

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ เช่น ตะกั่ว นิเกิล พรอท แคดเมียม สังกะสี เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน (Dean และคณะ, 1972) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นพรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชัน (Oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร และเมื่อโลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ก็จะไปเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะหนักต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภทคือ

- 1) โลหะหนักที่ให้คุณประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
- 2) โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อลูมิเนียม
- 3) โลหะหนักที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น พรอท ตะกั่ว และสารหนู เป็นต้น
- 4) โลหะที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อย แต่ให้โทษถ้าได้รับในปริมาณมาก

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ (Dean และคณะ, 1972)

Type of industries	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	F	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sb	Sn	Zn
Pulp,paper mills, paperboard,building paper, board mills					●	●			●		●	●			●
Organic chemical, petrochemicals	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Alkalis,chlorine, inorganic chemicals	●		●	●	●		●	●	●		●			●	●
Fertilizers	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●
Petroleum refining	●		●	●	●	●	●	●			●	●			●
Basic steel work, foundries			●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●
Basic non-ferrous metals-works,foundries	●	●	●	●	●	●	●		●		●		●		●
Motor vehicles, aircraft-plating,finishing	●	●		●	●	●			●			●			
Flat glass , cement , asbestos products					●										
Textile mill products					●										
Leather tanning					●										
Steam generation power plants					●										●

Note: plastic materials,meat products,dairy products,fruits and vegetables,grain milling,beet sugar,beverages and livestock feedlot industries have no heavy metal discharges.

2.2 ตะกั่ว

2.2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว

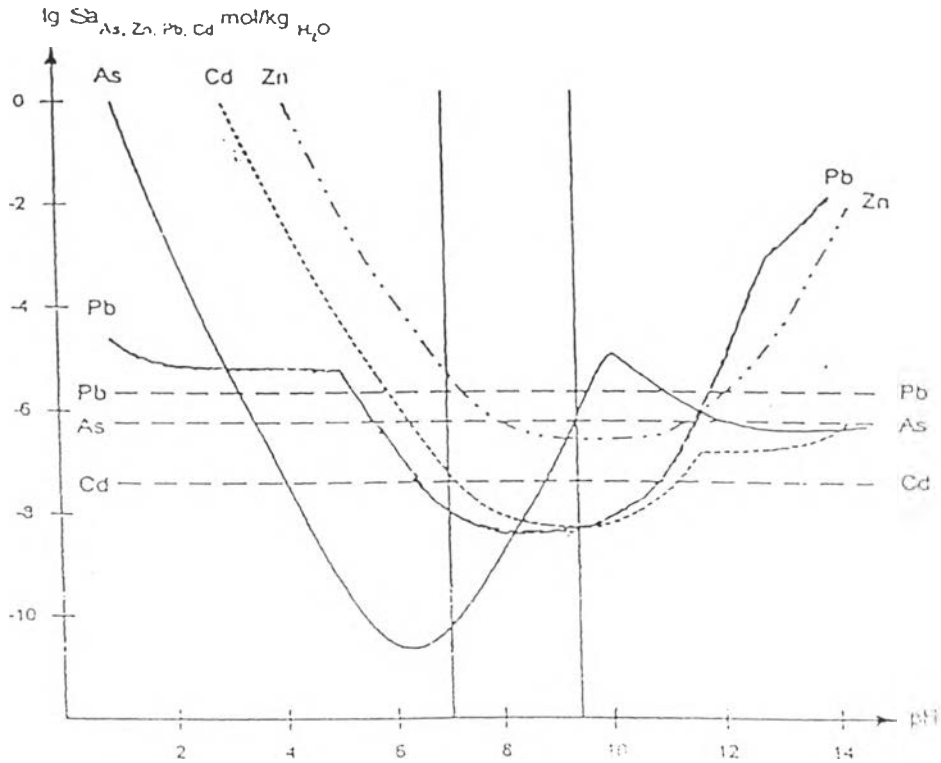
ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน (Transition element) ในตารางธาตุ พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีหลายไอโซโทป (Isotope) แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียร (Stable isotope) มีเพียงชนิดเดียวคือ Pb – 208 เป็นโลหะหนักสีเทา มีสีม่วงเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีน้ำหนักอะตอม 207.17 ความถ่วงจำเพาะ 11.37 มีความอ่อนตัว สามารถดัดหรือรีดได้ง่าย เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง เป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่างๆ ได้หลายชนิด สารประกอบตะกั่วส่วนมากไม่ละลายน้ำ โดยทั่วไปจะมีสี่วาเลนซ์หรือไม่มีสี่ แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม ไดออกไซด์จะมีสีดำหรือสีเทา ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์บางอย่างสามารถละลายน้ำได้ (Rochow และ Abel, 1973 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543) ตะกั่วเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในกรดไนตริกเข้มข้นร้อนและในกรดเกลือ กรดกำมะถันและกรดน้ำส้มที่เข้มข้นเดือด ตะกั่วมีจุดเดือดที่ 1740 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศาเซลเซียส ส่วนแร่ตะกั่วเป็นสารประกอบตะกั่วที่มีตะกั่ววาเลนซ์ +2 และ +4 โดยส่วนมากจะพบอยู่ปนกับหินอัคนีบางชนิดในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ มีรูปแบบต่างๆ ที่สำคัญ 3 แบบ ได้แก่

- 1) กาลีนา (Galena, PbS) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.1×10^{-29}
- 2) เซอร์ไรต์ (Cerrusite, PbCO₃) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.5×10^{-13}
- 3) แองกลีไซต์ (Anglesite, PbSO₄) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.8×10^{-8}

Barth (1985) อ้างถึงใน ชาญวิทย์ (2543) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วในธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบได้ว่าความสามารถในการละลายน้ำจะต่ำสุดอยู่ในช่วงพีเอชที่ 7 – 9 ถ้าค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำกว่านี้ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วจะมากขึ้น

กลไกในการละลายน้ำของตะกั่ว

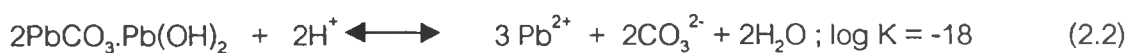
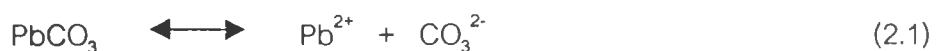
สารตะกั่วที่ปรากฏว่าปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปคาร์บอเนต (PbCO₃) ประกอบกับผิวดินบริเวณต้นน้ำตามธรรมชาติก็เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนต รวม



