



น้ำ เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มนุษย์ และสิ่งมีชีวิตทุกชนิดขาดไม่ได้ นอกจากนี้น้ำยังเป็นทรัพยากรที่สำคัญยิ่ง สำหรับการพัฒนาเศรษฐกิจขั้นพื้นฐาน เช่น การประมง การเกษตร การคมนาคม การสาธารณสุข การอุตสาหกรรม และการพลังงาน ตลอดจนเป็นแหล่งรองรับของเสียอันเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

ในปัจจุบันจำนวนประชากรโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการนำทรัพยากรต่าง ๆ มาใช้อย่างมากเพื่อเพิ่มผลผลิตและการจัดสาธารณูปโภคต่าง ๆ ให้เพียงพอแก่ความต้องการที่เพิ่มขึ้น ของเสียเหล่านั้นส่วนหนึ่งได้ระบายลงสู่แหล่งน้ำเป็นเหตุให้แหล่งน้ำนั้นเสื่อมโทรมลง อันก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำขึ้นได้

การขยายตัวทางอุตสาหกรรม ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำขึ้นโดยการปล่อยของเสียอันประกอบไปด้วย อนินทรีย์สาร และธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะโลหะลงสู่แหล่งน้ำ โดยที่โลหะส่วนที่ไม่ละลายตัวทางธรรมชาติจะตกตะกอนสะสมอยู่ในตะกอนของแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถสะสมอยู่ในเนื้อของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ๆ ด้วย โดยสะสมเพิ่มขึ้นในห่วงโซ่อาหารของระบบนิเวศน์ การปนเปื้อนของโลหะในน้ำจึงไม่เพียงแต่มีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ และมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเท่านั้น แต่ยังมีอันตรายต่อคนและสัตว์เลี้ยงที่บริโภคพืช และสัตว์น้ำเหล่านั้นอีกด้วย ดังเช่น กรณีการเกิดโรคมินามาตะในคนญี่ปุ่นที่บริโภคปลาที่มีมีเมทิลเมอร์คิวรีอยู่ในระดับสูง (Clarkson, Smith, Marsh & Turner, 1975) และการเกิดโรคอิไตอิไต เนื่องจากบริโภคปลาที่มีแคดเมียมสูง (Nomiya, 1975)

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าจะมีการควบคุมโรงงานต่าง ๆ ทางกฎหมายอย่างเข้มงวดก็ยังพบว่า มีแนวโน้มการปนเปื้อนของโลหะในน้ำ บริเวณปากแม่น้ำสายต่าง ๆ ของอ่าวไทยตอนบนสูงขึ้น เช่น ที่แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำแม่กลอง (Polprasert et al, 1979 และ กรมอนามัย, 2524) แล้วแพร่กระจายลงสู่อ่าวไทยตอนใน ซึ่งอำเภอ อิทธิเกษม, ราชนิกร บำรุงราชสิทธิ์, วรณา แก้วภักดี และพันธ์ จริงจิตร์ (2524) พบว่าปริมาณโลหะแคดเมียม คอปเปอร์ โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี และปรอท ในอ่าวไทยตอนในมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าโลหะที่จะพบในน้ำทะเลประเทศเขตร้อน อันส่งผลต่อการลดลงของสิ่งมีชีวิต เช่น การตายของหอยแครงและหอยแมลงภู่ในบริเวณฟาร์มหอย (สุธรรม สิทธิเกษม และสุวรรณี เงินบำรุง, 2527) หรือส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้อาศัยอยู่ริมน้ำ เช่น กรณีมินามาตะในญี่ปุ่น (Schroeder, 1973) เป็นต้น จึงควรมีการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อบรรเทามลพิษของแหล่งน้ำเหล่านี้ขึ้น เพราะนอกจากการปนเปื้อนในแม่น้ำสายต่าง ๆ แล้วยังพบว่าแหล่งน้ำอื่น ๆ ที่มี

ทางน้ำติดต่อกับแม่น้ำสายต่าง ๆ ก็ประสบปัญหาการปนเปื้อนของโลหะเช่นกัน ตัวอย่างเช่นในบึงมักกะสันสามารถตรวจพบปริมาณการปนเปื้อนของโลหะได้ (จาร์นัย วนิชยกุล, พภา อุดมนิธิกุล และารพันธ์ แก้วอุดม, 2530)

ดังนั้นในปี พ.ศ. 2528 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงมีพระราชดำริให้ทดลองใช้บึงมักกะสัน เป็นสถานที่ดำเนินการวิจัย เพื่อให้บึงมักกะสันเป็นแหล่งบำบัดน้ำเสียส่วนหนึ่งของกรุงเทพฯ โดยมีทางน้ำไหลเข้าจากคลองสามเสน และทางน้ำออกสู่คลองแสนแสบ (ปรีชญา ชัญญาติ, ธนง ตันติศิริวิทย์, อุดล วรวิศิษฐ์บำรุง, วิสูตร จันทราภา, เสาวนีย์ ธรรมสละ, ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และสมจิตร ชัตติยารา, 2530)

บึงมักกะสันนี้ ปัจจุบันมีพื้นที่ประมาณ 92 ไร่ กว้างประมาณ 60 เมตร ยาวประมาณ 2 กิโลเมตร ลึกประมาณ 2 เมตร แต่เดิมปี พ.ศ. 2475 นั้น ได้สร้างบึงนี้ขึ้นเพื่อทำหน้าที่รับภาระระบายน้ำทิ้งจากโรงงานซ่อมรถไฟ และได้ใช้มาเรื่อยจนถึงปัจจุบัน (เกษม จันทรแก้ว, รัศมี สร้อยวัลณา, นิพนธ์ ตั้งธรรม, ศักดิ์สิทธิ์ ทวีเดช, ไชยยุทธ กลิ่นสुकนธ์, สามีคดี บุญยะวัฒน์ และเติมศักดิ์ สุขวิบูลย์, 2530) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านลงสู่บึงนี้ได้ผ่านแหล่งชุมชนจากคลองสามเสน และมีน้ำทิ้งจากโรงงานซ่อมรถไฟ อันประกอบไปด้วยไฟฟ้า แบตเตอรี่ โรงกลึงและโรงหล่ออื่น ทำให้น้ำในบึงแห่งนี้มีคุณภาพไม่เหมาะสมสำหรับอุปโภค และบริโภคตามข้อมูลของจาร์นัย วนิชยกุล และคณะ (2530) ที่ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ พบว่า ฟิล์ยความเข้มข้นของเหล็ก 0.25 - 7.16 ppm, สังกะสีน้อยกว่า 2.5 - 138 ppb, แมงกานีส 88 - 244 ppb, ทองแดง 1.4 - 30.3 ppb, โครเมียม 0.5 - 16.7 ppb, ตะกั่ว 0.5 - 11.2 แคดเมียม, 0.05 - 2.1 ppb, และปรอท 0.02 - 0.78 ppb น้ำในบึงมีลักษณะ ชุ่น ดำ และมีกลิ่นเหม็น ชลธิชา นุ่มหอม, มณฑิพย์ ศรีรัตน, เจิดจรรย์ ศิริวงศ์ และรววัฒน์ สาแก้ว (2530) พบคราบน้ำมันลอยอยู่บนผิวน้ำและน้ำมันที่ละลายน้ำได้มีปริมาณตั้งแต่ 0.2 - 12.84 มิลลิกรัม/ลิตร

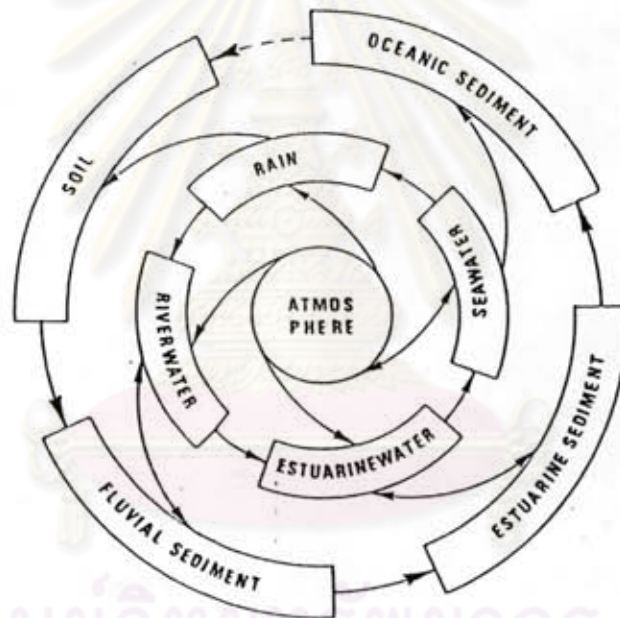
ในการทดลองใช้บึงมักกะสันเป็นที่บำบัดโลหะก่อนปล่อยสู่คลองแสนแสบนั้น ได้มีการพิจารณาถึงวิธีการที่นิยมใช้ เช่น การสกัดด้วยตัวละลาย การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับด้วยคาร์บอน และวิธีการเคมีอื่น ๆ นั้น วิธีเหล่านี้จะต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงมาก พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวจึงพระราชทานแนวความคิดแก่คณะวิจัยให้พิจารณาใช้พืชน้ำ ซึ่งมีความสามารถในการสะสมโลหะ และสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารได้ค่อนข้างมาก และพบว่าผักตบชวาซึ่งเป็นพืชลอยน้ำมีอยู่มากมายในบริเวณบึงมักกะสันสามารถดูดสะสมโลหะได้มากกว่าพืชน้ำชนิดอื่น (กรมวิชาการเกษตร, 2530) และมีความสามารถขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณ และน้ำหนักรับได้ตั้งแต่ 3 - 5 เท่า ภายในเวลา 1 เดือน ถึง 1 เดือนครึ่ง (กรมชลประทาน, 2530) จึงได้พิจารณาให้ใช้ผักตบชวาเพื่อบำบัดโลหะในบึงมักกะสันนี้

อย่างไรก็ดี จากการศึกษาถึงการทำงานในโครงการพระราชดำริตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 นั้นยังมิได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมของโลหะในระบบนิเวศน์ของบึงอย่างเด่นชัด จึงยังไม่ทราบถึง



การสะสมตัวของโลหะ เมื่อถูกนำเข้าสู่ระบบนิเวศน์ของบึงแล้วว่าจะเข้าไปสะสมอยู่ที่ใด เช่น ในตะกอน ในสารแขวนลอย ในน้ำ หรือในผักตบชวา กรณีเช่นนี้ย่อมไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะจริงหรือไม่ ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงข้อมูลที่ขาดหายไป จึงได้ดำเนินการวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของโลหะในบึงมักกะสัน โดยศึกษาปริมาณที่สะสมในตะกอน น้ำ สารแขวนลอย และผักตบชวา เพื่อใช้พิจารณาว่าผักตบชวาสามารถที่จะใช้ในการบำบัดโลหะ ในบึงมักกะสันนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่

การศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายโลหะผ่านวัฏจักรของน้ำ พบว่าโลหะสามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ และสามารถเคลื่อนย้ายไปสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของแหล่งน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงการสะสมและการเคลื่อนย้ายของโลหะในวัฏจักรของน้ำ (Salomons and Forstner, 1984)

