัญในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัว

ถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวพันธะถูกใช้ยาวขึ้น (Wang, Leonard, Wang and Goupil, 1975) นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว Bernardin (1976) กล่าวว่าปัจจัยที่สำคัญ 3 อย่างที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารอินทรีย์คือ โพลาลิตี (Polarity) โครงสร้างโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ โมเลกุลที่มีโพลาลิตีสูงสามารถที่จะละลายน้ำได้ดี ทำให้ยากต่อการดูดติดผิว โครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อพื้นผิวที่ยึดติดบนผิวคาร์บอน เช่น วงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Rings) ทำให้การดูดติดผิวดีขึ้น น้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการดูดติดผิวเนื่องมาจากผล 2 ประการ คือ ความสามารถในการละลายต่ำและแรงดึงดูดสูง จึงสามารถที่จะดูดติดผิวได้ง่าย อย่างไรก็ตาม กฎเหล่านี้จะใช้ได้สำหรับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอน ขนาดรูพรุนของผิวคาร์บอนจะอยู่ระหว่าง 10 อังสตรอม จนถึง 1000 อังสตรอม ดังนั้น โมเลกุลที่ใหญ่กว่า 1000 อังสตรอมจะไม่สามารถดูดติดได้

2.3.1.3 พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนอื่น ๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบ ที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิว ตัวอย่างของพีเอชที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวแสดงดังรูปที่ 2.4 แสดงผลของพีเอชต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน Geothite ซึ่งพบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้การดูดติดผิวของตะกั่วเพิ่มขึ้นด้วย

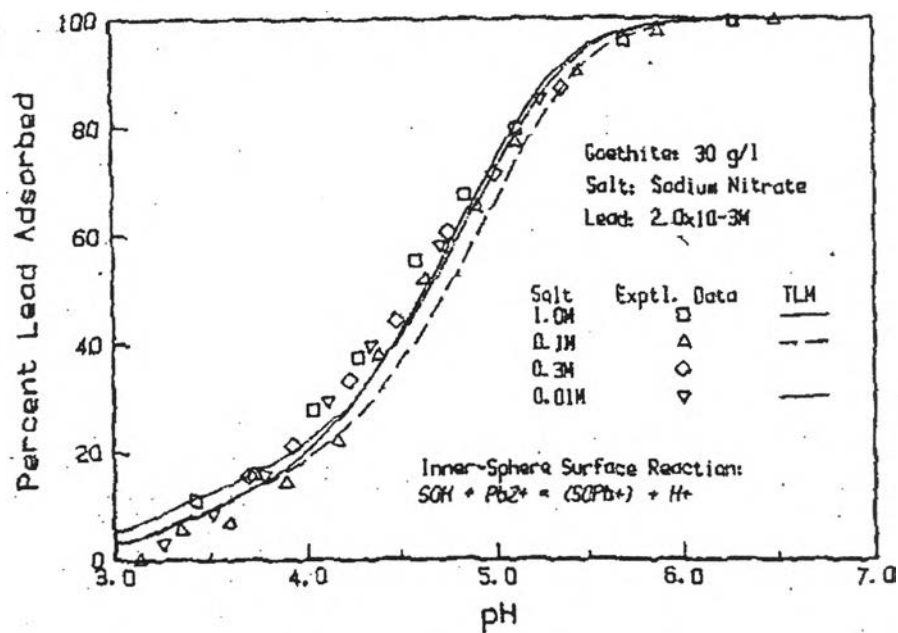
2.3.1.4 อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดติดผิวส่วนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง แต่อัตราการดูดติดผิวจะสูงขึ้น

2.3.1.5 ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งของโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore Diffusion) ในระบบที่ของเหลวที่มีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้ การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางกลับกัน

ถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้น การแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว Chang(1991) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วพบว่าเมื่อเพิ่มความปั่นป่วนของระบบความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 2 ชนิดเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.4 ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน Geothite. (David&Kent,1990)

2.3.1.6 เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่ง Lee และคณะ (1981) ได้รายงานว่าการสัมผัสถึงเปล่าของถังดูดติดผิวที่ยาวนาน และปริมาณของสารในน้ำเข้าที่มีจำนวนน้อย ๆ จะมีอายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนนานขึ้น Cheremisinoff และคณะ (1976) แนะนำไว้ว่าเพื่อที่จะได้แน่ใจได้ว่าการดูดติดผิวของสารแปลกปลอมในน้ำเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรจะมีเวลาเก็บกักในชั้นของคาร์บอนนานประมาณ 30 นาที

2.4 การดูดติดผิวไอออนบวกของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

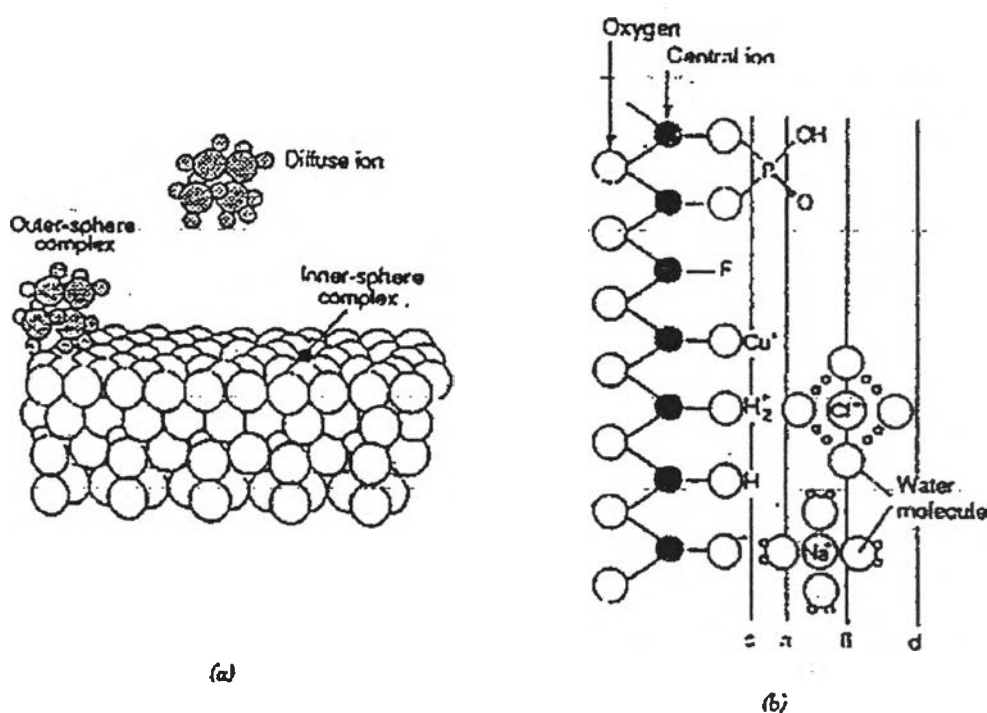
(Cation Adsorption by Hydrated Metal Oxides)

ส่วนใหญ่แล้วธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปตะกอนและมีพื้นที่ผิวใหญ่มาก ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกดินเหนียว ผลึกเหล็กไฮดรอกไซด์ที่บริสุทธิ์ หรืออาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ สารต่าง ๆ เหล่านี้สามารถดูดติดไอออนบวกและปล่อยไอออนบวกตัวอื่น ๆ ออกมาในปริมาณเท่า ๆ กัน เรียกได้ว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation Exchange) ถ้าจะกล่าวถึงกลไกซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกนั้น จะต้องศึกษาถึงความสามารถในการดูดติดผิวของไอออนประจุลบ (Charged Anion Sites) ที่สามารถดูดติดไอออนบวกได้อย่างเช่น SiOH^- , AlOH^{2-} , AlOH-Group ในแร่ดินเหนียว FeOH-Group ในเหล็กไฮดรอกไซด์ หรือ OH-Group ในสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น ในโครงสร้างที่เป็นผลึกนั้น จะต้องเกิดสมดุขของประจุลบ ถือว่าเป็นกระบวนการเลือก (Selective Process) คือการเลือกที่จะดูดติดไอออนบวกตัวใดก็ได้ และปล่อยไอออนบวกตัวอื่น ออกมา จากนั้นจะเก็บสะสมไอออนโลหะไว้ที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-Liquid Interface) จะทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุลเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การดูดติดผิว (Adsorption) ในกรณีที่ไม่เจาะจงและไม่เลือกที่จะดูดติดไอออนใด การดูดติดผิวอาจเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แรงดึงดูดทางไฟฟ้านั้นอาจเกิดมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนหรือแรงแรงแวลเดอร์วาลส์ และอาจกล่าวได้ว่า ปรากฏการณ์ดูดติดผิวเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของตัวละลาย (Solute) ของผิวของของแข็ง

ก่อนที่จะอธิบายรายละเอียดต่อไป จะขอกล่าวถึงแบบจำลองที่สำคัญมากซึ่งใช้ในการอธิบายการดูดติดผิวโลหะหนักบนตัวกลางดูดซับก่อนได้แก่ แบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Surface Complexation Model) ซึ่ง David & Kent(1990) ได้สรุปแนวคิดพื้นฐานสำหรับแบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวทั้งหมดไว้ดังนี้

1. พื้นผิวจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันจำเพาะ (Specific Functional Groups) ซึ่งทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนในสารละลายเดียวกัน
2. จุดสมดุขของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ที่พื้นผิวและปฏิกิริยาไอออนนิค สามารถจะอธิบายได้ด้วยสมการกฎทรงมวล (Mass Balance) สมการและสมดุขเคมีที่มีค่าปรับแพกเตอร์
3. ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิว (Surface Charge) และศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว (Surface Electrical Potential) จะเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับข้างในตัวเอง (Stumm&Morgan,1995)

4. ค่าคงที่ต่าง ๆ ในการเกิดพันธะที่ชัดเจนที่ต้องการ จะเป็นค่าพารามิเตอร์อย่างง่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกโดยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ หรืออาจจะอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงตัวอย่างของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว และสามารถจำแนกประเภทของจุดสมดุลของการดูดติดผิวในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวแสดงดังตาราง 2.5



- (a) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว ของไอออนหนึ่ง ๆ บนพื้นผิวไฮดรอกไซด์
- (b) แผนภาพที่ใช้ในการอธิบายพื้นผิวไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงแนวที่เชื่อมติดกับหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวทั้งแบบ Inner-Sphere Complexes, Outer-Sphere Complexes และ Diffuse Layer

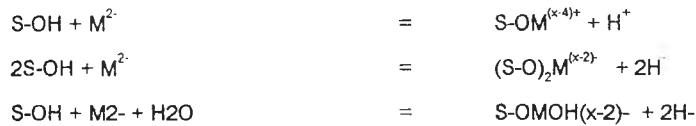
รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Stumm&Morgan, 1995)

ตารางที่ 2.5 แสดงประเภทของจุดสมดุลของการดูดติดผิวในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว
ผิว(Stumm&Morgan, 1995)

Acid Base Equilibria for Surface



Metal Biding (M^{2+} = metal)



Ligand Exchange (L=ligand)

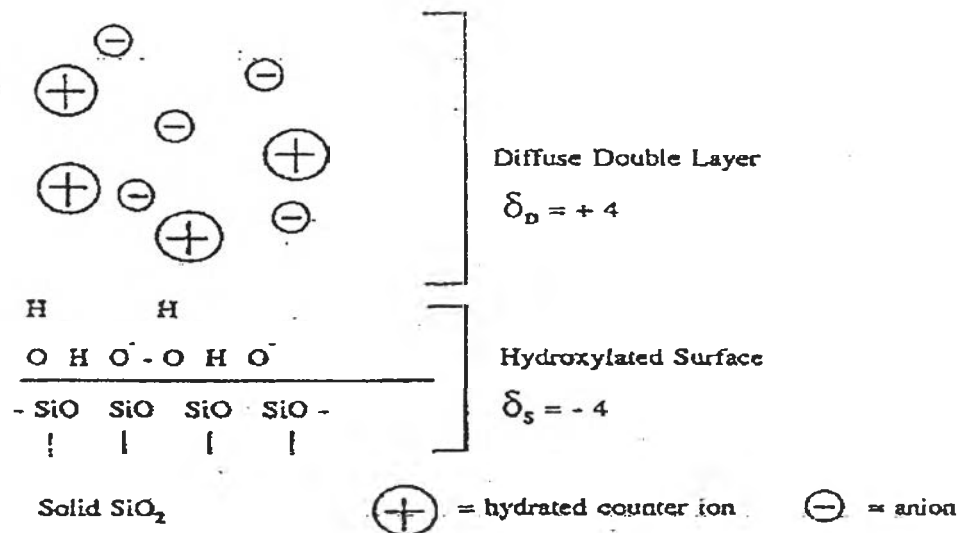


Ternary Surface Complex Formation



SOH = Oxide surfaces

ปรากฏการณ์การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวอธิบายได้ดีที่สุดคือ Electrical
Double Layer Model (EDL Model) ตัวอย่างอธิบายได้ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.6 แสดง Electrical Double Layer Model: รูปแบบของพื้นผิว Silicate in an Electrolyte
(Forstner & Wittman, 1981)

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า พื้นผิวของแข็งของซิลิกา (Silica) ที่มีประจุไฟฟ้าอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อสัมผัสกับน้ำ ทำให้ไอออนและประจุที่ผิวของแข็งถูกเปลี่ยนกลับไปอยู่ที่ผิวของไฮดรอกไซด์ (MOH-Groups) และการดูดติดผิวของน้ำจะเกิดขึ้นที่ Coherent Layer ของพื้นระไฮโดรเจนของน้ำเป็นจุดแรก น้ำในสวอนี้จะถูกแยกตัวออกมาจากน้ำทั้งหมด (Fripiat,1965 อ้างถึงใน Forstner & Wittman) เมื่อความหนาของชั้นน้ำที่ถูกดูดติดเพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นน้ำนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำทั้งหมด และในสภาวะนี้ไฮโดรเจนไอออนซึ่งเคลื่อนตัวระหว่างผิวของก๊าซและของแข็งจะแพร่กระจายอย่างอิสระเข้าไปในระบบของเหลวทั้งหมดนี้ ถูกจัดให้อยู่ในรูปของไฮดรอกซิล (Hydroxylate) ซึ่งมีประจุลบที่ผิวหน้า (Surface Layer) และมีประจุบวกที่ผิวชั้นใน (Diffuse Layer) โดยชั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะเกิดขึ้นในกรณีของแข็ง จุ่มลงในน้ำซึ่งเปรียบได้กับการดูดติดของไอออนจากสารละลายบนผิวของแข็ง

นอกจากนี้สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการดูดติดผิวด้วยสภาวะสมดุลนี้เกิดขึ้นระหว่างปริมาณของไอออนบวกที่สะสมอยู่บนผิวของสารดูดติดกับความเข้มข้นของไอออนนั้นในสารละลาย ถ้าปริมาณของไอออนโลหะหนักในสารละลายมากขึ้น ปริมาณของไอออนบวกที่ถูกดูดติด ก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และจะมีการคายสารออกมา เมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดลง จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลใหม่ขึ้นมา

ในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ไอออนสามารถที่จะเลือกที่จะแลกเปลี่ยนกับไอออนใดก็ได้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความชอบไอออน (Affinity) ตามปัจจัยดังนี้ (Scheffer&Schachtschabel,1996 อ้างถึงใน Forstner&Wittman,1981

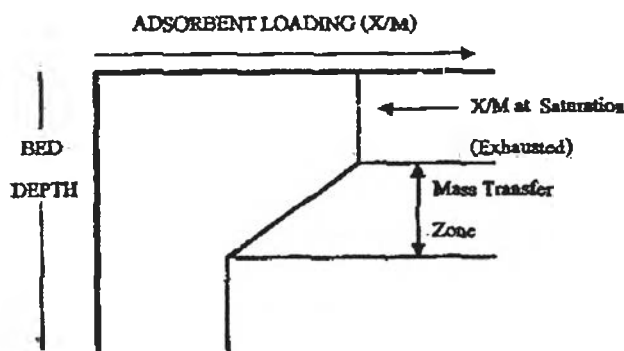
1. ผลของวาเลนซ์และไฮเดรชัน ลำดับความชอบจะเพิ่มขึ้นตามเลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น เรียกว่า Valence Effect ดังนี้ $Me^+ < Me^{2+} < Me^{3+}$ และจะลดลงตามเส้นผ่านศูนย์กลางของไอออนบวกที่ถูกไฮเดรต ซึ่งความหนาแน่นของประจุใน Alkali และ Alkali Earth จะเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า Hydration Effect ดังนี้ $Ba < Sr < Ca < Mg < Cs < Rb < K < Na < Li$
2. ความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จำนวนไอออนบวกที่ถูกแลกเปลี่ยนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
3. ปฏิริยาไฮโดรไลซิสของไอออนบวก การเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นผลเนื่องจากการเพิ่ม ปฏิริยาไฮโดรไลซิสของไอออนบวกที่จะแลกเปลี่ยน ยกตัวอย่างเช่น Hydroxyls Complex ($CuOH^+$, $FeOH^{2+}$,ect) จะถูกดูดติดโดยของแข็งมากกว่าไอออนบวกที่ไม่ใช่สารประกอบเชิงซ้อน (เช่น Cu^{2+} , Fe^{3+} ,etc)

2.5 คอลัมน์ดูดติดผิว (Adsorptive Column)

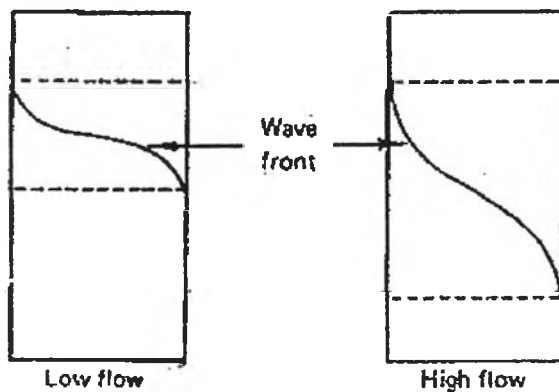
ลักษณะของคอลัมน์ดูดติดผิว จะเป็นแบบตัวดูดซับจะบรรจุไว้ในปริมาณคงที่ โดยมีการป้อนของเหลวซึ่งมีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับป้อนอย่างต่อเนื่อง

2.5.1 เขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone)

เมื่อสารละลายไหลผ่านถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ตัวถูกละลายจะถูกดูดติดผิวอย่างรวดเร็วในชั้นบนของสารดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดติดผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล ที่จุดนี้สารดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดติดผิวก็จะเกิดขึ้นต่อไปในสารดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสภาวะที่ถูกติดผิวนี้ เราเรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือชนิดของสารดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ และปัจจัยทางศาสตร์ Bernardin(1976) กล่าวว่าเมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารดูดซับด้วยอัตราการไหลที่เร็ว จะทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม หากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารดูดซับช้า ๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้สารดูดซับจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่



รูปที่ 2.7 แสดงเขตการถ่ายเทมวลในคอลัมน์ดูดติดผิว(Faust & Aly ,1987)

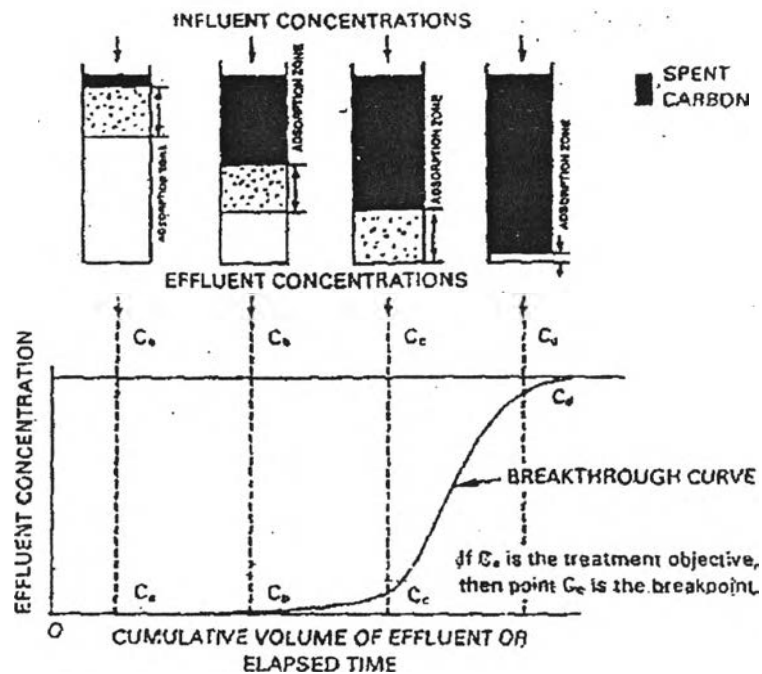


รูปที่ 2.8 เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่ต่างกัน (Bemadin,1976)

2.5.2 ลักษณะเบรคทวร์จ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทวร์จเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ของความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับ ปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา แสดงดังรูป 2.9 แสดงรูปทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทวร์จ และแสดง ความสัมพันธ์ของเส้นโค้งเบรคทวร์จกับปริมาณของชั้นสารดูดซับที่เสื่อมสภาพ ชั้นของสารดูดซับที่ ยังใช้งานได้อยู่ (Active Zone) และชั้นของสารดูดซับที่หมดสภาพ

จากรูปที่จุดเริ่มต้นน้ำที่ผ่านออกจากถังดูดติดผิวแบบแห้งจะมีปริมาณตัวถูกละลายต่ำ ตัว ถูกละลายส่วนใหญ่จะถูกดูดติดผิวโดยตัวดูดซับในชั้นต้น ๆ ของถังเมื่อของเหลวไหลผ่านถึงเป็น จำนวนมากขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง ทำให้ปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออก เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของสารดูดซับในถังเกือบจะหมดสภาพ ปริมาณของตัวถูกละลายใน น้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำเข้า



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นโค้งเบรคทรูจในคอลัมน์ดูดติดผิว (Clark and Lykins, 1989)

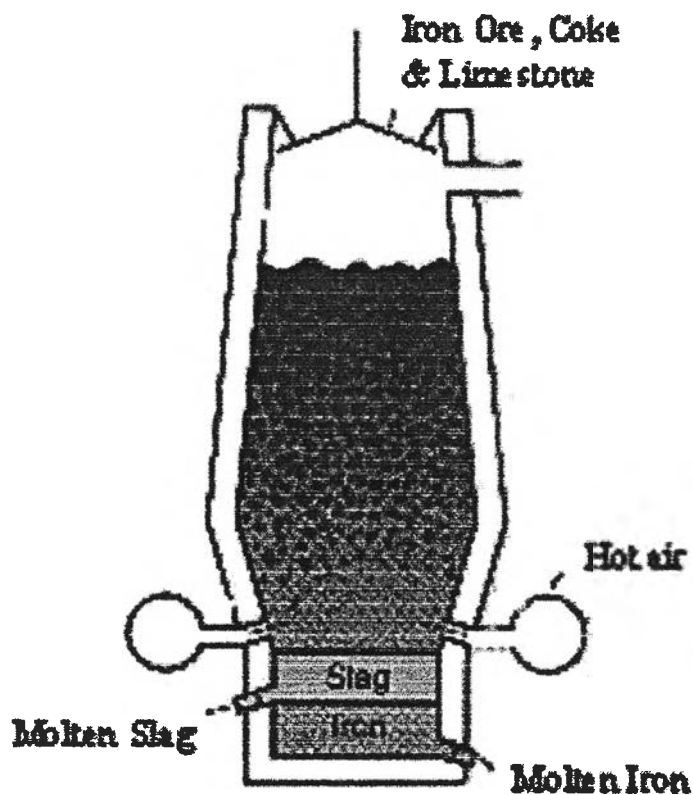
2.6 ประโยชน์ของสารดูดติดผิว

สารดูดติดผิวถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- กำจัดสี กลิ่น รส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟัลลิก
- กำจัดคลอรีน
- กำจัดโลหะหนักต่าง ๆ
- กำจัดยาฆ่าแมลง
- กำจัดผงซักฟอก
- กำจัดฟีนอล และสารประกอบฟีนอล
- กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน

2.7 กากตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Blast Furnace Slag)

กากตะกรันเป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการถลุงเหล็กจากสินแร่ (Co-Product) ในกระบวนการถลุงแร่เหล็กจากสินแร่ จำพวก Hematite (Fe_2O_3) , Magnetite (Fe_3O_4) , Geothite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) โดยจะหลอมแร่ให้มีอุณหภูมิประมาณ 1200-1500 องศาเซลเซียส พร้อมกับเติมถ่านโค้ก(Coke) ลงไปเพื่อทำหน้าที่ตัวออกซิไดซ์ (สารดึงออกซิเจนออกจากสินแร่) และเติมปูนขาว(Lime Stone)ลงไป เพื่อช่วยทำให้เกิดตะกรัน (Slag Forming Agent)และสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ปะปนมากับสินแร่และยังช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมลงได้อีกทางหนึ่งด้วย จึงทำให้เหล็กมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยเหล็กจะหลอมรวมกันอยู่ด้านล่างของเตาหลอม สิ่งเจือปนต่าง ๆ จะลอยอยู่ด้านบน สารที่ลอยอยู่ด้านบนจะเรียกว่า กากตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Blast Furnace Slag) จากนั้นทำการแยกกากตะกรันออกจากเตาหลอมและทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้ได้การตะกรันที่เป็นเม็ด(Granulated slag) คล้ายเม็ดทราย



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการถลุงเหล็ก (Appleby Group, 1999)

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนจากการหลอมเหล็ก

(Appleby Group, 1999)

Surface Area	375-425 m ² /kg
Bulk Density	1000-1100 kg/m ³
Relative Density (Sp.Gr)	2.9
Color	Off White

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนจากการหลอมเหล็ก

(Appleby Group, 1999)

Compositions	Percent (%)
CaO	40 %
SiO ₂	37%
Al ₂ O ₃	11%
Fe ₂ O ₃	0.2 %



2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pandey และ Chaudhuri, (1982) ได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการดูดซับปรอท (+2) บนถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal) ชนิดต่าง ๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินบิทูมินัสมาใช้แทนถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการดูดซับปรอท โดยการนำถ่านหินบิทูมินัสมาผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ เช่น กรดไนตริก, ซัลไฟเนต เป็นต้น พบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับปรอทได้มากขึ้นด้วย และได้สรุปว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำถ่านหินบิทูมินัสมาใช้กำจัดปรอทในน้ำเสียได้

Rowley และคณะ, (1983) ศึกษาการกำจัดแคดเมียม ปรอท และตะกั่ว โดยใช้ตัวกลางเป็นเศษยางรถยนต์ พบว่า กลไกการกำจัดปรอทและแคดเมียมจะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับสังกะสีที่อยู่ในยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber) โดยสังกะสีจากการวัลคาไนซ์ จะมีบริเวณพื้นผิวที่สามารถให้ปรอทและแคดเมียมมาจับ โดยสามารถที่จะจับปรอทได้มากกว่าแคดเมียม แต่กระบวนการกำจัดตะกั่วจะกำจัดโดยการดูดติดผิว ซึ่งแตกต่างกับ ปรอทและแคดเมียม

Yamashita และคณะ, (1983) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ตัวกลางเป็นกากตะกอนจากการหลอมเหล็ก พบว่ากากตะกอนสามารถกำจัดโลหะหนักได้หลายตัว ไม่ว่าจะเป็นตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ซึ่งอธิบายว่ากลไกการกำจัดโลหะหนักของกากตะกอนมีหลายกลไกคือ การดูดติดผิว (Adsorption) จากผลของ CaO และ SiO_2 ในกากตะกอน ผลของการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) จากผลของเหล็กในกากตะกอน การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation) จากผลของซัลเฟอร์, การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) จากผลของพีเอช และการแลกเปลี่ยนไอออนจาก CaO และ MgO

Karthikeyan และ Chaudhuri, (1986) ได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการดูดซับปรอท (+2) บนถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal) โดยนำมาผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่าง ๆ เช่น กรดไนตริก, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, คาร์บอนไดซัลไฟด์ และแมงกานีสคลอไรด์ เป็นต้น การทดสอบได้ทำการทดสอบทั้งการดูดซับแบบแบตช์และการทดสอบแบบคอลัมน์ดูดติดผิว พบว่าถ่านหินบิทูมินัสที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ล้วนแต่มีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทได้ดีขึ้น โดยที่ถ่านหินบิทูมินัสที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไนตริก มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้ได้อธิบายว่า เกิดจากการออกซิไดซ์ด้วยกรดไนตริกทำให้เพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้การดูดซับได้มากขึ้น

Marcantonio และคณะ, (1990) ศึกษาการกำจัดซีเลเนียมในน้ำเสียโดยใช้เรซินแบบต่างแก่ (Strong-base Anion) เพื่อจับซีเลเนียมไว้กับเรซิน จากนั้นทำการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายอะซิดิกคลอไรต์ (Acidic Chlorate) จากนั้นค่อยนำไปตกตะกอนเคมีด้วยซัลไฟด์

Weng และ Huang, (1994) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม(+2)และสังกะสี(+2) โดยใช้ขี้เถ้าลอย(Fly Ash) เป็นสารดูดซับ จากนั้นทำการทดสอบการทำให้เป็นก้อน (Solidification)เพื่อศึกษาเสถียรภาพ โดยการนำขี้เถ้าลอยมาผสมกับซีเมนต์ พบว่าขี้เถ้าลอยสามารถกำจัดสังกะสีและแคดเมียมได้ในอัตราส่วน 0.27 มิลลิกรัมต่อกรัมขี้เถ้าลอย และ 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมขี้เถ้าลอย ตามลำดับ ซึ่งถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะไม่ได้เท่ากับมันต์ แต่ก็ยังเป็นทางเลือกหนึ่งเนื่องจากขี้เถ้าลอยมีราคาถูกมาก ๆ และยังช่วยปรับพีเอชของน้ำเสียได้ด้วย และผลการทำให้เป็นก้อน พบว่าเมื่อนำมาทดสอบการชะคอนกรีตที่ผสมกับขี้เถ้าลอยด้วยสารละลายตามมาตรฐาน ASTM น้ำที่ได้จะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำขี้เถ้าลอยหลังจากการดูดซับแล้วไปทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อรักษาความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive Strength) ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

Yupin และคณะ, (1994) ได้ศึกษากลไกการดูดซับแคดเมียม (+2) และสังกะสี (+2) บนไฮดรอกซีแอฟฟาไทท์ ขอบเขตที่ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นระหว่าง 0-0.25 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร พบว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแลงมัวร์ไอโซเทอม แต่การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีจะเกิดจากกลไก 2 อย่าง คือ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิว (Surface Complexation) และการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเป็นตัวควบคุมการแลกเปลี่ยนโปรตอนกับโลหะหนัก และการตกตะกอนร่วมจะเกิดจากแคลเซียมและฟอสเฟตที่มีอยู่ในไฮดรอกซีแอฟฟาไทท์ ซึ่งพบว่าการตกตะกอนร่วมของแคดเมียมจะดีกว่าสังกะสี และได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของแคดเมียม และสังกะสี พบว่า สังกะสีจะฟื้นฟูสภาพได้มากกว่า ซึ่งอธิบายได้ว่าส่วนหนึ่งมาจากการตกตะกอนร่วมอีกครั้งหนึ่งของแคดเมียมหลังจากฟื้นฟูสภาพแล้ว

Tan และคณะ, (1996) ได้ทำการศึกษานำกากปาล์มที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม มาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักคือ ทองแดงและนิกเกิล โดยการทดลองได้ศึกษาทั้งการนำกากน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เพียงชนิดเดียวและการใช้ร่วมกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น เช่น ดิน,ทราย เป็นต้น ผลที่ได้พบว่า กากปาล์มสามารถดูดซับโลหะหนักจำพวกทองแดงและนิกเกิลได้เป็นอย่างดี โดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการดูดซับจะดีขึ้น ถ้าควบคุมอัตราการไหลให้ช้าลง และเพิ่มปริมาณของสารดูดซับ นอกจากนี้การนำกากปาล์มไปใช้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ คือ ดิน ทราย พบว่ากากปาล์มจะช่วยเสริมการดูดซับทองแดง และนิกเกิลได้ดีขึ้น

พนวจิตร ธนสิน, (1996) ศึกษาการกำจัดสังกะสีและนิกเกิล โดยใช้ตัวกลางเป็นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่าตัวกลางทั้งสองมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล ที่พีเอชเท่ากับ 6 โดยทรายเคลือบ

แมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและนิกเกิลเท่ากับ 68.92 % และ 69.52% ตามลำดับ และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและนิกเกิลเท่ากับ 60.66 % และ 68.27% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณสังกะสีและนิกเกิลที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 1978.02 มก./ล.เรซิน และ 2136.33มก./ล.เรซิน และปริมาณสังกะสีและนิกเกิลที่ทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 2982.64 มก./ล.เรซิน และ 3057.52 มก./ล.เรซิน และได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของความแรงไอออน(Ionic Strength) ในการฟื้นฟูสภาพ พบว่าหากเพิ่มความแรงไอออนสามารถฟื้นฟูสภาพ โลหะหนักได้มากขึ้น ทั้งทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Khaodhiar, (1997) ศึกษาการกำจัดโครเมียม ทองแดง และอาร์ซีนิก ออกจากน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide Coated Sand, (IOCS)) และทรายเคลือบแมกนีไทท์ (Magnetite Coated Sand, (MCS)) พบว่า MCS สามารถทำให้เกิดทั้งการดูดติดผิว และรัดกั้นสำหรับการกำจัด โครเมียม ทองแดง และอาร์ซีนิก ส่วน IOCS ถูกใช้สำหรับการศึกษาการดูดติดผิวของสารละลายโลหะแต่ละชนิดและศึกษาการแข่งขันการดูดติดผิว ของสารละลายที่มีโลหะผสม พบว่าทองแดงและอาร์ซีนิกจะถูกดูดติดผิวอย่างแข็งแรงในรูปของ Inner-Sphere Surface Complexes ในขณะที่โครเมียมจะถูกดูดติดผิวอย่างไม่แข็งแรงนักในรูปของ Outer-Sphere Surface Complexes กับผิวของเหล็กออกไซด์ สำหรับการศึกษาการแข่งขันการดูดติดผิวพบว่าการมีอยู่ของอาร์ซีนิกในสารละลายจะช่วยเพิ่มปริมาณการดูดติดผิวของทองแดงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่การมีอยู่ของโครเมียมไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของทองแดงเลย

Srivastava และคณะ, (1997) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ตัวกลางเป็นกากตะกั่วจากการหลอมเหล็ก พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่า 80 % ที่พีเอชมากกว่า 3 และประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามพีเอช สำหรับโครเมียมประสิทธิภาพที่ได้จะน้อยกว่าตะกั่ว คือจะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ประมาณ 60 % ที่พีเอช 1 และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ผลของความแรงไอออน(Ionic Strength) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งตะกั่วและโครเมียมลดลงด้วย

Lopez และคณะ,(1998) ศึกษาการกำจัดตะกั่ว ,สังกะสี,แคดเมียม,ทองแดงและโครเมียมโดยใช้กากตะกั่วจากการหลอมเหล็ก พบว่าความสามารถในการกำจัด ตะกั่ว >ทองแดง>โครเมียม>แคดเมียม>สังกะสี ซึ่งเป็นผลมาจาก ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electro negativity) ของโลหะต่อ Hydrated ionic radii ในสารละลายที่แตกต่างกัน และพบว่าการดูดติดผิวเป็นตามแลงมัวร์ไอโซเทอม ยกเว้น แคดเมียมและสังกะสี การดูดติดผิวจะเป็นตามฟรุนดลิชไอโซเทอม และอธิบายว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบดูดความร้อน(Endothermic) คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม การดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Dimitrova และ Mehandgiev, (1998) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ตัวกลางเป็นกากตะกั่วจากการหลอมเหล็ก พบว่าการกำจัดตะกั่วประสิทธิภาพสูงที่พีเอช 6-7 ประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจะมากขึ้นตามไปด้วย ขนาดอนุภาคมีผลต่อการกำจัด โดยอนุภาคเล็กจะกำจัดได้ดีกว่าขนาดใหญ่ ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นมากจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดน้อยลง ผลของปริมาณกากตะกั่วเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกั่วมากขึ้น ทำให้การกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้น แต่การกำจัดต่อหน่วยน้ำหนักตะกั่วจะลดลง

Gharaibeh และคณะ, (1998) ศึกษาการกำจัดตะกั่ว และสังกะสี โดยใช้กากของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกเป็นตัวกลาง พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วและสังกะสี ได้ โดยการดูดติดผิวจะเป็นไปตามฟรุนดลิชไอโซเทอม แต่สามารถกำจัดโครเมียม นิเกิลและแคดเมียมได้น้อยมาก

Kuan และคณะ, (1998) ศึกษาการกำจัดซีเลไนท์และซีเลเนท โดยใช้ตัวกลางเป็นทรายเคลือบอนุภาคนา พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยการกำจัด ซีเลไนท์จะมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่าซีเลเนท ผลของการแข่งขันพบว่าเกิดการขัดขวางกันหากปริมาณซีเลเนทเพิ่มขึ้นทำให้กำจัดซีเลไนท์ได้น้อยลงในช่วงพีเอช 3-8

Gharabeh และคณะ, (1998) ได้ศึกษาการนำกากมะกอกมากำจัดโลหะหนักหลายชนิดที่ปะปนมากับน้ำดื่ม เช่น โครเมียม (+3), นิเกิล(+2), ตะกั่ว (+2), แคดเมียม(+2) และ สังกะสี(+2) โดยศึกษาการดูดซับแบบแบตช์ พบว่ากากมะกอกสามารถดูดซับโลหะได้บางตัวเท่านั้นคือ ตะกั่ว และสังกะสี ส่วนโลหะชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถกำจัดได้

Ho และ Mckay, (1999) ศึกษาการกำจัดตะกั่ว โดยใช้ตัวกลางเป็นถ่านพีท (Peat) พบว่าการดูดติดผิวเป็นไปตามแลงมัวร์ไอโซเทอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม การดูดซับจะเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคหากเล็กจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ความเร็วในการเขย่ามีผลต่ออัตราการเกิดการดูดติดผิว หากเขย่าด้วยความเร็ว เร็วขึ้น จะทำให้อัตราการดูดติดผิวเร็วขึ้น แต่ความสามารถในการดูดติดผิวที่สภาวะสมดุลจะเท่ากัน ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเขย่า

ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์, (2000) ศึกษาผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่า การดูดติดผิวจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 24 ชั่วโมง โดยการดูดติดผิวจะน้อยลงเมื่อมีความเข้มข้นตะกั่วมากขึ้น ส่วนการดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นมากขึ้น โดยการดูดติดผิวตะกั่วจะเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 5-8 ส่วนฟลูออไรด์จะเกิดช่วงพีเอช 4-5 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ คืออัตราส่วนจำนวนโมลของตะกั่วต่อฟลูออไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่พีเอช 6

Castaldi และคณะ,(2001) ศึกษาการกำจัด Oxy-Anion ซีเลเนียม จาก Limestone-Based Flue Gas Desulfurization จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน โดยใช้ Free Hydroxyl Radical เพื่อออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เป็นซัลเฟต หลังจากนั้นทำการตกตะกอนร่วม (Co precipitation) กับไอออนเหล็กโดยใช้เวลาสัมผัสอย่างต่ำ 30 นาที ซึ่งจะเกิดตะกอนของเหล็ก-ซีเลเนียม (Ferrous-Selenium Solid) จากนั้นค่อยแยกออกโดยใช้ถังตกตะกอน โดยปฏิกิริยาออกซิไดซ์ กระทำที่พีเอช 3-4 ที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส สภาวะการตกตะกอนร่วม กระทำที่ พีเอช 8.8-9.2 ที่อุณหภูมิมากกว่า 35 องศาเซลเซียส