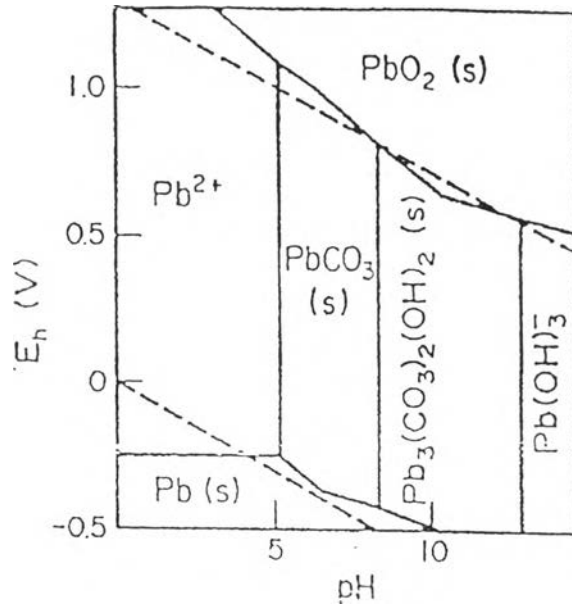
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ (Barth, 1985 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

ทั้งกิจกรรมการทำเหมืองแร่ในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้น ในที่นี้จะขอล่าวเฉพาะการละลายของตะกั่วคาร์บอเนตเป็นหลัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

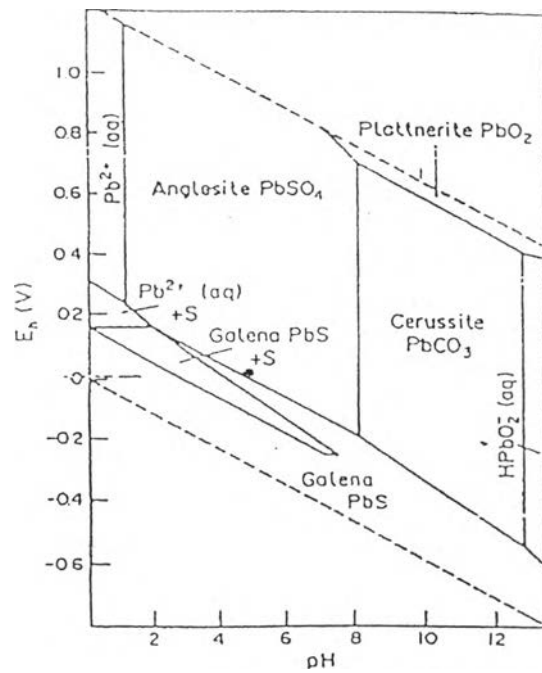
ในธรรมชาติจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ตะกั่วคาร์บอเนตเกิดรูปได้หลายรูปที่ละลายน้ำได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ซึ่งแสดงการแตกตัวและการละลายในสภาพกรดของตะกั่วกลุ่มคาร์บอเนต



ในรูปที่ 2.2 เป็นรูปของตะกั่วคาร์บอเนตที่อยู่ภายใต้สภาวะตามธรรมชาติ และความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณแร่ตะกั่วกับน้ำตามธรรมชาติ แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



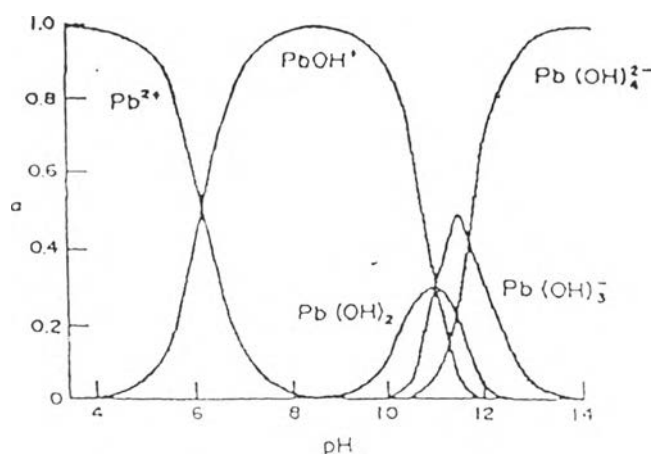
รูปที่ 2.2 แผนภาพของ Eh-pH สำหรับระบบ Pb-H₂O-CO₂ (Stumm และ Morgan, 1970)



รูปที่ 2.3 แผนภาพ Eh-pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม (Garrels และ Christ, 1965 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

การละลายน้ำของตะกั่วอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) จะได้ค่า $\log K$ ของ $\text{Pb}(\text{OH})^+$ เท่ากับ -7.9 สารไฮโดรไลซิสของตะกั่วจะเป็นสารที่พบได้หลายองค์ประกอบ เช่น เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 12 ไม่พบว่ามีตะกอนของ Pb

(OH)₂ เกิดขึ้น แต่จะอยู่ในรูปของสารละลาย จากรูปที่ 2.4 จะแสดงปริมาณตะกั่วไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆที่ระดับความเป็นกรด-ด่างต่างๆกัน โดย Pb(OH)⁺ มีค่า log K₁ = 7.82, Pb(OH)₂ มีค่า log K₂ = 10.88, Pb(OH)₃⁻ มีค่า log K₃ = 13.94 และ Pb(OH)₄²⁻ มีค่า log K₄ = 16.33 นอกเหนือจากสารทั้งสี่ตัวที่กล่าวมาแล้วในสารละลายจะมี Pb(OH)₄⁴⁺, Pb₂(OH)³⁺, Pb(OH)₄²⁺ และ Pb₆(OH)₈⁴⁺ (Jack E. Fergusson, 1990)



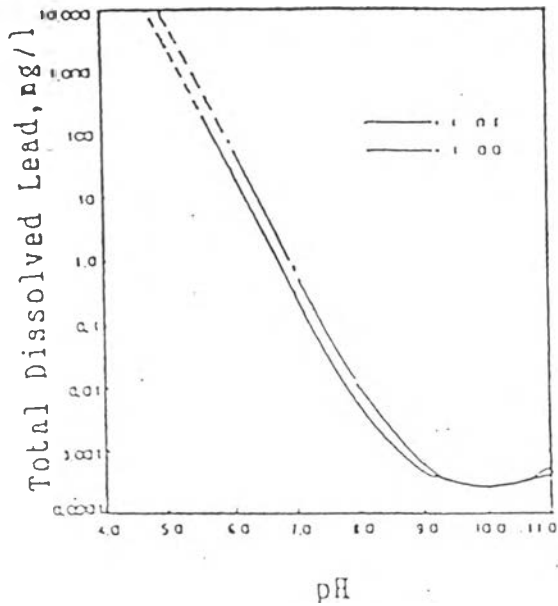
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี (Fergusson, 1990 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

นอกจากการทำให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับน้ำแล้ว ในการละลายน้ำของสารประกอบโลหะหนักตะกั่ว ในวิชาโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ก็ได้ใช้สภาพความเป็นกรด-ด่าง หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากเกลือ เช่น กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือแอมมาใช้ในการสกัดเอาสินแร่ออกจากสินแร่ที่มีกรดต่ำ ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนสภาพความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตะกั่วจะมีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติของกลุ่มทางเคมีของตะกั่วในดินที่เป็นกรด-ด่างภายใต้ oxidic condition นั้น Pb(II) จะมี Pb²⁺, Org, PbSO₄ และ PbHCO₃⁺ เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด และมี PbCO₃, PbHCO₃⁺, Pb(CO₃PbHCO₃)₂²⁻ และ PbOH⁺ เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง (Florence, 1977; Sposito, 1983)

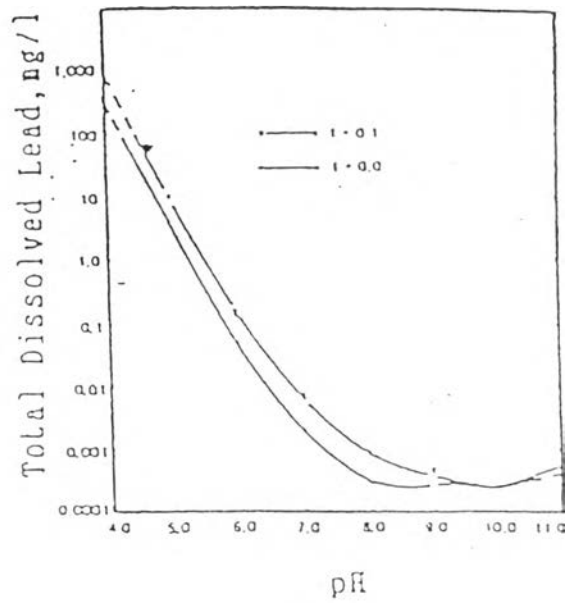
2.2.2 ตะกั่วในน้ำเสีย

ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองในธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ทำสี วัสดุเคลือบ การทำบัดกรี ทำตัวพิมพ์ ท่อ

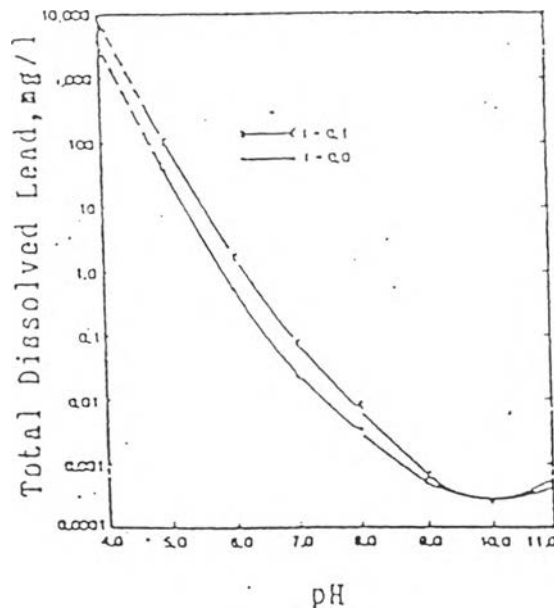
น้ำ ลูกรีน แผ่นตะกั่ว ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว พลาสติก เซรามิก แผ่นเหล็กอาบสังกะสี และโลหะผสมนานาชนิด



ก



ข



ค

รูปที่ 2.5 แสดงสมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ความแรงไอออน 0 และ 0.1 โมลาร์ โดยมี
 ก. $\text{CO}_2 = 10^{-3}$ โมลาร์
 ข. $\text{CO}_2 = 10^{-2}$ โมลาร์
 ค. $\text{CO}_2 = 10^{-4.87}$ โมลาร์ (Hem และ Duram, 1973 อ้างถึงใน สาขาวิทย์, 2543)

การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติหรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ความสัมพันธ์ของการละลายของตะกั่วในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในความเข้มข้นต่างๆกับพีเอช แสดงในรูป 2.5 จากการศึกษาของ Nayer และ Dague (1975) อ้างถึงใน ชาญวิทย์ (2543) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ คือความเป็นด่าง ความกระด้าง และพีเอช ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กล่าวคือ อัตราส่วนของความเป็นด่าง ซึ่งอยู่ในรูปคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต-ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ความกระด้าง ก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างและพีเอชเช่นเดียวกัน

- ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปสารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ ดังสมการ (2.3)



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ (2.4)



- ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

- ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออนที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนอยู่ในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ (2.5)



ที่พีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ (2.3) หรืออาจจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนตพื้นฐาน (basic lead carbonate) ดังสมการ (2.6)



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ ตามสมการที่ (2.4)

2.3 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีลักษณะสามารถอ่อนตัวได้ มีสีเงินปนขาว และสามารถรับประจุไฟฟ้าบวก มีน้ำหนักอะตอม 112.41 มีวาเลนซ์ 0, 2 และมีจุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส โดยแคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักเกิดปนกับแร่สังกะสี ทองแดง และดีบุก ปกติในธรรมชาติจะรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide) ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญและมีประโยชน์หลายประการ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำและทนการกัดกร่อน ในทางการค้าแคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการหลอมทองเหลือง ตะกั่ว และสังกะสี แคดเมียมใช้ในงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ทำอัลลอยด์ ใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรมทำสี เป็นตัวคงสภาพและสารให้สีในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ทำแบตเตอรี่ ใช้ในการผลิตฟิล์มถ่ายรูปและเซลล์แสงอาทิตย์

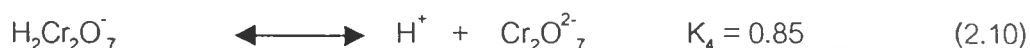
2.4 โครเมียม

โครเมียมเป็นโลหะทรานซิชัน มีน้ำหนักโมเลกุล 51.9961 จำนวนอะตอมเท่ากับ 24 จุดหลอมเหลว 1857 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันหลายค่า ตั้งแต่ +2 จนถึง +6 มีลักษณะสีขาววอลลุกล มีความผิวดำ ไม่เป็นสนิม จึงนำมาผสมหรือชุบที่ผิวของโลหะอื่น เพื่อป้องกันสนิมหรือเพิ่มความแข็งและเพื่อความสวยงาม นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ อย่างกว้างขวาง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ (Ullmann, 1986
อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แคตาลีซิส, ออกซิไดซ์สาร ประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต (VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียม(III)อะซิเตต, โครเมียม (III) ฟลูออไรด์	ย้อมสีผ้า

สารประกอบโครเมียม (VI) ออกไซด์ หรือกรดโครมิก เมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นกรดโครเมตชนิดต่างๆ โดยมีทั้งที่อยู่ในรูปของกรดแบบ โมโน, ได, ไตร และเตตระโครมิก เมื่ออยู่ในสารละลายต่างหรือเมื่อเจือจาง จะมีสีเหลืองของโมโนโครเมต แต่เมื่ออยู่ในสารละลายกรดหรือมีความเข้มข้นสูงจะมีสีแดงของไดโครเมต กรดโครมิกเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง สามารถเป็นสารประกอบเกลือของโลหะและต่าง การแตกตัวของโครเมต ที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังสมการ (2.7) ถึง (2.12)



โดยสารประกอบโครเมียมที่มีวาเลนซ์ 3 นั้นมีอันตรายน้อยมากเกือบจะไม่เป็นพิษ ส่วนสารประกอบที่มีวาเลนซ์ 6 นั้นเป็นสารที่มีพิษก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อน

2.5 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมในหลายๆด้าน ดังนี้คือ

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

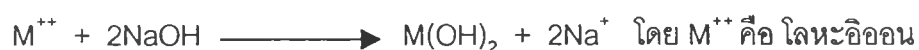
ซึ่งสามารถสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

2.5.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำทิ้งเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาวหรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้น้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพี

เชลล์กว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอชประมาณ 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนไปจากค่าพีเอชที่ตกตะกอน

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือเรื่องกลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งได้จากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเรซินนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกัน ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกันนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนจ์ (Cation Exchange) และถ้าเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนจ์ (Anion Exchange)

วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงนิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถังเรซินเพื่อทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด และยังมีข้อเสียที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

2.5.3 การรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยหลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตดและโพลีเอไมด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนจึงต้องทนความดันสูง และต้องมีการบำบัดขั้วตันโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

2.5.4 การออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

วิธีการนี้เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชันได้แก่ เหล็ก(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีออกซิเดชันได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะโดยใช้คลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ส่วนตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชันได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกเจือปนอยู่โดยใช้เหล็ก(II)ซัลเฟต โดยต้องทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำกว่า 3 หลังจากนั้นจึงเติมปูนลอมลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.5.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด(ขั้วลบ)และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนด(ขั้วลบ)ตลอดเวลา วิธีนี้

เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.5.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นการระเหยเอาน้ำออกซึ่งเป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดาและการระเหยภายใต้สภาวะสูญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

2.5.7 การอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่มีค่าต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้

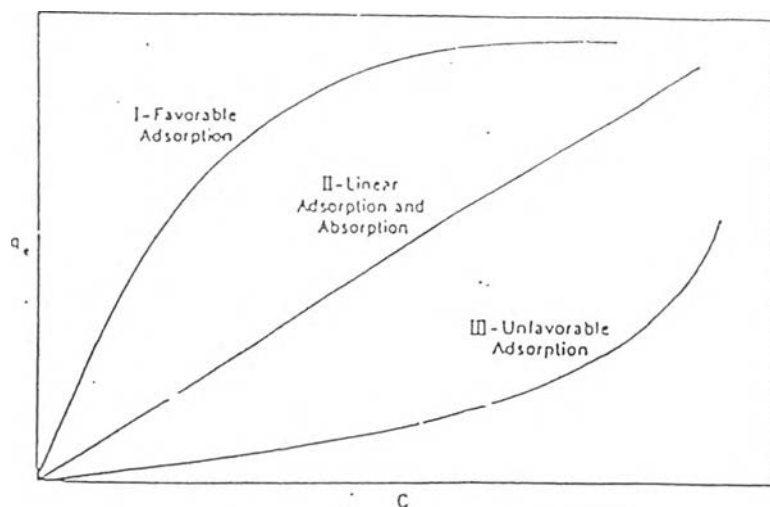
2.5.8 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูดติดผิวที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำโดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้อุณหภูมิมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 A° กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม

2.6 กระบวนการการดูดติดผิว

การดูดติดผิวถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลาย (ชาญวิทย์, 2543) เป็นที่

ทราบกันดีว่า การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดติดผิวของของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างสองสภาวะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นที่ผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนนอน หมายถึงความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็ง และ q บนแกนตั้ง หมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านข้ามระหว่างหน้า



รูปที่ 2.6 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง (Weber, 1972)

จากรูป 2.6 เส้นโค้ง I และ III แสดงถึงการดูดติดผิวโดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งนี้แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดีและไม่ดี ส่วนเส้นโค้งที่ II แสดงรูปแบบการดูดติดผิวแบบเส้นตรงจะเกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารบนผิวของของแข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว

การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf และ Eddy, 1991) Rizzo (1971) อ้างถึงใน ชาญวิทย์ (2543) กล่าวว่า การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการ

ควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

สารที่มีอำนาจดูดติดผิวโมเลกุลต่างๆได้ หรือสารดูดติดผิวมีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอคติเวตเต็ด ซิลิกา(Activated Silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามสารดูดติดผิวประเภทนี้มีข้อเสียคือจับโมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทนี้มีจำกัดมาก

2) แอคติเวตเต็ดคาร์บอน อันที่จริงสารดูดติดผิวชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแอคติเวตเต็ดคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบกว่าคือ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามากและสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมักเป็นสารราคาถูกลง ความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดติดผิวอาจมีมากกว่าแอคติเวตเต็ดคาร์บอน เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องการฟื้นฟูสภาพ

ปัจจุบันได้มีการผลิตสารดูดติดผิวสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมากมายหลายชนิด เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่มีความสามารถในการดูดติดผิวและความคล่องตัวในการทำงานน้อยกว่าแอคติเวตเต็ดคาร์บอน แต่สารดูดติดผิวเหล่านี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานบางประเภท ซึ่งชนิดและคุณสมบัติของสารดูดติดผิวที่นิยมใช้มีแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับที่นิยมใช้กัน (Kenneth, 1992)

Material	Shape	Size (Mesh)	ϵ_p (-)	ρ_b (lb/ft ³)	r_p (°A)	A_s (m ² /g)	Commercial Products
Aluminas							
Active aluminas	G	V	0.25-0.3	50	35-45	235	Alcoa F-1 Reynolds RA-1,RA-3
	S	3-8	0.5-0.6	47-50	40-50	400	Alcoa H-151 Kaiser KA-201
Catalytic- alumina	S	V	0.62	47	45	300	Pechiney CR
Chromatographic -alumina	G	80-200	0.3	58	45	225	Alcoa F-20
Silicas							
Alumino-silicates	C	4-12	0.4	40	-	770	Davison
	S		0.55	55			3A,4A,5A
Magnesia-silica gel	P						13X,700
	G	V	0.33	30	-	300	Florisil
Silica gel	G	V	V	27-45	V	300- 800	Davison silica gel
	S	1/8 in	0.34 - 0.51	41-52	21-28	650- 700	Cecagel Mobil Sorbead R,H
Carbons							
Shell-base	G	V	0.5-0.6	27-34	20	800- 1100	Cochranex FCB
	P	-	0.6-0.8	20-22	30	1200	Barnebey-Cheney JF,JU,YF
Wood-based	G	5-7	-	24	5-10	1400	Supersorbon W
	P	V	-	27-29	3-10	750- 900	Brilonit

ϵ_p = particle porosity, ρ_b = bulk density, r_p = pore size, A_s = surface area

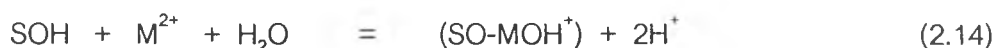
C=cylindrical pellets, G=granular, P=powder, S=spherical beads, T=tablets V=various

2.6.1 กลไกการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

2.6.1.1 กลไกการดูดติดผิว (adsorption mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) (Eckenfelder, 1981 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543) การดูดติดผิวทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยาของแรงวันเดอร์วาลส์ (Vander waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) โมเลกุลของสารดูดซับจะดูดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayers) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Outer – Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกซิลออกไซด์
 M^{2+} คือ ไดวาเลนต์แคโทไอออน
 H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีแตกต่างกับการดูดติดผิวทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดติด

ผิวทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนั้นอ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Inner – Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ (2.15)



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกซิลออกไซด์

M^{2+} คือ ไดวาเลนต์แคทไอออน

H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

Kiselev (1965) และ Voice และ Weber (1983) อ้างถึงใน ชาญวิทย์ (2543) กล่าวว่า ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดติดผิว โดยการดูดติดผิวทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล นอกจากนี้ Hassler (1963) อ้างถึงใน ชาญวิทย์ (2543) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การดูดติดผิวทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดติดผิวทางเคมีเพิ่มขึ้น

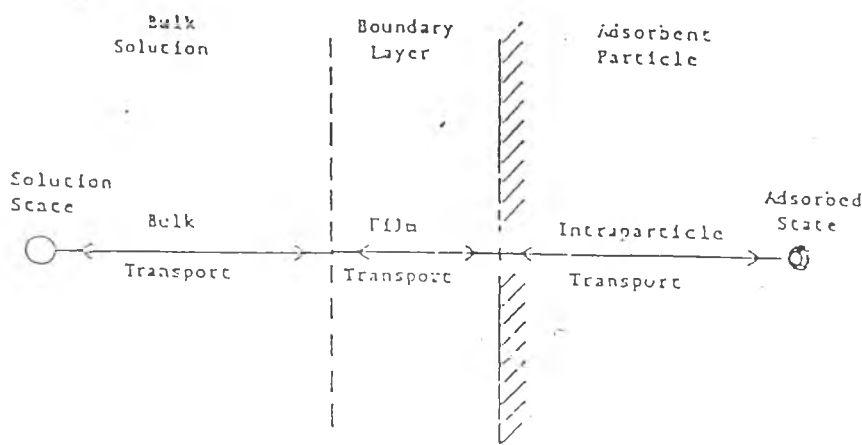
2.6.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน คือ

2.1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2.2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่า ภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นชั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว

2.6.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวเกิดจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็ง ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง ที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ จะมีค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ หรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้เทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับนั้นที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption Isotherms) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมกันมากที่สุด

กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่นี้ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็ง อัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวถูกละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติของตัวถูกละลาย เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของของแข็ง กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

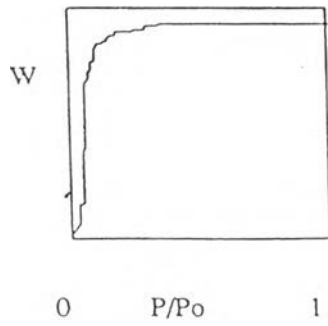
2.6.2.1 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ

(Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

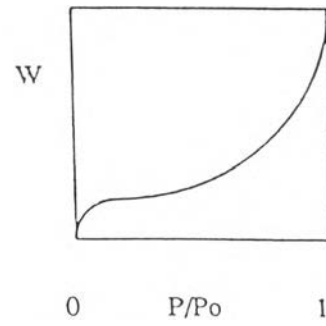
รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ มี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ไอโซเทอมแบบที่ 1 (รูปที่ 2.8a) พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งโมเลกุล (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous Powders) ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

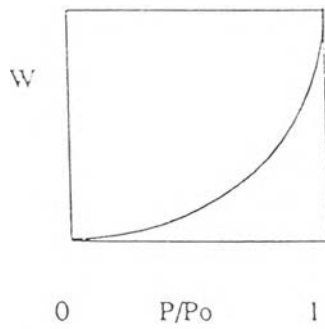
ไอโซเทอมแบบที่ 2 (รูปที่ 2.8b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอินฟินิตี้) โดยจะเกิดบนวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Powder) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่ารูพรุนขนาดเล็ก (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)



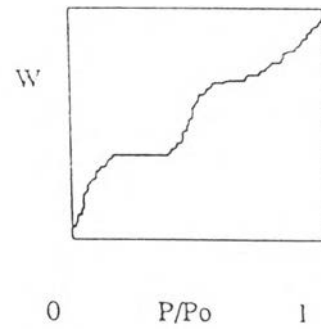
(a)



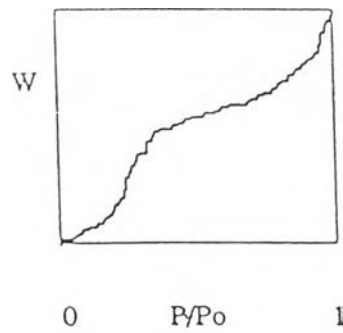
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 2.8 รูปของไอโซเทอมของการดูดซับ : W = ปริมาณการดูดซับ; P/P_0 = ความดันสัมพันธ์ (Cheremisinoff และ Ellerburch, 1978)

ไอโซเทอมแบบที่ 3 (รูปที่ 2.8c) การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 แต่การดูดซับของชั้นแรกให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (The Adsorbate Heat of Liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

ไอโซเทอมแบบที่ 4 (รูปที่ 2.8d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับ มีรูพรุนประมาณ 15-1000 อังสตรอม การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับในแบบที่ 2 คือเกือบเป็นแบบผิวชั้นเดียว (Monolayer) สมบูรณ์

ไอโซเทอมแบบที่ 5 (รูปที่ 2.8e) การดูดซับคล้ายแบบที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับแบบที่ 4 เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

2.6.2.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ซึ่งรูปแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว
- พื้นที่บริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว

- พลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.16)

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \tag{2.16}$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

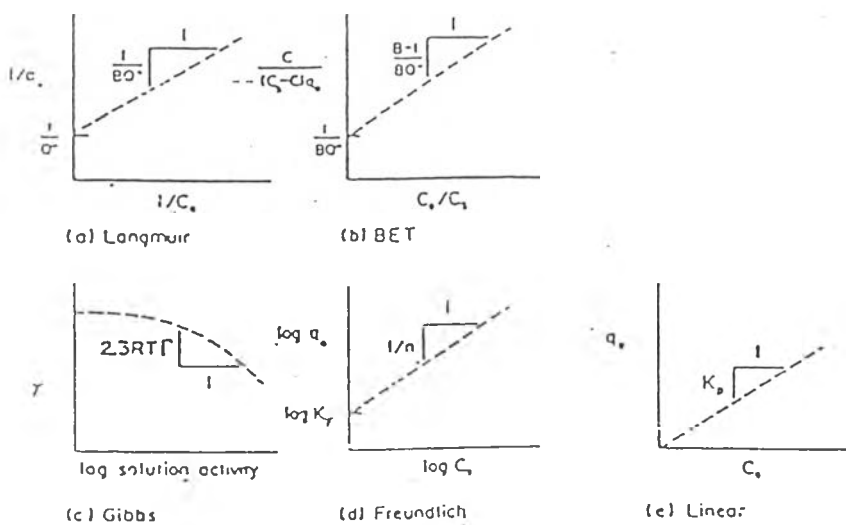
X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้าง
แผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ
โมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

จากสมการที่ (2.16) เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ สมการที่ (2.16) สามารถเขียนได้เป็น

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่างๆ (Voice และ Weber, 1983)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_o/X กับ C_o จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/bX_m$ สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ C_o ไปหารสมการที่ (2.17) จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_o)(1/bX_m) \quad (2.18)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_o$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/bX_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m$ รูปที่ 2.9 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงมัวร์

ลักษณะของรูปไอโซเทอม สามารถบอกได้ว่าการดูดซับในการทดลองได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งเราจะใช้การคำนวณจากค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยจะแสดงให้เห็นในรูปค่าคงที่ของการแยกตัว r (dimension constant separation factor) ซึ่งจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.19) (ชลธา และคณะ, 2538) โดยผลของค่า r ที่มีการดูดซับแสดงไว้ดังตารางที่ 2.4

$$r = 1 / (1 + bC_o) \quad (2.19)$$

โดยที่ C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.4 แสดงผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวของการแยกตัวจากลักษณะรูปไอโซเทอม (ชลธา และคณะ, 2538)

Separation Factor: r	ลักษณะของไอโซเทอม
$r > 1$	การดูดซับไม่ดี
$r = 1$	การดูดซับคงที่หรือการดูดซึม
$0 < r < 1$	การดูดซับดี
$r = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท

(BET, Brunauer Emmerett Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งมีสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สองหรือชั้นต่อไป สมการการดูดติดผิวแบบเบท แสดงในสมการที่ (2.20)

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1) C_e / C_s] \quad (2.20)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของการตัวถูกละลายในสารละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

C_s = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

สมการที่ (2.20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e / X(C_s - C_e) = (1/X_m B) + [(B-1)/X_m B](C_e / C_s) \quad (2.21)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e / X(C_s - C_e)$ กับ C_e / C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/X_m B$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = KC_e^{1/n} \quad (2.22)$$

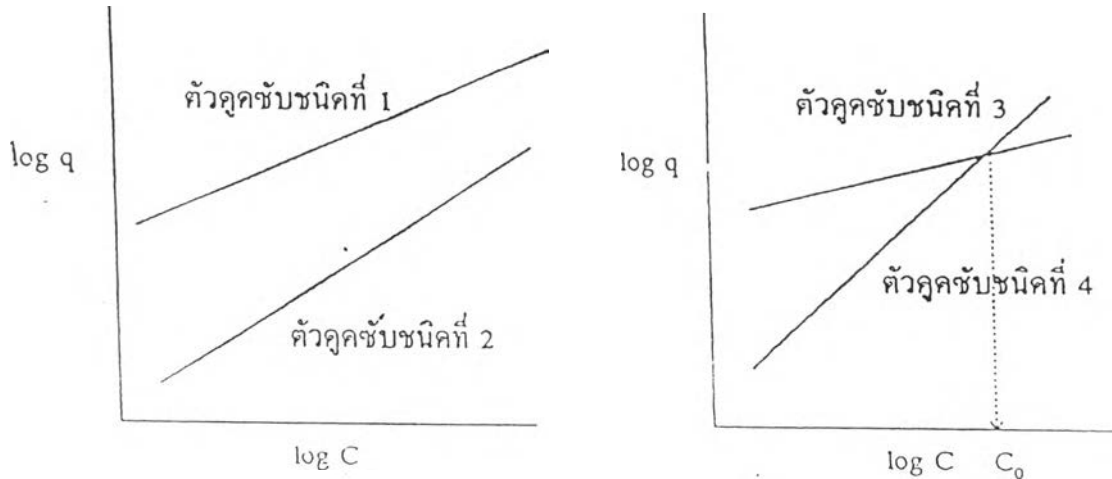
- โดยที่ x = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
หรือโมลต่อลิตร
- m = น้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
หรือโมลต่อลิตร
- $K, 1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log(x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.23)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(x/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ เมื่อ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชแสดงดังรูปที่ 2.9 ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า $1/n$ ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี นอกจากนี้ค่า n ยังให้เป็นตัวบอกความสามารถในการดูดซับ และความจุของตัวดูดซับได้อีกด้วยโดยถ้าค่า n มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า n อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่า การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี

ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากันพิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.10ก จะเห็นได้ว่า ไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.10ข ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูงกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.10ข ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดแบบที่มีการไหลต่อเนื่องแล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะเหมาะสมกับชนิดที่ 3



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช (ชลธา และคณะ, 2538)

2.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ความดันปวน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันปวนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันปวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันปวนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดติดผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้ pore diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ด้วยเหตุนี้ในกรณีความดันปวนสูงอัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับ pore diffusion และในกรณีความดันปวนต่ำ อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับ film diffusion

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว ส่วนพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive Capacity)

3) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดผิว

เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้นโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดติดผิวได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถกล่าวได้เต็มที่มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวและความสามารถในการละลายน้ำ

4) ขนาดของสารที่ถูกดูดติดผิว

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว จากการวิจัยพบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

5) พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย

6) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.6.4 ประโยชน์ของการดูดติดผิว

สารดูดติดผิวชนิดต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียเพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟัลลิก
- 2) กำจัดคลอรีนในน้ำ
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะสารไฮโดรคาร์บอนแบบลูกโซ่อิ่มตัว

แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารดูดติดผิวแทน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านกระดูกมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในการบำบัดโลหะหนัก

2.7 ถ่านกระดูก (Bone Charcoal)

ถ่านกระดูกเป็นสารดูดติดผิวที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันของกระดูกสัตว์ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ซึ่งถ่านกระดูกนี้จะแตกต่างกับสารดูดติดผิวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบชนิดอื่นๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ่านไม้ เนื่องจากถ่านกระดูกมีได้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแต่เพียงชนิดเดียว

ถ่านกระดูกประกอบด้วยสององค์ประกอบใหญ่ๆ คือ คาร์บอน และ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ไฮดรอกซีอะพาไทต์ก็คือแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่งที่มีสูตรเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5(\text{OH})_2$ ซึ่งก็เป็นส่วนประกอบอินทรีย์ของกระดูกนั่นเอง ตัวอย่างขององค์ประกอบของถ่านกระดูก แสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ในการผลิตถ่านกระดูก ซึ่งเป็นการเพิ่มรูพรุนและพื้นที่ผิวให้กับโครงสร้างกระดูกนั้นไม่มีการใช้สารเคมีใดๆทั้งสิ้น ซึ่งจะกระบวนการผลิตสารดูดติดผิวอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์ ที่ต้องใช้สารเคมีร่วมด้วย

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของถ่านกระดูกเชิงการค้าชื่อ Brimac216 (Irvine. GD. และ Knowles. Mj., 1997)

Carbon	9 to 11%
Acid insoluble ash	3% max
Moisture	5% max
Hydroxyapatite	70 to 76%
Calcium carbonate	7 to 9%
Calcium sulphate	0.1 to 0.2%
Total surface area	100 m ² /g
Carbon surface area	50 m ² /g
Iron – as Fe ₂ O ₃	< 0.3%
Pore size distribution	7.5 to 60,000 nm
Pore volume	0.225 cm ³ /g
Bulk density	640 kg/m ³ to 40 lb/ft ³

ถ่านกระดูกมีคุณสมบัติในการดูดซับสารปนเปื้อนที่สามารถละลายได้ออกจากสารละลาย และยึดเข้าไปในโครงสร้างของรูพรุนของถ่านกระดูก และเนื่องจากถ่านกระดูกประกอบด้วย 2 องค์ประกอบด้วยกัน ทำให้มีความสามารถในการดูดซับทั้งส่วนของแอนไอออนิก และ แคทไอออนิกในสารละลาย และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติคือ เมื่อทำการดูดซับด้วยถ่านกระดูกแล้ว ตัวที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดทางเคมีภายในโครงร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และไม่สามารถหลุดออกจากสารดูดติดผิวได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เคมิซอร์ปชัน (Chemisorption) ซึ่งไม่พบคุณสมบัตินี้ในสารดูดติดผิวที่มีองค์ประกอบคาร์บอนโดยทั่วไป แต่จะพบคุณสมบัตินี้ในตัวแลกเปลี่ยนไอออนบางชนิดเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ในถ่านกระดูก เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ถ่านกระดูกมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น นอกจากนี้ถ่านกระดูกยังสามารถดูดซับสี กลิ่น รส คลอรีน ฟลูออรีน และสารอินทรีย์อื่นๆในน้ำได้อีกด้วย

ปัจจุบันมีการนำถ่านกระดูกมาใช้งานดังต่อไปนี้คือ

- 1) ใช้เป็นสารดูดติดผิวในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ซึ่งนำถ่านกระดูกมาใช้ในการกำจัดสีของน้ำตาล
- 2) ใช้ในการกรองน้ำเพื่อลดระดับของโลหะหนัก คลอไรด์ โบรไมด์ ฟลูออไรด์ รวมทั้งยาฆ่าแมลง
- 3) ใช้เป็นสารดูดติดผิวสำหรับการกรองน้ำที่ใช้หมุนเวียนในสระว่ายน้ำ

2.8 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

- ผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยกระบวนการดูดซับ

Sorg, T. J., 1978 ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วในน้ำดื่มสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์แบบผง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 7 ถึง 9 และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีค่ามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5 ถึง 10

Harison, R. M. และ D. P. H. Laxen, 1983 ได้อธิบายว่าถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 และสามารถใช้น้ำทิ้งที่มีปริมาณตะกั่วเข้มข้นสูง แต่มีราคาแพงแม้จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการฟื้นฟูสภาพก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วโดยวิธีนี้ก็ยังคงสูง

Panday, K. K. และคณะ, 1987 ศึกษาการใช้ซีเมนต์ถ่านในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองนี้ใช้ ซีเมนต์ถ่านปริมาณ 1 กรัมต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี เมื่อพีเอชเท่ากับ 8.5 และเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 84.80 เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสูง กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอชจาก 4 เป็น 8.5 ที่ความเข้มข้น เริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มจาก 11.85 เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ และยังพบอีกด้วยว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10 และประสิทธิภาพของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm)

Alaerts, G. J., 1989 ได้ศึกษาการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว พบว่ามีความสามารถในการกำจัดเป็น 20 มิลลิกรัมของ Cr^{6+} ต่อกรัมคาร์บอนที่พีเอชเท่ากับ 2.5

Yavada และคณะ, 1989 ได้ศึกษาถึงการนำซี้ถ่านลอมมาใช้ในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ซี้ถ่านลอมปริมาณ 1 กรัม เขย่าในสารละลายสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6.4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในรูปร้อยละการกำจัดจะลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น และสมการไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช

อารีย์ ชาญบัณฑิตนันท์, 1993 ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซี้ถ่านลอมไนต์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดที่ระยะเก็บกักแตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมง พบว่าซี้ถ่านลอมไนต์สามารถลดปริมาณตะกั่วในน้ำที่มีความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์และมีระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมคือ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนซี้ถ่านลอมไนต์ต่อน้ำโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดคือ 1:62.50 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด

- ผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ถ่านกระดูก

Yoshiharu, H. และคณะ, 1987 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองโดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ที่ความเข้มข้น 100 ppm. ผสมกับถ่านกระดูกหรือถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายมีค่าระหว่าง 1 ถึง 7 เมื่อพีเอชของสารละลายเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 และพีเอชสุดท้ายมีค่าระหว่าง 7 ถึง 10 เมื่อพีเอชเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 3 และประสิทธิภาพการดูดซับของ Cr^{6+} จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายหลังทำการทดลอง คือสำหรับถ่านกัมมันต์ค่าพีเอชสุดท้ายจะอยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 5.5 และสำหรับถ่านกระดูกจะมีค่าพีเอชประมาณ 1 จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยจะมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ประมาณ 10 และ 46 เปอร์เซ็นต์สำหรับถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูกตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าพีเอชสุดท้ายน้อยกว่า 3.5 Cr^{6+} จะถูกลดรูปเป็น Cr^{3+} และ Cr^{3+} จะค่อยๆ ถูกดูดซับด้วยสารดูดติดผิว

Azab, M.S. และ Peterson, P.J., 1989 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียโดยใช้สารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองโดยใช้สารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 100 ppm. ให้ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่างๆ ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และพีเอชเป็น 5.2 พบว่ากระดูกสามารถดูดซับแคดเมียมได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Brown และคณะ, 1992 ทำการศึกษาโดยใช้สารดูดติดผิวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ถ่านไม้ ถ่านลิกไนต์ ถ่านกระดูก ถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆรวมทั้งสิ้น 17 ชนิด นำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยโลหะหนักที่ใช้ศึกษา ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ผลการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดคือสามารถกำจัด แคดเมียมได้มากกว่า 100 กรัมต่อปริมาณถ่านกระดูก 1 กิโลกรัม ซึ่งเหตุผลที่ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงอาจเนื่องจากถ่านกระดูกมีไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นองค์ประกอบ

Maycock, K. R. และคณะ, 1996 ทำการศึกษาการกำจัดโลหะจากน้ำเกลือจากการผลิตคลอรีนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยถ่านกระดูก ทำการทดลองโดยใช้สารละลายเกลือที่ความเข้มข้นต่างๆซึ่งมีอะลูมิเนียม ตะกั่ว แมงกานีส และนิกเกิลเจือปนอยู่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านกระดูก 1.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับอะลูมิเนียม แต่จะมีผลยับยั้งการดูดซับตะกั่วและแมงกานีสเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายสูงๆ ผลที่ได้พอสรุปได้ว่า ถ่านกระดูกสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักเหล่านี้ได้ และปริมาณเกลือที่เจือปนอยู่ในน้ำไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก

Irvine GD. และ Knowles Mj., 1997 ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ถ่านกระดูกทางการค้าชื่อ Brimac216 โดยทำการทดลองกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้หน่วยจำลองของ Tate & Lyle Process Technology (TLPT) ที่บรรจุถ่านกระดูก ขนาด 20/60 mesh น้ำหนัก 4 กิโลกรัมอยู่ภายใน โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเป็น 22 ลิตรต่อนาที พบว่า ลักษณะของน้ำเข้าและขาออกจากระบบ แสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งจากผลการบำบัดพบว่าน้ำเสียหลังจากบำบัดแล้วสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

สมชาย พิษณุชยานนท์, 1997 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำโดยใช้ถ่านกระดูกในการทดลองแบบคอลัมน์ ทำการศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 และ 50

มิลลิลิตรต่อลิตร ไหลผ่านชั้นกระดูกซึ่งบรรจุคอลัมน์สูง 30 และ 50 เซนติเมตร ด้วยอัตราการกรอง 41.3 มิลลิลิตรต่ออนาที ผลการทดลองพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นเท่ากัน ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะสูงขึ้นตามความสูงของชั้นกระดูกที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระดับความสูงของชั้นถ่านกระดูกเท่ากัน ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะลดลง เมื่อความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูก พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิลิตรต่อลิตรและความสูงของชั้นถ่านกระดูก 50 เซนติเมตร ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการกำจัดถึง 96.2 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองแสดงลักษณะน้ำขาเข้าและขาออกจากระบบ (GD Irvine และ Mj Knowles, 1997)

โลหะหนัก	ปริมาณในขาเข้า (มก./ล.)	ปริมาณในขาออก (มก./ล.)
สังกะสี	0.023	0.006
ทองแดง	0.014	<0.003
นิกเกิล	0.095	<0.003
โครเมียม	0.086	0.050
แคดเมียม	<0.001	<0.001
ตะกั่ว	0.015	0.005
อลูมิเนียม	2.8.	0.84

Dahbi S. และคณะ, 1999 ทำการศึกษาการดูดติดผิวของ Cr^{6+} บนถ่านกระดูก โดยศึกษาถึงตัวแปรทางด้านเวลา, ปริมาณถ่านกระดูก, พีเอช, ความเข้มข้นและปริมาณสารละลายโครเมียม ทำการทดลองโดยใช้สารละลายของ Cr^{6+} ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 5 ถึง 25 มก./ล. พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 1 โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 2 กรัม และใช้เวลาในการผสม 30 นาที และยังพบว่าการบำบัดกระดูกชั้นต้นด้วยกรดหรือด่างไม่ส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ Cr^{6+}

- ผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับถ่านกระดูกนอกเหนือจากใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

Lewis J., 1995 ทำการศึกษาการใช้ถ่านกระดุกเป็นตัวกรองช้า เพื่อกำจัดสีในการผลิตน้ำสำหรับใช้ในชนบท โดยทำการศึกษาจำลองการใช้งานจริงเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าการกรองโดยใช้ อัตราการไหลต่ำผ่านถ่านกระดุก ทำให้ได้น้ำที่ผ่านการกรองมีสีและความเข้มข้นของไตรแฮโลมีเทนเป็นที่ยอมรับของมาตรฐานของอีซี (EC Standard) และยังพบว่าถ่านกระดุกสามารถรองรับกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบอย่างรวดเร็ว

Kader AA, Aly ANH และ Girgis BS, 1996 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของถ่านกระดุก โดยทำการทดลองภายใต้ห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาโดยให้น้ำเชื่อมจากโรงงานทำน้ำตาลไหลผ่านคอลัมน์แบบอยู่นิ่ง โดยใช้ถ่านกระดุกในการบำบัดทั้งหมด 4 รอบการทำงานซึ่งแต่ละรอบการทำงานใช้เวลา 4 วัน ซึ่งในระหว่างรอบการทำงานจะทำการกระตุ้นถ่านกระดุกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ผลที่ได้พบว่า ในรอบการทำงานแรกซึ่งเป็นถ่านกระดุกใหม่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด และในรอบการทำงานที่ 2, 3 และ 4 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่เกือบจะเท่ากัน

Maycock, K.R. และคณะ, 1996 ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Al และ SiO₂ ทั้งในน้ำและในน้ำเกลือระหว่างถ่านกระดุกและถ่านกัมมันต์ พบว่าสำหรับ Al ทั้งถ่านกระดุกและถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับในน้ำได้ ส่วนการดูดซับในน้ำเกลือพบว่าถ่านกระดุกสามารถดูดซับได้เพียงชนิดเดียว และสำหรับ SiO₂ พบว่าเฉพาะถ่านกระดุกเท่านั้นที่สามารถดูดซับ SiO₂ ในสารละลายเกลือได้ และนอกจากนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำและน้ำเกลือ พบว่าความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำด้วยถ่านกระดุกเป็น 110 มิลลิกรัมฟลูออไรด์ต่อ 100 กรัมถ่านกระดุก และสำหรับในน้ำเกลือเป็น 250 มิลลิกรัมฟลูออไรด์ต่อ 100 กรัมถ่านกระดุก

Phatumvanit P และ Legeros RZ, 1997 ศึกษาถึงลักษณะของถ่านกระดุกที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำที่มีฟลูออไรด์เจือปนอยู่สูง ซึ่งจุดมุ่งหมายในการทำการทดลองคือศึกษาตัวแปรที่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ จึงทำการศึกษาโดยเตรียมถ่านกระดุกโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำธรรมชาติในประเทศไทยที่มีฟลูออไรด์เจือปนอยู่และทำการฟื้นฟูสภาพถ่านกระดุกหลังการใช้งานแล้วด้วยกรดหรือด่าง ผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดุกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 600 องศาเซลเซียส) และฟื้นฟูสภาพโดยใช้ด่างจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด และพบว่า ความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยถ่านกระดุกมีความสัมพันธ์

กับขนาดของผลึกของอะพาไทต์ในโครงสร้างถ่านกระดูก (วิเคราะห์ด้วยวิธี XRD) ซึ่งก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเผาด้วยกล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการเผาถ่านกระดูกสูงขึ้น จะทำให้ขนาดของผลึกอะพาไทต์เพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง