

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

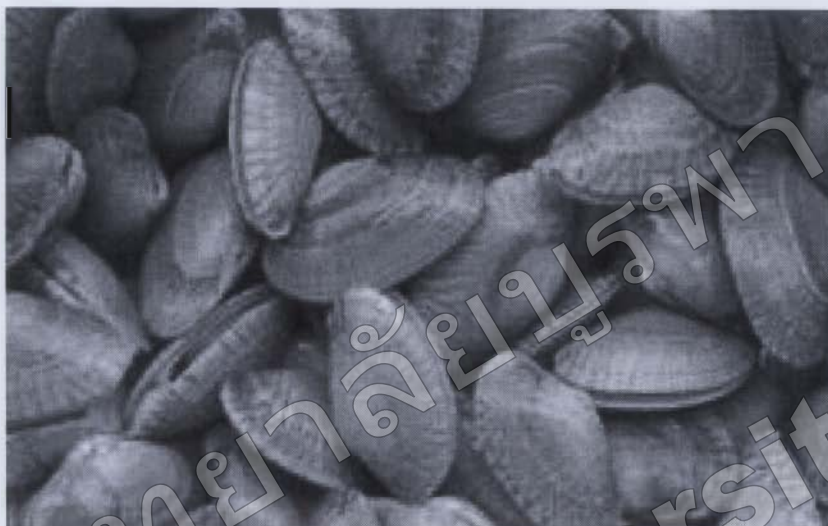
หอยลาย (*Paphia undulate*)

หอยลายชนิด *Paphia undulate* มีชื่อสามัญว่า Short necked clam, surf clam, Venus clam, carpet clam หรือ undulating clam และมีชื่อทางการค้าว่า baby clam หอยลายชนิดนี้มักถูกจำแนกผิดเป็น *Paphia textile* หอยลายชนิด *Paphia undulate* นี้จัดเป็นหอยลายชนิดเด่นของประเทศไทย โดยพบทั้งในอ่าวไทยและฝั่งทะเลอันดามัน คือ พบในจังหวัดตราด ฉะเชิงเทรา ชลบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี ระนอง พังงา กระบี่ ตรัง สตูล และภูเก็ต พบที่ระดับความลึก 1-25 เมตร ลักษณะเปลือกหอยมีรูปร่างเป็นรูปยาว ฝาหอยทั้งสองฟามีขนาดเท่ากัน (equivalved) ผิวภายในฝาหอยมีสีขาว มีขอบเรียบ หอยลายอาศัยอยู่ตามพื้นที่ท้องทะเลที่มีลักษณะเป็นทรายปนโคลนในระดับความลึก 4-6 เมตร แหล่งที่พบตัวอย่าง ได้แก่ อำเภอกุลองดำน-จังหวัดสมุทรปราการ อำเภอบางปะกง-จังหวัดฉะเชิงเทรา อำเภอบางตะขุน-จังหวัดเพชรบุรี อำเภอกาญจนดิษฐ์-จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีการแพร่กระจายในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดตราด ฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม เพชรบุรี สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี พังงา และกระบี่ การกระจายตามภูมิศาสตร์ คือ อินโด-แปซิฟิก ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น คาบสมุทรพินินซูล่า หอยลายที่ใช้ในการบริโภคสดและใช้ทำหอยลายกระป๋องส่งประเทศสหภาพยุโรปเป็นหอยลายที่มีขนาดเล็ก ในการทำประมงหอยลายนั้นจะใช้เครื่องมือคราดหอยในการจับหอยขึ้นมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าหอยลายถูกจับโดยเรืออวนลากในปี 2535-2538 (ไพเราะ สุทธากรณ์ และสุนันท์ ทวยเจริญ, 2536; วัฒนา ไวยนิยา, 2537)

ชีววิทยาและวงจรชีวิตหอยลาย

หอยลายมีการสืบพันธุ์แบบแยกเพศผู้และเพศเมีย วางไข่ตลอดปี โดยมีช่วงที่วางไข่สูงสุดจะอยู่ระหว่างเดือนสิงหาคม-ตุลาคม และมีนาคม-พฤษภาคมของทุกปี (ทั้งทางฝั่งอ่าวไทย-อันดามัน) อัตราส่วนเพศเมียต่อเพศผู้ 1:1 หอยลายขนาดที่เป็นพ่อแม่พันธุ์จะมีขนาด 3.2 เซนติเมตร เมื่อหอยลายได้รับการผสมพันธุ์แล้วจะวางไข่ ไข่จะฟักเป็นตัวอ่อนและลอยไปตามกระแสน้ำเป็นเวลา 12 วัน หลังจากนั้นจะมีรูปร่างเหมือนพ่อแม่และลงเกาะยังพื้นที่ท้องทะเล สภาพพื้นที่ท้องทะเลที่เหมาะสมจะมีลักษณะเป็นโคลนหรือโคลนปนทราย แต่ถ้าลงเกาะในพื้นที่ท้องทะเลที่ไม่

เหมาะสมก็จะตาย หอยลายจะอาศัยอยู่ในระดับความลึกของผิวดิน 1-4 นิ้ว (นวลมณี พงศ์ธนา, 2531) หอยลายขนาดที่เป็นพ่อแม่พันธุ์จะมีอายุประมาณ 1 ปี และมีอายุไขประมาณ 2-3 ปี (มาลา สุพงษ์พันธุ์ และจินตนา จินคาลิจิต, 2548)



ภาพที่ 1 หอยลาย *Paphia undulate* (คเชนทร เกลิมวัฒน์, 2543)

หอยเชลล์ (*Amusium pleuronectes*)

หอยเชลล์ มีชื่อสามัญเรียกว่า สเกลลอป (scallops) หอยกลุ่มนี้เป็นหอยสองฝาที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั่วโลก ซึ่งมีทั้งที่สามารถเพาะเลี้ยงได้และไม่ได้ โดยหอยชนิดนี้มีลักษณะการดำรงชีวิตที่แตกต่างจากหอยสองฝากลุ่มอื่น ๆ คือ สามารถว่ายน้ำได้เพื่อเปลี่ยนที่อยู่อาศัยหรือเพื่อหลบหนีศัตรู โดยในการว่ายน้ำจะใช้กล้ามเนื้อยึดเปลือก (adductor muscle) ขนาดใหญ่ที่ทำหน้าที่ในการเปิดและปิดเปลือก ซึ่งกล้ามเนื้อดังกล่าวนี้เป็นส่วนที่คนนิยมใช้เป็นอาหาร หอยเชลล์ในประเทศไทยที่พบในตลาดสดซึ่งเป็นชนิด *Amusium pleuronectes* โดยเป็นหอยที่ได้จากการประมงในแหล่งน้ำธรรมชาติ (บำรุงศักดิ์ นัตรอนันทเวช และวรรณเกียรติ ทับทิมแสง, 2533) การเพาะเลี้ยงหอยเชลล์ชนิด *Amusium pleuronectes* ในประเทศไทยนี้ยังอยู่ในขั้นทดลองเท่านั้น (Chaitanawisuti & Menasveta, 1991; 1992)

ชีววิทยาของหอยเชลล์

ลักษณะการดำรงชีวิตของหอยเชลล์ในธรรมชาติจะวางตัวอยู่บนพื้นผิวทะเลที่เป็นโคลนหรือทราย โดยมีบางชนิดที่วางตัวอยู่บนพื้นระยะหนึ่งแล้วจึงยึดตัวติดกับวัตถุใต้น้ำ เมื่อมีอายุมากขึ้นเปลือกที่วางอยู่บนพื้นทะเลจะเป็นเปลือกด้านขวา รูปร่างของหอยสองฝาในกลุ่มนี้เกือบทั้งหมด

ก่อนซ็อกกลม หอยเชลล์มีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงที่สุดในกลุ่มพวกหอยสองฝาด้วยกัน โดยเฉพาะหอยเชลล์ชนิดที่มีเปลือกบาง เช่น หอยเชลล์ชนิด *Amusium pleuronectes* หอยเชลล์มีการผสมพันธุ์ภายนอกเหมือนหอยสองฝาโดยทั่วไป ขนาดของไข่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 60-70 ไมโครเมตร ไข่ที่มีขนาดเล็กเช่นนี้จะมีไข่ได้แค่น้อย และเนื่องจากมักพบหอยเชลล์ในเขตที่มีอุณหภูมิค่อนข้างเย็นจึงทำให้หอยเชลล์มีการพัฒนาของตัวอ่อนช้า ลูกหอยอาจว่ายน้ำอยู่นานถึง 1 เดือน จึงเริ่มลงเกาะเมื่อมีขนาดความยาวเปลือก 260-285 ไมโครเมตร เมื่อลงเกาะใหม่ ๆ ลูกหอยจะยึดติดกับวัสดุที่ลอยอยู่ในน้ำด้วยเส้นใยยึดเกาะเป็นเวลา 40-60 วัน และจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้จะมีขนาดความยาวเปลือก 10 มิลลิเมตร ในเวลานี้ลูกหอยจะสละเส้นใยยึดเกาะแล้วจมลงสู่พื้นทะเลเพื่อดำรงชีวิตแบบหอยเชลล์เต็มวัยทั่วไป (คเชนทร เกลิมวัฒน์, 2543)



ภาพที่ 2 หอยเชลล์ *Amusium pleuronectes* (FAO, 1998)

หอยเชลล์มีการเพาะเลี้ยงในหลายประเทศ ซึ่งมีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก และหอยเชลล์ชนิด *Amusium pleuronectes* ในประเทศไทยก็เป็นหนึ่งในหอยเชลล์เศรษฐกิจโลก โดยมีสรุปและแสดงไว้ในตารางที่ 1

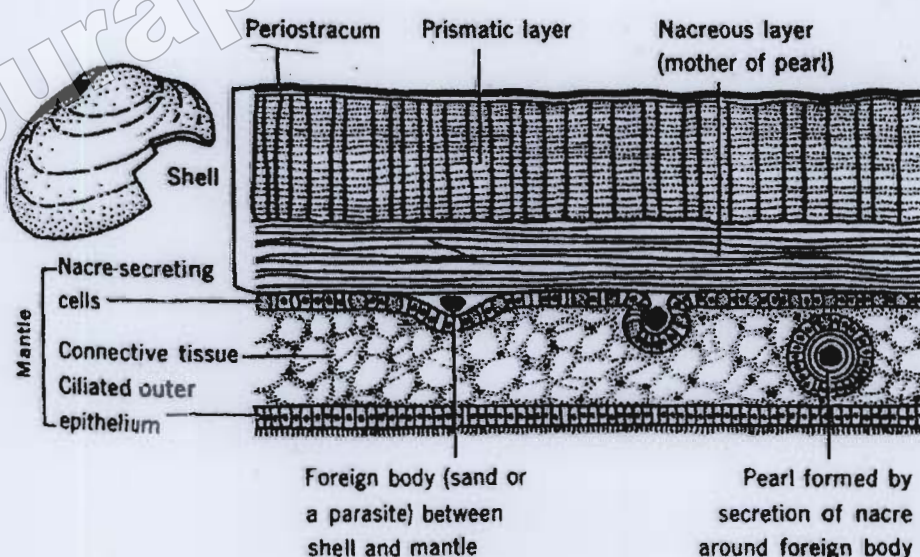
ตารางที่ 1 หอยเชลล์เศรษฐกิจของโลก (Shumway, 1991)

สกุล	ชื่อวิทยาศาสตร์	ประเทศ
Chlamys	<i>Chlamys tehuelcha</i>	อาร์เจนตินา รัสเซีย
	<i>Chlamys farreri</i>	สาธารณรัฐประชาชนจีน รัสเซีย
	<i>Chlamys nobilis</i>	สาธารณรัฐประชาชนจีน
	<i>Chlamys varia</i>	ยูโกสลาเวีย สเปน อิตาลี
	<i>Chlamys flexuosus</i>	ยูโกสลาเวีย
	<i>Chlamys bifrons</i>	ออสเตรเลีย
	<i>Chlamys delicatula</i>	นิวซีแลนด์
Patinopecten	<i>Patinopecten yessoensis</i>	ญี่ปุ่น สาธารณรัฐประชาชนจีน
Crassadoma	<i>Crassadoma gigantean</i>	สหรัฐอเมริกา และ แคนาดา
Aequipecten	<i>Aequipecten opercularia</i>	ยูโกสลาเวีย อิตาลี สเปน
	<i>Aequipecten tehelchus</i>	อาร์เจนตินา
Argopecten	<i>Argopecten irradians</i>	สหรัฐอเมริกา
	<i>Argopecten gibbus</i>	สหรัฐอเมริกา
	<i>Argopecten purpurata</i>	ชิลี
Placopecten	<i>Placopecten magellanicus</i>	แคนาดา (แอตแลนติก)
Pecten	<i>Pecten novaezelandiae</i>	นิวซีแลนด์
	<i>Pecten maximus</i>	สหราชอาณาจักร ไอร์แลนด์ ฝรั่งเศส
	<i>Pecten jacobus</i>	ยูโกสลาเวีย สเปน อิตาลี
	<i>Pecten circularis</i>	เม็กซิโก
	<i>Pecten vogdesi</i>	เม็กซิโก
	<i>Pecten fumatus</i>	ออสเตรเลีย
Amusium	<i>Amusium pleuronectes</i>	ประเทศไทย ฟิลิปปินส์
	<i>Amusium japonicum balloti</i>	ออสเตรเลีย
	<i>Amusium japonicum japonicum</i>	ฟิลิปปินส์
Lyropecten	<i>Lyropecten subnodoosus</i>	เม็กซิโก

เปลือกหอย (Mollusk shell)

เปลือกหอยเกิดขึ้นตั้งแต่เป็นตัวอ่อนระยะเวลิเจอร์ และเมื่อหอยเจริญเติบโตขึ้นจะสร้างเปลือกเพิ่มขึ้นตามขนาดของลำตัวที่เพิ่มมากขึ้น เปลือกที่สร้างเพิ่มขึ้นในช่วงหลังนี้จะสร้างจากเยื่อแมนเทิล เปลือกของหอยฝาเดียวและหอยสองฝาจะประกอบด้วยชั้นของสาร 3 ชั้น (ภาพที่ 3) เรียงจากข้างนอกสุดเข้าไป คือ

1. เพริโอสตรัคัม (periostracum) เป็นชั้นนอกสุด เป็นแผ่นบางมีสี มีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นสารโปรตีนที่แข็งแรงเหมือนโปรตีนของเขาสัตว์ มีชื่อเฉพาะว่า คอนคิโอลิน (conchiolin)
2. ปริสมติค (prismatic) เป็นชั้นกลาง มีความหนาแน่นมากกว่าชั้นอื่น มีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตอัดตัวกันแน่นมาก และเรียงตั้งฉากกับชั้นแรก นอกจากนี้ยังพบผลึกของ แคลไซต์ (calcite) และอาราโกไนต์ (aragonite) โดยผลึกของแคลไซต์ จะมีรูปร่างผลึกหลายแบบแตกต่างกันไป โดยมีฟอรม์ผลึกมากกว่า 300 ฟอรม์ เช่น สี่เหลี่ยม เป็นต้น ส่วนอาราโกไนต์รูปร่างผลึกเป็นพริสมติครูปแท่งเข็ม หรือผลึกรูปแบน และมักพบผลึกแผ่บนระนาบ โดยมีการเกาะกลุ่มกันรวมกันของผลึกมีลักษณะเป็นแท่งรวมกันคล้ายรูปหินย้อย
3. เนครีช (nacreous) เป็นชั้นในสุดเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง และมันวาวเรียงซ้อนกัน เรียกว่า ชั้นมุก (pearl) เพราะเป็นบริเวณที่มีการสร้างมุกในหอยสองฝาบางชนิด (Booolootain & Stiles, 1979)



ภาพที่ 3 ภาพตัดตามขวางของเปลือกหอยสองฝา (Booolootain & Stiles, 1979)

น้ำเสีย (Waste water)

น้ำเสียมีผู้ให้คำนิยามและความหมายไว้หลากหลาย ดังนี้

อุตร จารุรัตน์ (2537) ให้คำนิยามของน้ำเสียไว้ว่า น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์แล้วระบายทิ้งลงมา ซึ่งมีสิ่งปะปนซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก หรือสารพิษต่าง ๆ ทำให้น้ำนั้นไม่เหมาะสมสำหรับใช้อีกต่อไป

กรมควบคุมมลพิษ (2537) กล่าวว่า น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียจากบ้านพักอาศัย ขนาดต่าง ๆ โรงแรม ตลาด รวมทั้งสำนักงาน และสถานที่ทำงานนานาชนิด น้ำเสียประเภทนี้เกิดจากกิจกรรมในการดำรงชีวิตของมนุษย์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแล้ว น้ำเสียจากชุมชนจะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมาก

อาภรณ์ ยิ่งยง (2539) กล่าวว่า น้ำทิ้ง (Wastewater) หมายถึงน้ำที่ผ่านการนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ของครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรม การเกษตร และกิจกรรม เช่น การชำระล้างร่างกาย การประกอบอาหาร การจับถ่ายของเสีย การล้างวัตถุดิบในโรงงาน อุตสาหกรรม การล้างเครื่องจักร การหล่อเย็นเครื่องจักร เป็นต้น น้ำทิ้งเหล่านี้จะมีสมบัติของน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโลหะหนัก เป็นต้น จากกิจกรรมซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดถ่ายลงมาเจือปนอยู่ในน้ำ ปริมาณสิ่งสกปรกในน้ำทิ้งหรือความสกปรกของน้ำทิ้งจึงขึ้นอยู่กับการใช้งาน ดังนั้นน้ำทิ้งจากแต่ละแห่งจึงมีคุณลักษณะแตกต่างกัน

แหล่งกำเนิดน้ำเสีย นิยมจำแนกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ ๆ ได้แก่

1. น้ำเสียชุมชน (domestic wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพของประชาชนที่อยู่อาศัยในชุมชน เช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน ที่พักอาศัย ร้านค้า ตลาด โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน เป็นต้น น้ำเสียชุมชนนี้ส่วนมากจะมีสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ
2. น้ำเสียอุตสาหกรรม (industrial wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท เช่น น้ำเสียจากกระบวนการผลิต การล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักร หรือการทำความสะอาดโรงงาน เป็นต้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมแต่ละประเภทจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามประเภทของกิจการ วัตถุดิบที่ใช้ กระบวนการผลิต ระบบควบคุมและบำรุงรักษา แต่อาจกล่าวโดยรวมได้ว่า น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ เช่น สารอินทรีย์เคมี สารเคมี โลหะหนัก เป็นต้น

3. น้ำเสียเกษตรกรรม (agricultural wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ทางเกษตร ซึ่งรวมทั้งการเพาะปลูกพืชและการเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียประเภทนี้จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ทั้งในรูปของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำ การไถพรวนและสารเคมีต่าง ๆ ถ้าหากเป็นน้ำเสียจากพื้นที่เพาะปลูกอาจพบอนินทรีย์สารจำพวกปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม อินทรีย์สาร และสารพิษกำจัดศัตรูพืชในปริมาณสูง แต่ถ้าเป็นน้ำเสียจากกิจการเลี้ยงสัตว์ จะพบสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสิ่งขับถ่ายของสัตว์เป็นส่วนใหญ่ (นิรุติ คุณผล, 2539)

โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 ขึ้นไป มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างสูง ส่วนมากอยู่ในกลุ่มของ transition element แต่มีบางธาตุอยู่ในกลุ่มของ representative elements และโลหะหนักตามนิยาม เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม ระหว่าง 22-33 และระหว่าง 40-52 รวมทั้งธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์และกลุ่มแอกติไนด์ ซึ่งเป็นสารที่มีผลต่อระบบชีวเคมีของพืชและสัตว์ เป็นธาตุที่ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตแบตเตอรี่ เครื่องใช้ไฟฟ้า บางชนิด เป็นต้น โลหะหนักส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี เหล็ก แมงกานีส และเงิน เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถสะสมและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารในสัตว์น้ำ ซึ่งจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นจนถึงระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคสัตว์น้ำได้ (พรวรณัฐ คีร์วงค์ และภทริยา สังข์ดี, 2550)

แหล่งกำเนิดโลหะหนัก

แหล่งกำเนิดโลหะหนัก มีการสรุปแหล่งกำเนิดไว้ดังนี้

1. การชะล้างของแผ่นดิน ซึ่งบริเวณใดที่เป็นแหล่งแร่ของโลหะใดก็จะพบว่าน้ำบริเวณนั้นจะมีโลหะหนักชนิดนั้น ๆ สูงด้วย
2. อุตสาหกรรมการถลุงแร่ โลหะจะปะปนมากับน้ำทิ้งที่เกิดจากกิจกรรมถลุงแร่
3. การเผาไหม้เชื้อเพลิง จากการผลิตปูนซีเมนต์และอิฐบล็อก เชื้อเพลิงที่ใช้ประเภทถ่านหิน น้ำมันจะพบว่ามีโลหะหนักบางตัวสูง
4. การใช้โลหะและสารประกอบโลหะเกิดจากการใช้โลหะในอุตสาหกรรม
5. ยวดยานพาหนะเป็นแหล่งในการกำเนิดการกระจายของโลหะหนักในบรรยากาศ
6. การรั่วออกจากขยะต่าง ๆ พบมากในแหล่งชุมชนและบริเวณชายฝั่งทะเล

(พรวรณัฐ คีร์วงค์ และภทริยา สังข์ดี, 2550)

7. โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น

- Al จาก อุตสาหกรรมภาชนะบรรจุ อลลอยด์
- As จาก โรงงานสารฆ่าแมลง และ สารกำจัดวัชพืช
- Cd จาก โรงงานชุบโลหะ พลาสติก สี
- Cr จาก โรงงานชุบโลหะ สีทาบ้าน ยาฆ่าแมลง
- Pb จาก โรงงานผลิตแบตเตอรี่ สีทาบ้าน โรงกลั่นน้ำมัน
- Mn จาก โรงงานผลิตสีทาบ้าน แบตเตอรี่ อลลอยด์
- Hg จาก โรงงานผลิตสารฆ่ารา สารอุดฟัน
- Ni จาก โรงงานชุบโลหะ อลลอยด์
- Se จาก โรงงานผลิตสี สีย้อม สารฆ่าแมลง
- Ag จาก อุตสาหกรรมถ่ายภาพ ชุบโลหะ
- Zn จาก โรงงานผลิตชุบโลหะ สีย้อม (คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรม

สิ่งแวดล้อม, 2545)

การแพร่กระจายโลหะลงสู่แหล่งน้ำ

การปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำนั้นมาจาก 2 แหล่งที่สำคัญคือ

1. ขบวนการผุพังตามธรรมชาติของพื้นผิวดิน หิน หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางกายภาพของเปลือกโลก เนื่องมาจากพื้นที่ท้องทะเลมีสนามแม่เหล็ก แรงดึงดูดและการไหลของความร้อนเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงทำให้ได้พื้นทะเลเกิดปฏิกิริยาอยู่ตลอดเวลา เช่น เกิดกระบวนการแพร่กระจายของโลหะในทะเล เพราะว่าภายใต้พื้นท้องทะเลนั้นจะมีโลหะบางชนิดเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้โลหะเหล่านั้นเกิดการแพร่กระจาย เมื่อมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะตะกั่วผสมอยู่ในหินอัคนี และหินแปร ประมาณ 10-20 $\mu\text{g/g}$ และประมาณ 10-70 $\mu\text{g/g}$ ในหินปูน หรือมากกว่า 100 $\mu\text{g/g}$ ในหินฟอสเฟตบางชนิด

2. แหล่งกำเนิดที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งส่วนใหญ่มาจาก 3 แหล่ง ได้แก่

2.1 แหล่งอุตสาหกรรม โดยเกิดมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งอาจจะปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ หรือระบายก๊าซพิษสู่บรรยากาศ หรือตัวกลางอื่น ๆ

2.2 แหล่งเกษตรกรรม ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช หรือ ยากำจัดเชื้อราบางชนิดที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ

2.3 แหล่งชุมชน เช่น การใช้น้ำมันที่มาจากสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น

โลหะในสิ่งแวดล้อมเป็นสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะจากการปล่อยของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้เมื่อมีน้ำฝน

ไหลผ่านจะทำให้เกิดการชะล้างสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นโลก และชั้นบรรยากาศในรูปฝุ่นละออง หรือไอลงสู่ทะเล เมื่อโลหะถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเลแล้ว จะเกิดการแพร่กระจายในน้ำทะเล โดยกระแสน้ำ เมื่อจับตัวกับสารแขวนลอยหรือสารอินทรีย์ก็สามารถที่จะเกิดการจมตัวลงได้ (มนูดี หังสพฤกษ์, 2529)

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (Quantitative analysis of heavy metals)

โลหะหนักในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น

1. โลหะทั้งหมด หมายถึง โลหะทั้งหมดที่มีอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ สารละลายและสารแขวนลอย การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมดให้ย่อยสลายตัวอย่างก่อนตรวจวัด
2. โลหะละลายน้ำ วิเคราะห์ได้โดยตรงตัวอย่างน้ำแล้วทำให้เป็นกรด วิเคราะห์ได้โดยตรง

3. โลหะแขวนลอย วิเคราะห์ได้โดยตรงตัวอย่าง แล้วนำกระดาศกรอง + สารแขวนลอยไปย่อยสลายแล้วจึงวิเคราะห์ (กรองด้วยกระดาศเมมเบรน 0.45 ไมครอน ซึ่งเป็น polycarbonate หรือ cellulose acetate)

สำหรับตัวอย่างน้ำสะอาดหรือน้ำประปาซึ่งของแข็งแขวนลอยต่ำมาก ค่าโลหะทั้งหมดและโลหะละลายน้ำจะมีค่าเท่ากัน การเตรียมตัวอย่างน้ำโดยกรองผ่านกระดาศกรองแล้วนำน้ำตัวอย่างหลังกรองไปตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดโลหะหนักได้เลย ส่วนตัวอย่างน้ำเสียการวิเคราะห์โลหะทั้งหมดจำเป็นต้องย่อยสลายตัวอย่างก่อนเพื่อที่จะกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำก่อนแล้วจึงไปตรวจวัดโลหะต่อไป (คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2545)

ตารางที่ 2 ค่าโลหะหนักในน้ำทิ้งก่อนการบำบัดในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโลหะ (เนตรนภาพรรณ และจตุรรัตน์ ตันภูมิ, 2549; อรพิน โทณเดี้ยว, ม.ป.ป.)

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/L)
ทองแดง (Cu)	50.36
สังกะสี (Zn)	49.00
แมงกานีส (Mn)	59.75

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (2525) ให้ผู้รับใบอนุญาตกิจกรรมอุตสาหกรรมต้องดูแลรักษาระบบ และระบายน้ำทิ้งให้อยู่ใน

สภาพเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ โดยมีให้ระบายน้ำทิ้ง เว้นแต่ได้กระทำอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างแต่ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง ซึ่งน้ำทิ้งต้องมีลักษณะตาม ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม (เฉพาะบางส่วน)
(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2525)

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (mg/L)
ทองแดง (Cu)	≤ 2.0
แมงกานีส (Mn)	≤ 5.0
สังกะสี (Zn)	≤ 5.0

การปนเปื้อนของโลหะหนักในสัตว์ทะเล

การปนเปื้อนของโลหะ และค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่สะสมในสิ่งมีชีวิตในทะเลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี ในสัตว์ทะเลจำพวกปลา กุ้ง หอย และหมีก็ ก็มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (สุธรรม สิทธิชัยเกษม และสุวรรณี เจริญบำรุง, 2527) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณการสะสมของโลหะในปลาทะเลและในหมีก็ พบว่า หมีก็มีการสะสมของสังกะสีสูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ซึ่งสังกะสีมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 90.48 $\mu\text{g/g}$ ส่วนในปลาพบว่าสังกะสีมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 30.53 $\mu\text{g/g}$ (พัชรา เพ็ชรพิรุณ, 2531)

ตารางที่ 4 ระดับมาตรฐาน โลหะหนักที่อนุญาตให้มีได้ในอาหารทะเล ($\mu\text{g/g}$) (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ค่ามาตรฐาน	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
กระทรวงสาธารณสุข (อ้างอิงในกรมควบคุมมลพิษ, 2542)	20	100	-	0.5	1
สำนักคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ (อ้างอิงในกรมควบคุมมลพิษ, 2542)	-	-	2	-	1

โลหะหนักเข้าสู่ร่างกาย

โลหะหนักสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ดังนี้

1. ทางปาก โดยการกินเข้าไปในรูปของการปะปนอยู่ในอาหาร น้ำ และอื่น ๆ ในกรณี ที่กินเข้าไป จะทำให้เยื่อทางเดินอาหารเกิดการระคายเคืองจนเกิดการอักเสบ และเลือดออกได้ สำหรับโลหะที่ดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตจะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบต่าง ๆ ภายใน ร่างกาย เช่น ระบบประสาท เลือด ตับ และไต

2. ทางผิวหนัง โดยการสัมผัส การสัมผัสโดยตรงจะทำให้ระคายเคือง ส่วนที่สัมผัส เนื้อเยื่อจะถูกทำลาย เกิดเป็นผื่นคันจนเป็นแผล และมีเลือดออกใต้ผิวหนัง

3. ทางระบบหายใจโดยการสูดดม จะทำให้เยื่อทางเดินหายใจระคายเคือง (มาลินี ลัมโกคา, 2527)

ทองแดง (Copper; Cu)

ทองแดงสัญลักษณ์คือ Cu ซึ่งเป็นโลหะสีแดงอมชมพู (กรรณิการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552) มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.549 amu อยู่ในกลุ่ม IB ความหนาแน่น 8.92 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด 2,567 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 1,083 องศาเซลเซียส ไม่ละลาย น้ำแต่ละลายในกรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกที่ร้อน ละลายเล็กน้อยในกรดไฮโดรคลอริก แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ มีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 (นันทประภา อุษงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550)

การค้นพบ

โลหะทองแดงรู้จักกันตั้งแต่ก่อนประวัติศาสตร์ ทองแดงแผ่กระจายทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ชัลไฟด์ ออกไซด์ อาเซนไนด์ อาร์เซนอสัลเฟต และคาร์บอนเนตทำให้เกิดสารประกอบทองแดง ต่าง ๆ (นันทประภา อุษงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550)

การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

ทองแดงเป็นโลหะที่อ่อนดัดแปลงเป็นรูปได้ง่าย ทนความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี จึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า (กรรณิการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552) ทองแดงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในรูป โลหะทองแดง และสารประกอบทองแดง เช่น การทอผ้า เม็ดสีในการผลิตเซรามิกและเส้นใย ใช้ทำ เส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้า และเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้ในการเคลือบผิวโลหะ และใช้ผสมกับโลหะต่าง ๆ เช่น สังกะสี ดีบุก และเงิน (Clark, 2004)

การเข้าสู่ร่างกาย

1. ทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาควันหรือฝุ่นละอองของทองแดงจากการบัดกรีหรือขัดเข้าไป
2. ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีทองแดงปนเปื้อนอยู่ (มาลินี ลิ้มโกคา, 2527)

ความเป็นพิษ

อวัยวะเป้าหมายหลักของทองแดง คือ ระบบทางเดินอาหาร ตับ ไต เลือด ระบบประสาท ส่วนกลาง ระบบหัวใจ และหลอดเลือด มีผลต่อระบบกล้ามเนื้อ ผิวหนัง หรือตา มีบ้างแต่เล็กน้อย ส่วนการเกิดพิษเรื้อรัง มีอวัยวะเป้าหมายหลัก คือ ตับ (กรรณิการ์ นัตรสันติประพา, 2552) แม้ว่าความเป็นพิษของโลหะทองแดงจะต่ำมาก ๆ แต่เกลือของทองแดง (II) จำนวนมากมีระดับความเป็นพิษสูง ทองแดงเป็นธาตุอาหารรองในธรรมชาติที่ต้องการใช้ในกระบวนการสันดาปในพืช เอนไซม์ของสัตว์ และในชีวโมเลกุล (biological molecules) ทองแดงสามารถเป็นได้ทั้งสารพิษและสารอาหาร (นันทประภา อุษงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550) ถ้ามีการรับสัมผัสทองแดงในโรงงานอุตสาหกรรมโดยการหายใจ จะทำให้เกิดอาการไข้ละอองโลหะ (Metal fume fever) อาจใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมงจึงมีอาการ เช่น ไข้ หนาวสั่น ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หายใจลำบาก ไอ ไม่มีเสมหะ แต่อาการเหล่านี้จะลดลงในเวลา 24-28 ชั่วโมงแล้วหายไปภายในไม่กี่วันโดยไม่ต้องรักษา แต่ถ้าเกิดจากการรับประทานทองแดงในปริมาณมาก หรือแค่รับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีทองแดงปนเปื้อนอยู่ถ้าร่างกายได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดพิษเฉียบพลันได้ (กรรณิการ์ นัตรสันติประพา, 2552) โดยการเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงจากระบบทางเดินอาหารเกิดจากระบบทางเดินอาหารที่มีปริมาณทองแดงปะปนอยู่ในปริมาณที่สูง การเกิดพิษลักษณะนี้ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียนและท้องร่วง นอกจากนี้ยังเกิดอาการเม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดออกในทางเดินอาหาร มีปัสสาวะน้อยกว่าปกติ ไม่มีไนโตรเจนในเลือด (azotemia) ปัสสาวะมีโลหิต (hematuria) และโปรตีน (proteinuria) ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นเร็ว กล้ามเนื้อมีอาการหดเกร็งรุนแรง มีอาการโคม่า (coma) และเสียชีวิตถ้าได้รับทองแดงในปริมาณที่มากจนเกินไป (นันทประภา อุษงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550)
2. การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงในลักษณะนี้เกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารประกอบทองแดง หรือไอของทองแดงโดยการหายใจเข้าไป ซึ่งจะทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบในระบบทางเดินหายใจ และถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงเป็นปริมาณ

มาก ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน เป็นไข้ (metal fume fever) และบางครั้งทำให้ผมและผิวหนังเปลี่ยนสีได้ การหายใจเอาฝุ่นของสารประกอบทองแดง (dusts and mists of copper salts) ปริมาณมากพอสมควรเข้าร่างกายสามารถทำให้เกิดอาการเลือดคั่งในเนื้อเยื่อจมูก และช่องติดต่อระหว่างจมูกและปาก (pharynx) บางครั้งทำให้เกิดแผลทะลุในผนังกั้น (septum) ของจมูกได้ นอกจากนี้สารประกอบทองแดงนี้เมื่อเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตาอักเสบ และตาขุ่นมัวได้ (สิทธิชัย ต้นชนะสฤณี, 2545)

แมงกานีส (Manganese; Mn)

แมงกานีสสัญลักษณ์คือ Mn แมงกานีส เป็นโลหะสีเงินอมเทา แข็ง เปราะ มีเลขอะตอม 25 น้ำหนักอะตอม 25.938 amu อยู่ในโลหะทรานซิชันหมู่ VII B แถวที่ 7 ของตารางธาตุ รัศมีอะตอม 1.27 อังสตรอม แมงกานีสสกรูรูปอยู่ได้ 4 อนุกรม คือ alpha- gamma- beta- และ delta มีจุดเดือด 2,097 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,244 องศาเซลเซียส ความแข็งแรง 5.0 Mohs scale มีเลขออกซิเดชัน คือ +2, +4 และ +7 (นันทประภา อุตสูงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550)

การค้นพบ

แมงกานีสเป็นธาตุที่รู้จักโดย Scheele, Bergman และคณะในปี ค.ศ. 1774 และถูกแยกโดย Gahn ได้โลหะนี้มาโดยการเปลี่ยนรูป Pyrolusite ด้วยคาร์บอน ชื่อแมงกานีสมาจากภาษาละตินว่า “magnes” ซึ่งมีความหมายว่า “magnet” แมงกานีสไม่พบเป็นธาตุอิสระในธรรมชาติ แมงกานีสที่เปลือกโลกมีประมาณ 0.095% และพบในปริมาณความเข้มข้นในน้ำทะเลประมาณ 2 µg/L (นันทประภา อุตสูงเนิน และพิมพ์ร่ำไพ จารลี, 2550)

การใช้ประโยชน์ของแมงกานีสในโรงงานอุตสาหกรรม

แมงกานีสถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เป็นโลหะที่นำมาใช้ในการผลิตเหล็กกล้าเพื่อให้เหล็กมีความเหนียว แข็ง และทนทาน เช่นทำรางรถไฟ หัวเจาะ หัวขุด ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่แห้ง เป็นสารให้สีในอุตสาหกรรมสีทา สีย้อม หมึก ไม้ขีด ใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกและแก้วเพื่อให้แก้วใส ใช้ในการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการฟอกหนัง ย้อมหนัง ผลิตปุ๋ย ยาฆ่าเชื้อรา สารประกอบอินทรีย์ของแมงกานีสใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อไม่ให้เกิดควันมากและป้องกันเครื่องยนต์น็อก ใช้ในการทำถังดับเพลิง (กรณีการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552) ใช้ในทางเคมีโดยแมงกานีสถูกเตรียมเป็นสารประกอบหลายชนิด ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และประยุกต์ใช้ในทางอาหารและทางเภสัชกรรม เป็นต้น แมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับพืชและสัตว์ การขาดแคลนแมงกานีสในดินเป็นสาเหตุทำให้ขาดคลอโรฟิลล์ในพืช

และเมงกานีสเป็นธาตุที่จำเป็นปริมาณน้อยของร่างกายอีกด้วย (พิษวิทยา และเวชศาสตร์
อุตสาหกรรม, 2539)

การเข้าสู่ร่างกาย

สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง

1. ทางเดินหายใจ โดยการสูดหายใจเอาฝุ่น หรือไอระเหยของเมงกานีสเข้าสู่ปอด ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยที่สุด
2. ทางเดินอาหาร โดยการกินอาหารและน้ำหรือน้ำมันที่มีการปนเปื้อนเมงกานีส โดยเฉพาะคนที่ซื้อเนื่องจากร่างกายขาดเหล็กจะสามารถดูดซึมเมงกานีสจากทางเดินอาหารได้ดี ยิ่งขึ้น ทำให้โอกาสเป็นพิษมากขึ้นด้วย
3. ทางผิวหนังเมงกานีสจะเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังได้น้อยมาก (กรณีการ
ฉัตรสันติประพา, 2552)

ความเป็นพิษ

อวัยวะเป้าหมายหลักของเมงกานีส โดยจะมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ปอด ตับ
ตับอ่อน ไต และกล้ามเนื้อ จนถึงขั้นเป็นอัมพาตที่ส่วนต่าง ๆ ได้ (ไมตรี สุทธิจิตร, 2520) ถึงแม้
เมงกานีสจำนวนน้อยมีความสำคัญต่อสัตว์ แต่ถ้าเมงกานีสในปริมาณมากเป็นสาเหตุทำให้เกิด
ความเป็นเรื้อรัง การหายใจเอาฝุ่นหรือควันของโลหะเมงกานีสเข้าไปจะส่งผลกระทบต่อระบบ
ประสาทส่วนกลาง ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ (นันทประภา อุษงเนิน และพิมพ์ฟ้า
จารลี, 2550) ส่วนการสัมผัสทางผิวหนัง หรือเยื่อเมือกอื่น ๆ ก็จะทำให้เกิดการอักเสบ สารประกอบ
เมงกานีส คือ ค่างทับทิม มีฤทธิ์กัด อาจทำให้เกิดการอักเสบทำลายเนื้อเยื่อรุนแรงได้ เนื่องจากเป็น
สารออกซิไดซ์ที่แรง การเกิดพิษจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การเกิดพิษแบบเฉียบพลัน โดยเกิดเนื่องจากสารประกอบเมงกานีสมีฤทธิ์
ระคายเคืองถ้ามีการหายใจเข้าไปครั้งละมาก ๆ จะทำให้เกิดอาการที่เกิดขึ้นกับปอด หรือทำให้เกิด
อาการหลอดลมอักเสบ หรือหอบหืดได้

2. การเกิดพิษชนิดเรื้อรัง เกิดจากงานในโรงงานอุตสาหกรรมโดยมีการเกิดขึ้น
อย่างช้า ๆ จึงพบพิษ 2 ประเภทตามอวัยวะเป้าหมายของการเกิดพิษ คือ

- 2.1 พิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า Manganism จะมี
อาการเป็น 3 ระยะ คือ

- 2.1.1 ระยะแรกไม่มีอาการที่เฉพาะเจาะจง วินิจฉัยยากที่สุด แต่สำคัญที่สุด
จะมีอาการคือ ไม่มีเรี่ยวแรง เบื่ออาหาร ปวดศีรษะ วิงเวียน ง่วงนอนผิดปกติ ไม่สนใจสิ่งแวดล้อม
เหนื่อย มีความผิดปกติทางด้านอารมณ์และพฤติกรรม ตื่นเต้นง่าย บางครั้งมีอาการทางจิต เรียกว่า

Manganese psychosis คือ พุดมากไม่เน้นสาระ เดินไม่มั่นคง การเคลื่อนไหว และการทำงานของกล้ามเนื้อไม่ประสานกัน ทำให้ทำงานละเอียดไม่ได้ กล้ามเนื้อหดเกร็ง เกิดอาการปวดหลัง ความรุนแรงอาจมากหรือน้อยก็ได้ และอาจมีอาการเพียงอย่างเดียว หรือหลายอย่างก็ได้

2.1.2 ระยะกลาง เป็นระยะที่สังเกตเห็นได้ เสียงพุดมักโทนเดียวไม่มีเสียงสูงเสียงต่ำ และเสียงจะค่อย ๆ ลงเหมือนเสียงกระซิบ พุดซ้ำ ไม่สม่ำเสมอเหมือนติดอ่าง ใบหน้าตึงเครียด บางครั้งอาจมีอาการ ครั่นแกร้ง มือเคลื่อนไหวช้า ศีรษะทิ่มไปข้างหน้า การเดินไปด้านข้างยังปกติ แต่ไม่สามารถวิ่งได้ และเดินถอยหลังลำบาก แขนเคลื่อนไหวเป็นคลื่น การคว้าหยาบมือสลับกันเร็ว ๆ อาจทำไม่ได้

2.1.3 ระยะท้าย ภายในไม่กี่เดือนหลังจากระยะกลาง ผู้ป่วยจะมีอาการต่าง ๆ เลวลง คล้ายอาการโรคพาร์กินสัน โดยเฉพาะการเดิน อาการเริ่มแรกและรุนแรงที่สุดของระยะนี้คือ กล้ามเนื้อหดเกร็งตลอดเวลา ทำให้มีท่าเดินแบบเฉพาะ เหมือนเข่งปลายเท้า ศีรษะทิ่มไปข้างหน้า ขาแข็งก้าวไม่ค่อยออก แขนแกว่งน้อยกว่าปกติ เคลื่อนไหวช้า เดินถอยหลังไม่ได้ มีอาการสั่น พบได้ตามแขน ขา และศีรษะ บางครั้งอาจจะเหวี่ยงออกง่าย เขียนหนังสือช้าไม่เป็นตัว ลืมคำบางคำ การตรวจความไวในปฏิกิริยา สะท้อนกลับจะไวขึ้น ประสาทหลอน ชี้นำ ยังอาจมีอาการจิตเภท (Schizophrenia) ปัญญาทึบ กล้ามเนื้ออ่อนแรง ปวดศีรษะ หรือนอนไม่หลับ เป็นต้น

2.2 พิษต่อระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาฝุ่นแมงกานีส เข้าสู่ปอด จะเกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจส่วนบนและปอด ทำให้เกิดปอดบวม ไอ เจ็บหน้าอก เหนื่อยและหายใจลำบาก (กรรณิการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552)

สังกะสี (Zinc, Zn)

สังกะสีสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีเป็นโลหะที่แข็ง สีขาวอมฟ้า มีลักษณะเป็นมันเงา เปราะและแตกง่ายที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ มีน้ำหนักอะตอม 65.38 เวเลนซีจุดเดือด 907 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.4 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขอะตอม 30 อยู่ในหมู่ IIB คาบที่ 12 ตามตารางธาตุ มีเลขออกซิเดชัน คือ +2 สังกะสีพบมากในธรรมชาติในรูป Zinc sulfide, Zinc carbonate, Zinc oxide และ Zinc silicate สังกะสีทั้งหมดที่พบมักจะอยู่แบบปะปนทำให้ปริมาณสังกะสีที่พบไม่สูงมากนัก เช่น สังกะสีซัลไฟด์ (Zinc sulfide) มีสังกะสี 67% (มนัส สติจินดา, 2538)

การค้นพบ

ในช่วงระยะเวลาก่อนประวัติศาสตร์ สังกะสีได้ถูกใช้ในรูปโลหะผสมและทองเหลือง โลหะสังกะสีได้ถูกผลิตขึ้นในประเทศอินเดียในศตวรรษที่ 13 โดย Marggraf ผลิตโลหะขึ้นในปี

ค.ศ. 1749 โดยคาร์ล วิลเฮล์ม คาลามีน ด้วยการเผาหิน เป็นธาตุที่มีชื่อมาจากภาษาเยอรมัน มาจากคำว่า Zink หมายความว่า “Lohneyes of obscure oringin” เป็นบุคคลแรกที่ใช้ชื่อนี้กับสังกะสี ในปี 1697 สังกะสีพบทั่วไปในธรรมชาติ และแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง สังกะสีมีอยู่ในเปลือกโลกประมาณ 70 mg/kg และในน้ำทะเลเข้มข้นประมาณ 10 $\mu\text{g/L}$ (นันทประภา อวยสูงเนิน และพิมพ์ฟ้า จารลี, 2550)

การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

การใช้ประโยชน์จากสังกะสีจะใช้ในการชุบเคลือบผิวโลหะ (Galvanized) เช่น ชุบเหล็ก และเหล็กผสม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า ใช้ทำอัลลอยด์ทองเหลือง (ทองแดงผสมสังกะสี) หรืออัลลอยด์อื่น เช่น ผสมกับทองแดง นิกเกิล อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ใช้เป็นส่วนประกอบรถยนต์ เครื่องมือก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ กาว ปุ๋ย เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ยาฆ่าหนู ยาฆ่าเห็บ ยาฆ่าแมลง ยารักษาเนื้อไม้ ใช้ในห้องปฏิบัติการในการเตรียม แก๊สไฮโดรเจน ใช้ในอุตสาหกรรมยา และสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่สำคัญที่ใช้ในการเจริญเติบโตของสัตว์เป็นต้น โดยใช้สังกะสีที่ใช้จะอยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น Zinc oxide มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรค และยาสมาน Zinc chloride ใช้ชุบโลหะ และ Zinc chromate ใช้ทำเม็ดสี สีทา และเคลือบผิว (จารุพงศ์ บุญ-หลง และคณะ, 2538)

การเข้าสู่ร่างกาย

สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง

1. ทางเดินหายใจ สูดหายใจเอาควันเข้าไป เช่น การสูดหายใจเอาควันของ Zinc chloride จากผู้ประกอบอาชีพ เชื่อม บัดกรี ตัดโลหะที่เคลือบด้วยสังกะสี งานโลหะ หลอม หล่อ สังกะสีเป็นต้น
2. ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานเข้าไป ซึ่งในภาวะร่างกายปกติ สังกะสีที่กินเข้ามา 20-30% จะดูดซึมในทางเดินอาหารได้ การดูดซึมของสังกะสีจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของ ฟอสฟอรัส แคลเซียม และเส้นใยอาหาร แต่เมื่อดูดซึมเข้ามาแล้วสังกะสีก็จะกระจายทั่วร่างกาย ปริมาณมากที่สุดพบที่กล้ามเนื้อ กระดูก ทางเดินอาหาร สมอง ผิวหนัง ปอด หัวใจ และตับอ่อน เมื่ออยู่ในเลือดสังกะสีประมาณ 2 ใน 3 ส่วนจะจับอยู่กับโปรตีนอัลบูมิน และ เส้นทางการขับถ่ายหลัก (กรรณิการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552)

ความเป็นพิษ

สังกะสีเป็นธาตุจำเป็นในร่างกายจึงถูกมองว่าไม่มีความเป็นพิษ แต่สังกะสีจะมีปฏิกิริยาเคมีกับโลหะสำคัญอื่น ๆ ในร่างกาย เช่น สังกะสีมีปฏิกิริยากับทองแดง โดยถ้ากินสังกะสีเข้ามาในร่างกายปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดภาวะขาดแคลนทองแดง สังกะสีมีปฏิกิริยากับแคลเซียม โดย

มีผลต่อการสร้างกระดูก สังกะสีกับแคดเมียมโดยแคดเมียมแข่งขันกับสังกะสีในการจับกลุ่ม Sulfhydryl ที่อยู่ในชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ของร่างกาย สังกะสีสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย โดยแพร่กระจายจากอากาศลงสู่ดิน และแหล่งน้ำ อาการของการขาดสังกะสีมีมากมาย เช่น มีผื่นแดงที่หน้า ท้องเสีย เบื่ออาหาร ผอมร่าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้แผลหายช้า การรับรสและกลืนเสียไป เกิดความผิดปกติในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ในผู้สูงอายุหรือผู้ป่วยที่ลิ้นรับรสไม่ดี การได้รับสังกะสีจะช่วยให้การรับรสดีขึ้น แต่ถ้าได้รับสังกะสีในปริมาณมาก ๆ อาจทำให้ปวดท้อง มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน และถ้าได้รับสังกะสีในปริมาณสูงเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดอันตรายได้ (ศิริวรรณ ลากทับทิมทอง, 2544) การเกิดพิษแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การเกิดพิษเฉียบพลัน แตกต่างกันตามรูปแบบของสังกะสีที่กินหรือหายใจเข้าไป ถ้าการหายใจเอา Zinc oxides จะทำให้เกิดอาการไข้จากควันโลหะ (Metal fume fever) โดยจะทำให้มีอาการปวดหน้าอก ไอ หายใจลำบาก ส่วนสาร Zinc chloride จะมีอันตรายกว่า และกัดเยื่ออ่อนมากกว่า โดยจะมีการกระจายแทรกเข้าปอดทั้ง 2 ข้าง เกิดลมชักในเยื่อหุ้มปอดและปอดอักเสบเฉียบพลัน หากรับประทาน Zinc sulfate ทางปากเป็นจำนวนมาก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อทางเดินอาหาร ทำให้อาเจียน แสบไหม้ในลำคอเป็นตะคริวที่ท้อง และท้องเสีย
2. การเกิดพิษแบบเรื้อรัง จะมีการเปลี่ยนแปลงทางระบบเลือด การได้รับอาหารเสริมสังกะสีเป็นเวลานานจะทำให้เป็นโรคโลหิตจางได้ (กรรณิการ์ ฉัตรสันติประพา, 2552)

พิษวิทยา (Toxicology)

ความเป็นพิษ (toxicity) คือ ความสามารถของสารเคมีที่จะทำให้เกิดการบาดเจ็บเมื่อสารเคมีกระทบต่อเซลล์ ตำแหน่งในร่างกาย หรือบนร่างกาย ความเป็นพิษแบ่งออกเป็น

1. ความเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute toxicity) หมายถึง ความสามารถของสารพิษที่จะทำให้เกิดพิษ เมื่อได้รับสารนั้นเพียงครั้งเดียวในระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งหากสารที่ได้รับมีพิษรุนแรงหรือได้รับในปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิตได้
2. เป็นพิษเรื้อรัง (Chronic toxicity) หมายถึง ความสามารถของสารพิษที่จะทำให้เกิดพิษต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เมื่อได้รับสารพิษปริมาณเพียงเล็กน้อยติดต่อกันเป็นเวลานาน (นิธิยา รัตนานนท์ และวิบูลย์ รัตนานนท์, 2553)

สารพิษ หมายถึง สารเคมีที่ร่างกายได้รับเข้าไปเพียงเล็กน้อยแล้วทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย แต่จะเป็นอันตรายมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับความเป็นพิษ (toxic level) ของสารนั้น ตัวอย่างความเป็นพิษของสารพิษแต่ละกลุ่มแสดงดังตาราง 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบระดับความเป็นพิษและตัวอย่างค่า LD₅₀ (ปริมาณของสารพิษที่ทำให้สัตว์ทดลองตายจำนวน 50%) (Omay, 2004; Eaton & Gilbert, 2008)

ระดับความเป็นพิษ	ค่า LD ₅₀
พิษร้ายแรงที่สุด	<5 mg/kg
พิษร้ายแรงมาก	5-20 mg/kg
พิษร้ายแรง	20-50 mg/kg
พิษปานกลาง	50-500 mg/kg
พิษน้อย	0.5-5 g/kg
พิษน้อยมาก	5-15 g/kg
ไม่มีพิษ	>15 g/kg

กลไกการเกิดพิษของสารโลหะหนัก

มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของร่างกายอย่างกว้าง ๆ ดังนี้

1. ผลต่อเอนไซม์ ทำให้การทำงานของเอนไซม์ผิดปกติ เนื่องจากสารโลหะหนักจะรวมตัวกับหมู่ -SH ของเอนไซม์หรือของโปรตีน ซึ่งเป็นกลไกของการเกิดพิษที่สำคัญที่มีผลต่อร่างกายทั้งนี้เป็นที่ทราบกันแล้วว่าเอนไซม์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดเมตาบอลิซึมในร่างกาย หากขาดเอนไซม์หรือการทำงานของเอนไซม์ถูกขัดขวางก็จะเกิดความผิดปกติ
2. ผลต่อการส่งออกซิเจนระหว่างเซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ลดลง นำให้เกิดความเสียหายของระบบขนส่งออกซิเจนทำให้การขนส่งออกซิเจนลดลง
3. ผลต่อกรดนิวคลีอิก มีผลต่อ DNA ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม ภายในเซลล์ หรือมีผลต่อ RNA ทำให้เกิดการสังเคราะห์โปรตีนผิดปกติไป ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ใช้อธิบายการเกิดเซลล์มะเร็งหรือการเกิดการกลายพันธุ์ได้ (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว, ชีรยุทธ กลิ่นสุคนธ์ และปัญญา เต็มเจริญ, 2536)

โลหะหนักที่เป็นพิษ

การที่จะตัดสินใจว่าสารใดมีพิษมากน้อยเท่าใด จะต้องพิจารณาถึงค่า LD₅₀ ซึ่งเป็นขนาดของสารนั้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50% ค่าของ LD₅₀ ยิ่งต่ำแสดงว่ายังมีพิษมากขึ้น เช่น สารที่มีค่า LD₅₀ มากกว่า 500 mg/kg (เมื่อให้ทางปาก) จัดเป็นสารไม่มีพิษ แต่ทำมีค่าน้อยกว่า 100 mg/kg จัดเป็นสารมีพิษมาก ตัวอย่างโลหะหนักที่มีพิษคือ สังกะสี ซึ่งเป็นโลหะที่มีพิษน้อย รูปแบบที่เป็นพิษ คือ สังกะสีออกไซด์ (ZNO) ปกติสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อเมตาบอลิซึมของร่างกาย เป็น

ส่วนประกอบที่จำเป็นของเอนไซม์หลายตัวในสิ่งมีชีวิต และมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ การคงสภาพของผนังเซลล์ การมองเห็นในที่มืด การรับรส และระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งคนเราต้องการ 6-15 มิลลิกรัมต่อวัน แต่ถ้าขาดจะทำให้เป็นโรคตับ แคระ ผอมร่วง ผิวหนังอักเสบ ท้องร่วง ขาดภูมิคุ้มกัน แต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะมีการกระหายน้ำ ปวดศีรษะ มีนชา หูอื้อ และท้องเสีย แต่ถ้าได้รับ 12 กรัม เป็นเวลา 2 วัน จะมีพิษต่อระบบหมุนเวียนโลหิต ตับ และไต (ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา จุ้ยจุลเดิม, 2548)

การกำจัดโลหะหนัก (Heavy metals removal)

การกำจัดโลหะหนักออกจากรน้ำเสียเป็นที่สนใจของนักวิจัยหลาย ๆ ท่านในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ยังพัฒนาได้อีกมาก และงานวิจัยหลายเรื่องก็ได้พัฒนาไปถึงระดับการค้าและอุตสาหกรรม สามารถสรุปแนวคิดและแนวทางในการดำเนินงานของนักวิจัยที่ทำงานวิจัยด้านนี้ได้ดังนี้

1. มีการพยายามนำวัสดุทางธรรมชาติหลาย ๆ ชนิดมาทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้ หรือพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก (Kuh & Kim, 2000; Low, Lee, Wong, & Tang 2000; Cimino, Passerini, & Toscano, 2000; Chu & Hashim, 2002; Juang & Shao, 2002; Raddad, Gerente, Andres, & Cloirec, 2002; วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และธีรวิทย์ ทับทอง, 2540)
2. ปรับปรุงวัสดุธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (Kuh & Kim, 2000; Cimino et al., 2000)
3. อธิบายกลไก และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการดูดซับ (Kuh & Kim, 2000; Low et al., 2000; Cimino et al., 2000; Chu & Hashim, 2002; Juang & Shao, 2002; Reddad et al., 2002; วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และธีรวิทย์ ทับทอง, 2540)
4. เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุดูดซับ กับวิธีการกำจัดโลหะหนักวิธีอื่น ๆ เช่น การตกตะกอน และการแลกเปลี่ยนไอออน (Bailey, Olin, Bricka, & Adrian, 1999; Volesky & Holan, 1995) (ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา จุ้ยจุลเดิม, 2548)

การดูดซับ (Absorption)

เป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ

จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง (ปนัดดา ภูจอมนิน, 2549)

ทฤษฎีการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้มากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กจนได้ถึงขนาดโมเลกุล ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองแบบธรรมดา การดูดซับนี้อาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงดูดโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของสารดูดซับ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนมาเกาะที่ผิวว่ากระบวนการดูดซับ (Absorption) ตัวที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะติดที่บริเวณผิวของตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์การดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิว (Surface) โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งได้แก่พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว (พรวิรัช คีรีวงศ์ และภทริยา สังขดี, 2550)

กระบวนการดูดซับ

โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและ ไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน มักจะเกิดในสถานะอุณหภูมิต่ำ ๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ โดยไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของแข็งเปลี่ยนไป การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง โดยเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับหลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) (จิตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ ฤทธดานุรักษ์, 2547)

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ

1. การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับทำได้ยาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่ง ถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน

2. ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกจับด้วยพันธะทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ ส่วนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดจากผลของการดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล

3. การดูดซับทางเคมีนั้น โมเลกุลของตัวดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว และการดูดซับทางเคมีจะหยุดลงเมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ตัวดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา จุ้ยจุลเดิม, 2548)

ขั้นตอนการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) มาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับโดยการเคลื่อนที่อาจเกิดจากมีการกวนน้ำ จนทำให้เกิดการปั่นป่วนหรือเนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian movement)

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นที่ผิวลักษณะเป็นโพรง หรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวดูดซับแต่ละตัวต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในสารดูดซับจึงเกิดการดูดติดผิว

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลต้องเกาะบนผิวของสารดูดซับโดยไม่หลุด การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

ประเภทของตัวดูดซับ (Absorbent)

ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) แบ่งได้ 3 ประเภท

1. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อาจจัดเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จึงเป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ 450–1500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10–10000 อังสตรอม

2. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 300–500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเทียบ

กับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ แต่เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่า คือ สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่าย และสารที่ใช้มีราคาถูก (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

3. สารอินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ แอ็คติเวเตดซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอินทรีย์นี้สามารถจับ โมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอินทรีย์มีข้อจำกัดมาก (พรวิญญ์ ศิริวงศ์ และภทรียา สังข์ดี, 2550)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ประสิทธิภาพของการดูดซับจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ขนาดของพื้นผิวและ โครงสร้างของรูพรุนในสารดูดซับ พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีจำนวนมากจะมีผลทำให้มีพื้นที่ผิวมากทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อ โมเลกุลของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่ขนาดเล็กก็ไม่สามารถทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ ส่วนขนาดของสารดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้น ไม่มีรูพรุน (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

2. ค่าความเป็นกรดค่าด่าง การดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ เช่นถ้า pH ลดลงส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนที่พื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับไอออนลบเกิดขึ้นได้มาก (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

3. อุณหภูมิ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดซับ

4. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

4.1 ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลาย และตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะถูกใช้ยาวขึ้น

4.2 น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักและขนาดของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มความสามารถในการดูดซับจะลดลง และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง

5. ความดันป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความดันป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความดันป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

6. เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และอายุการใช้งานของคอลัมน์ สารละลายควรจะมีเวลากักเก็บน้ำในชั้นของสารดูดซับนานประมาณ 30 นาที (พรวิญญ์ คีรีวงศ์ และภทริยา สังข์ดี, 2550)

การใช้เปลือกหอยเป็นวัสดุดูดซับ

ประเทศไทยมีวัสดุธรรมชาติมากมายและหลากหลายชนิดที่สามารถใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนัก วัสดุที่น่าสนใจอย่างยิ่ง คือ เปลือกหอย เนื่องจากมีการบริโภคในประเทศปริมาณสูง รวมถึงอุตสาหกรรมหอยกระป๋อง และเนื้อหอยแช่แข็งที่ส่งออกต่างประเทศ จึงมีเปลือกหอยเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก อีกทั้งเปลือกหอยดังกล่าวก็ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างจริงจังและเป็นรูปธรรม เปลือกหอยจึงเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจ เพราะ เปลือกหอยหาได้ง่าย เป็นของเหลือทิ้งที่มีราคาถูกหรือไม่มีราคา มีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับ คือมีรูพรุน มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก และประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณสูง จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกหอยเป็นวัสดุดูดซับในเบื้องต้น พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่า 98% (Jung, Shon, Yoo, & Oh, 2000) โดยไอออนของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) จะไปจับกับไอออนของโลหะหนัก แล้วเกิดเป็นตะกอนที่ผิวและภายในรูพรุนของเปลือกหอย ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติการละลายของสาร โดยตะกอนคาร์บอเนตของโลหะหนัก ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี จะมีค่าการละลายที่ต่ำกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต (Petrucchi, Harwood, & Herring, 2002)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงในภาพที่ 4 เป็นเครื่องมือที่ใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว และใช้กับตัวอย่างที่บดเป็นผงละเอียดที่อัดลงในที่ใส่ตัวอย่างหรือฉาบบนแผ่นสไลด์ เครื่องนี้จะปล่อยรังสีให้ตกกระทบบนตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะหมุนไปทำมุมกับแนวยิง โดยหลอดสำหรับนับความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกจากผงผลึกจะหมุนไปเช่นกัน เครื่องนับความเข้มของรังสีจะส่งข้อมูลที่ได้ออกไปยังเครื่องขยาย (amplified) แปลงค่าเป็นตัวเลขและบันทึกบนกระดาษตารางบันทึก ซึ่งเคลื่อนที่ในอัตราความเร็วที่สามารถปรับได้ตามต้องการ

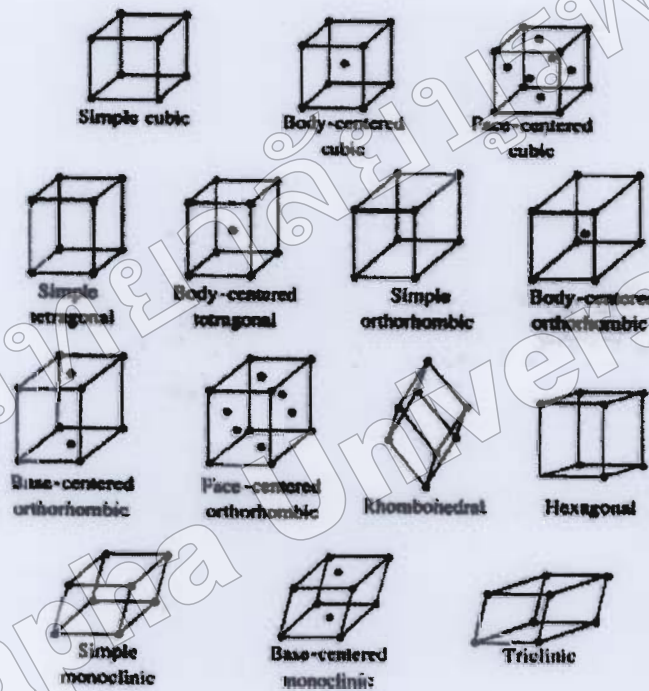


ภาพที่ 4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) (โสฬส ไกลแสน, 2552)

1.1 ระบบผลึก

ผลึกต่าง ๆ ประกอบด้วยอะตอม ซึ่งจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีลักษณะคล้ายตารางสี่เหลี่ยมวางซ้อนกันเป็นจำนวนมาก โดยแต่ละชั้นจะมีระยะห่างเท่ากัน และมีแนวของตารางขนานกัน จุดซึ่งเกิดจากการตัดกันของชั้นตารางจะแทนอะตอม โดยอะตอมทุก ๆ กลุ่มซึ่งแทนด้วยจุด

ดังกล่าวจะมีลักษณะการจัดเรียงอะตอมแบบเดียวกัน ตารางสี่เหลี่ยมซึ่งวางซ้อนกันเป็นชั้นนี้ จะเรียกว่า แกวลำดับแลตทิซ (lattice array) และจุดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นตารางนี้ จุดแลตทิซ (lattice point) จากรูปจะพบว่า ผลึกต่าง ๆ ประกอบด้วยหน่วยเซลล์สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ จำนวนมาก หน่วยเซลล์เหล่านี้สามารถแบ่งออกได้ 7 ระบบ โดยจำแนกด้วยองค์สมมาตร ด้านและมุมของหน่วยเซลล์ทั้ง 7 นอกจากนี้ระบบผลึกทั้ง 7 นี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 14 แบบบราวส์แลตทิซ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 บราวส์แลตทิซทั้ง 14 แบบใน 3 มิติ (โศภส โกลแสน, 2552)

1.2 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1.2.1 ส่วนที่ผลิตรังสี (X-ray generator) ประกอบด้วยหลอดรังสีเอกซ์ และเครื่องกำเนิดกระแสไฟแรงสูง

1.2.1.1 หลอดรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยไส้ทั้งสแตนท์ที่เป็นขั้วลบ ส่วนนี้จะอยู่ในทรงกระบอกเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนรวมกันอยู่เป็นลำแสง ขั้วบวกจะเป็นโลหะที่ต้องการโดยจะใช้รังสีชนิดนั้น ๆ เช่น ทองแดง โมลิบดีนัม เหล็ก โคบอลต์ เป็นต้น ส่วนบนของหลอดทำด้วยทองแดง

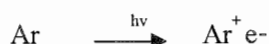
เพื่อช่วยในระบบระบายความร้อน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่าง 30-60 กิโลโวลต์ (kV) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานสูงทำให้เกิดความร้อน ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านออกมาทางหน้าต่าง 4 ด้าน ซึ่งทำด้วยธาตุเบริลเรียบพร้อมกับมีโลหะกรองแสงที่ใช้สำหรับคัดรังสีอื่น ๆ

1.2.1.2 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าแรงสูง เป็นเครื่องที่ช่วยเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นอยู่ระหว่าง 20-100 กิโลโวลต์ และเป็นต้นกำเนิดพลังงานที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ในหลอดรังสีเอกซ์

1.2.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสี (diffraction) รังสีเอกซ์ซึ่งเป็นรังสีคลื่นเดียวที่ออกจากหลอดรังสีจะผ่าน soller slit ซึ่งทำหน้าที่ในการคัดแสงที่กระเจิงไปทิศทางต่าง ๆ ให้เหลือเป็นเส้นตรงเดียว เมื่อรังสีตกกระทบตัวอย่างที่จะวิเคราะห์จะเกิดการเลี้ยวเบนผ่านหน้าต่างรับรังสี ผ่าน soller slit แล้วผ่านหน้าต่างที่กระเจิงรังสีเพื่อเข้าเครื่องวัด ซึ่งจะต้องมีขนาดพอดีกับหน้าต่างแยกรังสี (divergence slit) หลังจากนั้นรังสีจะผ่านเข้าเครื่องวัดความเข้มของรังสี

1.2.3 เครื่องวัดความเข้มของรังสี (detector) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องวัดชนิดที่มีก๊าซผ่าน และเครื่องวัดชนิดซินติเลชัน

1.2.3.1 เครื่องวัดชนิดที่มีก๊าซผ่าน (gas flow counter) หลอดของเครื่องวัดชนิดนี้เป็นกระบอกโลหะกลวง ภายในมีไส้ทั้งสแตนเลสเป็นขั้วบวก มีก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือซีนอน (Xe) บรรจุอยู่ เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย อิเล็กตรอนในอะตอมของก๊าซจะหลุดออกไปเหลือเป็นประจุบวกดังนี้



อาร์กอนไอออน (Ar^+) และอิเล็กตรอน (e^-) เรียกว่าคู่ของไอออน (ion pair) จำนวนของคู่ไอออนครั้งแรกที่ถูกยิงทำให้แตกตัว (ionized) โดยรังสีเอกซ์นี้จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ดังสมการ

$$n = E_0 / CI$$

โดย E_0 = พลังงานของรังสีเอกซ์

CI = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่พอดี (effective ionization potential)

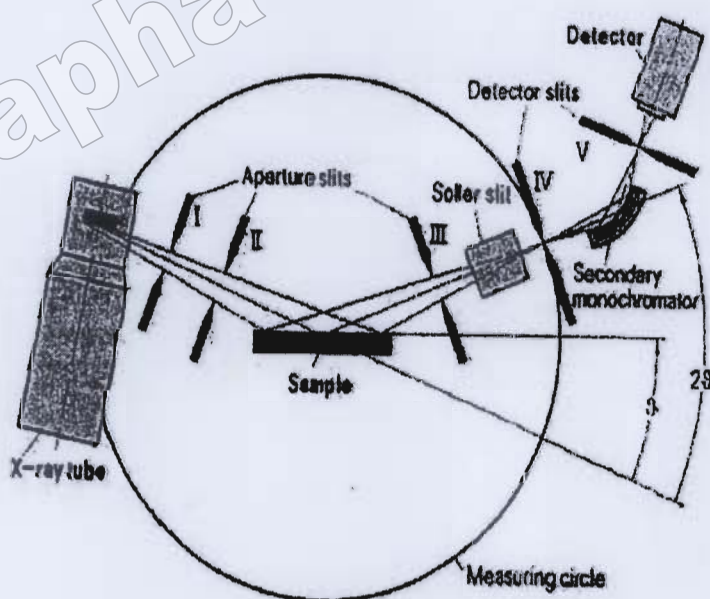
n = จำนวนของคู่ไอออนครั้งแรกที่ถูกยิงทำให้แตกตัวโดยรังสีเอกซ์

หลังจากการเกิดคู่ของไอออนในขณะความเข้มของสนามไฟฟ้าไม่สูงพอ คู่ของไอออนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถกลับไปรวมตัวกันได้ (recombination) แต่ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นจนกระทั่งถึงความต่างศักย์ที่สูงมากพอ (ประมาณ 1,800 โวลต์) จะทำให้สามารถวัดสัญญาณได้เมื่อผ่านเครื่องขยาย

1.2.3.2 เครื่องวัดชนิดซินติเลชัน (scintillation counter) เครื่องวัดชนิดนี้เป็น การเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 2 สภาวะ คือ รังสีเอกซ์ถูกเปลี่ยน พลังงานแสงสีฟ้าโดยผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) ซึ่งเป็นผลึกเรืองแสง (phosphorcrystal) จากนั้น แสงสีฟ้านี้จะผ่านไปยังพลวง-ซีเซียม (Sb/Cs) ซึ่งทำหน้าที่เป็น photocathode โดยจะผลิต อิเล็กตรอนให้ไปตกบน dynode ซึ่งเรียงกันอยู่ 10 แถว โดยแต่ละแถวจะมีศักยภาพที่สามารถทำให้ เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นบน dynode ชุดถัดไปเรื่อย ๆ ทั้ง 10 แถว จนได้อิเล็กตรอนจำนวนมากไป รวมกันที่ขั้วบวก ซึ่งจะก่อให้เกิดพลังงานไฟฟ้าแล้วไปสะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (condenser) จากนั้นจะผ่านเครื่องขยายไปยังเครื่องรับสัญญาณ

1.3 การทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียวพุ่งไปตกกระทบบนตัวอย่างซึ่งบดละเอียดที่บรรจุ ลงในที่ใส่ตัวอย่างชนิดเบนหรือฉาบลงบนกระจกที่ใส่ตัวอย่างซึ่งจะอยู่บนแกนที่หมุนด้วยมอเตอร์ ในขณะที่ตัวอย่างหมุนไปทำให้เกิดมุมตกกระทบของรังสีเท่ากับแกนของเครื่องวัดความเข้มของ รังสี โดยจะหมุนไป ดังในภาพที่ 6 ซึ่งในขณะที่ปฏิบัติการนี้ตัวอย่างเครื่องวัดความเข้มของรังสีและ กระจาดารานบนที่ก็จะหมุนไปพร้อม ๆ กัน เมื่อให้ตัวอย่างเริ่มหมุนไปสามารถจะควบคุม ความเร็วที่ได้ เช่น 1°C/min หรือ 2°C/min ตามความต้องการ โดยถ้าความเร็วเป็นไปอย่างช้า ๆ จะ สามารถวัดค่าได้ละเอียดมากขึ้น



ภาพที่ 6 แผนภาพเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (โสฬส โกลแสน, 2552)

1.4 การดูดกลืนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่พุ่งมาสู่วัตถุจะเกิดอันตรกิริยาได้ 2 ลักษณะ คือ การดูดกลืนและการกระเจิง การดูดกลืนนั้นจะมีความสำคัญกับการกระตุ้นสารตัวอย่างและมีความสัมพันธ์กับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมา ส่วนการกระเจิงนั้นจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสัญญาณพื้นหลังการดูดกลืน และการกระเจิงของรังสีเอกซ์

1.5 การเกิดรังสีเอกซ์

การเกิดรังสีเอกซ์มี 2 ลักษณะ คือ การปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว และเบรมส์ตราลูง

1.5.1 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอนุภาคหรือโปรตอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอะตอมของเป้าหมายทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรอะตอมของเป้าหมายหลุดออกจากชั้นวงโคจร จากนั้นจึงเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนชั้นวงนอกที่มีค่าระดับพลังงานสูงกว่าแล้วจึงปล่อยพลังงานส่วนเกินออกในรูปของรังสีเอกซ์เรียกว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ถูกปล่อยออกมาจะประกอบด้วยอนุกรมของรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวหลายพลังงาน แต่ละพลังงานจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของชั้นวงโคจรเดิมกับวงโคจรที่อิเล็กตรอนเข้าแทนที่และมีค่าเฉพาะในแต่ละธาตุ ซึ่งอนุกรมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแต่ละชั้นวงโคจรจะมีชื่อเรียกตามชั้นวงโคจรที่เกิดช่องว่างและถูกอิเล็กตรอนเข้าแทนที่ เช่น อนุกรมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรชั้น K จะเรียกรังสีเอกซ์เฉพาะอนุกรม K เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L เข้ามาแทนที่ว่างชั้น K เรียกว่า K และอิเล็กตรอนจากชั้น M เข้ามาแทนที่ว่างชั้น K เรียกว่า K เป็นต้น

1.5.2 เบรมส์ตราลูง (Bremsstrahlung) เบรมส์ตราลูง เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูง (high energy electron) วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า ซึ่งนิวเคลียสมีประจุเป็นบวกส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางไป และเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยจะปล่อยออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ซึ่งเรียกว่า เบรมส์ตราลูง ซึ่งจะมีพลังงานได้หลายค่าขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนว่าสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสเพียงใด ซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียพลังงาน (กัลยกร เทียนชัย, 2555)

2. เครื่องมือที่ใช้ในดูโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

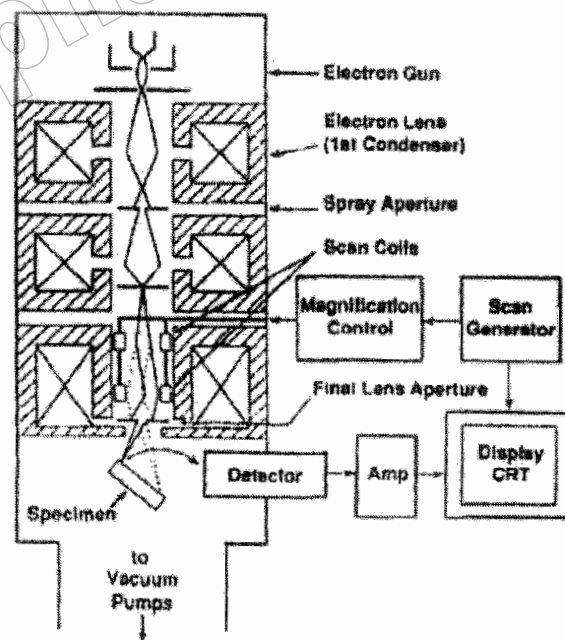
ในปัจจุบันเราอาจขยายภาพวัตถุในระดับ 10 เท่า โดยใช้แว่นขยาย ระดับ 10-1,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และระดับ 10-1,000,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope, EM) ซึ่งข้อแตกต่างระหว่าง OM และ SEM 8 คือ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ต่างเป็นเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์แทบทุกสาขาจำเป็นต้องมีไว้ใช้งาน แต่ถึงแม้ว่าเครื่องมือทั้งสองจะใช้เพื่อการขยายภาพวัตถุต่าง ๆ เช่นเดียวกันแต่หลักการทำงานต่างกันอย่างมาก โดย OM นั้น เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมากกว่าเนื่องจากใช้งานง่าย สามารถศึกษาวัตถุ หรือตัวอย่างในบรรยากาศปกติ หรือในของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำมันได้ ภาพขยายของตัวอย่างที่ได้จะให้สีจริงตามธรรมชาติและสามารถขยายภาพของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 10-1,000 เท่า ซึ่งปัจจุบันสามารถผ่านจอทีวีหรือคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้พิมพ์ภาพ หรือเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประมวลผล เช่น การวัดขนาดอนุภาคได้สะดวกขึ้น แต่ OM ก็มีข้อจำกัดที่ ความชัดลึก (depth of field) ของภาพขยาย ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง ส่วน SEM มีจุดเด่น คือ มีระยะชัดลึกมากกว่า และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่า OM ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ทั้งสองใช้แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันเป็นตัวสร้างภาพ OM ใช้คลื่นแสง (แสงที่ตามนุษย์มองเห็น) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ทำให้ OM ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ ส่วน SEM จะใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลด้านองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้อีกด้วย

การทำงานของ SEM

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของ SEM แสดงในภาพที่ 7 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน โดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกๆ ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่

มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons Image, SEI)
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวนอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป (กัลยกร เทียนชัย, 2555)



ภาพที่ 7 การทำงานของ SEM (Toya et al., 1986)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะหนัก เครื่องหาปริมาณสารโดยวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่งที่สามารถทำได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ เป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ถึง 67 ธาตุ เป็นการวัดปริมาณสารโดยอาศัยการดูดกลืนแสงของอะตอมอิสระในสภาพแก๊ส (สุริย์ ยิงเจริญ, 2551)

3.1 หลักการของอะตอมมิกแอ็บซอร์พชัน (Principles of Atomic Absorption)

อะตอมมิกแอ็บซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานแสงที่ต่างกัน ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้นต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า เป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้นหรือกลายเป็นไอออนก็ได้ โดยเทคนิคนี้อาศัยหลักการดูดกลืนแสงของอะตอมอิสระจนอะตอมเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ การตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนในแต่ละความยาวคลื่นจะบ่งบอกถึงชนิดและปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ซึ่งการทำให้อะตอมภายในธาตุเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้นจะต้องอาศัยพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้อะตอมเกิดการแตกตัวหรือกลายเป็นไอขึ้น (พรหมทิพย์ ตั้งปรียารักษ์, 2550)

3.2 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ด้วย AAS

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างนั้น ถ้าตัดสินใจที่จะใช้เทคนิคทาง AAS ขั้นตอนต่าง ๆ ควรจะเตรียมให้พร้อม ดังนี้

3.2.1 เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS

3.2.2 ตัดสินใจว่าจะทำวิเคราะห์เพื่อหาอะไร และเลือกวิธีการให้เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

3.2.3 จัดเครื่องมือให้พร้อมซึ่งถ้าเป็นเครื่องสมัยใหม่ที่ใช้คอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุมจะมี Software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้ว ซึ่งเป็นเสมือนตำรา ที่ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกใช้ได้ ซึ่งมี

3.2.3.1 เลือก Hollow Cathode Lamps (HCLs) ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ให้เข้าไปในเครื่อง และเลือกกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

3.2.3.2 จัดเครื่องให้มีสภาพเหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ เช่น flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่ อากาศ และเชื้อเพลิง เป็นต้น

3.2.3.3 จัดความกว้างของช่องแสง เข้าออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit width) ให้เหมาะสม

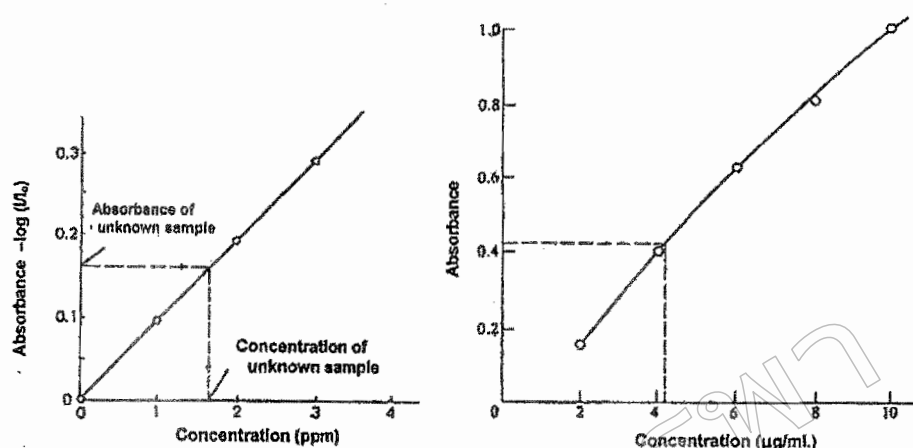
3.2.4 เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์ (วิลเล พาสเพล, 2536)

3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS

3.3.1 การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis) โดยทั่วไปแล้วเทคนิคทาง AAS นั้นสามารถใช้วิเคราะห์คุณภาพได้แต่ไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับทำคุณภาพวิเคราะห์ เพราะเสียเวลา ไม่สะดวก เนื่องจากต้องเปลี่ยน HCL และต้อง Scan ความยาวคลื่น ประกอบกับต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมใช้สำหรับตรวจหา

3.3.2 การทำปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) สามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

3.3.2.1 Standard Method ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่างเจือจาง อาจทำการวิเคราะห์ได้ง่าย ๆ โดยเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปโดยปรับสัญญาณที่ได้จาก blank ให้เป็นศูนย์ แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ flameless atomization technique อาจใช้วัด peak area หรือความสูงของพีค (peak height) แล้วนำผลมาเขียนกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้ Standard Curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ ในการเขียนกราฟอาจใช้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ ถ้าเป็นเส้นตรงใช้ least squares fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้งอาจใช้เครื่องลากเส้นโค้งพร้อมคำนวณความเข้มข้นให้ด้วยจากค่าที่วัดได้ของสารตัวอย่าง ซึ่งมีความสะดวกมาก ลักษณะ Curve ดังแสดงในภาพประกอบ 10 สิ่งที่สำคัญจะต้องไม่ลืมว่า Standard Curve ที่ได้ใช้ได้เฉพาะแต่ละการวิเคราะห์เท่านั้น เมื่อจะวิเคราะห์ใหม่จะต้องทำใหม่ ทั้งนี้เพราะ parameters ต่าง ๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงไปได้



ภาพ 8 ลักษณะของ Standard Curve (วิไล พาสะพล, 2536)

3.3.2.2 ใช้ Factor Method วิธีนี้จะใช้ได้เมื่อ Standard Curve เป็นเส้นตรง ซึ่งทำให้วิธีนี้ทำได้ง่ายขึ้นโดยนำสารละลายตัวอย่างมา 2 ส่วน เท่า ๆ กัน (X และ Y) และมีปริมาตรเป็น V_z นำส่วน X มาเติมสารละลายมาตรฐานซึ่งมีความเข้มข้นเป็น C_s ลงไปปริมาตร V_s สำหรับส่วน Y นำมาเติมตัวทำละลาย (อาจเป็นน้ำหรือกรด) ลงไปปริมาตร V_s แล้วนำสารละลายทั้งสองส่วนไปวัดค่าแอมบอร์แบนซ์ได้เป็น A_x และ A_y ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ถ้าให้ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างเป็น C_u จะคำนวณหาความเข้มข้นได้จากสมการ

$$C_u = \frac{A_y V_s V_z}{(A_x - A_y) V_z}$$

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์โดยวิธีนี้ดีที่สุด สภาวะต่าง ๆ ที่ควรจะต้องคำนึงถึงคือ

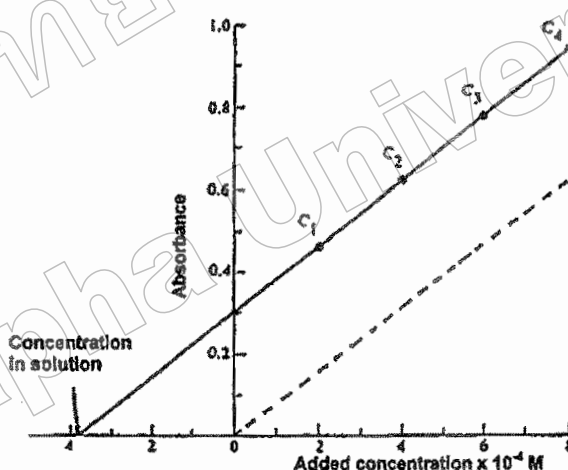
1. Standard Curve จะต้องเป็นเส้นตรง
2. ค่าแอมบอร์แบนซ์ที่วัดได้คือ A_x ควรจะต้องเป็นประมาณ 2 เท่าของ A_y
3. V_s ควรจะต้องน้อยกว่า V_z มาก ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเจือจางของ

สารละลายตัวอย่างมากเกินไปเนื่องจากการเติมสารมาตรฐาน

4. ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน C_s ควรจะต้องมากกว่าความเข้มข้นของสารตัวอย่าง C_u มาก ๆ

3.3.2.3 ใช้ Standard Addition Method จะเห็นว่าการทำ Standard Curve ในการวิเคราะห์สารนั้น สัญญาณที่วัดได้ไม่ใช่เป็นแต่เพียงสารที่ทำการวิเคราะห์เท่านั้น แต่มันรวมถึงสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากสารอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ matrix effects และ interferences จึงควรใช้

Standard Addition Method ซึ่งทำได้โดยแบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 4-5 ส่วน นำแต่ละส่วนมาเติมสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันลงไป ($C_1, C_2, C_3, \dots$) จำนวนปริมาตรเท่ากัน ส่วนสารละลายสุดท้ายนำมาเติมเฉพาะตัวทำละลายให้ปริมาตรเท่ากัน นำสารละลายทั้งหมดไปวัดค่าแอมพอร์แบนซ์แล้วนำมาเขียนกราฟหาความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไปด้วย least-square fit ดังในภาพประกอบ 11 ความเข้มข้นของสารตัวอย่างหาได้จาก Extrapolating ไปตัดแกนความเข้มข้น ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะเห็นว่าสารละลายทั้งหมดทุกขวดมีลักษณะเหมือนกัน (same matrix) ถ้าการวิเคราะห์มี matrix effects ก็จะมี effects เหมือนกันหมดด้วย จึงหักล้างกันไป และการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถหาได้ว่าสารตัวอย่างมี matrix effects นาน้อยเพียงใดได้ด้วย โดยเทียบค่าของ slopes ของ curves ทั้งสอง (เส้นที่เป็น Standard addition method เส้นประเป็นของ Standard solutions ซึ่งไม่มี interferences) ถ้าทั้งสองเส้นมีค่า slopes เท่ากัน แสดงว่าสารละลายทั้งสองชุดไม่มี interferences



ภาพที่ 9 การหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างด้วยวิธี Standard Addition (วิไล พาละพล, 2536)

3.3.2.4 ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution Method) วิธีนี้จะใช้ได้กับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มี interferences โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เกิด Enhancement คือค่าแอมพอร์แบนซ์จะวัดได้มากกว่าปกติเนื่องจากเกิดไอออนเนเชนซ์ วิธีนี้สามารถทำได้โดยการเติมสารละลายที่ประกอบด้วยธาตุที่ไอออนในสิ่งง่าย ๆ ลงในสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานให้มากเกินไปและมีปริมาตรจำกัด ไม่ควรเติมมากเกินไปจนทำให้สารละลายเจือจางมากวัดไม่ได้ ส่วนการวิเคราะห์อาจใช้วิธีที่ 1 หรือ 3 ก็ได้

3.3.2.5 ใช้วิธี Internal Standard Method วิเคราะห์หาค่าหลักการเติมสารมาตรฐาน (Reference element) ซึ่งเป็นคนละธาตุกับสารที่จะวิเคราะห์ลงในสารตัวอย่าง และ blank หลังจากวัดค่าแอมพลิจูดแล้วหาอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน (A_u/A_s) จากนั้นไปเขียนกราฟกับความเข้มข้นของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์จะได้ Standard Curve เพื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างต่อไป สำหรับวิธีนี้จะใช้ได้ต่อเมื่อ

1. สารตัวอย่างจะต้องไม่มีธาตุที่ใช้เป็นมาตรฐาน (Reference element)
2. ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะและคุณสมบัติทางเคมี

เหมือนกัน เทคนิคอาจจะค่อนข้างลำบากในการทำแต่สามารถทำได้ง่ายถ้าเป็นเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ชนิดมี 2 channel (วิไล พาละพล, 2536)

3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง AAS นั้น อาจกระทำได้หลายวิธีคือ ให้สารตัวอย่างผ่านเข้าไปในเปลวไฟ หรือใส่เข้าไปใน Graphite furnace หรือใช้ Vapor generation technique เป็นต้น แต่ละเทคนิคนั้นมีข้อดีข้อเสีย และการใช้งานแตกต่างกัน เพียงแต่จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการเท่านั้น และอาจกล่าวได้ว่า กระบวนการทำให้สารเกิด atomization ไม่มีวิธีไหนเลยที่จัดว่าดีที่สุดและดีกว่าวิธีอื่น ๆ ดังนั้นในการเลือกใช้เทคนิคใดจึงต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง เช่น ความรวดเร็วของการวิเคราะห์ ความยากง่าย ความเข้มข้น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารที่จะวิเคราะห์ เป็นต้น

3.4.1 Flame Techniques เทคนิคนี้ใช้ flame ทำให้เกิด atomization ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม สารตัวอย่างควรจะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. สารตัวอย่างต้องเป็นสารละลายหรือของเหลว
2. สารตัวอย่างควรมีสารที่เป็นของแข็งละลายอยู่ไม่เกิน 5% มิฉะนั้นจะมีผลต่อการทำให้เกิด atomization
3. สารตัวอย่างควรจะสามารถละลายได้ดีด้วยความร้อน
4. ควรมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
5. สารละลายตัวอย่างจะต้องมีอย่างน้อย 1 ml.
6. นอกจากนี้ ผู้ทำการวิเคราะห์ก็ไม่จำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นมากนัก

ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะอยู่ที่การเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นสารละลาย ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องมือมีน้อย ความแม่นยำในการวิเคราะห์ก็ดีเยี่ยมอีกด้วย

3.4.2 Graphite Furnace Techniques สารตัวอย่างที่จะใช้กับเทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. สารตัวอย่างอาจเป็นของแข็ง หรือของเหลว หรือของแข็งละลายในของเหลวซึ่งถ้าละลายเป็นเนื้อเดียวกันก็ยิ่งดี
2. สารตัวอย่างต้องสลายตัวด้วยความร้อน แล้วทำให้สารเจือปนกับสารที่จะวิเคราะห์แยกออกจากกันได้
3. ควรจะต้องมีช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม
4. สารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องเปรียบเทียบกันได้
5. ปริมาณของสารตัวอย่างที่จำเป็นต้องใช้อาจเป็น 0.5 L
6. วิธีนี้ให้ความหนาแน่นและ Sensitivity ในการวิเคราะห์ดี แต่ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร อัตราการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเคมีที่ต้องใช้ Graphite tube และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.4.3 Vapor Generation Techniques สำหรับเทคนิคนี้จำเป็นจะต้องทำสารตัวอย่างให้มีลักษณะดังต่อไปนี้

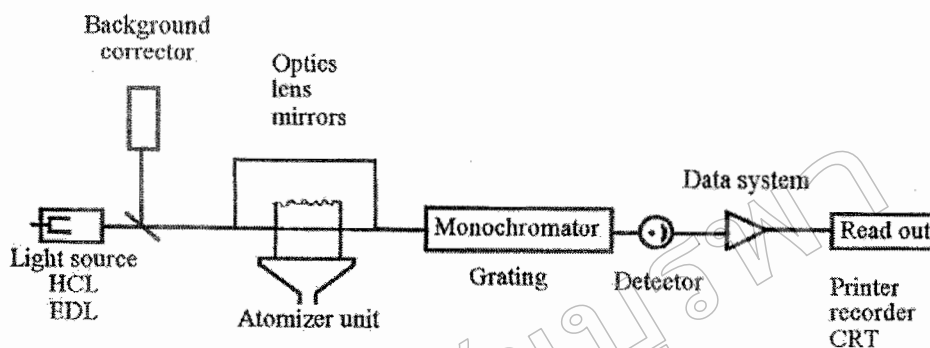
1. สารตัวอย่างจำเป็นจะต้องย่อยให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรด และมี Oxidation state ที่เหมาะสม
2. ใช้วิเคราะห์ได้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น ดังได้กล่าวมาแล้ว
3. ควรจะต้องปราศจากสิ่งรบกวนทางเคมี
4. ช่วงความเข้มข้นจะต้องพอเหมาะ
5. เป็นเทคนิคที่ให้ Sensitivity สูงสำหรับธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้
6. ค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับสารเคมีและเวลาที่ใช้
7. การเตรียมตัวอย่างต้องใช้ความชำนาญ แต่การทำวิเคราะห์สามารถทำได้ง่าย
8. ความแม่นยำของการวิเคราะห์สูง 2 วิธีแรกไม่ได้ (วิล พาสเพล, 2536)

3.5 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS มี 5 ส่วนด้วยกันคือ

- 3.5.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)
- 3.5.2 ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรี (Atomizer)
- 3.5.3 โมโนโครเมเตอร์ (Monochromater) ซึ่งใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ
- 3.5.4 ดีเทกเตอร์ (Detector)

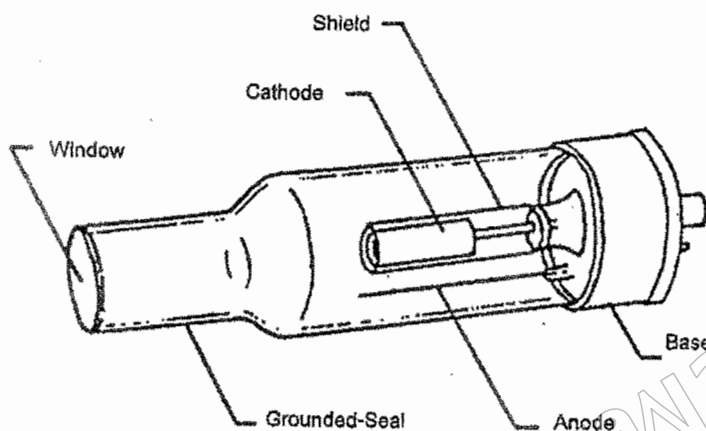
3.5.5 เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out units) (สุริย์ ยิงเจริญ, 2551)



ภาพที่ 10 องค์ประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (เน้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2535)

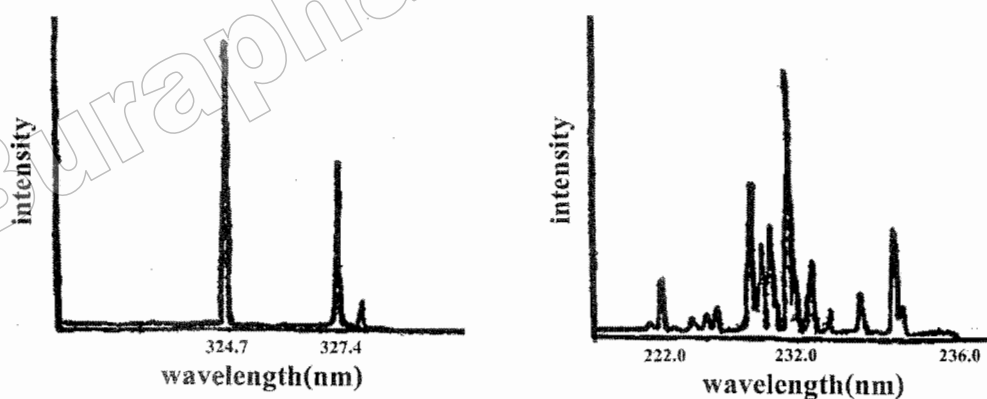
3.5.1 เครื่องกำเนิดแสง เครื่อง AAS โดยทั่วไปจะมีแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ Hollow cathode lamps (HCL) และ Electrodeless discharge lamps (EDL) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เป็น HCL เพราะให้สเปกตรัมของแสงได้หลายค่า สามารถตรวจวัดธาตุได้เกือบทุกชนิด แต่ไม่สามารถตรวจวัดสารที่กลายเป็นไอได้ง่ายการวิเคราะห์สารเหล่านี้จึงจำเป็นต้องใช้ EDL เป็นแหล่งกำเนิดแสง (สุริย์ยิงเจริญ, 2551) โดย HCL และ EDL แตกต่างกันดังนี้

3.5.1.1 Hollow cathode lamps (HCL) ลักษณะของ HCL จะประกอบด้วยขั้วแคโทดซึ่งเป็นโลหะทำเป็นรูปทรงกระบอกกลวงหรือรูปถ้วย (Cup) แล้วฉาบด้วยโลหะหรือผงโลหะที่ต้องการให้ถูกกระตุ้น เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มี Resonance lines ส่วนขั้วแอโนด (Anode) ทำด้วยโลหะนิกเกิล หรือทังสเตนหรือเซอร์โคเนียมแท่งเล็ก ๆ ภายในหลอดแก้วจะบรรจุด้วยแก๊สนีออนหรืออาร์กอนที่มีความดันประมาณ 4-10 torr. ส่วนหน้าต่าง (Window) อาจเป็นแก้วไพเร็กซ์หรือควอร์ต แก๊สเปกตรัมที่ได้อยู่ในช่วงยูวี window ต้องทำด้วยควอร์ตหรือซิลิกา แต่แก๊สเปกตรัมที่อยู่ในช่วงวิสิเบิลก็อาจใช้แก้วไพเร็กซ์หรือควอร์ต แต่ที่สำคัญ window จะต้องสะอาดเสมอ ในการใช้หลอด HCL ควรจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าให้ถูกต้อง โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 3-30 mA ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ



ภาพที่ 11 ลักษณะของ Hollow cathode lamp (Deller, 1983)

การเกิดสเปกตรัมของ HCL เมื่อใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในช่วง 300-600 โวลต์ จะทำให้แก๊สเฉื่อยที่บรรจุอยู่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ไอออนบวก แล้วไอออนบวกจะวิ่งไปชน (bombard) ธาตุที่ฉาบอยู่ที่คาโทดทำให้อะตอมของธาตุนั้น ๆ ถูกกระตุ้นและเปล่งแสงออกมาเป็นสเปกตรัมเฉพาะของธาตุนั้น ซึ่งในสเปกตรัมนั้นจะมี Resonance line อยู่ด้วย เช่น การเกิดสเปกตรัมของทองแดงและของนิกเกิล Resonance line ได้แก่ 324.7 และ 232 nm. ตามลำดับ

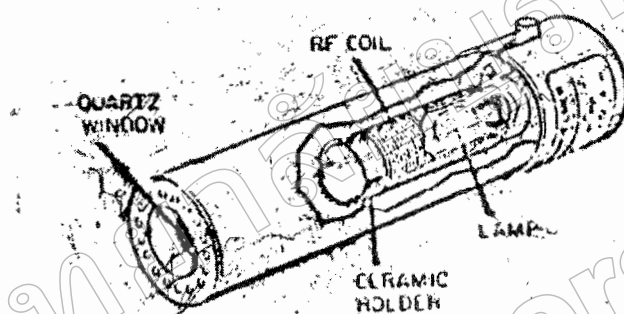


ภาพที่ 12 ลักษณะของสเปกตรัมและ Resonance Line

(a) สเปกตรัมของทองแดง

(b) สเปกตรัมของนิกเกิล (วิล พาละพล, 2536)

3.5.1.2 Electrodeless Discharge Lamps (EDLs) หลอดชนิดนี้ได้รับความนิยมเร็วมาก ซึ่งใช้เป็น Light Source ในการหาปริมาณของธาตุบางอย่าง ได้แก่ Bi, Cd, As, P, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Tl และ Zn โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลอดนี้ได้รับการแนะนำให้ใช้ปริมาณของ As, Se และ Hg เพราะให้ Sensitivity ดีกว่า นอกจากนี้ EDL ยังให้ความเข้มของแสงสูงกว่าซึ่งทำให้เพิ่มขีดจำกัดของการตรวจหาได้อีกด้วย โดยจะเห็นว่าค่าแอมป์ของหลอดที่วัดได้จากการใช้ EDL สูงกว่าของ HCL มาก (วิลโล พาละพล, 2536)



ภาพที่ 13 ลักษณะของ EDL (วิลโล พาละพล, 2536)

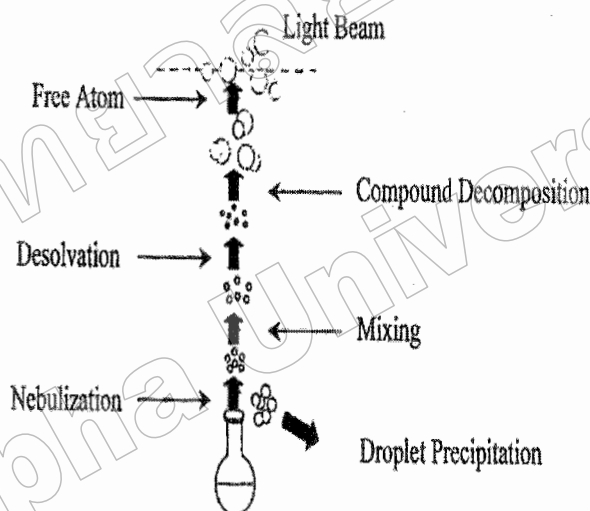
3.5.2 ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรี (The Atomization Process หรือ Atomizer) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง AAS นั้นจะประสบความสำเร็จอย่างมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมเสรี (Free atoms) ของธาตุที่ทำให้เกิดขึ้น เพราะอะตอมเสรีเป็นตัวดูดกลืนแสงที่ทำการวัดโดยการเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสงที่เหมาะสมผ่านเข้าไป วิธีที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีนิยมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ กระบวนการที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization) ในกรณีที่ใช้กระบวนการ atomization ด้วยเปลวไฟนั้น สารตัวอย่างจะต้องเป็นสารละลายที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรืออินทรีย์ก็ได้ กระบวนการ atomization นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็ก ๆ (Mist) ด้วยเครื่องที่เรียกว่า Nebulizer
2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็ก ๆ ของสารรวมกันเป็นหยดสารละลาย ซึ่งไม่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้ จึงตกลงมาแล้วออกไปทางน้ำทิ้ง (Drain)

3. Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็ก ๆ ของสารละลายเกิดผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel) และออกซิแดนท์ (Oxidant) ใน Spray chamber ของ Nebulizer

4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กนั้น ถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ของสารประกอบ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ

5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยที่ใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะไปทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์ เป็นโมเลกุล และเป็นอะตอมเสรี บางครั้งอาจเกิดการกระตุ้นหรือเกิดการไอออไนเซชันต่อไปได้ (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพรชสม, 2535)



ภาพที่ 14 Flame atomization process (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพรชสม, 2535)

3.5.3 โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) โดยแสงจากแหล่งกำเนิดจะตกลงบนตัวอย่าง แล้วผ่านมายังโมโนโครเมเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกระจายแสงออกตามค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ ให้ไปตกยังเครื่องวัด

3.5.4 ดีเทคเตอร์ (Detector) ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสัญญาณ

3.5.5 เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data System and Read-out Units) สัญญาณที่จะได้รับจากเครื่องตรวจวัดมักจะมีค่าความแรงต่ำจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยขยายสัญญาณและแปลงให้เป็นค่า Absorbance แล้วอ่านผลที่ได้ด้วย Scale Meter, Digital Meter, หรือคอมพิวเตอร์ ซึ่งอยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที (พรณทิพย์ ตั้งปรียารักษ์, 2550)

3.6 ประโยชน์ของ AAS (Application of AAS)

เนื่องจากเทคนิค AAS นั้น เป็นที่นิยมกันมากในการวิเคราะห์ธาตุในแทบทุกชนิดของสารตัวอย่างไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อการเกษตร (Agricultural Analysis) เช่น การวิเคราะห์ดิน พืช และปุ๋ย เป็นต้น
2. ใช้ในงานวิเคราะห์เพื่อการแพทย์และชีวเคมี (Clinical and Biochemistry) เช่น การหาปริมาณของธาตุ Ca, Mg, Cu, K, Fe, Zn, และอื่น ๆ ในเลือด ปัสสาวะ และเนื้อเยื่อ เป็นต้น
3. ใช้ในงานวิเคราะห์เพื่อการโลหวิทยา (Metal lurgy) เช่น การวิเคราะห์โลหะผสมต่าง ๆ หาปริมาณสารเจือปนต่าง ๆ ในโลหะบริสุทธิ์ เป็นต้น
4. ใช้ในการวิเคราะห์พวกน้ำมันหล่อลื่นและการปิโตรเลียม (Oil and Petroleum) เช่น การหาองค์ประกอบที่เป็นโลหะของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น
5. ใช้ในการวิเคราะห์พวกแร่และวัสดุต่าง ๆ (Minerals and Materials)
6. ใช้ในการวิเคราะห์น้ำจากแหล่งต่าง ๆ เช่น น้ำบาดาล น้ำเสีย น้ำทิ้ง น้ำแร่ หรือน้ำจากแหล่งธรรมชาติ เป็นต้น
7. ใช้ในงานวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม
8. ใช้ในงานวิเคราะห์อาหารและยา (Foods and Drugs)
9. ใช้ในงานวิเคราะห์ธาตุในสารอื่น ๆ (วิไล พาละพล, 2536)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนา พานแก้ว, อานนท์ ดวงพิลา, ภูริวัฒน์ ดิชฐเจริญ, วิภาดา สอนองราชบุรี และ สมภพ สอนองราชบุรี (2008) ทำการทดลองการดูดซับเมงกานีสออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกไข่ไก่แปรสภาพซึ่งมี 2 ประเภท คือ เปลือกไข่อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 4 ชั่วโมง และเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 550°C นาน 30 นาที แล้วนำไปบดให้มีขนาด 100 ไมโครเมตร. ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมมาจากเมงกานีสซัลเฟต ให้มีเมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นประมาณ 900 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยมีการใส่เปลือกไข่ไก่ที่แปรสภาพทั้ง 2 ชนิดเพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณของตัวดูดซับ 0.5, 2, 5, 10 และ 15 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ที่ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ของเมงกานีสที่มีค่า pH ต่างกันคือ 1, 4, 7 และ 10 ไว้แล้วปล่อยให้ไวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน พบว่า เปลือกไข่ไก่เผาปริมาณ 15 กรัมมีประสิทธิภาพดูดซับได้ดีที่สุด คือ สามารถดูดซับเมงกานีสให้เหลือความเข้มข้นอยู่ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 97.08% ซึ่งมีการดูดซับมากกว่าเปลือกไข่ไก่อบซึ่งพบว่าที่เวลาการดูดซับ 20 วันเท่ากันเปลือกไข่ไก่ปริมาณ 10 และ 15 กรัม สามารถดูดซับเมงกานีสได้เท่ากันโดยเหลือความเข้มข้นอยู่ 28 mg/L และพบว่า ค่า pH ที่ 10 มีผลต่อความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ของเมงกานีสมาก

จรรยาพร พุ่มงาม (2545) ศึกษาการนำเปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ภายในประเทศมากำจัดตะกั่ว (Pb) ออกจากน้ำเสีย โดยทำการทดสอบแบบเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ จากการตรวจดูลักษณะทางกายภาพของเปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่พบว่า เปลือกของหอยแครงมีพื้นที่ผิวจำเพาะ รูพรุนรวม และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ และยังสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ ผลของการนำเปลือกหอยขนาดต่างกันไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 mesh ซึ่งนำไปตากแดดสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด โดยการดูดซับตะกั่วเกิดได้ในช่วง pH 6.3-8.8 โดยกลไกการกำจัดเกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยตามด้วยการตกผลึกในรูปของเลดคาร์บอเนตและถูกดูดซับบริเวณผิวหน้าของเปลือกหอย

ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา จุ้ยจุลเจิม (2548) ทำการศึกษาศักยภาพการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}), สังกะสี (Zn^{2+}) และ แคดเมียม (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ pH 5 โดยใช้เปรียบเทียบเปลือกหอยแครง 2 แบบ คือ เปลือกหอยแครงไม่ได้ปรับสภาพ และเปลือกหอยแครงปรับสภาพ (เผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 90 นาที) ที่มีความละเอียด 65-120 ไมโครเมตร โดยใช้ปริมาณ 0.1 กรัม แล้วทำการเขย่าในเครื่องเขย่า 160 รอบ/นาที พบว่าการดูดซับเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่เวลาประมาณ 120 นาที โดยเปลือกหอยแครงปรับสภาพและเปลือกหอยแครงไม่ได้ปรับสภาพสามารถกำจัดสังกะสีมากที่สุด คือ 90-99% และ 90-97%

ตามลำดับ รองลงมาเป็นแคดเมียมซึ่งสามารถกำจัดได้ถึง 84-99% และ 82-97% ตามลำดับ และ ตะกั่ว โดยสามารถกำจัดได้ถึง 70-76% และ 62-79% ตามลำดับ

อ่อนสา นนทพละ (2545) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักผสมของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้สารดูดซับ คือ เปลือกหอยแครงบด ปั่นจย ที่ทำการศึกษา คือ ขนาดของผงเปลือกหอยแครงที่ขนาด 16 และ 20 mesh ศึกษาความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้งตั้งแต่ pH 2-10 ความเข้มข้นของโลหะหนักผสมในน้ำทิ้งที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 mg/L และทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลเปลือกหอยแครงธรรมชาติและผงเปลือกหอยแครงที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ผลเปลือกหอยแครงเผา และไม่เผาดูดซับโลหะหนักทุกตัวได้ดีเหมือนกันที่ pH 5 แต่ที่ pH มากกว่า 7 เปลือกหอยแครงเผา จะดูดซับ ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม ได้ดีกว่า ผลของขนาดตัวอย่างเปลือกหอยแครงพบว่า ให้ผลค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือสามารถดูดซับโลหะหนักทุกตัวได้ที่ pH 5 แต่ที่ pH อื่น ๆ เปลือกหอยแครงทั้งสองขนาดยังดูดซับนิกเกิลและโครเมียมได้ไม่ดี เปลือกหอยแครงขนาด 20 mesh ดูดซับนิกเกิลได้มากกว่าเปลือกหอยแครงขนาด 16 mesh เล็กน้อยประมาณ 5% ของความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ 100 mg/L ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของน้ำทิ้งจากโรงงานที่มีโลหะหนักปนเปื้อน และโลหะหนักสามารถถูกดูดซับด้วยเปลือกหอยแครงทั้ง 2 ขนาดได้ดีในช่วง pH 4-6

จินดา ยืนยงชัยวัฒน์ (ม.ป.ป.) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการกำจัด โลหะตะกั่ว (Pb) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่เป็นตัวดูดซับ โดยการเผาด้วยเตาถ่านและ คัดให้มีขนาด 0.125-0.250 มิลลิเมตร จากการศึกษา โครงสร้างและพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และกล้องจุลทรรศน์สแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พบว่า หอยแครงมีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแคลไซด์ ในขณะที่หอยแมลงภู่มีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งรูปแคลไซด์และอะราโกไนต์ การทดลองสอบกระทำโดยแบบไม่ต่อเนื่องโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ เวลาในการดูดซับ ค่า pH เริ่มต้น และปริมาณเปลือกหอย ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดของหอยแครงเป็น 0.5 mg/g ที่เวลาในการดูดซับ 10 นาที และหอยแมลงภู่เป็น 5 mg/g ที่เวลา 5 นาที โดยค่า pH เริ่มต้นไม่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว นอกจากนั้นยังศึกษาการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ พบว่าหอยแครงและหอยแมลงภู่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ปริมาณสูงถึง 19 เท่า และ 45 เท่าของปริมาตรบรรจุเปลือกหอย ซึ่งผลการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องและแบบคอลัมน์แสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยแมลงภู่มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแครง

Dahiya, Tripathi, and Hegde (2006) ได้ศึกษาศักยภาพของการดูดซับทางชีวภาพโดยใช้ เปลือกหอยในการบำบัดโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล โคบอลต์ และซีเซียม ในน้ำเสีย

สังเคราะห์ โดยเปลือกหอยที่ศึกษามาได้เก็บมาจากตำบลทอมเบย์ ประเทศอินเดีย นำมาล้าง บด และร่อนให้มีขนาด 600 ไมโครเมตร บ้างยี่ห้อที่ศึกษาได้แก่ pH ช่วง 1-7 ความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณ การดูดซับทางชีวภาพ และระยะเวลาที่ทำการศึกษาในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ผลกระทบจาก ไอออนทั่วไป เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมของปริมาณการดูดซับเริ่มต้น ของการบำบัดด้วยเปลือกของสิ่งมีชีวิตที่ถูกศึกษาเหมือนกัน และการสังเกตส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีการรับปริมาณของธาตุเข้าไปทั้งหมด 10% ที่จุดสมดุล ปริมาณสูงสุดที่เปลือกหอยสามารถรับธาตุ เข้าไปเท่ากับ 18.33 ± 0.44 , 17.64 ± 0.31 , 9.86 ± 0.17 , 3.93 ± 0.11 และ 7.82 ± 0.36 mg/g สำหรับตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล ซีเซียม และโคบอลต์ ตามลำดับ ผลการศึกษาสภาวะการดูดซับโลหะหนักที่ เหมาะสมพบว่าที่ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล ซีเซียม และ โคบอลต์ เป็น 4, 4.5, 5, 5.5 และ 4 ตามลำดับ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของโลหะหนักทุกตัว เป็น 100 mg/L ยกเว้นธาตุซีเซียมที่มีค่าเท่ากับ 50 mg/L ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้สำหรับตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล ซีเซียม และโคบอลต์ มีค่าเท่ากับ 5, 5, 10, 12.5 และ 12.5 g/L ตามลำดับ และ ระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล ซีเซียม และโคบอลต์ มีค่าเท่ากับ 3, 5, 5, 3 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลกระทบจากไอออนหลายตัวรวมกันที่ความเข้มข้น 50 mg/L ไม่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักที่ศึกษา แต่ที่ความเข้มข้นของ ไอออนทั่วไปสูงกว่านี้จะมีผลต่อการ ดูดซับธาตุ

Dahiya, Tripathi, and Hegde (2007) ได้ศึกษาศักยภาพการดูดซับตะกั่ว และทองแดงของ การบำบัดน้ำเสียเริ่มต้นด้วยตัวกลางชีวมวลจากเปลือกหอยและเปลือกปูมาศึกษาอิทธิพลของความ เข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ปริมาณการดูดซับทางชีวภาพ และเวลาในการสัมผัส ด้วย วิธี batch (การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง) โดยศึกษาอิทธิพลของไอออนพื้นฐานจำพวกโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ต่อความสามารถในการบำบัดน้ำเสียเริ่มต้นด้วยการดูดซับ ด้วยเปลือกหอยและเปลือกปู ซึ่งตัวอย่างถูกเก็บและรวบรวมจากชาวประมงในตำบลทอมเบย์ ประเทศอินเดีย และนำมาทำความสะอาดและบดให้เหลือขนาดมากกว่า 600 ไมโครเมตร โดย ทำการศึกษา pH ในช่วง 1-7 ปริมาณสารดูดซับทางชีวภาพ 0.1-12.5 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำ เสียอยู่ระหว่าง 10-500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเวลาในการสัมผัส 10 นาทีถึง 7 ชั่วโมง การศึกษาอิทธิพลของไอออนโดยเติมสารละลายผสมของ Na^+ , K^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่ความเข้มข้น ต่างกันคือ 10, 20, 50, 100, 200 และ 500 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับทำ ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นที่หลากหลายในช่วง 10-500 $\mu\text{g/ml}$ หลังจากทำการโดยวิธี batch จะนำ ตัวอย่างมาทำการกรองและวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer (AAS) พบว่า ความเข้มข้นที่สมดุล (ความเข้มข้นที่ไม่สามารถดูดซับได้อีก) เปลือกปูดูดซับตะกั่วใน

ปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 19.83 ± 0.29 mg/g และดูดซับทองแดงในปริมาณมากที่สุดได้เท่ากับ 38.62 ± 1.27 mg/g ในกรณีของเปลือกหอยสามารถดูดซับตะกั่วในปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 18.33 ± 0.44 mg/g และดูดซับทองแดงในปริมาณมากที่สุดได้เท่ากับ 17.64 ± 0.31 mg/g

Tabtong and Juijuljerm (2009) ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอยนางรม โดยเปลือกหอยนางรม มี 2 แบบคือ เปลือกหอยนางรมอบที่อุณหภูมิ 105°C และเปลือกหอยนางรมเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำมาบดให้เหลือขนาด 75-106 ไมโครเมตร ในการทดลองนี้ใช้เปลือกหอยปริมาณ 0.1 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ pH 6 โดยในการทดลองทำการเขย่าในเครื่องเขย่า 200 รอบ/นาทิจ เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับโลหะ พบว่าการดูดซับเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่เวลาประมาณ 120 นาที โดยเปลือกหอยนางรมแบบเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ระยะเวลา 120 นาที มีเปอร์เซ็นต์กำจัดตะกั่วสูงถึง 84% ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว 160 mg/g ส่วนเปลือกหอยนางรมแบบอบที่อุณหภูมิ 105°C มีเปอร์เซ็นต์กำจัดตะกั่ว 65.7% และความสามารถในการกำจัดตะกั่ว 124.6 mg/g

Liu, Sun, Xu, and Li (2009) ทำการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอยสองฝา โดยเปลือกหอยสองฝาถูกเก็บรวบรวมในบริเวณตลาดแล้วมาทำความสะอาด ผึ่งให้แห้ง และนำมาบดให้ละเอียดจนมีขนาด 100 ไมโครเมตร ซึ่งมีความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยในการทดลองทำการเขย่าในเครื่องเขย่า 200 รอบ/นาทิจ และทำการเปรียบเทียบ ปริมาณสารดูดซับ (0.1-1 กรัม) ความเข้มข้น (100-1400 mg/L) ระยะเวลาสมดุล (0-150 นาที) ค่า pH (1-5) อุณหภูมิ ($15-40^{\circ}\text{C}$) และเปรียบเทียบโลหะหนักผสม พบว่า เปลือกหอยในปริมาณ 0.9-1 กรัม มีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มีระยะเวลาสมดุลอยู่ที่ 90 นาที ค่า pH เท่ากับ 4 และ 5 สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุดคือ 95% น้อยที่สุด คือ ค่า pH เท่ากับ 1 สามารถดูดซับโลหะหนักได้แค่ 50% ส่วนอุณหภูมิช่วง $15-40^{\circ}\text{C}$ ไม่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก คือ สามารถดูดซับโลหะหนักได้ 95% ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100-400 mg/L สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ 97.32% หรือมีความสามารถในการดูดซับ 38.93 มิลลิกรัมโลหะหนัก/กรัมเปลือกหอย และในโลหะผสมเปลือกหอยสามารถดูดซับ เหล็ก > ทองแดง > สังกะสี > แคดเมียม โดยมีความสามารถในการดูดซับ คือ 99.99%, 98.62%, 26.81% และ 14.5% ตามลำดับ