วงนอกสุดเป็นการเคลื่อนย้าย โดยมีสารแขวนลอยเป็นตัวพา วงกลางเป็นการเคลื่อนย้ายของโลหะที่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันกับสารแขวนลอย ส่วนตรงกลางเป็นบรรยากาศที่มีผลต่อทุก ๆ ส่วนของวัฏจักรนี้ ในแง่ที่ควบคุม อุณหภูมิ ฝน ความดันบรรยากาศ กระแสลม ฯลฯ

การที่โลหะอยู่ได้ในส่วนต่าง ๆ ของวัฏจักร และเคลื่อนย้ายได้นั้น โลหะจะต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งรูปแบบของโลหะในแหล่งน้ำว่าจะอยู่ในรูปแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะเอง และสภาพแวดล้อม

## รูปแบบของโลหะในแหล่งน้ำธรรมชาติ

รูปแบบที่นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบนั้น ได้อาศัยการค้นคว้าทดลองในทางเคมีวิเคราะห์ ซึ่งให้ผลสรุปว่า โลหะนั้นอาจอยู่ในรูปแบบของสารประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน หรือโลหะนั้นอาจมีรูปแบบที่แตกต่างกันเนื่องจากขนาดของโมเลกุล เพื่อช่วยให้เกิดความเข้าใจได้ดีขึ้น จึงควรพิจารณาคุณสมบัติของโลหะที่จะมีผลต่อรูปแบบของมันในแหล่งน้ำเสียก่อน โดยทั่วไปแล้วโลหะจะแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามคุณสมบัติได้ดังนี้

### 1. การแบ่งตามรูปแบบทางเคมี (chemical form)

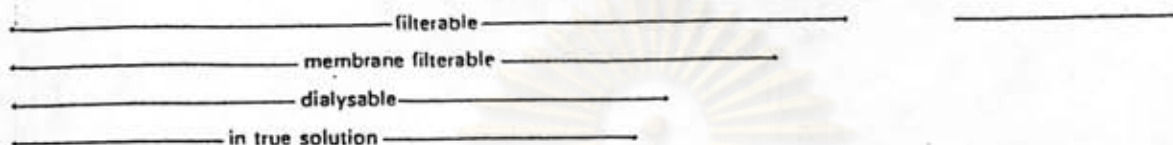
คุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดเมื่ออยู่ในน้ำตามธรรมชาติ จะอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งบางรูปแบบจะมีปริมาณมากกว่ารูปแบบอื่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดและด่าง เป็นต้น จากรูปที่ 1.2 แสดงรูปแบบที่แตกต่างกันทางเคมี 7 ชนิด ซึ่งจะเห็นว่ารูปแบบของโลหะส่วนมาก อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนทั้งที่เป็นสารเชิงซ้อนของอินทรีย์และอนินทรีย์ การเกิดของสารประกอบเชิงซ้อนเรียกว่า coordinate reaction และเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางเคมีของโลหะในแหล่งน้ำ

### 2. การแบ่งโดยขนาด (size)

การแบ่งโดยขนาดอาศัยหลักการคำนวณของพันธะต่าง ๆ ของโมเลกุลหรืออะตอมที่เข้าทำปฏิกิริยากันจัดแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ดังรูปที่ 1.2 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของโลหะที่อาจเกิดขึ้นได้ในน้ำธรรมชาติ

ในทางปฏิบัติสามารถใช้กระดาษกรองเมมเบรนฟิลเตอร์ และวิธีโคอะไลซิสมแยก รูปแบบต่าง ๆ ออกจากกันที่นิยมใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับได้แก่ เมมเบรนฟิลเตอร์ ซึ่งมีรูขนาด 0.45 ไมครอน โลหะที่สามารถลอดผ่านเมมเบรนฟิลเตอร์ได้เรียกว่าอยู่ในรูปสารละลาย หรือ dissolved ส่วนที่ค้างอยู่บนกระดาษกรองเรียกว่าสารแขวนลอย หรือ particulate

อย่างไรก็ดีพบว่าวิธีการนี้ยังไม่สามารถแยกรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งออกจากกันได้โดยสิ้นเชิง จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ หรือวิธีการอื่นเข้ามาช่วยวิเคราะห์แทน เช่น อะตอมมิคแอบซอร์ปชัน นิวตรอนแอคทิเวชัน เป็นต้น



Free metal ions	Inorganic ion pairs; inorganic complexes	Organic complexes, chelates	Metal species bound to high molecular wt. org. material	Metal species in the form of highly dispersed colloids	Metal species sorbed on colloids	Precipitates organic particles, remains of living organisms
-----------------	--	-----------------------------	---	--	----------------------------------	---

Diameter range: ← 10 Å ————— 100 Å ————— 1000 Å

Examples:

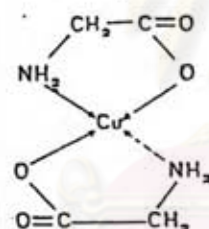
$\text{Cu}^{2+}$  aq.  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$

$\text{Fe}^{2+}$  aq.  $\text{Pb}(\text{CO}_3)^0$

$\text{Pb}^{2+}$  aq.  $\text{CuCO}_3$   
 $\text{AgSH}$   
 $\text{CdCl}^+$   
 $\text{CoOH}^+$   
 $\text{Zn}(\text{OH})_2^+$   
 $\text{Ag}_2\text{S}_2\text{H}_2^-$

Me-SR

Me-OOCR



Me-lipids

Me-humic-acid polymers

"lakes"  
 "Gelbstoffe"  
 Me-polysaccharides

$\text{FeOOH}$

$\text{Fe}(\text{OH})_3$

Mn(IV) oxides  
 $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   
 $\text{Na}_4\text{Mn}_4\text{O}_{27}$   
 $\text{Ag}_2\text{S}$

$\text{Me}_x(\text{OH})_y$

$\text{MeCO}_3$ , MeS  
 etc. on clays.

$\text{FeOOH}$  or  
 Mn(IV) on  
 oxides

รูปที่ 1.2 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของโลหะที่อาจเกิดขึ้นในน้ำธรรมชาติ

(Stumm and Brauner, 1975)



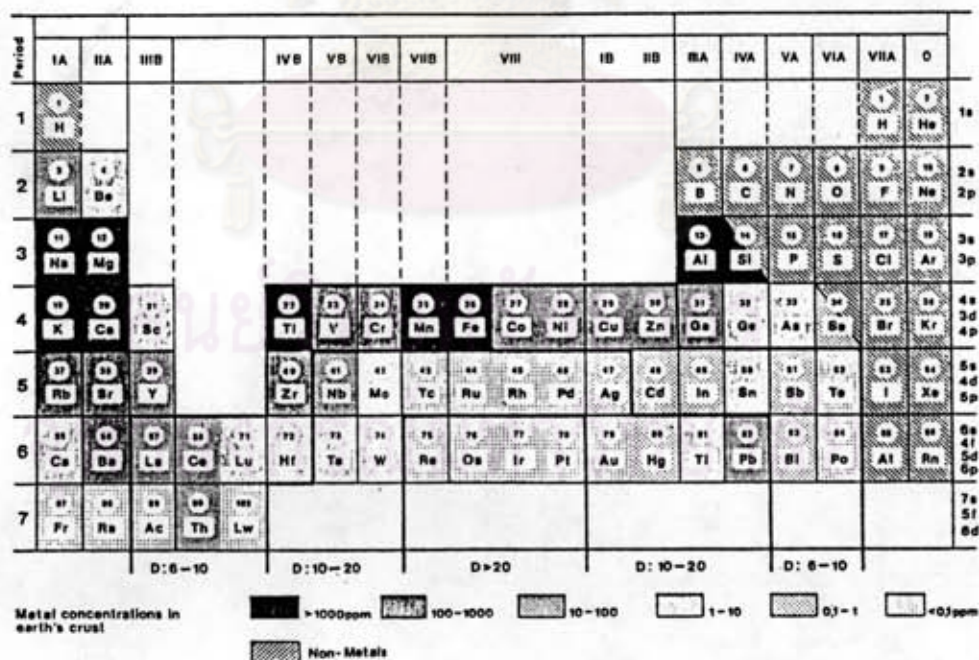
## การจัดจำแนกโลหะ

จากการที่โลหะในแหล่งน้ำธรรมชาติมีหลายรูปแบบ ซึ่งโลหะแต่ละรูปแบบก็มีความเหมือนหรือแตกต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาจึงได้มีผู้จัดกลุ่มโลหะโดยอาศัยคุณสมบัติเฉพาะตัวบางประการแบ่งโลหะออกเป็นกลุ่ม ๆ แตกต่างกันดังนี้

### 1. แบ่งตามการจัดเรียงอิเล็กตรอน

ในการจัดลำดับโลหะตามตารางธาตุ รูปที่ 1.3 มีหมู่ที่สำคัญ 8 หมู่คือ IA ถึง IIIA และกลุ่ม 0 ซึ่งเป็นพวกแก๊สเฉื่อย โดยมีโลหะอัลคาไลและอัลคาไลเอิร์ท ในหมู่ IA และ IIA ตามลำดับ

ธาตุที่อยู่ระหว่างหมู่ IIA และ IIIA ประกอบด้วยธาตุที่มีอิเล็กตรอน ในชั้น D ซึ่งเรียกว่าธาตุทรานสิชัน จะมีความสำคัญในแง่การศึกษาเกี่ยวกับโลหะ เนื่องจากประกอบไปด้วยโลหะที่สำคัญในแหล่งน้ำหลายชนิด สำหรับธาตุที่มีอิเล็กตรอนเพิ่มในระดับชั้น F ถ้าเป็นระดับ 4F เรียกว่า Lanthanide series และในระดับ 5F เรียกว่า trans uranium series



รูปที่ 1.3 แสดงตารางธาตุ (Goldberg, 1981)

ตารางที่ 1.1 การจัดจำแนกประเภทของไอออนของโลหะ (Pearson, 1968)

A-type metal cations	Transition metal cations	B-type metal cations
Electron configuration of inert gas. Low polarizability. "Hard spheres" (H <sup>+</sup> ), Li <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Be <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Sr <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Sc <sup>3+</sup> , La <sup>3+</sup> , Si <sup>4+</sup> , Ti <sup>4+</sup> , Zr <sup>4+</sup> , Th <sup>4+</sup>	1-9 outer shell electrons; not spherically symmetrical V <sup>2+</sup> , Cr <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Ti <sup>3+</sup> , V <sup>3+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Mn <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Co <sup>3+</sup>	Electron number corresponds to Ni <sup>0</sup> , Pd <sup>0</sup> and Pt <sup>0</sup> (10 or 12 outer shell electrons). Low electronegativity, high polarizability. "Soft spheres" Cu <sup>+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Au <sup>+</sup> , Tl <sup>+</sup> , Ga <sup>+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Sn <sup>2+</sup> , Tl <sup>3+</sup> , Au <sup>3+</sup> , In <sup>3+</sup> , Bi <sup>3+</sup>
According to Pearson's (1968) Hard and Soft Acids		
Hard acids	Borderline	Soft acids
All A-metal cations plus Cr <sup>3+</sup> , Mn <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Co <sup>3+</sup> , UO <sup>2+</sup> , VO <sup>2+</sup> as well as species like BF <sub>3</sub> , BCl <sub>3</sub> , SO <sub>3</sub> , RSO <sub>2</sub> <sup>+</sup> , RPO <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> , RCO <sup>+</sup> , R <sub>3</sub> C <sup>+</sup>	All bivalent transition metal cations plus Zn <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Bi <sup>3+</sup>  SO <sub>2</sub> , NO <sup>+</sup> , B(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	All B-metal cations minus Zn <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Bi <sup>3+</sup>  All metal atoms, bulk metals I <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> , ICN, I <sup>+</sup> , Br <sup>+</sup>
Preference for ligand atom		
N ≧ P O ≧ S F ≧ Cl		P ≧ N S ≧ O I ≧ F
Qualitative generalizations on stability sequence		
Cations	Cations	
Stability ≈ prop. $\frac{\text{charge}}{\text{radius}}$	Irving-Williams order Mn <sup>2+</sup> < Fe <sup>2+</sup> < Co <sup>2+</sup> < Ni <sup>2+</sup> < Cu <sup>2+</sup> > Zn <sup>2+</sup>	
Ligands F > O > N = Cl > Br > I > S OH <sup>-</sup> > RO <sup>-</sup> > RCO <sub>2</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ≧ NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ≧ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≧ ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		Ligands S > I > Br > Cl = N > O > F



การจัดลำดับธาตุต่าง ๆ ตามตารางธาตุ จะเป็นไปตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้นต่าง ๆ (electron configuration) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน เช่น การนำไฟฟ้า ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดอิเล็กตรอน เลขออกซิเดชัน เป็นต้น

สำหรับโลหะสามารถใช้การจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้น d แบ่งโลหะออกเป็น 3 พวก ตามตารางที่ 1.1 ได้ดังนี้

### 1.1 โลหะกลุ่ม A

มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเหมือนแก๊สเฉื่อย คือไม่มีอิเล็กตรอนที่ชั้น  $d(d^0)$  ประกอบด้วยโลหะอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม และออรอนอื่น ๆ เช่น อลูมิเนียม ซิลิกอน

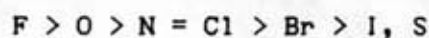
โลหะที่อยู่ในกลุ่มนี้ชอบเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์ที่มีออกซิเจน และฟลูออไรด์เป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีกว่า แอมโมเนียหรือไซยาไนด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะไม่พบตะกอนซัลไฟด์ของโลหะชนิดนี้ เพราะหมู่ไฮดรอกไซด์จะแทนที่หมู่ซัลไฟด์หรือซัลเฟต ของโลหะชนิดนี้หมด สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนคลอโรหรือไอโอไดด์จะเป็นสารประกอบที่ไม่คงตัวเมื่อเกิดจากโลหะกลุ่มนี้ และจะเกิดได้เฉพาะสถานะที่เป็นกรด หรือมีหมู่ไฮดรอกไซด์น้อยเท่านั้น

โลหะกลุ่ม A จะตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตและฟอสเฟต แต่เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตและไนโตรเจน (Riley & Skirrow 1975)

โลหะกลุ่มนี้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี และไอออนไนเซชันโพเทนเชียลต่ำ ดังนั้นจึงมีขนาดค่อนข้างเล็ก และทำให้เกิดการบิดตัวค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดสารประกอบ สารประกอบที่เกิดขึ้นจึงมีโครงสร้างค่อนข้างอัดกันแน่น

เสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นตามประจุที่เพิ่มขึ้น จากซ้ายไปขวาของตารางธาตุ และยิ่งเส้นผ่าศูนย์กลางอะตอมของโลหะเล็กลงมากขึ้น เสถียรภาพของสารประกอบยิ่งเพิ่มขึ้น (Riley & Skirrow, 1975; Pytkowicz and Ricardo, 1983)

เมื่อพิจารณาในด้านของลิแกนด์ พบว่าโลหะชอบเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ตามลำดับดังนี้ (Stumm & Morgan, 1981)



### 1.2 โลหะกลุ่ม B

โลหะกลุ่มนี้อยู่ในหมู่ IB, IIB, IIIA และ IVA ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอก 10 - 20 ตัว ตัวอย่างโลหะในกลุ่มนี้ เช่น ซิลเวอร์ สังกะสี พรอท ตะกั่ว และดีบุก



โลหะกลุ่มนี้ชอบที่จะเกิดสารประกอบ กับลิแกนด์ที่มีซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน เป็นผู้ให้อิเล็กตรอน เช่น แอมโมเนียซัลไฟด์ และฟอสไฟด์มากกว่าลิแกนด์ที่มีออกซิเจนเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้นสารประกอบของโลหะกลุ่มนี้กับไซยาไนด์ ไอโอไดด์และคลอไรด์จะคงตัวมากกว่า สารประกอบของโลหะฟลูออไรด์

พิจารณาเสถียรภาพของสารประกอบเมื่อเทียบกับลิแกนด์ดังนี้

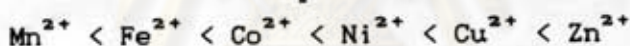


โลหะกลุ่มนี้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงเมื่อเทียบกับกลุ่ม A ดังนั้นจึงมีการบิดตัวได้มากกว่ากลุ่ม A สารประกอบที่ได้มีโครงสร้างไม่อัดกัน

### 1.3 โลหะทรานสิชั่น

จะมีการจัดอิเล็กตรอนวงนอกสุด 1-9 ตัว มีคุณสมบัติคล้ายทั้งชนิด A และ B ชอบตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์

Irving - Williams (1953) ได้ค้นพบว่าเสถียรภาพของสารประกอบในกลุ่มนี้จะเพิ่มขึ้นดังนี้ (ตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.4)

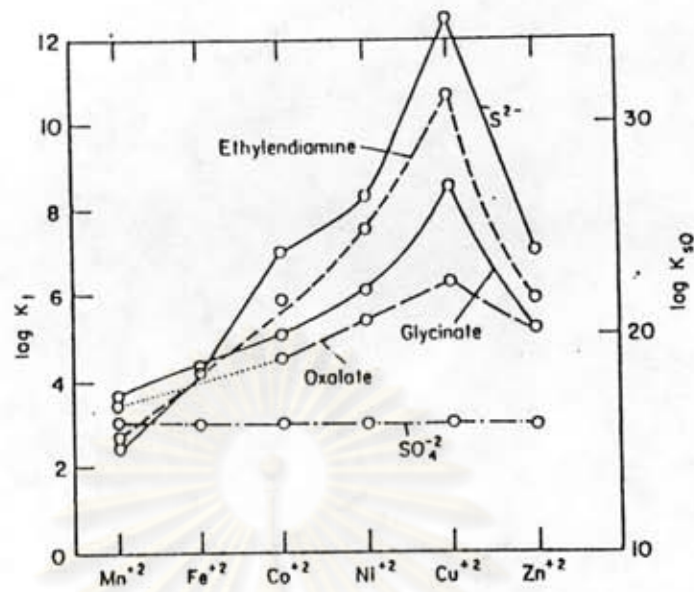


เขียนเป็นสูตรดังนี้

$$\text{Stability} \sim \frac{\text{prop.} \times \text{charge}}{\text{radius}}$$

radius คือรัศมีอะตอมของโลหะ  
 charge คือประจุของโลหะ ในที่นี้มีค่าเท่ากันทุกอิออน คือ บวกสอง  
 prop. คือโอกาสที่จะชนกัน แล้วเกิดปฏิกิริยา ในที่นี้ใช้ความเข้มข้นเท่ากันเพื่อเปรียบเทียบ จึงเป็นค่าคงที่





รูปที่ 1.4 แสดงค่า Stability constant ของโลหะทรานสิชั่นและ Solubility products ของสารประกอบในอัตราส่วนของลิแกนด์ต่อโลหะ 1 ต่อ 1 (Irving - Williams, 1953)

จะเห็นว่าเสถียรภาพของสารประกอบเป็นไปตามตารางธาตุ โดยเพิ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น นั่นคือรัศมีที่ลดลงทำให้เสถียรภาพเพิ่มขึ้น เป็นไปตามทฤษฎีของ Irving - Williams

แต่สังกะสีมีเสถียรภาพของสารประกอบน้อยกว่าทองแดง เป็นเพราะสังกะสีมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเต็มทุกระดับพลังงานแล้ว จึงไม่ยอมรับอิเล็กตรอนอีก ซึ่งถ้ารับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนนั้นก็จะอยู่ในระดับพลังงานใหม่ ถัดออกไปไกลจากนิวเคลียส ทำให้พลังงานการดึงคู่อิเล็กตรอนต่อระดับชั้นที่ไกลกว่ามีน้อยกว่าระดับชั้นเดิมซึ่งอยู่ใกล้ ดังนั้นสารประกอบที่เกิดจากลิแกนด์ให้อิเล็กตรอนกับสังกะสี จึงมีเสถียรภาพน้อยกว่าสารประกอบที่เกิดจากลิแกนด์นั้นให้อิเล็กตรอนกับทองแดง ดังตารางที่ 1.2 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนของโลหะทรานสิชั่นบางตัว ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ



ตารางที่ 1.2 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนของโลหะทรานสิชันบางตัว ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ  
( Pytkowicz, 1983 )

Element	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s
Cr	2	2	6	2	6	5	1
Mn	2	2	6	2	6	5	2
Fe	2	2	6	2	6	6	2
Cu	2	2	6	2	6	10	1
Zn	2	2	6	2	6	10	2
Filled orbitals	2	2	6	2	6	10	2
<-----Filled----->							

## 2. แบ่งตามทฤษฎีของ Soft and hard acids and bases

เป็นวิธีจำแนกโลหะอีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยคุณสมบัติของโลหะ ในการที่เป็นผู้รับคู่  
อิเล็กตรอน (Lewis acids) จากผู้ให้อิเล็กตรอน (Lewis bases) ของ Pearson (1968)  
หรือ SHAB concept ดังสมการ



โดยแบ่งโลหะตามปฏิกิริยาเคมีในการเกิดสารประกอบเช่น อาจเกิดสารประกอบ  
โคออดิเนตเกิดคู่ของอิออน หรือสารประกอบ donor - acceptor อาศัยหลักการดังนี้

- แยก กรดแก่ - เบสแก่ ขณะเกิดปฏิกิริยา
- ให้โลหะกลุ่ม B จัดอยู่ใน กรดอ่อน - เบสอ่อน เพื่อจะได้นำโลหะกลุ่มอื่นมา  
เปรียบเทียบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

จากตารางที่ 1.1 แยกชนิดของปฏิกิริยา soft and hard acids and bases  
โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงค่าเอนโทรปี และเอนทัลปีที่แตกต่างกัน เช่น ค่าลบของเอนทัลปี จะ  
บอกว่าเกิดปฏิกิริยา Soft acid-soft bases เป็นต้น

ซึ่งจากหลักการ hard and soft acids and bases นี้สามารถนำมาประยุกต์  
ในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ เพราะน้ำก็เป็นตัวทำละลายที่รุนแรงมาก น่าที่จะเกิดปฏิกิริยา hard  
acids, hard bases และ hard complexes ขึ้นได้



## การสะสมโลหะในแหล่งน้ำ

โลหะที่พบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติอาจสะสมอยู่ในรูปของแข็งได้แก่ สารแขวนลอยและตะกอน หรืออาจอยู่ในรูปที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น สารประกอบโมเลกุลชนิดต่าง ๆ หรือไอออนอิสระ นอกจากนี้ยังสามารถเข้าไปสะสมในสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ด้วย

การเปลี่ยนแปลงการสะสมโลหะในแหล่งน้ำนั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะทางเคมีและฟิสิกส์ที่ แตกต่างกันไปในแต่ละแห่ง และพบว่า การสะสมของโลหะในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น โลหะที่ละลายน้ำได้อาจตกตะกอนไปสะสมอยู่ในรูปของแข็ง หรือ จากการสะสมในของแข็งย้อนกลับมาละลายน้ำได้อีกเป็นต้น

ในการศึกษาเกี่ยวกับการสะสมโลหะ จึงแยกพิจารณาได้ดังนี้

### 1. การสะสมของโลหะในรูปของแข็ง

โลหะสามารถสะสมในรูปของแข็ง คือ ตะกอน และสารแขวนลอยได้ โดยการสะสมที่เกิดขึ้นในธรรมชาตินั้น มาจากกระบวนการที่ก่อให้เกิดการสะสมต่างกัน เช่น การ ปล่องจากเขื่อน การพุดังของหินในแหล่งน้ำเรียกว่า Lithogenous formations, การ ที่สิ่งมีชีวิตตายลงไปสะสมในแหล่งน้ำ หรือเกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต เรียกว่า Biogenous formations, การที่อนุภาคตกตะกอนหรือถูกดูดซับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ทางกายภาพและเคมีในแหล่งน้ำเรียกว่า Hydrogenous formations, การ fall out จากอากาศลงเป็นของแข็งโดยตรง เนื่องจากอากาศมีผิวสัมผัสกับแหล่งน้ำมากโอกาสที่จะตกอยู่สู่ พื้นน้ำย่อมมีได้มาก เช่น จากพืชหรือดินที่ถูกอากาศพาไป เรียกว่า Atmosgenous formations และการที่ของแข็งตกลงมาจากนอกโลกเรียกว่า Cosmogenous formations

ซึ่งพบว่ากระบวนการเกิดจากแหล่งกำเนิดแต่ละชนิดนั้น ก็สามารถเกิดได้หลายวิธี ดังนั้นจึงค่อนข้างยากในการจะสรุปถึงวิธีที่แน่นอนลงไปว่า การเกิดจากแหล่งกำเนิดชนิดต่าง ๆ นั้น เกิดได้อย่างไร อย่างไรก็ตามการที่โลหะสามารถสะสมในรูปของแข็งได้แก่ ตะกอน และสารแขวนลอยนั้น จะเกิดจากการที่โลหะทำปฏิกิริยากับของแข็งในแหล่งน้ำ ตามวิธีของ Gibbs (1973) ได้ 4 วิธีคือ

#### 1.1 การดูดซับ (adsorptive bonding)

โลหะเกิดการดูดซับกับตะกอน หรือสารแขวนลอยและคงตัวอยู่

#### 1.2 การตกตะกอนร่วมกับไฮดรอกไซด์ของโลหะ

โลหะเกิดการตกตะกอนร่วมกับตะกอนหรือสารแขวนลอย เช่น โลหะตกตะกอน



ร่วมกับไฮดรอกไซด์ ของเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์

### 1.3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation)

โลหะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน กับโมเลกุลสารอินทรีย์

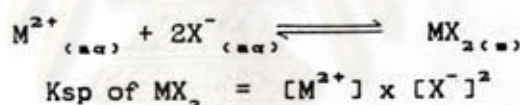
### 1.4 การรวมอยู่ในผลึกของแร่ธาตุ

## 2. สารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะ

ในการศึกษาการสะสมของโลหะ พิจารณาได้จากสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะ  
ได้ดังนี้

### 2.1 ไอออนที่มีประจุลบ (anion)

โลหะสามารถตกตะกอนกับแอนไอออน ที่มีอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น  
ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต ได้ดังสมการ



$K_{sp}$  = equilibrium constant

หรือค่าคงที่ในการละลาย, ความสามารถในการแตกตัว

ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของโลหะ จะขึ้นกับพีเอช พีอี (ปริมาณการให้และรับ  
อิเล็กตรอน) และปริมาณความเข้มข้นของแอนไอออนต่าง ๆ (รูปที่ 1.5) โดยปฏิกิริยานี้จะทำให้  
ตกตะกอนจนกระทั่งผลคูณของไอออนนี้มีค่า  $< K_{sp}$

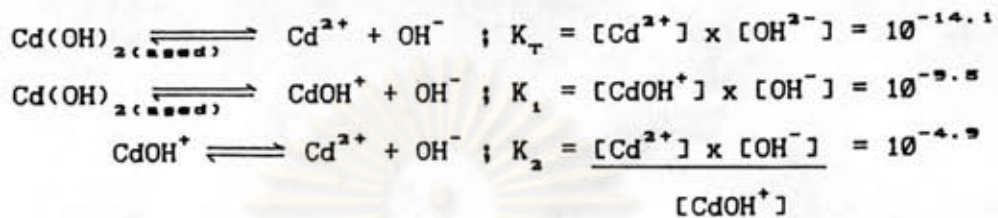
ไอออนประจุลบที่ทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะแล้วตกตะกอนได้ดี หรือ  
ละลายน้ำได้น้อย เช่น

### 1. ไฮดรอกไซด์ ( $OH^{-}$ )

จากการศึกษาของ Feitknecht และ Schindler (1963) พบ  
ว่าการเกิดตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์อาจเกิดได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และความ  
สามารถในการละลายด้วย พบว่าสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่อยู่ในรูป amorphous จะ  
ค่อนข้างว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาอื่น ๆ หรือแตกตัวง่าย ในขณะที่สารประกอบไฮดรอกไซด์ในรูป

aged จะละลายได้น้อย และคงตัวมากกว่า แต่สารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ในรูปผลึกจะไม่  
ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเลย

ดังตัวอย่าง แสดงสมคูลย์ของการไอออนในเซชันของสารประกอบไฮดรอกไซด์ชนิดต่าง ๆ และค่า  
equilibrium constant อันจะเห็นว่า การละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์  
อาจเกิดได้จากไอออนในเซชัน หรือการแตกตัวหลายขั้น (Krauskopf, 1967)



$K_T, K_1, K_2 = \text{equilibrium constant}$

ตารางที่ 1.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Negative logarithms ของความ  
สามารถในการละลาย โดยเกิดไอออนในเซชันสมบูรณ์ ค่าสูงแสดง  
ถึงการเกิดไอออนในเซชันหลายครั้ง (Krauskopf, 1967)

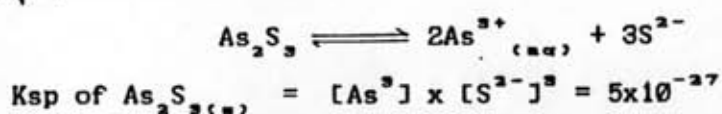
Hydroxides	-log $K_T$	Sulfides	-log $K_{sp}$	Carbonates	-log $K_{sp}$
Mn(OH) <sub>2</sub> (aged)	10.9	MnS (pink)	9.6	MnCO <sub>3</sub>	10.2
Mn(OH) <sub>2</sub> (cryst.)	12.7	MnS (green)	12.6	CdCO <sub>3</sub>	11.3
Cd(OH) <sub>2</sub> (aged)	14.4	CdS	27.8	FeCO <sub>3</sub>	10.5
Fe(OH) <sub>2</sub> (aged)	15.1	FeS	17.2	PbCO <sub>3</sub>	13.1
PbO + H <sub>2</sub> O (red)	15.3	PbS (galena)	27.5	CoCO <sub>3</sub>	12.8
Co(OH) <sub>2</sub> (blue)	14.2	CoS (alpha)	20.4	ZnCO <sub>3</sub>	10.8
Co(OH) <sub>2</sub> (pink, aged)	15.7	CoS (beta)	24.7	NiCO <sub>3</sub>	6.9
Zn(OH) <sub>2</sub> (amorphous)	15.5	ZnS (wurtzite)	21.6	CuCO <sub>3</sub>	9.6
ZnO + H <sub>2</sub> O (aged)	16.8	ZnS (sphalerite)	23.6	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	33.8
Ni(OH) <sub>2</sub> (active)	14.7	NiS (alpha)	18.5		
Ni(OH) <sub>2</sub> (aged)	17.2	NiS (gamma)	25.7		
CuO + H <sub>2</sub> O (active)	19.7	CuS	36.1		
CuO + H <sub>2</sub> O (tenorite)	20.5	Cu <sub>2</sub> S	48.0		
HgO + H <sub>2</sub> O (red)	25.4	HgS	52.4		
Cr(OH) <sub>3</sub> (aged)	37.4				
Fe(OH) <sub>3</sub> (aged)	39.1				

## 2. ซัลไฟด์ (S<sup>2-</sup>)

สารประกอบโลหะซัลไฟด์ มักไม่ละลายที่พีเอชเป็นกลางจากตาราง  
ที่ 1.3 จะเห็นว่า เหล็ก แมงกานีส และแคดเมียมซัลไฟด์ จะละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกขณะที่  
ที่นิเกิลและโคบอลต์ซัลไฟด์จะละลายได้เล็กน้อย และทองแดง ตะกั่วและปรอทซัลไฟด์จะละลายได้  
ดีใน oxidizing acids เช่น กรดไนตริก

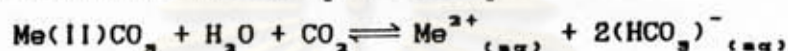


ตัวอย่าง แสดงสมการของสารประกอบซิลไฟด์

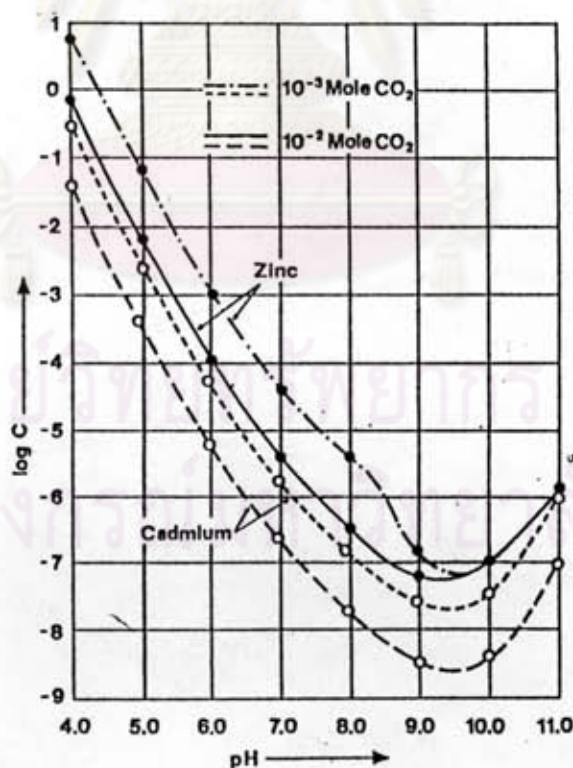


### 3. คาร์บอเนต

คาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของตะกอนในแหล่งน้ำ ในการเกิดสารประกอบโลหะคาร์บอเนต จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นความสามารถในการละลายหรือการไอออนในเซชันของสารประกอบโลหะคาร์บอเนต ที่แสดงในตารางที่ 1.3 จะขึ้นกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำด้วย (รูปที่ 1.5) ดังสมการ



Popova (1961) พบว่าคาร์บอเนตมีความสำคัญในแง่การตกตะกอนร่วม (coprecipitation) การเพิ่มพีเอชในแหล่งน้ำที่มี  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{HCO}_3^-$  จะตกตะกอน  $\text{CaCO}_3$  ทำให้โลหะอื่น ๆ เกิดตกตะกอนร่วมด้วยเช่น  $\text{CoCO}_3$  และ  $\text{PbCO}_3$  จะตกตะกอนจากสารละลายได้ทั้งหมดโดยตกตะกอนร่วมกับ  $\text{CaCO}_3$  แต่ถ้าปราศจาก  $\text{CaCO}_3$  โลหะเหล่านี้จะไม่ตกตะกอน



รูปที่ 1.5 แสดงความสามารถในการละลายของสังกะสีและแคดเมียมในน้ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช และให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่มีค่า  $10^{-3}$  และ  $10^{-2}$  โมล/ลิตร Ionic strength = 0.0, Log C = mol Zn or Cd (Hem, 1972)



ในแหล่งน้ำที่มีไอออนไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ และคาร์บอเนต เช่น ในแม่น้ำทะเล ในระบบบำบัดน้ำเสีย ฯลฯ โลหะจะสามารถตกตะกอนกับแอนไอออนเหล่านี้ได้ ซึ่งเกิดสารประกอบชนิดใดมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น ๆ อีกเช่น พีเอช พีอี ปริมาณความเข้มข้นของแอนไอออนและโลหะ อุณหภูมิ ความดันและ ionic strength

พบว่าไอออนของโลหะจะคงตัวในช่วงพีเอชน้อยกว่า 7-8 แต่ถ้ามีการเพิ่มพีเอช สารประกอบโลหะคาร์บอเนตและโลหะไฮดรอกไซด์ จะมีความคงตัวมากกว่าแต่ถ้าในสภาวะที่น้ำมีออกซิเจนน้อย หรืออุกิริตวาร์ (ค่า Eh ติดลบ) สารประกอบโลหะซัลไฟด์จะคงตัวที่สุดในช่วงพีเอชที่กว้าง

## 2.2 แร่ดินเหนียว (Clay minerals)

ในธรรมชาติแร่ดินเหนียวจะอยู่ในสภาพผลึกพวกซิลิเกต ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอลูมินาและซิลิกา โดยแผ่นอลูมินาเกิดจาก อลูมินัม 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม อัดตัวกันโดยมีอลูมินัมอะตอมอยู่ตรงกลาง เกิดเป็นรูปทรงที่มี 8 ด้านขึ้น เรียกว่า alumina octahedral unit และจะเกาะเชื่อมกันเข้าเป็นแผ่นในแนวระดับโดยการใช้ออกซิเจนร่วมกันแผ่นที่ได้มีลักษณะทึบ สำหรับแผ่นซิลิกาเกิดจากซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม อัดตัวกันโดยมีซิลิคอนอยู่ตรงกลาง เกิดเป็นรูปทรงที่มี 4 ด้านเรียกว่า silica tetrahedral unit และจะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่น โดยใช้ออกซิเจนร่วมกันระหว่างอะตอมที่อยู่พื้นฐานทำให้เกิดแผ่นที่มีลักษณะเหมือนรังผึ้งขึ้น คือจะเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป การเรียงลำดับของแผ่นอลูมินาและซิลิกานี้ จะทำให้ลักษณะโครงสร้างของดินแตกต่างกันไป แบ่งเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 3 พวกคือ Kaolinite (เรียงแบบ 1:1) Montmorillonite และ illite (เรียงแบบ 2:1) ดังรูปที่ 1.6

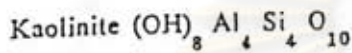
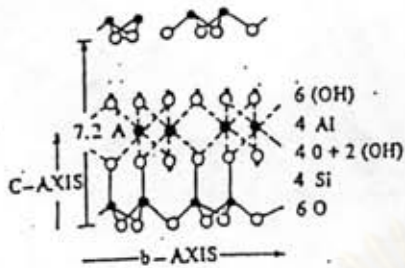
ในธรรมชาติพบว่า silicate clay จะเป็นบริเวณที่ดูดซับแคตไอออนไว้ โดยแคตไอออนเหล่านี้จะไม่ติดแน่นอยู่ที่ผิว clay แต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับพื้นผิวภายใต้อำนาจการดึงดูดซึ่งกันและกันเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยา adsorption

ซึ่งแคตไอออนเหล่านี้อาจถูกแทนที่ โดยแคตไอออนอื่นโดยง่าย เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชโดยพีเอชลดลงคือ  $H^+$  มากขึ้น หรือการเพิ่มแคตไอออนอื่น ๆ โดยแคตไอออนที่เข้าไปแทนที่จะมีประจุเท่ากับแคตไอออนที่ถูกไล่ออกมา เรียกการแทนที่แบบนี้ว่า cation exchange

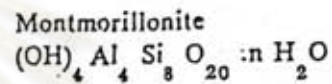
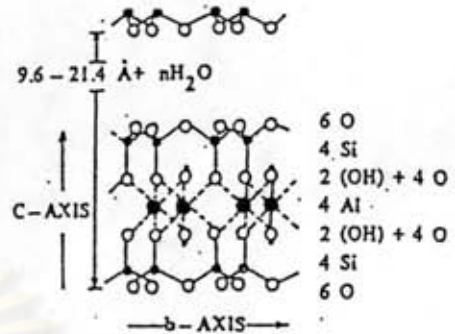
## 2.3 Hydrous oxides ของโลหะ

ในธรรมชาติโลหะที่อยู่ในแหล่งน้ำจะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ โดยเฉพาะเหล็กและแมงกานีสซึ่งเป็นธาตุที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 2 และ 3 ในแหล่งน้ำโดยจะเกิด

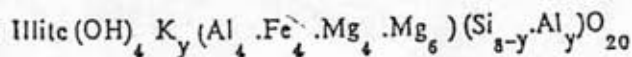
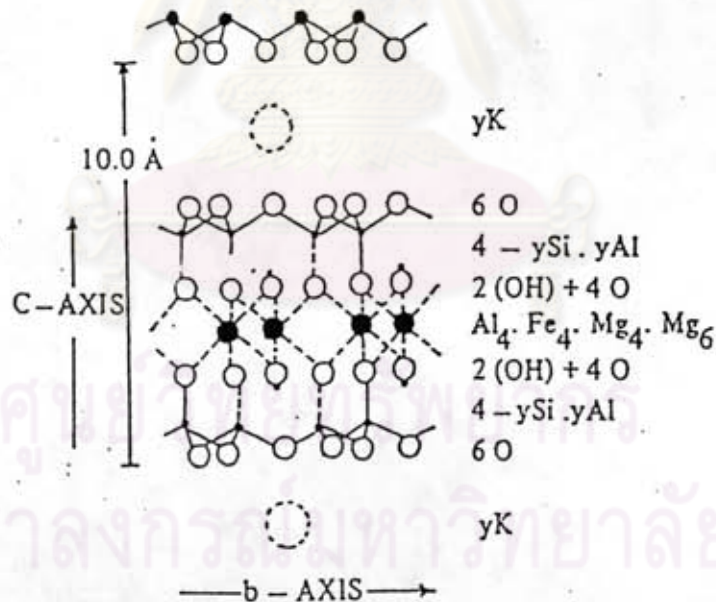




(ก) โครงสร้างของผลึกของ kaolinite  
(Schematic diagram of the crystal structure of kaolinite)

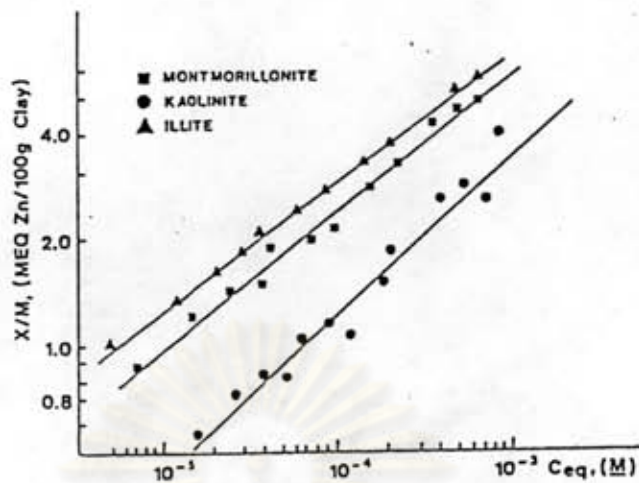


(ข) โครงสร้างของผลึกของ montmorillonite  
(Schematic diagram of the crystal structure of montmorillonite)



(ค) โครงสร้างของผลึกของ illite  
(Schematic diagram of the crystal structure of illite)

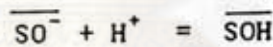
รูปที่ 1.6 โครงสร้างของผลึก silicate clay ที่สำคัญ (สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน, 2519)



รูปที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบ clay ชนิดต่าง ๆ ต่อการดูดซับสังกะสี โดยมีน้ำหนัก clay เท่ากันคือ 100 กรัม (Bourg and Filby, 1974)

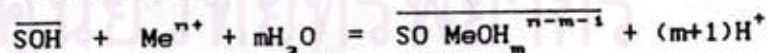
ไฮดรอกไซด์ออกไซด์มีลักษณะคล้ายเจลาติน และชอบแขวนลอยอยู่ในแหล่งน้ำ

แสดงสมการการเกิดประจุบนผิวของออกไซด์ในแหล่งน้ำ พบว่าอยู่ในรูปทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อนได้ (Stumm, Kummert & Siggg, 1980 ; Benjamin & Lickie, 1982)



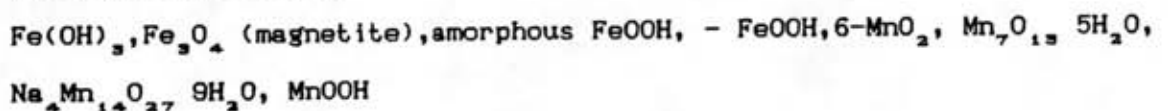
$\overline{\text{SOH}}$  = Single protonated surface oxid site

และเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ( $\text{Me}^{n+}$ ) ได้ดังสมการ

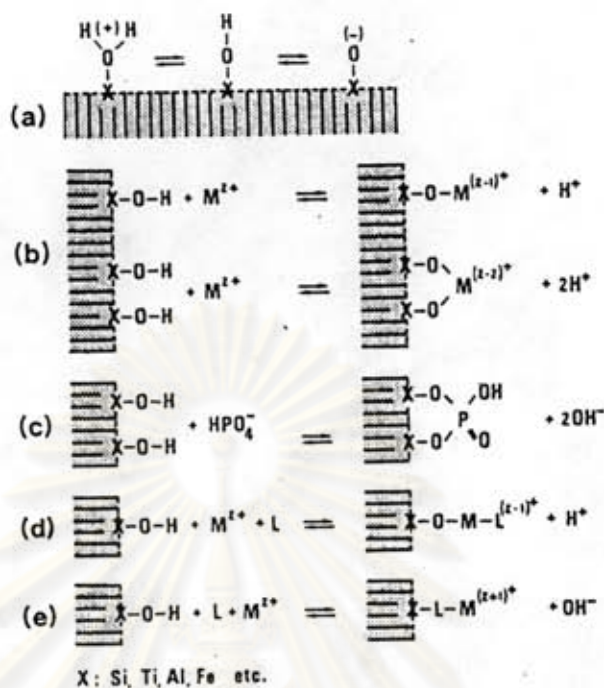


ดังนั้นถ้ามีการดูดซับมากขึ้น ปฏิกิริยาจะไปทางขวามือ และค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นด้วย จากคุณสมบัติของไฮดรอกไซด์ที่เป็นทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อนนี้เองทำให้ไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยา sorption หรือ coprecipitation กับแคตไอออน และแอนไอออนได้ ดังรูปที่ 1.8. และเป็นตัวควบคุมที่สำคัญในการกระจายของโลหะในแหล่งน้ำ

ตัวอย่างของไฮดรอกไซด์





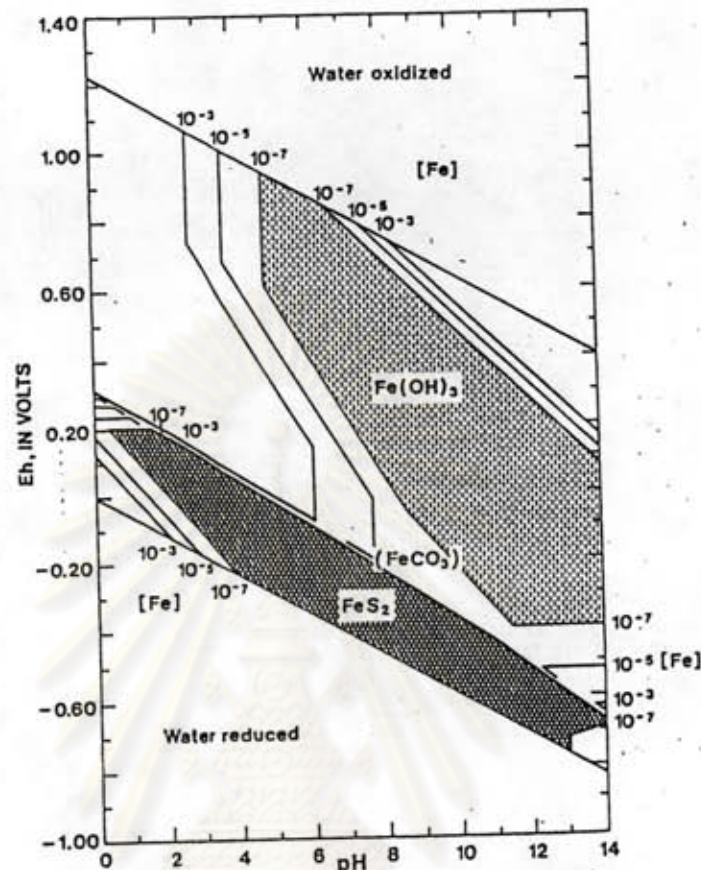


รูปที่ 1.8 แสดงปฏิกิริยาบนผิวของออกไซด์ ที่อาจเกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ

- (a) ปฏิกิริยา กรด-เบส บริเวณผิวของออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล
- (b) ไอออนของโลหะแทนที่  $\text{H}^+$  ของหมู่ไฮดรอกซิล
- (c) หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยลิแกนด์อื่น ๆ
- (d) ไอออนของโลหะ เกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์อื่น และเกิดการแทนที่  $\text{H}^+$  ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของออกไซด์ด้วย
- (e) multidentate ligand ที่ละลายน้ำทำปฏิกิริยากับทั้ง X และไอออนของโลหะ ด้วยพันธะโคออดิเนต (Schindler, 1981)

ในรูปที่ 1.9 เป็นตัวอย่างของไฮดรอกไซด์ของเหล็ก แสดงในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอชกับ redox potential

- ในสภาพที่น้ำถูกออกซิไดซ์ ( $\text{Eh} +$ ) จะตกตะกอน  $\text{Fe}(\text{OH})_3$
- ในสภาพที่น้ำถูกรีดิวซ์ ( $\text{Eh} -$ ) จะตกตะกอน  $\text{FeS}_2$
- ที่พีเอชต่ำกว่า 5 และน้ำถูกออกซิไดซ์ โลหะจะอยู่ในรูปที่ละลายได้
- ถ้ามีการรบกวนสมดุลย์เช่น การเติมออกซิเจนลงแหล่งน้ำ โลหะที่ตกตะกอนอยู่กับ  $\text{FeS}_2$  จะย้อนกลับมาละลายน้ำได้อีก



รูปที่ 1.9 แสดงการเกิดไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชและ Eh  
 Dissolved iron =  $5.6 \mu\text{g}/\text{l}$ ,  $\text{SO}_4^{2-} = 96 \mu\text{g}/\text{l}$ ,  $\text{HCO}_3^- = 61 \mu\text{g}/\text{l}$   
 (Hem, 1970)

#### 2.4 สารอินทรีย์

ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีสารอินทรีย์หลายชนิด แต่ที่พบว่ามีปริมาณมากที่สุดได้แก่พวกฮิวมัส หรือที่เรียกว่า Humic substances ในการจำแนกชนิดของสารอินทรีย์สามารถแบ่งตามความสามารถการละลายในกรดอ่อนและเบสอ่อนได้เป็น 3 ชนิด

##### 1. Fulvic acids

สามารถละลายได้ในกรดอ่อน และเบสอ่อนมีขนาดเล็ก

##### 2. Humic acids

ละลายได้ในเบสอ่อนเท่านั้น และจะตกตะกอนในกรดอ่อน ขนาดโมเลกุล

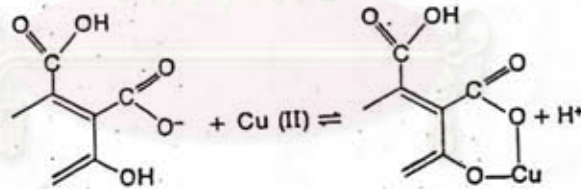
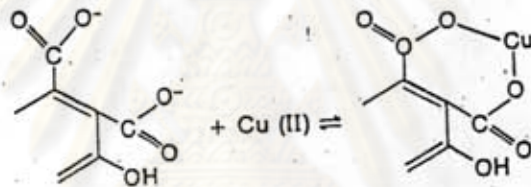


## 3. Humic

ไม่ละลายในกรดอ่อน และเบสอ่อน มีขนาดโมเลกุลใหญ่

พบว่า Humic acids และ Fulvic acids มีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนโลหะในแหล่งน้ำ เพราะสามารถเกิดพันธะกับโลหะได้โดยหมู่ฟังก์ชันนัลที่อยู่ในโมเลกุล สารอินทรีย์ ทำปฏิกิริยากับโลหะส่วน Humic นั้นไม่ค่อยมีหมู่ฟังก์ชันนัลจึงค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา

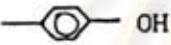
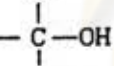

Fulvic acids มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันนัลมากที่สุด สามารถเกิดพันธะกับโลหะได้ดี และละลายน้ำได้ดีกว่าสารอินทรีย์อื่น จึงทำให้แขวนลอยอยู่ในน้ำได้นานและถูกพัดพาให้เคลื่อนที่ได้ไกล แต่ Humic acids ก็มีความสำคัญในแง่การขนส่ง เนื่องจากขนาดโมเลกุลใหญ่และมีปริมาณมาก ตัวอย่าง การเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันนัล



อย่างไรก็ตามการศึกษาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ยังไม่สามารถทราบถึงองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี ของสารประกอบอินทรีย์นี้ได้ว่าเป็นอย่างไรคุณสมบัติบางอย่าง เช่น จุดหลอมเหลว น้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างที่แน่นอนของสารอินทรีย์นี้จึงยังไม่มีใครทราบได้ ดังนั้นในการเกิดปฏิกิริยากับโลหะจึงไม่สามารถกำหนดคลงได้ว่าเกิดปริมาณมากน้อยเท่าไร เป็นเพียงแต่ทราบว่าเกิดจากหมู่ฟังก์ชันนัลเท่านั้น

ถึงแม้ว่าจะยังไม่มีใครทราบถึงองค์ประกอบที่แน่นอนแต่สำหรับ Humic และ Fulvic acids Schnizer และ Khan(1972) ได้รวบรวมคุณสมบัติบางอย่างและหมู่ฟังก์ชันนัลที่เกี่ยวข้องไว้ เปรียบเทียบกันในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 แสดงคุณสมบัติบางประการและหมู่ฟังก์ชันัล ของ Humic and fulvic acids  
(Schnitzer and Khan, 1972)

Property	Humic Acids	Fulvic Acids
Solubility in Strong acid (pH 1)	Not soluble	Soluble
Molecular weight range	Few 100	several 180 - 10,000 million
Functional group distribution	Percent of oxygen in indicated functional group	
carboxyl —COOH	14 - 45	58 - 65
phenol  —OH	10 - 38	9 - 19
alcohol  —C—OH	13 - 15	11 - 16
carbonyl  —C=O	4 - 23	4 - 11
methoxyl —O—CH <sub>3</sub>	1 - 5	1 - 2

จะเห็นได้ว่าโลหะสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ และทำให้เกิดการสะสมในรูปตะกอน และสารแขวนลอย

สามารถจัดลำดับความสามารถของสารที่เกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะแล้วเกิดการสะสมได้ดังนี้



#### การย้อนกลับของโลหะจากรูปของแข็งสู่รูปที่ละลายน้ำ

ในการเกิดปฏิกิริยาของโลหะกับสารต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสะสมในรูปของแข็งในธรรมชาติของแหล่งน้ำนั้น พบว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางกายภาพและเคมีของแหล่งน้ำไปทำให้สภาวะไม่เหมาะสมขึ้น ตะกอน หรือสารแขวนลอยที่มีโลหะอยู่นั้น ก็จะมีการละลายย้อนกลับสู่ในรูปที่ละลายน้ำได้อีก หรือไม่เกิดการสะสมในรูปของแข็งขึ้น



การย้อนกลับของโลหะจากรูปของแข็ง สู่รูปที่ละลายน้ำได้ดังนี้ จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากรูปแบบที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในรูปไอออนอิสระ ดังนั้นสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำจะสามารถดูดเอาโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำนี้ไป เกิดสะสมในร่างกายและถ่ายทอดถึงมนุษย์ได้ตามห่วงโซ่อาหารดังเช่น ในกรณีนิยามาตะประเทศญี่ปุ่น (Clarkson, Smith, Marsh & Turner, 1975)

ดังนั้นการศึกษาถึงสภาวะที่ทำให้เกิดการย้อนกลับของโลหะ จากของแข็งสู่รูปที่ละลายน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญ พบว่าสาเหตุที่ทำให้โลหะละลายอยู่ในน้ำได้มาก หรือย้อนกลับจากรูปของแข็งสู่รูปที่ละลายน้ำได้คือ

### 1. การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ

การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ คือการมีไอออนของพวกโลหะอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ทเพิ่มขึ้น เช่นในกรณีน้ำจืดจากแม่น้ำไหลลงสู่น้ำทะเลบริเวณปากอ่าวซึ่งมีความเค็มสูงกว่า จะเห็นว่าในน้ำทะเลมีโลหะอัลคาไลน์ คือ  $\text{Na}^+$  อยู่มาก ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของโลหะกับสารต่าง ๆ ที่เข้าทำปฏิกิริยา โดย  $\text{Na}^+$  จะไปแย่งที่โลหะที่ทำปฏิกิริยาเกิดการแข่งกันกันขึ้น ดังนั้นจึงทำให้โลหะอื่นที่ละลายน้ำอยู่เกิดตกตะกอน หรือสารแขวนลอยได้น้อย

### 2. การเปลี่ยนแปลงสภาวะ redox

การเปลี่ยนแปลงสภาวะ redox ในแหล่งน้ำ คือการเปลี่ยนแปลงสภาวะออกซิเจนและละลายในแหล่งน้ำ พบว่าการที่ออกซิเจนลดลง เช่น การเกิด Eutrophication มีสาหร่ายหรือพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จะทำให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะย้อนกลับมาละลายน้ำได้บางส่วนหรือทั้งหมด ดังรูปที่ 1.9 แสดงการเกิดไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช และ Eh

### 3. การลดต่ำลงของพีเอช

ค่าพีเอชที่ลดต่ำลงจะทำให้สารประกอบโลหะคาร์บอเนตและโลหะไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้มากขึ้น เนื่องจาก  $\text{H}^+$  ที่เพิ่มขึ้นนี้ จะไปแทนที่แคทไอออนโลหะเดิม โลหะที่ถูกแทนที่ก็จะกลับมาละลายอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำมีโลหะที่ละลายเพิ่มขึ้น



#### 4. การเพิ่ม complexing agent ขึ้น ๆ

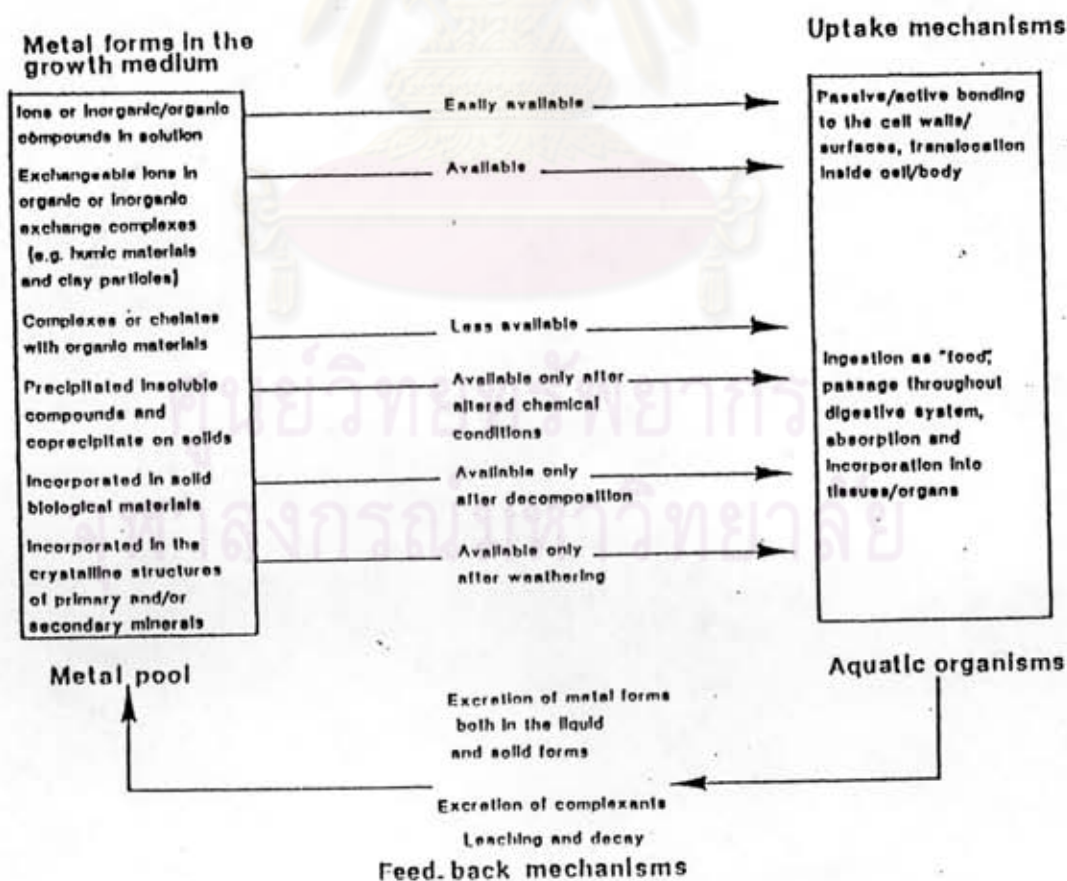
การเพิ่ม complexing agent ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะ แล้วอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ ได้ดีกว่าถูกดูดซับอยู่บนของแข็ง อาจเนื่องมาจากทางธรรมชาติเองหรือมนุษย์สังเคราะห์ขึ้น

#### การสะสมของโลหะในสิ่งมีชีวิต

โลหะที่ละลายน้ำสามารถถูกสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ กูดเข้าไปสะสมได้ จะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นกับ

- ความเข้มข้นของโลหะที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำ
- กระบวนการกูดโลหะของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด

จากการศึกษาของ Baudo (1984) พบว่าโลหะที่สิ่งมีชีวิตนำเข้าไปในร่างกายนั้น อาจมีประโยชน์หรือโทษก็ได้ ขึ้นกับรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกนำเข้าไป ซึ่งพอจะสรุปความสัมพันธ์ของโลหะกับสิ่งมีชีวิตได้ ดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 แสดงความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิต (Baudo, 1984)



จากการศึกษาถึงการสะสมโลหะในแหล่งน้ำดังกล่าว จะเห็นได้ว่าโลหะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบซึ่งกันและกันตลอดเวลา และโลหะที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ จะถูกดูดเข้าไปในสิ่งมีชีวิตได้อีก อย่างไรก็ดีในการศึกษาถึงสิ่งมีชีวิตนั้น พบว่าพืชน้ำหลายชนิดมีความสามารถในการดูดซับโลหะเข้าไปสะสมในลำต้นได้ดี ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ละลายอยู่ในน้ำหลายเท่า เช่น ผักตบชวา ซึ่งเป็นพืชน้ำชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะได้หลายชนิด ดังมีผู้ทำการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของผักตบชวา ในการดูดซับโลหะไว้หลายกรณี ดังนี้

Wolverton, Macdonal & Macdonal (1975) ได้ทำการวิจัยพบว่า โลหะที่อยู่ในรูปสารละลายนี้อาจถูกดูดซึมโดยพืชน้ำได้ เช่น Alligator weeds และผักตบชวา

Tridech, Englande, Hebert & Wilkinson (1980) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ โดยออกแบบเป็นถังสี่เหลี่ยม และมีปริมาณน้ำไหลเวียนตลอดเวลาในเวลา 28 วัน พบว่าสามารถกำจัด As = 12.5%, B = 12.46%, Cd = 68.60%, Hg = 70.16%, Se = 8.19%

Suttipong (1980) รายงานว่าประสิทธิภาพของผักตบชวา ในบ่อทดลองจะลดลงเมื่อใช้เวลานานขึ้น และน้ำหนักของผักตบชวาจะมีผลต่อการลดลงของโลหะในสารละลาย กล่าวคือผักตบชวาที่มีน้ำหนักมากจะสามารถกำจัดโลหะได้มากกว่าในโลหะ 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการกำจัด ดังนี้ โคเรียม 71.25%, คอปเปอร์ 99.65% และนิกเกิล 94.65%

สนธิ ศุขวัฒน์ (2530) ศึกษาผักตบชวาในบ่อทดลองพบว่าในระยะเวลาเท่ากันกลุ่มผักตบชวาที่มีความหนาแน่นต่อพื้นที่มากกว่า จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะ แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ได้ดีกว่ากลุ่มผักตบชวาที่มีความหนาแน่นต่อพื้นที่น้อยกว่า ประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัด แคดเมียม 0.5 ppm, ทองแดง 3.0 ppm และตะกั่ว 5.0 ppm เมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์ คือ 90.40 , 90.33 และ 90.20 % และเมื่อนำมาทดลองเลี้ยงในอ่างทดลองด้วยน้ำทิ้งมีระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 25% และกำจัด แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วได้สูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 3 นี้ คิดเป็น 42.44 , 44.27 และ 48.21% ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพของผักตบชวา จะลดต่ำลงมาก เนื่องจากสารมลพิษอื่นที่อยู่ในน้ำทิ้ง

Kay, Stratford, Haller & Garrard (1984) รายงานว่า สำหรับโลหะ 3 ชนิด คือ ตะกั่ว แคดเมียม และคอปเปอร์ พบว่าในสัปดาห์ที่ 6 จะมีปริมาณการดูดซับมากกว่าสัปดาห์ที่ 3 เล็กน้อยและพบว่าการสะสมโลหะนั้น รากจะสะสมมากกว่า ลำต้น และใบ ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้น  $Cd > Cu > Pb$  สำหรับตะกั่วถึงจะมีความเข้มข้นมากกว่า 5 ppm ก็ไม่แสดงอาการผิดปกติ แต่แคดเมียมจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา เมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 0.5 ppm และคอปเปอร์มีความเข้มข้นมากกว่า 1.0 - 2.0 ppm

Muramoto and Oki (1983) พบว่าเมื่อมีโลหะ 3 ชนิด คือ ตะกั่ว แคดเมียม และเมอร์คิวรี จะมีผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงกว่ามีโลหะชนิดเดียว และในสภาพธรรมชาติพบว่าผักตบชวาที่ทำการทดลองนั้นเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีแคดเมียม ที่ 1, 4, 8 ppm จะสามารถ

คูดโลหะได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 8 ppm คิดเป็น 13.9 กรัม/กิโลกรัม และสารละลายที่มีเมอร์คิวรีที่ 0.5, 1.0, 2.0 ppm จะสามารถคูดโลหะได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 1.0 ppm คิดเป็น 2.34 กรัม/กิโลกรัม และพบว่า การคูดซิมโลหะจะมีที่รากมากกว่าลำต้นส่วนบน

กรมวิชาการเกษตร (2532) ได้วิเคราะห์ปริมาณโลหะ Mn, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Cd ในตัวอย่างน้ำและผักตบชวาจากบึงมักกะสัน โดยเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2530 - ธันวาคม 2531 พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในผักตบชวามีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้นในน้ำ โดยลำต้นมีค่า Mn 185-469 ppm, Zn 48-97 ppm, Pb 3.6-22 ppm, Cu 3.1-95 ppm, Ni 1.6-9.8 ppm, Cr 0.6-8.8 ppm, Cd 0.09-1.08 ppm, ในรากมีค่า Mn 1086-2324 ppm, Zn 214-393 ppm, Pb 51-102 ppm, Cu 13.2-30 ppm, Cr 14-30 ppm, Cd 1.7-2.5 ppm แต่มิได้สรุปผลถึงประสิทธิภาพที่แน่นอน เพราะเป็นการเก็บข้อมูลเบื้องต้น

จากการที่พบว่าผักตบชวาเป็นพืชน้ำเค็มที่ขึ้นปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำบึงส่วนใหญ่ของบึงมักกะสัน และมีความสามารถในการคูดซิมโลหะได้หลายชนิด ทำให้ผักตบชวาเหมาะที่จะเป็นตัวแทนของสิ่งมีชีวิตจากบึง ในการวิจัยเกี่ยวกับการสะสมของโลหะในสิ่งมีชีวิตในบึงมักกะสันดังกล่าว

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการสะสมของโลหะทั้ง 4 ชนิด คือ เหล็ก แมงกานีส แคดเมียม และตะกั่ว ในสารแขวนลอย น้ำ ตะกอน และในผักตบชวาจากบึงมักกะสันในช่วงเวลา 1 ปีที่ทำการศึกษา
2. ศึกษาการเคลื่อนย้ายโลหะทั้ง 4 ชนิด ดังกล่าวที่เกิดขึ้นในบึงมักกะสัน

### ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่ทำการศึกษ ได้แก่ บริเวณบึงมักกะสันตั้งแต่บริเวณใต้ทางด่วน ถึงถนนอโศก คิดเป็นพื้นที่ 92 ไร่ หรือประมาณ 147,200 ตารางเมตร
2. ทำการเก็บตัวอย่างผักตบชวา ตะกอน น้ำ และสารแขวนลอย เป็นบริเวณ 4 แนว ตามรูปที่ 1.11 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กำหนดไว้ในโครงการปรับปรุงบึงมักกะสันโครงการใหญ่ (เกษม จันทร่แก้ว และคณะ, 2530)



3. เก็บตัวอย่างทุก 2 เดือนเป็นเวลา 1 ปี คือตั้งแต่วันที่ 12 เมษายน 2531 ถึง 10 กุมภาพันธ์ 2532

4. พิจารณาเฉพาะการสะสมตัวของโลหะ เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว และแคดเมียม ในผักตบชวา น้ำ ตะกอน และสารแขวนลอย

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. การเก็บตัวอย่าง

แบ่งบึงออกเป็น 4 บริเวณ ตามรูปที่ 1.12 คือ น.1, น.2, น.3 และ น.4 แต่ละแนวเก็บตัวอย่าง 3 จุด ห่างจากริมฝั่ง ๆ ละประมาณ 4 เมตร 2 จุด และจุดกึ่งกลางแนวอีก 1 จุด

##### 1.1 ตัวอย่างน้ำ

เก็บที่จุดเก็บตัวอย่างทุกจุด ในแต่ละจุดเก็บตัวอย่างน้ำ ที่ระดับความลึก 30 ซม. จากผิวน้ำ แล้วนำตัวอย่างน้ำทั้ง 3 จุด มารวมเป็น 1 ตัวอย่างน้ำของแนวนั้น

##### 1.2 ตัวอย่างผักตบชวา

เก็บตัวอย่างทั้ง 4 แนว ๆ ละ 2 แปลงจากซีกซ้ายและขวาของบึง โดยเก็บตัวอย่างทั้งต้นเล็ก และต้นใหญ่ในแปลงเดียวกัน

##### 1.3 ตัวอย่างตะกอน

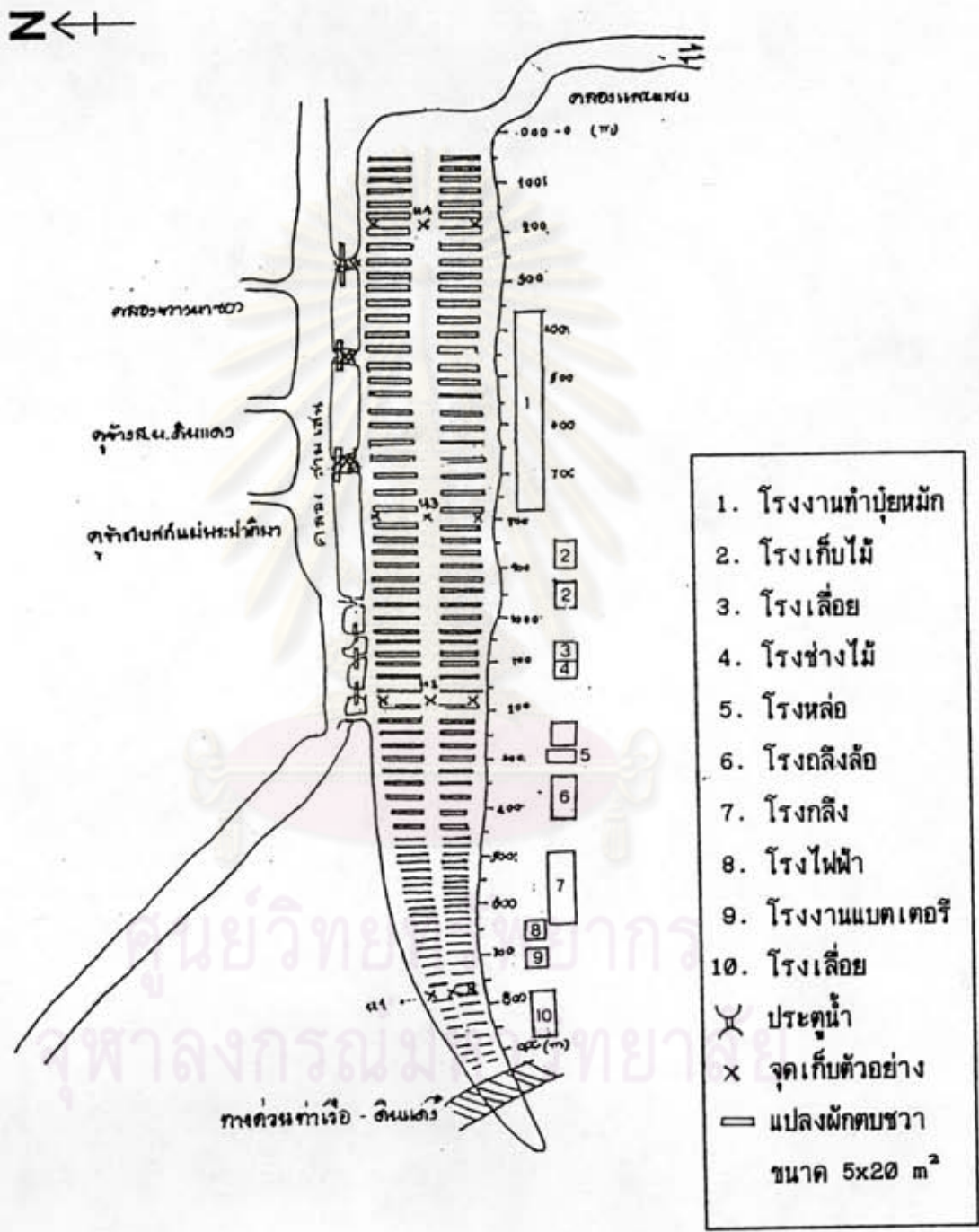
เก็บที่จุดเก็บตัวอย่างทุกจุดแล้วนำ 3 จุดมารวมเป็น 1 ตัวอย่างของแนวนั้น

#### 2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 นำน้ำตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองขนาดรู 0.45 ไมครอนด้วยระบบ pressurized filtration เพื่อแยกสารแขวนลอยออก แล้ว Preserve น้ำด้วยกรดไนตริกที่กลั่นแล้วให้มีพีเอชประมาณ 2 กระดาษกรองที่ใช้ควรผ่านการล้างด้วยวิธี acid-wash แล้ว







รูปที่ 1.12 ภาพจำลองขยายจากรูปที่ 1.12 แสดงจุดเก็บตัวอย่าง น้ำ ตะกอน และผักตบชวา ในบึงมักกะสัน (เกษม จันทรแก้ว และคณะ, 2530)

## ไมครอน

2.2 นำตะกอนไป freeze dry แล้วนำมาร่อนผ่านผ้ากรองไนลอนขนาดรู 70

2.3 ผักตบชวา นำไปล้างด้วย Deionize water แล้วตักก่อนนำไป freeze dry ให้แห้ง จึงนำไปเก็บใน Desicator

2.4 สารแขวนลอยบนกระดาษกรองนำไปแช่แข็งถ้ายังไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันที

### 3. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.1 ตัวอย่างน้ำวิเคราะห์โดยตรงด้วยวิธีอะตอมมิกแอปซอบชั่น

3.2 ตัวอย่างตะกอนที่ร่อนแล้ว และสารแขวนลอย นำไป leach ด้วยกรดไนตริก 10% ที่อุณหภูมิ 110° เซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (Chester & Voutsinou, 1981 ; Surat, 1982)

3.3 ตัวอย่างผักตบชวาที่ทำให้แห้งขนาด 1 กรัม นำไปย่อยด้วยวิธี Mixed Acid Digestion (Allen, 1974)

### 4. การตรวจวัดพารามิเตอร์ในภาคสนาม

4.1 ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) โดยใช้เครื่องมือ pH-Meter โดยวิธีโพเทนทิโอเมตริก

4.2 อุณหภูมิ (Temperature) โดยใช้เครื่องมือ S-C-T Meter (YSI Model 33 & M)

ส่วนการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ นอกเหนือจากนี้ วิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐาน ของ APHA , AWWA and WPCF (1972)



### การเลือกตัวแทนโลหะในแหล่งน้ำ

ในแหล่งน้ำมีโลหะอยู่หลายชนิด ในการศึกษาย่อมเป็นไปได้ที่จะศึกษาโลหะทุกชนิด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการเลือกตัวแทนของโลหะเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ วิธีการเลือกตัวแทนนั้นเลือกจากคุณสมบัติของโลหะ ที่ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มโดยดูจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนของโลหะที่ระดับชั้นนอกสุด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (บทที่ 2 หัวข้อ การจัดจำแนกโลหะ)

1. โลหะกลุ่ม A
2. โลหะทรานสิชั่น
3. โลหะกลุ่ม B

และได้ใช้หลักการนี้ในการเลือกตัวแทนโลหะจากกลุ่มต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการทำนายพฤติกรรมของโลหะกลุ่มนั้น ๆ โดย Fe และ Mn เป็นตัวแทนจากโลหะกลุ่ม A, Pb เป็นตัวแทนของโลหะทรานสิชั่น และ Cd เป็นแทนจากกลุ่ม B

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปริมาณโลหะที่สะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของบึงมักกะสัน คือ น้ำ ตะกอน สารแขวนลอย และผักตบชวา และการเคลื่อนย้ายโลหะ ซึ่งไม่มีผู้ใดทำมาก่อน
2. เป็นข้อมูลสนับสนุนว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะในน้ำหรือไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย