

การตรวจวิเคราะห์หาโลหะหนักในร่างกายแบบมาตรฐานและ
แบบคัดกรองเบื้องต้น : การทบทวนวรรณกรรม

กฤษฎดา ตียะมณีโรจน์

สารนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพ วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปีการศึกษา 2564

**DETERMINATION OF HEAVY METALS IN HUMAN BODY BY
STANDARD AND BASIC SCREENING METHOD MEASUREMENT:
A REVIEW**

KRISADA TIYAMANEEROJ



A Thematic Paper Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Anti-aging and Regenerative Medicine

College of Integrative Medicine, Dhurakij Pundit University

Academic Year 2021



ใบรับรองสารนิพนธ์

วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อสารนิพนธ์ การตรวจวิเคราะห์หาโลหะหนักในร่างกายแบบมาตรฐานและแบบคัดกรองเบื้องต้น :

การทบทวนวรรณกรรม

เสนอโดย กฤษดา ดิยะมณีโรจน์

สาขาวิชา วิทยาการชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพ

กลุ่มวิชา วิทยาศาสตร์ชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์พัฒนา เต็งอำนวย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบสารนิพนธ์แล้ว

ลงชื่อ ประธานกรรมการ
(เกศจักรหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี ดันตีสิริระ)

ลงชื่อ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์พัฒนา เต็งอำนวย)

ลงชื่อ กรรมการ
(ดร.นายแพทย์ภาวิต หน่อไชย)

วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ รับรองแล้ว

ลงชื่อ คณบดีวิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์พัฒนา เต็งอำนวย)

วันที่ 3 เดือน เมษายน พ.ศ. 2565

หัวข้อสารนิพนธ์	การตรวจวิเคราะห์หาโลหะหนักในร่างกายแบบมาตรฐานและแบบคัดกรองเบื้องต้น: การทบทวนวรรณกรรม
ชื่อผู้เขียน	กฤษดา ตีระมณี โรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพ.พัฒนา เต็งอำนวย
สาขาวิชา	วิทยาการชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพ
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

มลพิษจากโลหะหนักนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน มีหลายสาเหตุที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่ส่งผลทำให้โลหะหนักมีแนวโน้มที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นในสิ่งแวดล้อม ซึ่งโลหะหนักสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงผ่านการบริโภคอาหาร น้ำ การหายใจ หรือการซึมผ่านผิวหนังจากการสัมผัส และเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะกลายเป็นพิษและเป็นอันตรายหากร่างกายไม่สามารถขับออก และก่อให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อต่าง ๆ การป้องกันไม่ให้โลหะหนักเข้าสู่ร่างกายจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก การตรวจโลหะหนักจึงมีความจำเป็นทั้งในแง่เพื่อประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสโลหะหนัก และในแง่เพื่อดูแลสุขภาพในเชิงป้องกัน

การตรวจโลหะหนักแบบมาตรฐาน จะใช้วิธีการตรวจจากเลือด ปัสสาวะ และเส้นผม โดยเทคนิคที่เป็นที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุด เรียกว่า Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) สามารถตรวจวัดปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้พร้อมกันภายใน 1 ครั้ง มีความไวและขีดความสามารถในการตรวจจับสูง ด้วยประสิทธิภาพที่สูงของเทคนิคนี้จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการตรวจที่ค่อนข้างสูง การตรวจเลือดบ่งบอกถึงปริมาณของโลหะหนักในกระแสเลือด ในขณะที่การตรวจปัสสาวะบ่งบอกถึงโลหะหนักที่ร่างกายขับออก และการตรวจเส้นผมบ่งบอกถึงการสะสมของโลหะหนักในร่างกาย

การตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้น โดยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry ด้วยเครื่อง OligoScan เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจหาโลหะหนักและเกลือแร่ โดยเป็นการตรวจที่เนื้อเยื่อบริเวณฝ่ามือ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ทราบผลตรวจรวดเร็วทันที ไม่ต้องเจ็บตัวในการเก็บตัวอย่าง ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า สามารถตรวจวัดเกลือแร่ได้ 20 ชนิด และตรวจวัดโลหะหนักได้ 14 ชนิด ภายในการตรวจครั้งเดียว นอกจากนี้ การตรวจที่เนื้อเยื่อบ่งบอกถึงการสะสมของโลหะหนักในร่างกาย ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะพิษโลหะหนักแบบเรื้อรัง

โดยสรุป ในการพิจารณาเลือกการตรวจโลหะหนักแบบมาตรฐานหรือแบบคัดกรองเบื้องต้นนั้น ควรจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์และความจำเป็นในการตรวจ ระยะเวลาที่ใช้ตรวจ รวมถึงค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการตรวจ ในยุคที่ผู้คนเริ่มหันมาดูแลสุขภาพมากขึ้น การตรวจสุขภาพประจำปีเป็นที่นิยม การตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้นด้วยเครื่อง OligoScan อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ตอบโจทย์ในยุคสมัยนี้

คำสำคัญ : เกลือแร่, โลหะหนัก, การตรวจแบบมาตรฐาน, การตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้น



Thematic Paper Title	DETERMINATION OF HEAVY METALS IN HUMAN BODY BY STANDARD AND BASIC SCREENING METHOD MEASUREMENT: A REVIEW
Author	Krisada Tiyananeeroj
Thesis Advisor	Asst. Prof. Patana Teng-umnuay, Ph.D., M.D.
Department	Anti-aging and Regenerative Medicine
Academic Year	2021

ABSTRACT

The pollution of heavy metals is one of the major environmental problems in present days. A large number of activities carried out by humanity have a tendency to increase heavy metals in the environment. Heavy metals directly enter the human body through eating, drinking, inhalation and skin contact. The prevention of heavy metals from entering the body is therefore impracticable in typical situations. Heavy metals can accumulate in various tissues and become toxic if the human body cannot excrete them.

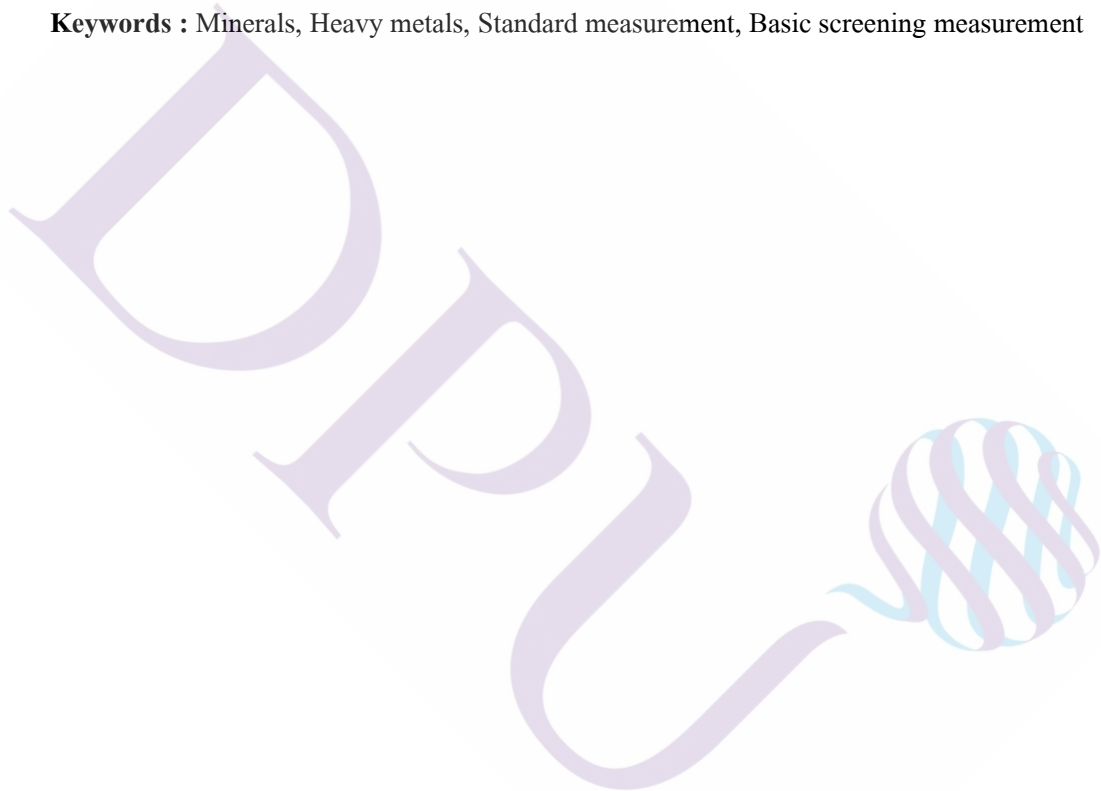
Testing for heavy metals may be necessary both in terms of assessing the risk of heavy metal exposure and for preventive health care. Standard heavy metal tests use blood, urine or hair for determination. The most widely used technique today is Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Multiple heavy metals can be measured simultaneously in a single analysis with high detection limits. Due to the high efficiency of this technique, the examination costs are quite high. In addition, the blood test indicates the amount of heavy metals in the bloodstream, while the urine test indicates the excretion of heavy metals by the body and the hair test indicates the accumulation of heavy metals.

Basic screening tests using the analytical technique of UV-Visible Spectrophotometry by OligoScan is an alternative method that can be used for the determination of heavy metals and minerals. With this technique, a device takes measurements on the hand epidermis. The method provides convenient, quick results that are pain free with no specimen required and low cost. 20 minerals and 14 heavy metals can be measured in a single analysis. Furthermore, the tissues of

palmar dermis tests indicate the accumulation of heavy metals in the body which may cause chronic heavy metal poisoning.

In conclusion, the consideration of choosing a standard heavy metals test or basic screening test should consider the objective and the need of the examination in addition to the analytical time and the cost effectiveness. Currently, people increasingly pay more attention to health care, and annual health check-ups are widely popular. Basic screening tests by OligoScan might be an alternative option that meets the needs of today's people.

Keywords : Minerals, Heavy metals, Standard measurement, Basic screening measurement



กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและสนับสนุนอย่างสูงยิ่งจากบุคคลหลายท่าน ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผศ.ดร.นพ.พัฒนา เต็งอำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์หลักที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ รวมถึงความเป็นห่วงเป็นใยและความใส่ใจที่ท่านอาจารย์มอบให้ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมากจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.ปพิชญา เทศนา และอาจารย์มนฤดี กิรดิพรานนท์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านสถิติ ข้อเสนอแนะ สอบทาน ตรวจสอบรายงานสารนิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสารนิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิทยาการชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพ วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันทรงคุณค่าด้วยความเมตตา ผู้เขียนตั้งปณิธานไว้ว่าจะนำความรู้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อตนเอง ครอบครัว และผู้อื่นต่อไป รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิทยาการชะลอวัยและฟื้นฟูสุขภาพทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในทุกเรื่องตลอดการเรียน

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับการอบรมสั่งสอนและคำแนะนำ การสนับสนุนและกำลังใจ ทำให้การทำสารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ คุณค่าประโยชน์อันพึงมีจากสารนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดามารดา

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าสารนิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจทั่วไป หากมีสิ่งผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กฤษฎา ดิยะมณี โรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๖
กิตติกรรมประกาศ.....	๗
สารบัญตาราง	๘
สารบัญภาพ	๘
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๘
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 หลักการและเหตุผล	2
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของเรื่อง	2
2. เนื้อเรื่อง.....	4
2.1 โลหะหนัก	4
2.2 อันตรายจากโลหะหนักที่ส่งผลต่อร่างกาย.....	14
2.3 โลหะที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย	17
2.4 การตรวจหาโลหะหนักในร่างกาย	18
2.5 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องมือตรวจวัดโลหะหนัก	19
2.6 เทคนิคมาตรฐานที่นิยมในการวิเคราะห์หาโลหะหนักในทางคลินิก	21
2.7 การตรวจหาโลหะหนักแบบคัดกรองเบื้องต้น	29
3. สรุป.....	49
บรรณานุกรม.....	52
ประวัติผู้เขียน	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม..... 14
2.2	ค่าอ้างอิงมาตรฐานของโลหะหนักในเลือดและปัสสาวะ..... 14
2.3	ขีดความสามารถของแต่ละเทคนิคในการวิเคราะห์หาธาตุชนิดต่าง ๆ..... 26
2.4	การเปรียบเทียบคุณสมบัติข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิค 27
2.5	จำนวนและร้อยละของตัวอย่าง จำแนกตามเพศ หมู่เลือด และอายุ..... 36
2.6	ระดับค่าเกลือแร่ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 37
2.7	ตารางเปรียบเทียบช่วงอ้างอิงปกติแต่ละเกลือแร่ระหว่างของคนยุโรปและ คนเอเชีย..... 38
2.8	ระดับค่าโลหะหนักค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 39
2.9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอะลูมิเนียม (Al) และเกลือแร่ 41
2.10	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียม (Cd) และเกลือแร่ 43
2.11	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปรอท (Hg) และเกลือแร่ 44
2.12	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนู (As) และเกลือแร่..... 46
2.13	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตะกั่ว (Pb) และเกลือแร่..... 48
3.1	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติแต่ละเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์ หาโลหะหนัก..... 51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กลไกโดยรวมของโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย.....	16
2.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบหลักของเทคนิค Atomic Spectrometry.....	20
2.3 หลักการพื้นฐานของเครื่อง AAS	21
2.4 เครื่อง FAAS รุ่น PinAAcle 500 ยี่ห้อ Perkin Elmer.....	22
2.5 เครื่อง GFAAS รุ่น 280Z AA ยี่ห้อ Agilent.....	23
2.6 เครื่อง ICP-AES รุ่น Avio 560 Max ยี่ห้อ Perkin Elmer	24
2.7 เครื่อง ICP-MS รุ่น NexION 1000 ยี่ห้อ Perkin Elmer.....	25
2.8 เครื่อง XRF ยี่ห้อ Bruker	28
2.9 เครื่อง LeadCare	29
2.10 ช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวีและช่วงแสงขาว.....	31
2.11 ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan).....	32
2.12 ผลการตรวจเกลือแร่จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan).....	33
2.13 ผลการตรวจโลหะหนักจากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)	35

ประมวลศัพท์และคำย่อ

AAS	Atomic Absorption Spectrometry
FAAS	Flame Atomic Absorption Spectrometry
GFAAS	Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry
HGAAS	Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry
XRF	X-ray Fluorescence
ASV	Anodic Stripping Voltammetry
GPx	Glutathione Peroxidase
SOD	Superoxide Dismutase



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา (Background and Significance of the Problem)

มลพิษจากโลหะหนักนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน ต้นเหตุหลายอย่างเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่ส่งผลทำให้โลหะหนักมีแนวโน้มที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นในสิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งปล่อยของเสียที่มีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่มีการบำบัดที่เพียงพอ การทำการเกษตรที่พึ่งพาสารเคมี น้ำเสียที่ถูกปล่อยจากบ้านเรือน หรือแม้แต่ของเสียที่เกิดจากการเผาไหม้พลังงานและปนเปื้อนไปในอากาศ ตลอดจนการปนเปื้อนโลหะหนักในอาหาร เครื่องดื่ม ยา เครื่องสำอาง ภาชนะบรรจุภัณฑ์ และของใช้ต่าง ๆ ภายในบ้าน ซึ่งก็เป็นสาเหตุของปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรง การสัมผัสโลหะหนักของมนุษย์จึงเป็นสิ่งที่ยากจะหลีกเลี่ยงได้^(1,2)

พิษโลหะหนักได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นภัยคุกคามที่สำคัญและมีความเสี่ยงต่อสุขภาพหลายประการ โลหะหนักบางชนิดมีความเป็นพิษสูงและเป็นอันตรายต่อมนุษย์แม้จะมีการสัมผัสในปริมาณเพียงเล็กน้อย เช่น สารหนู ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท บางโลหะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบในกระบวนการทำงานของร่างกาย ภาวะพร่องหรือเกินของโลหะบางชนิดอาจมีผลต่อการมีสุขภาพที่ดี และมีโลหะเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถกำจัดออกได้ บางชนิดจะสะสมในร่างกายและมีลักษณะอาการของพิษโลหะหนักแสดงออกมาให้เห็น พิษโลหะหนักไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปริมาณที่ได้รับ รูปแบบของโลหะหนักที่ได้รับ ระยะเวลาในการได้รับ หรือสัมผัสโลหะแบบเฉียบพลันหรือแบบเรื้อรัง เป็นต้น กลไกของพิษโลหะหนัก คือ การไปทำลายการทำงานของเซลล์ เช่น การเจริญเติบโต การแบ่งตัว การซ่อมแซม และกระบวนการตายของเซลล์แบบ Apoptosis คือ กระบวนการตายของเซลล์ตามที่ถูกตั้งโปรแกรมไว้ (Programmed Cell Death) รวมไปถึงการสร้างอนุมูลอิสระจำนวนมาก การทำให้กระบวนการต่อต้านอนุมูลอิสระอ่อนแอลง การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และทำให้เกิดภาวะออกซิไดซ์เกินสมดุล (Oxidative Stress)^(1,3) เนื่องจากพิษโลหะหนักส่งผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมาก อาการที่ไม่เฉพาะเจาะจงไม่ทราบสาเหตุ เช่น เหนื่อยล้า อ่อนเพลีย ปวดตามตัว เหน็บชา เบื่ออาหาร อาการเหล่านี้อาจมีสาเหตุมาจากภาวะพิษจากโลหะหนักแบบเรื้อรัง การสะสมของโลหะหนักแบบไม่รู้ตัวเป็นเวลานาน การตรวจหาโลหะหนักในร่างกายจึงอาจมีความจำเป็นช่วยให้แพทย์ใช้ในการวินิจฉัยหาแนวทางการรักษาและป้องกัน

1.2 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันวิธีการตรวจหาโลหะหนักแบบมาตรฐานในทางคลินิก ทำได้โดยการเก็บสารตัวอย่าง เช่น เลือด ปัสสาวะ และเส้นผม ส่งห้องปฏิบัติการเพื่อทำการวิเคราะห์ เทคนิคที่นิยมใช้ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคมีข้อเด่นข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ถึงแม้ว่าการตรวจแบบมาตรฐานจะได้ผลที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง แต่ก็มาพร้อมกับค่าใช้จ่ายที่สูงและสูงมากขึ้นหากต้องการตรวจปริมาณเกลือแร่เพิ่มเติม ระยะในการส่งตรวจที่นาน ความเจ็บจากการเจาะเลือด ปัจจุบันจึงมีทางเลือกในการตรวจแบบคัดกรองที่ให้ผลตรวจที่ง่ายและรวดเร็ว ไม่เจ็บตัว และค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า ให้ผลตรวจที่แม่นยำน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ในยุคที่คนเริ่มหันมาดูแลสุขภาพกันมากขึ้น มีการตรวจสุขภาพประจำปี การนิยมรับประทานผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเพิ่มขึ้น ฉะนั้นการทราบถึงปริมาณโลหะหนักและภาวะสมดุลเกลือแร่ในร่างกาย ด้วยการตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้น จึงเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำมาช่วยในการวางแผนดูแลสุขภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทบทวนข้อมูลความรู้เกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องมือตรวจหาโลหะหนัก รวมไปถึงเทคนิคที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาโลหะหนักในทางคลินิก
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบจุดแข็ง จุดอ่อน และข้อจำกัดต่าง ๆ ของการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักในร่างกายแบบมาตรฐานและแบบคัดกรองเบื้องต้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน
3. เพื่อศึกษาถึงความน่าเชื่อถือของผลตรวจโลหะหนักและเกลือแร่ที่ได้จากการตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้น

1.4 ขอบเขตของเรื่อง

การทบทวนวรรณกรรมนี้ ได้กำหนดหัวข้อหลักในการค้นหาข้อมูลภายใต้หัวข้อเรื่องพิษโลหะหนัก ผลกระทบจากโลหะหนักต่อร่างกายมนุษย์ การตรวจวิเคราะห์โลหะหนัก เครื่องมือและเทคนิคในการวิเคราะห์โลหะหนัก จากหัวข้อเรื่องเหล่านี้ให้คำและวลีที่สำคัญสำหรับการค้นหาทางอินเทอร์เน็ตผ่านฐานข้อมูลเว็บ Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, PMC Europe และ Scopus จำนวนงานวิจัยที่ค้นคว้าจากฐานข้อมูลดังกล่าวมีทั้งหมด 157 ชิ้นงาน โดยคัดเลือกเนื้อหาที่เหมาะสมสำหรับการทบทวนวรรณกรรมนี้ได้จำนวน 49 ชิ้นงาน โดยงานทบทวนวรรณกรรมนี้ได้ทำการสรุปความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะหนัก แหล่งที่มา กลไกการเกิดพิษ อันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ การตรวจหาโลหะหนักแบบมาตรฐานด้วยเทคนิควิธี

ต่าง ๆ รวมถึงเปรียบเทียบรายละเอียดทั่วไป จุดแข็ง จุดอ่อน และข้อจำกัดต่าง ๆ และท้ายที่สุดการ
ตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้นด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยให้ผลตรวจที่รวดเร็วฉับไว ที่เหมาะกับโลก
ปัจจุบันในยุคดิจิทัล



บทที่ 2

เนื้อเรื่อง (Body)

2.1 โลหะหนัก

“โลหะหนัก” ถูกนิยามและเรียกเช่นนี้เนื่องมาจากตัวมันมีน้ำหนักอะตอมมากกว่า 40.04 และมีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวอย่างเช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ปัจจุบันคำว่า “โลหะหนัก” ถูกใช้เพื่อเรียกโลหะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ สารกึ่งโลหะ (Metalloid) บางชนิด เช่น สารหนู อะลูมิเนียม ถึงแม้จะมีน้ำหนักเบาว่าโลหะแต่เป็นพิษต่อมนุษย์ ก็มักจะถูกกำหนดอยู่ในกลุ่มโลหะหนักด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปโลหะเป็นสารที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง สูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายและกลายสภาพเป็นไอออนบวก โลหะหนักบางชนิด เช่น สังกะสี มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตในกระบวนการทำงานทางสรีรวิทยาและชีวเคมี จึงถูกเรียกว่า แร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย อย่างไรก็ตาม หากมีในปริมาณที่มากเกินไปก็สามารถก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันหรือเรื้อรังได้ในทางกลับกัน หากมีปริมาณไม่เพียงพอก็อาจส่งผลให้เกิดโรคหรือภาวะพร่องสารอาหารได้ แร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายยังมีความสำคัญและเป็นองค์ประกอบหลักของเอนไซม์ที่สำคัญต่าง ๆ โครงสร้างโปรตีน และฮอร์โมน เป็นต้น สังกะสีเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิด ธาตุเหล็กมีความสำคัญต่อฮีโมโกลบิน ซีลีเนียมจำเป็นสำหรับเอนไซม์กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione Peroxidase)⁽⁴⁾

2.1.1 ปรอท (Mercury; Hg)

ปรอทเป็นโลหะหนักที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยมีลักษณะเป็นของเหลว มันวาว สีเงินขาว ไม่มีกลิ่น และเมื่อโดนความร้อนจะกลายเป็นไอไม่มีสี ปรอทเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงมาก ปรอทในธรรมชาติจะพบอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ โลหะธาตุ (Metallic Elemental) สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Compound) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound)⁽³⁾

โลหะปรอท (Metallic Mercury, Hg⁰) เป็นโลหะชนิดเดียวที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย ไอปรอทเป็นอันตรายมากกว่าในรูปของเหลว โลหะปรอทนิยมนำมาใช้ในเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) มาตรวัดความดันบรรยากาศ (Barometer) เครื่องวัดความดันโลหิต แบตเตอรี่รถยนต์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์ รวมไปถึงอะมัลกัม (Amalgams) ที่ใช้ในทางทันตกรรม ที่มีส่วนประกอบของโลหะปรอทประมาณ 50% ร่วมกับโลหะอื่น ๆ เช่น เงิน ดีบุก และ ทองแดง⁽³⁾

ปรอทอนินทรีย์ (Inorganic Mercury, Hg^+ , Hg^{2+}) เกิดขึ้นจากการที่ปรอทไปจับกับโมเลกุลของคลอรีน กำมะถัน หรือออกซิเจน ปรอทอนินทรีย์ เช่น ปรอทคลอไรด์ ($HgCl_2$) ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมปรับสีผิวให้กระจ่างใส ซึ่งใช้ในการขจัดฝ้ากระและจุดด่างดำของผิว อันเนื่องมาจากการสะสมของเม็ดสีเมลานินที่มากเกินไป ปรอทคลอไรด์มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สร้างเม็ดสีเมลานิน โดยการที่ปรอทไปแทนที่ตำแหน่งของทองแดงที่เป็นโคแฟกเตอร์⁽³⁾

ปรอทอินทรีย์ (Organic Mercury, CH_3-Hg) เกิดขึ้นจากการจับกันระหว่างปรอทกับคาร์บอน โดยธรรมชาติเมื่อโลหะปรอทมีการตกตะกอนสู่แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กหรือจุลินทรีย์ (Microorganism) ในน้ำสามารถดูดซึมและแปลงโลหะปรอทให้เป็นปรอทอินทรีย์ ที่เรียกว่า เมทิลเมอร์คิวรี (Methyl Mercury) ซึ่งจะถูกกินโดยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่าง ๆ และท้ายที่สุดจะถูกกินโดยปลาขนาดใหญ่ ปลาที่อยู่บนสุดของห่วงโซ่อาหาร เช่น ปลาทูน่า ปลาฉลาม จึงมักมีสารปรอทสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของพวกมัน⁽⁵⁾ เอทิลเมอร์คิวรี (Ethyl Mercury) เป็นปรอทอินทรีย์อีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเก็บรักษาผักขึ้น ปรอทอินทรีย์มีความเป็นพิษมากกว่าปรอทอนินทรีย์

ความเสี่ยงของพิษจากปรอทขึ้นอยู่กับรูปแบบของปรอทและช่องทางการสัมผัส การสัมผัสโลหะปรอทสามารถเกิดขึ้นได้หากมีการสูดดมไอปรอท โดยทั่วไปแล้วไอปรอทในอากาศมีปริมาณน้อยมากและไม่ถือเป็นช่องทางหลักของการสัมผัส อย่างไรก็ตาม สถานที่ทำงานบางอาชีพมีโอกาสที่สัมผัสกับปรอทได้ เช่น ในเหมืองทองคำที่มักใช้ปรอทในขั้นตอนการสกัดทองคำ คลินิกทันตกรรมที่ใช้อะมัลกัมในการอุดฟัน หรือโรงงานผลิตเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การสัมผัสปรอทของคนทั่วไปส่วนใหญ่จึงมักจะมาจากอาหาร และโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการบริโภคปลาที่มีการปนเปื้อน บริเวณน่านน้ำที่มีการปนเปื้อนของปรอทมาก ปลาที่มีขนาดใหญ่และอาศัยอยู่เป็นเวลานานจึงมีแนวโน้มที่จะปนเปื้อนสารปรอทมากกว่า⁽⁶⁾ ปลาทะเลถือเป็นแหล่งสำคัญของการได้รับเมทิลเมอร์คิวรี ปรอทในปลาสาวะจะมีความสัมพันธ์กับการได้รับปรอทอนินทรีย์ในช่วงเวลาไม่นานนี้ ในขณะที่ปรอทในเลือดบ่งบอกถึงการสัมผัสกับเมทิลเมอร์คิวรี และปรอทในเส้นผมถูกนำมาใช้คาดคะเนระยะเวลาที่มีสัมผัสปรอท⁽⁵⁾

พิษจากปรอทและผลกระทบต่อสุขภาพ

ไอปรอท (Hg^0) ดูดซึมได้ง่ายผ่านทางปอด และกระจายไปทั่วร่างกาย การสัมผัสไอปรอทปริมาณมากในระยะเวลาสั้น ๆ อาจทำให้ปอดอักเสบ เกิดอาการอาเจียน ท้องร่วง คลื่นไส้ ผื่นที่ผิวหนัง อัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้น ความดันโลหิตสูงขึ้น และอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้⁽⁷⁾ โลหะปรอทสามารถผ่านแนวกั้นเลือดของสมอง (Blood Brain Barrier) และรก ดังนั้นความเป็นพิษต่อระบบประสาทของโลหะปรอทจึงสูงกว่าปรอทอนินทรีย์ซึ่งไม่สามารถผ่านแนวกั้นเลือดของ

สมองและรกได้ โลหะปรอทในรูปของเหลวถูกดูดซึมได้เพียงเล็กน้อยจากระบบทางเดินอาหารและ ไม่ปรากฏว่าเป็นพิษ ปรอทอนินทรีย์มีความเข้มข้นมากที่บริเวณไต เนื่องมาจากการดูดกลับที่ บริเวณท่อไตส่วนต้น ในทางกลับกันปรอทอนินทรีย์ถูกดูดซึมได้ง่ายทางระบบทางเดินอาหาร ประมาณ 95% และกระจายทั่วร่างกาย ปรอทอนินทรีย์มักจับกับโมเลกุลที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล (Sulfhydryl Group) เป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะซิสเทอีน และทำให้ปรอทอนินทรีย์สามารถผ่านแนว กั้นเลือดของสมองได้⁽³⁾ ปรอทอนินทรีย์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลซัลไฟไฮดริลทั่วร่างกาย ก่อให้เกิดการ รวบรวนการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ เชื่อกันว่าปรอทไปขัดขวางการถอดรหัสดีเอ็นเอและ กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน รวมถึงการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์สมองที่กำลังพัฒนาโดยการ ไปทำลายเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม (Endoplasmic Reticulum) และไรโบโซม (Ribosomes) มี หลักฐานแสดงให้เห็นถึงการขัดขวางการทำงานของเซลล์จำนวนมากในระบบประสาทส่วนกลาง การรบกวนการทำงานของสารสื่อประสาท ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อส่วนต่าง ๆ ของสมองและ ระบบประสาทส่วนปลาย⁽⁸⁾

ปรอทอนินทรีย์สะสมมากที่สมอง ตับ ไต รก และทารกในครรภ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ สมองของทารก เช่นเดียวกับที่เส้นประสาทส่วนปลายและไขกระดูก ปรอทอนินทรีย์ที่สะสมตาม ร่างกายจะค่อย ๆ ถูกกระบวนการดีเมทิลเลชัน (Demethylation) ให้กลายเป็นปรอทอนินทรีย์ ค่าครึ่ง ชีวิตของการขับปรอทอนินทรีย์ออกในมนุษย์โดยประมาณอยู่ที่ 70 วัน และประมาณ 90% ถูกขับออก ทางอุจจาระ และประมาณ 20% ของปรอทอนินทรีย์อาจถูกขับออกมาทางน้ำนมแม่⁽⁸⁾

ภาวะพิษจากการสัมผัสปรอทอนินทรีย์มักมีอาการซึมเศร้า มีปัญหาเรื่องความจำ ตัวสั่น อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ ผม่วรง เป็นต้น เนื่องจากผลกระทบด้านสุขภาพส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการ สัมผัสกับปรอท องค์การอนามัยโลก (WHO) จึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำดื่มที่มีปรอทปนเปื้อนไว้ ไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร⁽⁷⁾ ภาวะพิษจากการสัมผัสปรอทแบบเฉียบพลันที่ทราบกันดี คือ เหตุการณ์ภัยพิบัติรุนแรงที่มินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น ในปี 1950 ที่ก่อให้เกิดโรคจากพิษปรอทอนินทรีย์ที่ เรียกว่า โรคมินามาตะ สาเหตุเกิดจากการบริโภคปลาและหอยที่ปนเปื้อนเมทิลเมอร์คิวรี ปรอท อนินทรีย์เหล่านี้มาจากน้ำเสียของโรงงานผลิตสารเคมีที่ปล่อยลงสู่ทะเล จากการตรวจสอบพบสาร ปรอทในดินตะกอนบริเวณอ่าวปริมาณมาก สูงสุดถึง 2,000 ppm และสัตว์ทะเลสูงถึง 40 ppm โรคนี้ ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลางของร่างกาย ผู้รับสารพิษจะมีอาการ พูดไม่ชัด เสียงสั่น หูตึง เดินโซเซ ตะคริว ปวดหัว นอนไม่หลับ เป็นต้น⁽⁹⁾ ภัยพิบัติในอิรักในช่วงต้นทศวรรษ 1970 ชาวอิรักมากกว่า 10,000 คน ถูกวางยาพิษจากการรับประทานขนมปังที่อบจากเมล็ดพืชที่ปนเปื้อน สารปรอท หลายพันคนเสียชีวิตอันเป็นผลมาจากพิษจากปรอท ภาวะพิษปรอทแบบเรื้อรังจากการ ได้รับปรอทเข้าสู่ร่างกายทีละน้อยเป็นเวลานานมักก่อให้เกิดความผิดปกติทางระบบประสาท หากมี

การสัมผัสในปริมาณต่ำ มักจะมีอาการไม่เฉพาะเจาะจง เช่น อ่อนแรง เหนื่อยล้า เบื่ออาหาร น้ำหนักลด และความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร แต่หากมีการสัมผัสในปริมาณที่สูงขึ้น อาจก่อให้เกิดอาการคลื่น ชักกระตุก การทรงตัวและการเดินผิดปกติ เหนื่อยง่าย จี๊ดจ๊าด โมโหง่าย ซึมเศร้า เหงื่อออกเสบน้ำลายไหลมาก⁽⁸⁾

2.1.2 แคดเมียม (Cadmium; Cd)

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีสีเงินอมฟ้า มีลักษณะอ่อน นุ่ม ในธรรมชาติมักปะปนอยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่ว แคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสีและตะกั่ว แคดเมียมถูกนำมาใช้ครั้งแรกสมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 เพื่อมาทดแทนการใช้ดีบุก และใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดสี ในปัจจุบัน ประมาณ 3 ใน 4 แคดเมียมถูกนำมาใช้ในการผลิตขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่แอลคาไลน์ ที่เหลือถูกใช้ในการเคลือบผิว การชุบโลหะ และผลิตเป็นวัสดุกันโคลงในผลิตภัณฑ์พลาสติก นอกจากนี้แคดเมียมยังพบมากในแหล่งเหมืองแร่โลหะ โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานผลิตปุ๋ย หรือโรงงานขยะ แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจและการรับประทาน ก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรังได้ การกระจายตัวของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมพบได้ทั้งบนดินและในน้ำ โดยพืชจะค่อย ๆ ดึงโลหะแคดเมียมเหล่านี้และเกิดการสะสมภายในตัวมัน เข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ในที่สุด⁽⁷⁾ เนื่องจากไบยาซูบสะสมแคดเมียมจากดิน การสูบบุหรี่เป็นประจำจึงเป็นช่องทางหลักของการได้รับแคดเมียมของมนุษย์ ข้อมูลในประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานค่าเฉลี่ยระดับแคดเมียมในเลือดของคนไม่สูบบุหรี่อยู่ที่ 0.47 ไมโครกรัมต่อลิตร ขณะที่ค่าเฉลี่ยของคนสูบบุหรี่สูงเป็นสองเท่า มีค่าอยู่ที่ 1.58 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับผู้ไม่สูบบุหรี่ โอกาสในการสัมผัสแคดเมียมส่วนใหญ่เกิดจากการบริโภคอาหารจำพวกพืช เช่น มันฝรั่ง ธัญพืช ถั่วลิสง ถั่วเหลือง และเมล็ดทานตะวัน⁽⁶⁾ ในประเทศไทย พบการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมครั้งแรกที่หมู่บ้านชนบทแห่งหนึ่งในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งเป็นบริเวณแหล่งแร่สังกะสีที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ฝนตกทำให้ชะหน้าดินที่อุดมไปด้วยแร่สังกะสีและแคดเมียมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และท้ายที่สุดลงสู่แปลงนาข้าว ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและเมล็ดข้าวที่ปลูกในบริเวณพื้นที่นั้น⁽¹⁰⁾

พิษจากแคดเมียมและผลกระทบต่อสุขภาพ

แคดเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะจับกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและอัลบูมิน จากนั้นจะค่อยไปจับกับโปรตีนที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริลเป็นองค์ประกอบ เช่น เมททัลโลไธโอนีน (Metallothionein) ที่ตับและไต เมททัลโลไธโอนีนที่จับแคดเมียมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนนี้เป็นต้นเหตุให้เกิดภาวะตับเป็นพิษ (Hepatotoxicity) ทำให้เอนไซม์ตับเพิ่มมากขึ้น และเมื่อแคดเมียมไปสะสมที่ไตก็ก่อให้เกิดภาวะไตเป็นพิษ (Nephrotoxicity) เช่นกัน⁽⁷⁾ ไตเป็นอวัยวะที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากการได้รับ

แคดเมียมเป็นเวลานาน ๆ ความเสียหายที่ไตโดยเฉพาะท่อไตส่วนต้น ส่งผลให้เซลล์ท่อไตสูญเสียหน้าที่การกรองและไม่สามารถดูดซึมกลับของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น β 2-microglobulin ได้ ทำให้ในปีสภาวะพบ β 2-microglobulin ในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังส่งต่อการกรองและการดูดซึมกลับของสารตัวอื่น เช่น แคลเซียม กลูโคส กรดอะมิโน และอิเล็กโทรไลต์บางตัว⁽⁶⁾ ร่างกายจะมีการขับแคดเมียมออกได้ช้ามาก โดยมีค่าครึ่งชีวิตอยู่ที่ 25 ปี ประมาณครึ่งหนึ่งของแคดเมียมในร่างกายจึงถูกสะสมอยู่ที่ตับและไต⁽¹¹⁾

พิษจากแคดเมียมก่อให้เกิดโรคที่เป็นที่รู้จักกัน คือ โรคอิไต-อิไต ซึ่งมีสาเหตุมาจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่ถูกปล่อยมากับน้ำเสียของโรงงานถลุงแร่สังกะสี ผู้รับสารพิษจะมีอาการเจ็บกระดูก ปวดกล้ามเนื้อ ภาวะกระดูกโค้งงอ ภาวะกระดูกเสียรูปทรง แตกร้าวและหักง่าย และยังสามารถให้เกิดภาวะกระดูกพรุน จากการศึกษาในประเทศญี่ปุ่น ในประชากรที่อาศัยในบริเวณที่การปนเปื้อนของแคดเมียม พบว่า แคลเซียมที่กระดูกมีปริมาณลดลง และความเข้มข้นของวิตามินดี 3 ที่ไตลดลงด้วยเช่นกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า พิษจากแคดเมียมทำให้การทำงานของไตเสียหาย การสังเคราะห์วิตามินดี 3 ที่ไตลดลง การดูดซึมแคลเซียมกลับที่ท่อไตส่วนต้นลดลง เป็นผลทำให้เกิดภาวะกระดูกผิดปกติในผู้ที่รับสารพิษแคดเมียม⁽¹⁰⁾

2.1.3 ตะกั่ว (Lead; Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะที่มีสีเทาอมเงิน มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน เหนียว คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ง่ายต่อการหลอมและนำมาใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ กระจก ปืน ลีซียม หมึกพิมพ์ น้ำมันเบนซิน และอุปกรณ์ทางการแพทย์⁽⁶⁾ มนุษย์ได้รับตะกั่วผ่านทางอากาศและอาหารโดยประมาณในสัดส่วนที่เท่ากัน ในอดีตตะกั่วในอาหารมาจากหม้อทำอาหาร และตะกั่วในอากาศว่าครึ่งหนึ่งมาจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันตะกั่วในอากาศลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการเปลี่ยนมาใช้น้ำมันไร้สารตะกั่ว การสัมผัสตะกั่วจากการทำงานพบมากในเมืองถลุงแร่ โรงหลอม และโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ละอองตะกั่วในอากาศสามารถตกตะกอนและสะสมบนดินและในน้ำ จึงมีโอกาสดูดซับเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านทางอาหาร เด็กมีความเสี่ยงสูงจากการสัมผัสตะกั่วมากกว่าผู้ใหญ่ เนื่องจากพิษของตะกั่วสัมพันธ์กับอายุของผู้ที่สัมผัส และแนวโน้มพฤติกรรมของเด็กที่มักหยิบสิ่งของเอาเข้าปาก⁽⁵⁾

การดูดซึมของตะกั่วขึ้นอยู่กับประเภทของตะกั่ว ปริมาณที่ดูดซึม อายุ และภาวะโภชนาการของแต่ละบุคคล ตะกั่วอนินทรีย์ที่สุดคมผ่านการหายใจว่าครึ่งหนึ่งถูกดูดซึมที่ปอดและเข้าสู่กระแสเลือดได้ประมาณ 30-40% ส่วนอัตราการดูดซึมผ่านระบบทางเดินอาหารนั้นขึ้นอยู่กับภาวะโภชนาการและอายุของบุคคลที่สัมผัส ผู้ใหญ่ดูดซึมตะกั่วในอาหารประมาณ 15% ของปริมาณที่บริโภคเข้าไป ในขณะที่เด็กเล็ก ทารก และสตรีมีครรภ์ ดูดซึมมากถึง 50% การดูดซึม

ตะกั่วที่ลำไส้ในเด็กจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเด็กมีภาวะพร่องธาตุเหล็ก แคลเซียม ฟอสฟอรัส หรือสังกะสี การบริโภคอาหารที่มีแคลเซียมสูงสามารถยับยั้งการดูดซึมตะกั่วที่ลำไส้ได้ ภาวะพร่องแคลเซียมกระตุ้นให้มีการสร้างวิตามินดีเพื่อเพิ่มการดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้ อย่างไรก็ตาม หากแคลเซียมมีในปริมาณไม่เพียงพอ ตะกั่วและโลหะอื่น ๆ จะถูกดูดซึมมาแทนที่แคลเซียม⁽⁶⁾ การดูดซึมตะกั่วอินทรีย์ผ่านผิวหนังเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้าม ตะกั่วอินทรีย์ในน้ำมันเบนซินสามารถซึมผ่านผิวหนังได้ เมื่อตะกั่วถูกดูดซึมแล้ว ตะกั่วจะสะสมอยู่ในเลือด ดับ ไต และกระดูก หลังจากการดูดซึมประมาณ 99% ตะกั่วในเลือดจะจับกับฮีโมโกลบินของเซลล์เม็ดเลือดแดง และอีก 1% หลงเหลืออยู่ในพลาสมาและซีรัม การเคลื่อนย้ายของตะกั่วจากเลือดไปยังเนื้อเยื่ออ่อนเกิดขึ้นต่ำและใช้เวลาประมาณ 4 ถึง 6 สัปดาห์ ตะกั่วในเลือดมีค่าครึ่งชีวิตโดยประมาณ 35 วัน ในเนื้อเยื่ออ่อน 40 วัน และในกระดูก 20 ถึง 30 ปี ค่าครึ่งชีวิตของตะกั่วในเด็กจะยาวนานกว่าเมื่อเทียบกับผู้ใหญ่ ความเข้มข้นของตะกั่วในเลือดสะท้อนถึงการสัมผัสในช่วง 3 ถึง 5 สัปดาห์ก่อนหน้าเท่านั้น จึงไม่สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดของการสัมผัสแบบเรื้อรังได้⁽¹²⁾

ตะกั่วอินทรีย์ไม่สามารถผ่านแนวกันเลือดของสมองได้ ในขณะที่แนวกันนี้ในเด็กยังมีพัฒนาการไม่เต็มที่ เด็กจึงมีความอ่อนไหวต่อตะกั่วมากและมีความเสี่ยงต่อสมองของเด็กหากมีการสัมผัสตะกั่วอินทรีย์ในปริมาณสูงผ่านระบบทางเดินอาหารและซึมผ่านแนวกัน ในขณะที่ตะกั่วอินทรีย์ เช่น Tetramethyl Lead สามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านทางผิวหนังและยังสามารถข้ามแนวกันเลือดของสมองในผู้ใหญ่ และอาจก่อให้เกิดโรคทางสมองที่เกิดจากพิษของตะกั่วอินทรีย์แบบเฉียบพลัน⁽¹²⁾

เหตุการณ์ครั้งสำคัญของการปนเปื้อนตะกั่วในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ อำเภอน้ำพุร้อนภูมิจังหวัดกาญจนบุรี ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในหมู่บ้านห้วยคลิตี้ล่างเป็นอย่างมาก โดยการปนเปื้อนเกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงเต่งแร่คลิตี้ ชาวบ้านที่ได้รับสารพิษตะกั่วมีอาการปวดในช่องท้อง ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ ร่างกายอ่อนแรง สาเหตุเกิดจากการบริโภคน้ำ สัตว์น้ำจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน เด็กมีความเสี่ยงต่อพิษของตะกั่วสูงกว่าผู้ใหญ่ จึงไม่น่าแปลกใจที่ผลการศึกษารายงานว่า เด็กที่อาศัยบางรายเกิดภาวะด้อยพัฒนาทางสติปัญญาขั้นร้ายแรง มีไอคิวต่ำกว่ามาตรฐาน มีปัญหาเรื่องสมาธิ และมีการเจ็บป่วยบ่อยครั้ง⁽¹⁷⁾

พิษจากตะกั่วและผลกระทบต่อสุขภาพ

พิษจากตะกั่วส่งผลกระทบต่อร่างกายและร้ายแรงที่สุด คือ การสร้างเม็ดเลือดแดงและการทำงานของระบบประสาท พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในเลือดเพียง 5 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร กระบวนการสังเคราะห์ฮีโม (Heme) จะเริ่มลดลง โดยการที่ตะกั่วไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการนี้ แต่เนื่องจากเอนไซม์เหล่านี้มีอยู่ในปริมาณมาก การยับยั้งการ

ทำงานของมันจึงอาจไม่เด่นชัด ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่สูงขึ้นการยับยั้งนี้จะเด่นชัดมากยิ่งขึ้น โดยการสังเคราะห์ฮีโมจะหยุดการทำงานถึง 90% เมื่อค่าตะกั่วในเลือดอยู่ที่ 55 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร นอกจากนี้ในภาวะที่ร่างกายขาดธาตุเหล็ก การสังเคราะห์ฮีโมที่ใช้ธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักจะถูกแทนที่ด้วยสังกะสี ทำให้ระดับ Zinc Protoporphyrin (ZPP) ในเลือดเพิ่มขึ้น ค่า ZPP ในเลือดจึงใช้เป็นตัวชี้วัดสำหรับผู้ที่อาจมีความเสี่ยงต่อการสัมผัสตะกั่วจากการทำงาน ดังนั้นโรคโลหิตจางจึงมักได้รับการวินิจฉัยในคนที่มีการสัมผัสตะกั่ว⁽¹²⁾

ตะกั่วสามารถผ่านแนวกันเลือดของสมองเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลาง (CNS) ส่งผลให้ระบบประสาทส่วนกลางถูกทำลาย เกิดภาวะสมองบวม อาการที่พบบ่อย เช่น อ่อนเพลีย ง่วงซึม หงุดหงิด ปวดศีรษะ หลงลืม นอนไม่หลับ อาการรุนแรงที่พบ เช่น อาการทางสมอง ชัก หมดสติ อัมพาต นอกจากนี้ยังส่งผลต่อระบบประสาทส่วนปลาย ผู้สัมผัสสารพิษจะมีอาการอ่อนแรงของกล้ามเนื้อมากกว่าการสูญเสียความรู้สึก อาการที่พบ เช่น มือและเท้าอ่อนแรง เด็กจะแสดงอาการผิดปกติของระบบประสาทมากกว่าผู้ใหญ่ เช่น ชัก หงุดหงิด เบื่ออาหาร ความจำเสื่อม การพัฒนาการทางสมองช้าลง ทั้งนี้พิษของตะกั่วยังส่งผลต่อระบบทางเดินอาหาร เช่น ปวดในช่องท้อง ตะคริว คลื่นไส้ เบื่ออาหาร ท้องผูก⁽¹²⁾

ประมาณ 96% ของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายตลอดชีวิตจะถูกเก็บสะสมที่กระดูก โดยมีค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ยที่ 32 ปี การเคลื่อนย้ายของตะกั่วจากกระดูกขึ้นอยู่กับอัตราเมตาบอลิซึมแคลเซียมในร่างกาย กลุ่มประชากรที่น่าเป็นห่วงโดยเฉพาะ คือกลุ่มสตรีมีครรภ์ เนื่องจากกระดูกของมารดาจะถูกสลายเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสร้างกระดูกของทารกในครรภ์ นอกจากนี้ตะกั่วยังสามารถผ่านแนวกันรก (Placental Barrier) และพบได้ในน้ำนมมารดา การสัมผัสตะกั่วในระหว่างตั้งครรภ์อาจส่งผลต่อทารกในครรภ์และพัฒนาการของทารกบกพร่องได้ เส้นตะกั่ว (Lead Line) หรือเส้นสีน้ำเงินเทาที่บริเวณเหงือก เป็นตัวบ่งบอกถึงภาวะพิษตะกั่วเรื้อรัง เส้นตะกั่วนี้เกิดจากการสะสมของตะกั่วที่บริเวณระหว่างเส้นใยคอลลาเจน รอบ ๆ เส้นเลือด และภายในเซลล์⁽⁶⁾

2.1.4 สารหนู (Arsenic; As)

สารหนู หรือ อาร์เซนิก เป็นสารกึ่งโลหะสีเทาเงิน มันวาว ค่อนข้างเปราะ เป็นโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งที่เป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง รูปแบบที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ เช่น อาร์เซไนต์ (Arsenite, As^{3+}) และ อาร์เซเนต (Arsenate, As^{5+}) โดยที่อาร์เซไนต์มีความเป็นพิษรุนแรงกว่าอาร์เซเนตถึง 60 เท่า ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและต่อสิ่งมีชีวิต⁽⁷⁾ สารหนูอนินทรีย์ (Inorganic Arsenic) พบได้ตามแหล่งน้ำดื่มธรรมชาติ ขณะที่สารหนูอินทรีย์ (Organic Arsenic) พบในสาหร่ายและปลาเป็นส่วนใหญ่ กระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองแร่ การหลอมเหล็ก และการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นสาเหตุนำไปสู่

การปนเปื้อนสารหนูในดิน น้ำ และอากาศ การใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบเป็นอีกหนึ่งสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูในดินมากขึ้น การใช้น้ำยารักษาเนื้อไม้ที่มีส่วนผสมของสารหนูก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมเช่นกัน⁽⁵⁾

การสัมผัสสารหนูของมนุษย์ส่วนใหญ่เกิดจากการบริโภคอาหารและน้ำดื่ม ในบางพื้นที่ สารหนูในน้ำดื่มเป็นช่องทางการสัมผัสสารหนูอนินทรีย์ที่สำคัญ ความเข้มข้นของสารหนูในเลือด เส้นผม เล็บ และปัสสาวะถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้การสัมผัสสารพิษ สารหนูในเส้นผมและเล็บสามารถเป็นตัวบ่งชี้ที่เป็นประโยชน์ในการวินิจฉัยการสัมผัสสารหนูในอดีตที่ผ่านมา⁽⁵⁾

พิษจากสารหนูและผลกระทบต่อสุขภาพ

พิษจากสารหนูส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสารประกอบ อัตราการดูดซึมและการขับออกของร่างกาย สารหนูอนินทรีย์เป็นสารที่ไม่มีรสไม่มีกลิ่น มีความเป็นพิษสูง ได้แก่ อาร์เซนไนต์ และ อาร์เซนเตต ซึ่งจะถูกลดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ประมาณ 90% ผ่านระบบทางเดินอาหาร โดยที่อาร์เซนไนต์มีความสามารถในการละลายและถูกดูดซึมได้ดีกว่าจึงทำให้เกิดพิษได้มากกว่า และประมาณ 50-80% ของสารหนูอนินทรีย์ที่ดูดซึมเข้าไปนี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสารเมตาบอไลต์ที่มีความเป็นพิษน้อยลงที่ตับ โดยกระบวนการเติมหมู่เมทิล (Methylation) เกิดเป็นกรดโมโนเมทิลอาร์โซนิค (Monomethylarsonic Acid, MMA) และกรดไดเมทิลอาร์เซนิก (Dimethyl Arsenic Acid, DMA) และขับออกทางปัสสาวะ ร่างกายจะขับสารหนูออกจากกระแสเลือดอย่างรวดเร็ว ทำให้ระดับเลือดอยู่ในเกณฑ์ปกติแม้ว่าระดับสารหนูในปัสสาวะจะยังคงสูงอยู่ อย่างไรก็ตามสารหนูส่วนใหญ่ประมาณ 70% จะถูกขับออกทางปัสสาวะใน 1-3 วัน โดยส่วนใหญ่ 50% ของสารหนูอนินทรีย์ที่ถูกขับออกจะอยู่ในรูปของ DMA และส่วนน้อย 25% เป็น MMA สารเมตาบอไลต์นี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการสัมผัสสารหนูในเวลาไม่นาน และส่วนที่เหลือจะถูกขับออกอย่างช้า ๆ โดยมีค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 1 เดือน ดังนั้นผู้ที่สัมผัสสารหนูยังสามารถตรวจพบสารหนูในปัสสาวะได้นานถึง 1-2 เดือน หลังจากได้รับพิษ สารหนูส่วนน้อยขับออกทางอุจจาระ น้ำดี น้ำลาย และเหงื่อ⁽⁶⁾

สารหนูอนินทรีย์พบมากในปลา บางครั้งเรียกว่า สารหนูปลา (Fish Arsenic) เป็นรูปที่มีความเป็นพิษต่ำ มีโอกาสน้อยมากที่มนุษย์จะได้รับเข้าในปริมาณที่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกาย โดยสารหนูอนินทรีย์ถูกลดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินอาหารได้น้อยกว่าสารหนูอนินทรีย์ และจะถูกขับออกทางปัสสาวะภายใน 48 ชั่วโมง⁽⁶⁾

สารหนูอนินทรีย์เป็นพิษรุนแรงต่อร่างกาย การบริโภคเข้าไปในปริมาณมากเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร ระบบหัวใจและหลอดเลือด และระบบประสาทส่วนกลางอย่างรุนแรง และส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตได้ การบริโภคน้ำดื่มที่มีสารหนูปนเปื้อนเป็นระยะเวลานาน มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งผิวหนัง ปอด กระเพาะปัสสาวะ ตับและไต พิษจากสารหนูแบบเรื้อรังใน

มนุษย์มักจะปรากฏให้เห็นเด่นชัดที่ผิวหนังซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น โรคผิวหนังหนาและแข็งของฝ่ามือและฝ่าเท้า (Hyperkeratosis) และ การสร้างเม็ดสีที่ผิดปกติมีลักษณะกระดำกระด่างที่บริเวณฝ่ามือและฝ่าเท้าที่เรียกว่า Raindrop Pattern⁽⁵⁾

ในปี พ.ศ. 2530 ที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบประชาชนในพื้นที่ป่วยเป็นโรคพิษจากสารหนู ที่ต่อมาเรียกกันว่า “โรคไขดำ” ผิวหนังมีลักษณะดำดำ มีตุ่มแข็งบริเวณฝ่ามือและเท้า บางรายเป็นมะเร็งผิวหนัง พบว่าสาเหตุมาจากการสะสมของสารหนูในร่างกายมากผิดปกติ เนื่องจากมีการบริโภคน้ำดื่มจากบ่อน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนู พื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์อดีตเคยเป็นเหมืองแร่ดีบุกมาก่อน ในสินแร่ดีบุกที่ขึ้นดินตามธรรมชาตินั้นมีสารหนูปะปนอยู่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูไปกับน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ⁽¹⁸⁾

2.1.5 อะลูมิเนียม (Aluminum; Al)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสีเงินอมขาว น้ำหนักเบา อ่อนและเหนียว มีความหนาแน่นต่ำและทนต่อการกัดกร่อน อะลูมิเนียมไม่จัดว่าเป็นโลหะหนัก เป็นแค่เพียงโลหะ พบมากตามธรรมชาติในรูปสารประกอบไตรวาเลนต์ (Trivalent, Al^{3+}) เช่น อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) อะลูมิเนียมถูกนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในงานก่อสร้าง ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และเครื่องบิน อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ผลิตเป็นภาชนะหุงต้ม และบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ สารประกอบอะลูมิเนียมยังเป็นส่วนผสมในยาลดกรด ยาแก้ท้องเสีย ผลิตภัณฑ์ระงับเหงื่อ สารเติมแต่งในอาหาร อะลูมิเนียมแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการทางธรรมชาติเป็นหลัก มีหลายปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ชนิดของสารประกอบ เส้นทางการไหลของแหล่งน้ำ ปฏิกริยากันระหว่างดินและน้ำ และองค์ประกอบอื่น ๆ ทางธรณีวิทยา อะลูมิเนียมพบได้ตามแหล่งน้ำธรรมชาติเนื่องจากการผุกร่อนของแร่ธาตุและหินที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ และแพร่กระจายจากพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมบนผิวน้ำสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยตรงหรือโดยอ้อมจากกิจกรรมของมนุษย์จากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากบ้านเรือน อะลูมิเนียมพบได้ในอาหารตามธรรมชาติ เช่น มันฝรั่ง ผักโขม และใบชา หรือพบได้ในอาหารที่มีการใช้สารเติมแต่ง การใช้เครื่องครัว ซ้อนส้อม และแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ห่ออาหาร สามารถเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมในอาหารได้เช่นกัน⁽¹⁴⁾ การมีอยู่อย่างแพร่หลายของอะลูมิเนียมทั้งในสิ่งแวดล้อมและในอาหาร จึงแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะหลีกเลี่ยงจากการสัมผัสในความเป็นจริง อะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันรวมถึงยารักษาโรค ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในอาหารนั้นขึ้นอยู่กับปฏิกริยาระหว่างอาหารกับวัสดุที่ใช้บรรจุหรือใช้ในการปรุงอาหาร ตัวอย่างเช่น ปริมาณอะลูมิเนียมในเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ ที่บรรจุในกระป๋องอะลูมิเนียมนั้นสูงกว่าเครื่องดื่มประเภทเดียวกันที่บรรจุในขวดถึง 5-7 เท่า ยาลดกรดถือเป็นแหล่ง

สำคัญอีกแหล่งหนึ่งในการได้รับอะลูมิเนียม ผู้รับประทานยาลดกรดเป็นประจำอาจได้รับอะลูมิเนียมสูงถึง 5 กรัมต่อวัน ซึ่งสูงกว่าปริมาณที่ได้จากอาหารปกติหลายร้อยเท่า⁽¹³⁾

พิษจากอะลูมิเนียมและผลกระทบต่อสุขภาพ

อะลูมิเนียมเข้าสู่ร่างกายได้น้อยทั้งทางการหายใจและการรับประทาน โดยทางการรับประทานนั้น การดูดซึมอะลูมิเนียมจากน้ำดื่มได้ประมาณ 0.3% จากอาหารได้ประมาณ 0.1% เมื่ออะลูมิเนียมถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ประมาณ 90% ที่ไหลเวียนในกระแสเลือดจะจับกับ โปรตีน Transferrin ที่เหลือจะจับกับอัลบูมินและซิเตรต (Citrate) และไปสะสมที่ ปอด ตับ และกระดูก อะลูมิเนียมในกระแสเลือดจะถูกขับออกทางไตเป็นหลักประมาณ 95% นอกจากนี้อะลูมิเนียมจำนวนหนึ่งจะผ่านแนวกันเลือดของสมองและเข้าสู่สมอง อะลูมิเนียมในสมองแทบไม่ถูกขับออกและจะสะสมอย่างถาวรตลอดอายุขัยในมนุษย์⁽¹⁴⁾

อวัยวะที่เป็นเป้าหมายของพิษอะลูมิเนียม คือ ปอด ระบบประสาทส่วนกลาง และกระดูก คนสุขภาพดีที่ใช้ยาลดกรดเป็นประจำ และผู้ป่วยไตวายที่ล้างไตมาเป็นเวลานาน ๆ พบว่ามีภาวะกระดูกบาง (Osteomalacia) ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมในยาลดกรดและในน้ำยาล้างไตไปจับกับฟอสฟอรัสในอาหาร เป็นเหตุให้การดูดซึมฟอสฟอรัสในทางเดินอาหารลดลง อะลูมิเนียมยังไปขัดขวางกระบวนการสร้างกระดูกโดยการไปยับยั้งการแบ่งตัวและกระบวนการจับตัวกันของแร่ธาตุของเซลล์สร้างกระดูก (Osteoblast) การสะสมอะลูมิเนียมในสมองมีความเกี่ยวข้องกับ โรกระบบประสาท เช่น โรคทางสมองจากการฟอกไต โรคอัลไซเมอร์ โรคพาร์กินสัน โรคสมองเสื่อม ผู้ป่วยที่ล้างไตโดยการฟอกเลือดเป็นเวลานานหลายปีที่ได้รับยาลดกรดควบคู่ระหว่างการรักษา พบว่ามีอาการสมองเสื่อม พุดผิปกติ หลงลืม เชื่อว่าเกิดจากอะลูมิเนียมไปสะสมในสมอง มีการศึกษาพบว่าผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์มีอะลูมิเนียมที่เนื้อสมองสูงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามสมมติฐานนี้ยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอที่พิสูจน์ว่าอะลูมิเนียมเป็นสาเหตุของโรคสมองเสื่อมเหล่านี้หรือไม่⁽⁴⁾

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม^(19,20,21,22,23)

โลหะหนัก	เกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้น		
	ในน้ำดื่ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ในสถานที่ทำงาน (มิลลิกรัม/ตารางเมตร)	ในน้ำขวด / อาหาร (มิลลิกรัม/ลิตร)
อะลูมิเนียม (Al)	0.2	15	0.2
สารหนู (As)	0.01	0.01	-
แคดเมียม (Cd)	0.005	0.005	0.005
ตะกั่ว (Pb)	0.015	0.15	-
ปรอท (Hg)	0.002	0.05	1

ตารางที่ 2.2 ค่าอ้างอิงมาตรฐานของโลหะหนักในเลือดและปัสสาวะ⁽⁶⁾

โลหะหนัก	ค่าครึ่งชีวิตในเลือด (Plasma t _{1/2})	ค่าอ้างอิงมาตรฐาน	
		ในเลือด	ในปัสสาวะ
สารหนู (As)	10 ชั่วโมง	-	35 µg/L
แคดเมียม (Cd)	1 เดือน	5 µg/L	5 µg/g creatinine
ตะกั่ว (Pb)	35 วัน	30 µg/dL	-
ปรอท (Hg)	52 วัน	15 µg/L	35 µg/g creatinine

2.2 อันตรายจากโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย

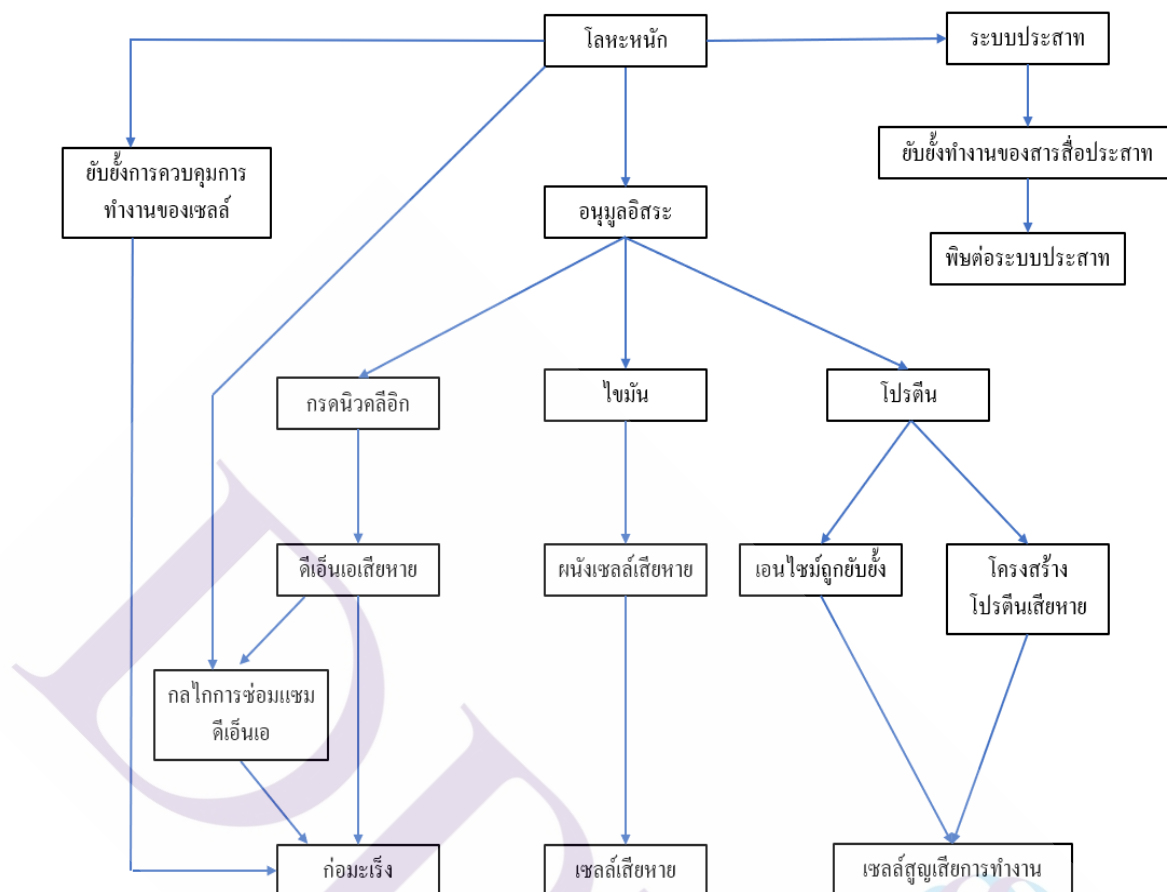
โลหะหนักส่วนใหญ่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมผ่านกระบวนการทางธรรมชาติหลายอย่าง เช่น ภูเขาไฟระเบิด น้ำพุ การกัดเซาะ และกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ซึ่งรวมถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล กระบวนการทางอุตสาหกรรม และกิจกรรมทางการเกษตร โลหะหนักเหล่านี้สะสมในร่างกายมนุษย์ผ่านกระบวนการต่าง ๆ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ในร่างกายมนุษย์โลหะหนักจะถูกกำจัดและแพร่กระจายไปตามเซลล์และเนื้อเยื่อต่าง ๆ โดยการไปจับกับโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก สร้างความเสียหายต่อโมเลกุลขนาดใหญ่ต่าง ๆ ในร่างกาย รวมถึงไปขัดขวางกระบวนการทำงานของเซลล์ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ พิษโลหะหนักสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางที่นำไปสู่ความผิดปกติทางจิต ทำลายองค์ประกอบของเลือดและอาจทำลายปอด ตับ ไต และอวัยวะสำคัญอื่น ๆ ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ตามมาได้ การสะสมของ

โลหะหนักในร่างกายเป็นเวลานาน อาจส่งผลต่อการพัฒนาการของร่างกาย ทำให้เกิดความเสื่อมถอยของระบบประสาท และอาจนำไปสู่โรคพาร์กินสันและโรคอัลไซเมอร์ ยิ่งไปกว่านั้น การสัมผัสโลหะหนักบางชนิดซ้ำ ๆ เป็นเวลานาน อาจทำให้กรดนิวคลีอิกเสียหาย เกิดการกลายพันธุ์ รบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ และนำไปสู่การเกิดมะเร็งในท้ายที่สุด⁽¹⁵⁾ ถึงแม้ว่าโลหะหนักจะมีการปนเปื้อนในปริมาณที่น้อยมาก แต่ก็ยังก่อให้เกิดปัญหาร้ายแรงต่อสุขภาพได้ เพราะเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะกลายเป็นพิษหากร่างกายไม่สามารถขับออกส่งผลให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อต่าง ๆ⁽¹⁾

โลหะหนักเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงผ่านการบริโภคอาหาร น้ำ สูดดมอากาศ หรือการซึมผ่านผิวหนังจากการสัมผัส โลหะหนักส่วนใหญ่แพร่กระจายไปทั่วร่างกายผ่านทางกระแสเลือดไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ เช่น ตะกั่วแพร่กระจายไปยังตับและไตผ่านเซลล์เม็ดเลือดแดง และไปสะสมที่ฟันและกระดูก แคดเมียมจะจับกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและอัลบูมิน จากนั้นจะค่อยไปจับกับเมททัลโลไธโอนีน (Metallothionein) ที่ตับและไต สารหนูกระจายผ่านทางเลือดและสะสมที่หัวใจ ปอด ตับ ไต กล้ามเนื้อ ผิวหนัง ผม และเล็บ⁽¹⁵⁾

กลไกหลักอย่างหนึ่งของพิษโลหะหนัก คือ การสร้างอนุมูลอิสระจำนวนมาก ที่ก่อให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันที่ไปทำลายโครงสร้างของไขมัน โปรตีน เอนไซม์ และดีเอ็นเอ ส่งผลให้เซลล์เกิดความเสียหายในท้ายที่สุด ไขมันสูญเสียโครงสร้างได้ง่ายจากอนุมูลอิสระประเภทรีแอกทีฟออกซิเจน (ROS) ผนังเซลล์ที่มีโครงสร้างเป็นไขมันชนิดฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ที่เสียหายจากกระบวนการออกซิเดชัน เป็นต้นตอของการเกิดโรคและความผิดปกติต่าง ๆ เช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ และโรคเซลล์ประสาทเสื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากความเสถียร ความลื่นไหล การซึมผ่านของผนังเซลล์เสียหายและเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม⁽¹⁶⁾

โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินอาหารจะถูกแปรสภาพให้เป็นกรดโดยกรดในกระเพาะอาหาร ในสภาวะกรดนี้ พวกมันจะถูกออกซิไดซ์ และสามารถจับกับโปรตีนและเอนไซม์ได้ง่าย โดยการสร้างพันธะที่มีความเสถียรและแข็งแรงและมักจะจับกับหมู่ซัลไฟไฮไดรลของโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนและเอนไซม์นั้น ๆ สูญเสียการทำงาน⁽¹⁵⁾



ภาพที่ 2.1 กลไกโดยรวมของพิษโลหะหนักที่ส่งผลอันตรายต่อร่างกาย⁽¹⁵⁾

อนุมูลอิสระที่เกิดจากโลหะหนักเป็นที่ทราบกันว่ามีฤทธิ์ก่อมะเร็ง ซึ่งกลไกของมันก็คือการทำลายโครงสร้างดีเอ็นเอโดยตรง กระตุ้นการทำงานของยีนก่อมะเร็ง และยับยั้งการทำงานของยีนควบคุมการเกิดมะเร็ง นอกจากนี้อนุมูลอิสระจากโลหะหนักยังทำให้โปรตีนของกระบวนการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ เสียหาย เช่น โปรตีนส่งสัญญาณ (Signaling Proteins) โปรตีนควบคุมเซลล์ (Cellular Regulatory Proteins) เช่น โปรตีน p53 เป็นต้น ซึ่งโปรตีนเหล่านี้อยู่ในกระบวนการตายของเซลล์แบบ Apoptosis รวมทั้งการไปรบกวนกระบวนการควบคุมวัฏจักรของเซลล์ (Cell Cycle Regulation) กระบวนการซ่อมแซมแซมดีเอ็นเอ (DNA Repair) กระบวนการเจริญเติบโตและการแบ่งตัวของเซลล์ (Cell Growth and Differentiation)⁽¹⁵⁾ เมื่อกระบวนการเหล่านี้เกิดความเสียหายหรือทำงานปกติ ก็จะส่งผลทำให้เซลล์เกิดการกลายพันธุ์ก่อให้เกิดเป็นมะเร็งในท้ายที่สุดนอกจากนี้โลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่ว ปรอท ส่งผลต่อสมองและทำให้เกิดพืชต่อระบบประสาทได้ โดยการไปยับยั้งการทำงานและการหลั่งของสารสื่อประสาท อีกทั้งอนุมูลอิสระที่เกิดจากโลหะหนัก

เหล่านี้ ยังสร้างความเสียหายที่ผนังเซลล์ประสาท ส่งผลให้เซลล์ประสาทเกิดการตายในท้ายที่สุด ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเสื่อมของสมอง และเชื่อมโยงนำไปสู่โรคทางสมอง เช่น โรคอัลไซเมอร์ โรคพาร์กินสัน⁽¹⁵⁾

2.3 โลหะที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย

โลหะหนักถือเป็นแหล่งกำเนิดอนุมูลอิสระที่สำคัญอย่างหนึ่งที่น่าไปสู่การเกิดภาวะออกซิไดซ์เกินสมดุล (Oxidative Stress) ในร่างกาย ซึ่งภาวะนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของความเสื่อมของเซลล์และนำไปสู่โรคต่าง ๆ มากมาย รวมถึงโรคมะเร็ง สารต้านอนุมูลอิสระถือเป็นสารที่สำคัญในการยับยั้งการเกิดภาวะออกซิไดซ์เกินสมดุล โดยกลไกการกำจัดอนุมูลอิสระของมันคือการให้อิเล็กตรอนและการทำปฏิกิริยารีดักชันกับอนุมูลอิสระ สารต้านอนุมูลอิสระมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ สารที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น วิตามินซี วิตามินอี กลูตาไธโอน กรดไลโปอิก เป็นต้น และอีกชนิดคือ สารที่เป็นเอนไซม์ เช่น กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione Peroxidase, GPx) ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (Superoxide Dismutase, SOD) และแคแทเลส (Catalase) อย่างไรก็ตามมีโลหะบางชนิดที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการกำจัดอนุมูลอิสระ โดยทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ที่สำคัญของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ทองแดง สังกะสี ซีลีเนียม^(25,26,27)

ซีลีเนียมมีความจำเป็นต่อมนุษย์และสัตว์ที่มีการเผาผลาญพลังงานสูง บทบาทที่สำคัญหลัก คือ ป้องกันอนุมูลอิสระโดยซีลีเนียมเป็นที่โคแฟกเตอร์ที่สำคัญของเอนไซม์ GPx ซีลีเนียมจับกับโปรตีน อยู่ในรูปซีลีโนโปรตีนทำหน้าที่ในการควบคุมการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกัน การทำงานของต่อมไทรอยด์และระบบสืบพันธุ์ การบริโภทซีลีเนียมที่เพียงพอช่วยเพิ่มระดับซีลีโนโปรตีนที่เหมาะสมในการปกป้องอันตรายจากอนุมูลอิสระที่พบได้ในโรคระบบประสาท โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคไทรอยด์ และมะเร็งบางชนิด นอกจากนี้ ในภาวะพร่องซีลีเนียม ร่างกายจะเกิดการสะสมของสารหนู แคดเมียม และปรอท เพิ่มมากขึ้น ซีลีเนียมมีฤทธิ์ต้านพิษจากแคดเมียม ปรอท และสารหนู ถึงแม้ว่ากลไกความเป็นพิษของซีลีเนียมจะยังไม่ชัดเจน การบริโภทซีลีเนียมในขนาดสูงอาจก่อให้เกิดพิษของซีลีเนียมได้ ภาวะพิษซีลีเนียมเรื้อรัง มักมีอาการผมร่วง เล็บเปลี่ยนสี ปวดกล้ามเนื้อ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย เป็นต้น⁽²⁶⁾

สังกะสีเป็นโลหะที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิดในร่างกาย เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ SOD มีส่วนร่วมในการสังเคราะห์และการสลายคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และกรดนิวคลีอิก สังกะสียังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน การแบ่งและซ่อมแซมเซลล์ การเปลี่ยนสภาพเซลล์ และการเผาผลาญของเซลล์ นอกจากนี้ยังมีส่วนร่วมในกระบวนการเจริญเติบโตและพัฒนาการในช่วงตั้งครรภ์ วัยเด็ก และวัยรุ่น การดูดซึม

สังกะสีจะถูกยับยั้งโดยไฟเตตและเส้นใยในอาหารที่ไปจับกับสังกะสี เช่นเดียวกับธาตุเหล็กและแคดเมียมในอาหาร อย่างไรก็ตาม การบริโภคสังกะสีในปริมาณสูงจากอาหารและเครื่องดื่มที่ปนเปื้อนและพิษจากสังกะสีแบบเฉียบพลันมักมีอาการทางเดินอาหารที่ไม่เฉพาะเจาะจง เช่น ปวดท้อง ท้องร่วง คลื่นไส้ และอาเจียน การสัมผัสสังกะสีในปริมาณสูงเป็นเวลานานอาจขัดขวางกระบวนการเมตาบอลิซึมของแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น การดูดซึมทองแดง เป็นต้น⁽²⁶⁾

ทองแดงเป็นโลหะอีกชนิดหนึ่งที่มีบทบาทหน้าที่หลักเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ทองแดงเป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ SOD เอนไซม์สังเคราะห์สารสื่อประสาท เอนไซม์สร้างเม็ดสีของผิวหนัง เอนไซม์สังเคราะห์คอลลาเจน เอนไซม์สร้างเมลานิน นอกจากนี้ทองแดงมีความจำเป็นในกระบวนการผลิตฮอร์โมนไทรอยด์ ในกระแสเลือด ประมาณ 60% ของทองแดงจะอยู่ในรูปของเอนไซม์ SOD ในเซลล์เม็ดเลือดแดง ส่วนที่เหลืออีก 40% จะจับอย่างหลวม ๆ กับโปรตีนและกรดอะมิโนอื่น ๆ ทองแดงมีความจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน คอลลาเจน และกระดูก ภาวะขาดทองแดงเป็นเวลานานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของการเจริญเติบโต อาจทำให้เกิดโรคโลหิตจาง การบกพร่องในการสร้างเคราตินและเม็ดสีที่เส้นผม การได้รับทองแดงที่มากเกินไปอย่างรวดเร็วจากการบริโภคอาหารทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง เหงื่อออกมาก และไตทำงานผิดปกติ^(25,26)

2.4 การตรวจหาโลหะหนักในร่างกาย

การใช้ชีวิตในโลกปัจจุบันเป็นเรื่องที่ยากในการจะหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับโลหะหนัก พิษที่เกิดจากโลหะหนักมีผลกระทบต่อสุขภาพร่างกาย รวมถึงก่อให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมในมนุษย์ ความรุนแรงจากพิษโลหะหนักที่ได้รับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของโลหะหนัก ปริมาณและความถี่ที่ได้รับ รวมถึง อายุ เพศ พันธุกรรม และภาวะโภชนาการของแต่ละบุคคล ซึ่งลักษณะและอาการมีความแตกต่างกันสำหรับการสัมผัสแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง แต่อาจไม่เฉพาะเจาะจง การวินิจฉัยอาการและส่งตรวจวิเคราะห์จึงอาจเป็นตัวช่วยแพทย์ในการยืนยันสาเหตุของอาการได้⁽⁶⁾

การตรวจหาโลหะหนักในปัจจุบันนิยมตรวจจากสารชีวภาพตัวอย่างจากร่างกาย เช่น เลือด ปัสสาวะ เส้นผม เล็บ หรือน้ำลาย และเนื่องจากไม่มีปริมาณระดับของโลหะหนักที่ปลอดภัยต่อร่างกาย การตรวจหาจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น การตรวจจากเลือดถึงเป็นวิธีที่นิยมวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นถึงปริมาณของโลหะหนักในกระแสเลือด ณ ช่วงเวลาหนึ่งได้ เหมาะสำหรับการตรวจหาตะกั่ว เนื่องจาก 95% ของตะกั่วในเลือดจะจับกับเซลล์เม็ดเลือดแดงเป็นหลัก นอกจากนี้เลือดยังเป็นตัวอย่างที่เหมาะสมกับการตรวจหาปรอทเช่นกัน เพราะปรอทในรูปที่พิษมักจะไม่ถูก

ขับออกทางปัสสาวะ การตรวจจากปัสสาวะจะเหมาะสำหรับกรณีที่ได้รับหรือสัมผัสโลหะหนัก ในช่วง 2-3 วันที่ผ่านมา ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจหาสารหนู เนื่องจากสารหนูจะไหลเวียนในกระแสเลือดไม่กี่ชั่วโมง จากนั้นจะถูกขับออกทางปัสสาวะ แต่การขับออกนั้นไม่สม่ำเสมอ จึงมักเก็บปัสสาวะแบบ 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม 90% ของสารหนูจะสามารถตรวจพบในปัสสาวะได้นานถึง 1-2 เดือน ส่วนการตรวจจากเส้นผมหรือเล็บ สามารถชี้ให้เห็นถึงการสะสมและเมตาบอลิซึมในช่วงหลายเดือนที่ผ่านมา สารหนูในรูปอนินทรีย์มักจะจับกับหมู่ซัลไฟไฮไดรลในเคราติน ซึ่งมีอยู่มากในเส้นผมและเล็บ การตรวจจากเส้นผมหรือเล็บ เหมาะกับการตรวจหาสารหนู ทั้งนี้ผลที่ได้ อาจจะมีการคลาดเคลื่อน หากในช่วงที่ผ่านมามีสารเคมีอื่นมาสัมผัสหรือปนเปื้อนกับเส้นผม เช่น การย้อมผม มลภาวะโดยรอบ อย่างไรก็ตาม โลหะหนักที่เป็นพิษจำนวนมากสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อ เช่น กระดูก ไต สมอง จึงอาจเป็นการยากในการเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจ⁽⁶⁾ ฉะนั้นการพิจารณาเลือกเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจจึงมีความสำคัญ ผลตรวจอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ หากพิจารณาเลือกเก็บตัวอย่างที่ไม่เหมาะสมกับชนิดโลหะหนักนั้น ๆ อีกทั้งการตรวจหาโลหะหนักแต่ละชนิด อาจมีการเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจมากกว่า 1 ชนิดได้

การส่งตรวจหาโลหะหนัก ไม่ได้เป็นการตรวจกันเป็นประจำในการตรวจร่างกายทั่วไปตามโรงพยาบาล การตรวจด้วยวิธีมาตรฐานจึงมักจะส่งตัวอย่างไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการภายนอก ดังนั้นผลตรวจที่ได้ อาจใช้เวลาหลายวัน การตรวจหาโลหะหนักที่กล่าวมานี้ จะเห็นว่า มีข้อจำกัดในการตรวจมากมาย เช่น ระยะเวลาในการทราบผล ความเจ็บจากการเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจ ราคาที่ค่อนข้างแพงในการตรวจหาโลหะแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

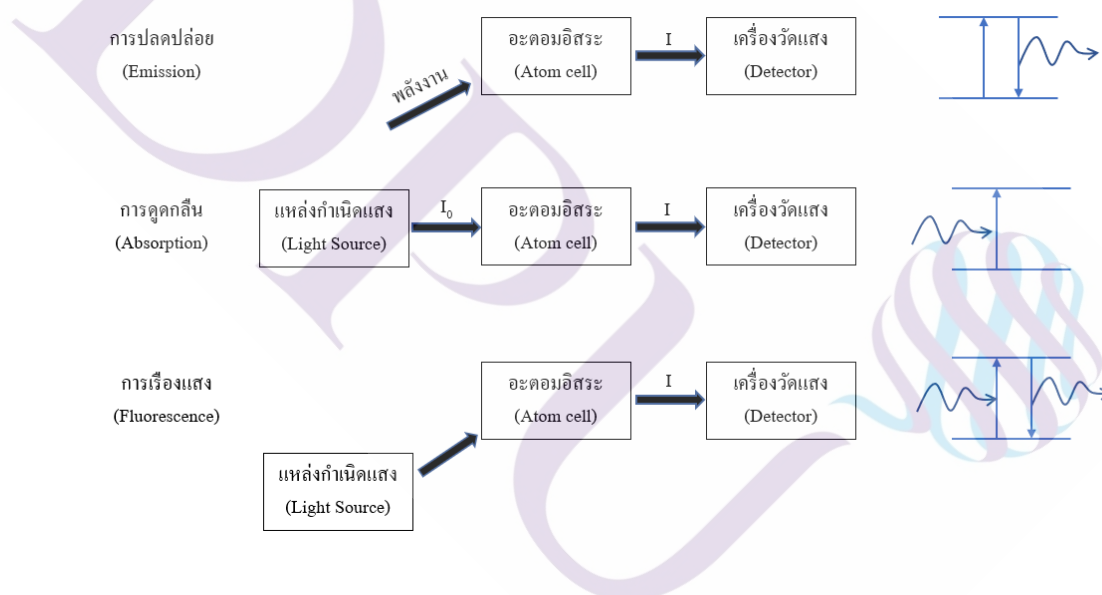
ในปัจจุบัน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักในทางคลินิกที่นิยมนั้น มีอยู่มากมายหลายเทคนิคด้วยกัน ได้แก่ Atomic Absorption Spectrometry (AAS), Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) ซึ่งแต่ละเทคนิคมีความแตกต่างกัน แต่โดยพื้นฐานแล้วใช้หลักการและทฤษฎีเบื้องต้นเดียวกันในการนำมาประยุกต์ใช้

2.5 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องมือตรวจวัดโลหะหนัก

อะตอมโดยพื้นฐานมีโครงสร้างประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โดยที่โปรตอนและนิวตรอนจะรวมกันอยู่เป็นนิวเคลียส และมีอิเล็กตรอนโคจรล้อมรอบ การเรียงตัวของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียส จะมีลักษณะเป็นวงโคจร แต่ละวงโคจรจะมีระดับพลังงานเฉพาะตัว วงโคจรที่อยู่ใกล้นิวเคลียสจะมีระดับพลังงานที่สูง ในสภาวะปกติอิเล็กตรอนของอะตอมจะเรียงตัวอยู่ในสถานะที่เสถียรที่สุด คือมีระดับพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเรียกว่า สถานะพื้น (Ground

State) แต่ถ้าหากมีพลังงานที่เหมาะสมมากระทบ อิเล็กตรอนของอะตอมซึ่งเดิมอยู่ที่สถานะพื้น จะเปลี่ยนวงโคจรขึ้นไปอยู่วงโคจรที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น ที่เรียกว่า สถานะกระตุ้น (Excited State) แต่เนื่องจากอะตอมที่อยู่ในสถานะนี้จะไม่ค่อยมีความเสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจะพยายามลดพลังงานลงเพื่อกลับไปสู่สถานะพื้น โดยการปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเท่ากับพลังงานที่ดูดกลืนไป⁽²⁸⁾ โดยสรุปธาตุแต่ละชนิดมีระดับพลังงานที่ต่างกัน จึงมีการดูดกลืนและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าของความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงของธาตุนั้น ๆ

Atomic Spectroscopy คือ การศึกษาถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ โดยธรรมชาติ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมี 3 ปรากฏการณ์ คือ การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) และการเรืองแสง (Fluorescence) และเมื่อนำการศึกษานี้มาประยุกต์ใช้เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ จะถูกเรียกว่า Atomic Spectrometry⁽²⁹⁾



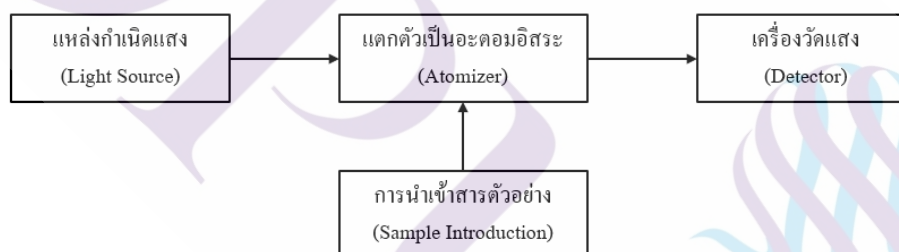
ภาพที่ 2.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบหลักของเทคนิค Atomic Spectrometry ทั้ง 3 ประเภท⁽²⁹⁾

2.6 เทคนิคมาตรฐานที่นิยมในการวิเคราะห์หาโลหะหนักในทางคลินิก

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาโลหะหนักในทางคลินิกปกติมีหลายประเภท แต่เทคนิคที่นิยมใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Atomic Absorption Spectrometry (AAS), Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)^(30,31)

2.6.1 Atomic Absorption Spectrometry (AAS)

เทคนิค AAS เป็นการวัดปริมาณของธาตุโดยการยิงแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะจากแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ผ่านไปอะตอมอิสระของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ อะตอมอิสระนี้จะดูดกลืนแสง ปริมาณความเข้มแสงที่วัดได้ปลายทางด้วยเครื่องวัดแสง (Detector) จะมีความเข้มแสงที่ลดลง ซึ่งความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ โดยหลักการทำงานของเทคนิค AAS สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกนำไปสู่ในส่วนขั้นตอนการแตกตัวให้เป็นอะตอมอิสระ (Atomizer) เพื่อที่จะเปลี่ยนสารตัวอย่างให้เป็นอะตอมอิสระหรือไอออนในรูปก๊าซ ก่อนที่จะยิงแสงผ่านเพื่อให้อะตอมอิสระทำการดูดกลืนพลังงาน⁽³¹⁾



ภาพที่ 2.3 หลักการพื้นฐานของเครื่อง AAS⁽³¹⁾

หัวใจสำคัญที่สุดของขั้นตอนการทำให้สารตัวอย่างเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (Atomization) นั้น คือ การทำให้สารตัวอย่างดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไป โดยพลังงานดังกล่าวอาจอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า เป็นต้น เทคนิค AAS จึงสามารถจำแนกย่อยได้อีกหลายเทคนิคด้วยกัน ซึ่งจะจำแนกตามลักษณะประเภทของ Atomizer ที่นำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ Flame Atomic Absorption Spectrometry (FAAS), Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry (GFAAS), Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry (HGAAS)⁽³¹⁾

2.6.2 Flame Atomic Absorption Spectrometry (FAAS)

เทคนิค FAAS เป็นเทคนิคที่เก่าแก่ที่สุด ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1955 เป็นเทคนิคที่ใช้เปลวไฟทำหน้าที่ในการสร้างพลังงานความร้อนทำให้สารตัวอย่างระเหยและแตกตัวกลายเป็นอะตอมอิสระ สารตัวอย่างจะถูกทำให้เป็นละอองขนาดเล็กก่อนถูกนำเข้าสู่ส่วนของ Atomizer อะตอมอิสระจะดูดกลืนแสงจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงที่ปล่อยออกมาจะออกมาจากอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันกับอะตอมอิสระของสารตัวอย่าง ความเข้มแสงที่วัดได้จากเครื่องวัดแสงจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมอิสระที่อยู่ในเปลวไฟ เทคนิค FAAS นี้สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยความเร็ว 10-15 วินาทีต่อตัวอย่าง สะดวก ง่าย ไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพงนัก แต่ก็มีข้อจำกัดมากมาย เช่น สามารถวิเคราะห์ได้ที่โลหะธาตุ ใช้ปริมาณสารตัวอย่างมากและต้องอยู่ในรูปของเหลว ไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็งได้โดยตรง ไม่สามารถวิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำได้ และนอกจากนี้โลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู อาจไม่เหมาะกับการตรวจด้วยเทคนิคนี้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดในการทำให้เป็นอะตอมอิสระนั้นไม่เพียงพอ ที่จะทำให้สารหนูเกิดเป็นอะตอมอิสระได้อย่างสมบูรณ์^(30,31)



ภาพที่ 2.4 เครื่อง FAAS รุ่น PinAAcle 500 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ที่มา: <https://www.perkinelmer.com>

2.6.3 Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry (GFAAS)

เทคนิค GFAAS มีลักษณะคล้ายกับเทคนิค FAAS ต่างกันที่เทคนิคนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าในการสร้างพลังงานความร้อน สารตัวอย่างจะถูกผสมเข้ากับตัวทำละลายก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนทำให้แตกตัวเป็นอะตอมอิสระ ภายในหลอด Graphite ซึ่งถูกออกแบบในการให้พลังงานความร้อน

เพิ่มขึ้นเป็นขั้นระดับ โดยเริ่มจากการทำให้แห้ง (Drying) โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส กับสารตัวอย่างเพื่อระเหยตัวทำละลายออกเสียก่อน ต่อด้วยการทำให้เป็นผงเถ้า (Ashing) ด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าขั้นตอนทำให้แห้งที่ประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารเจือปนให้ระเหยออกไป เหลือแต่ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เท่านั้น และสุดท้ายจึงค่อยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 3000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ธาตุที่เหลืออยู่แตกตัวเป็นอะตอมอิสระ จากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะถูกกักอยู่ภายในหลอดเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัด เทคนิค GFAAS มีความสามารถในการตรวจหาธาตุหลัก ๆ ได้ดี และใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อยเพียง 20 ไมโครลิตร สารตัวอย่างอยู่ในรูปของเหลวและของแข็งได้ ความสามารถในการวิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำได้ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น ใช้เวลานานในการวิเคราะห์ และค่าใช้จ่ายสูงกว่าเทคนิค FAAS^(30,31)



ภาพที่ 2.5 เครื่อง GFAAS รุ่น 280Z AA ยี่ห้อ Agilent

ที่มา: <https://www.agilent.com/>

2.6.4 Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry (HGAAS)

เทคนิค HGAAS อาศัยหลักของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่างที่เป็นกรดกับตัวรีดิวซ์ เพื่อสร้างสารประกอบไฮไดรด์ (Hydride) ที่ง่ายในการระเหย ก่อนจะถูกนำเข้าสู่กระบวนทำให้แตกตัวเป็นอะตอมอิสระ เริ่มจากสารตัวอย่างจะถูกทำให้เป็นกรดด้วยกรดเกลือ จากนั้นเติมสารละลายเป็นตัวรีดิวซ์ ส่งผลให้ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮไดรด์ที่มีจุดเดือดต่ำมากทำให้ระเหยแยกตัวออกมาจากสารตัวอย่าง สารประกอบไฮไดรด์จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนกรแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยความร้อนจากเปลวไฟ คุณภาพของผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องควบคุม เช่น ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิที่ใช้ ความดันก๊าซ

ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลวิเคราะห์ที่มีคุณภาพ ผู้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะต้องมีทักษะความชำนาญที่สูงกว่าเทคนิค AAS อื่น ๆ โลหะที่ระเหยง่ายส่วนใหญ่ เช่น สารหนู ซีลีเนียมปรอท มักนิยมใช้เทคนิค HGAAS ในการตรวจวิเคราะห์⁽³¹⁾

2.6.5 Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)

เทคนิค ICP-AES มีจุดเด่น คือ สามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุได้รวดเร็วและได้หลายชนิดในครั้งเดียว เทคนิคนี้แยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของ ICP (Inductively Coupled Plasma) เป็นการผลิตพลาสมาจากแก๊สอาร์กอน เพื่อสร้างพลังงานร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงถึง 9000 องศาเซลเซียส ในการกำจัดตัวทำละลายออกจากสารตัวอย่าง (Desolvation) และระเหยสารตัวอย่างให้กลายเป็นไอ (Vaporization) จากนั้นไอที่ได้จะแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (Atomization) และกลายเป็นไอออน (Ionization) อย่างสมบูรณ์ในท้ายที่สุด มากไปกว่านั้นพลังงานจากพลาสมายังทำหน้าที่กระตุ้นให้ไอออนเหล่านี้อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) ไอออนที่อยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรนี้ เพื่อกลับสู่สถานะพื้น (Ground State) จะปล่อยพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมา และถูกตรวจวัดปริมาณด้วยเครื่องวัดแสงในส่วนของ Atomic Emission Spectrometer (AES) ความเข้มแสงและความยาวคลื่นที่วัดได้นี้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนธาตุในสารตัวอย่าง ทั้งนี้เทคนิค ICP-AES ยังมีข้อจำกัดหลักที่คล้ายกับเทคนิค FAAS คือ ชีตความสามารถในการตรวจหาธาตุในปริมาณต่ำ ๆ ไม่ได้^(30,31)



ภาพที่ 2.6 เครื่อง ICP-AES รุ่น Avio 560 Max ยี่ห้อ Perkin Elmer

ที่มา: <https://www.perkinelmer.com>

2.6.6 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

หลักการการทำงานของเทคนิค ICP-MS แบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของ ICP (Inductively Coupled Plasma) มีหน้าที่ทำให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอออนบวก โดยการให้พลังงานความร้อนสูงจากพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ในการทำให้สารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอออนได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเอาไอออนบวกที่ได้จากส่วนแรก ผ่านไปสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass Spectrometer) ที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ทำให้ทิศทางของไอออนบวกเหล่านี้หักเหไปตามมวลของไอออนที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการแยกชนิดของธาตุต่าง ๆ ตามหลักการคัดแยกมวลต่อประจุ (Atom Mass-to-Charge Ratio) ก่อนจะถูกตรวจวัดปริมาณด้วยเครื่องวัด ซึ่งเทคนิคนี้จะเป็นการตรวจจับมวลของไอออนที่เกิดขึ้นแทนการวัดปริมาณแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมา^(30,31)

เทคนิค ICP-MS ถือเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในบรรดาเทคนิคทั้งหมด เพราะเป็นการผสมผสานรวมเอาจุดเด่นในเรื่องการวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิดในครั้งเดียวของเทคนิค ICP-AES และความสามารถในการตรวจจับธาตุที่มีปริมาณต่ำ ๆ ของเทคนิค GFAAS รวมเอาไว้เข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม เครื่อง ICP-MS นั้นไม่สามารถใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกห้องปฏิบัติการได้ เนื่องจากมีราคาต้นทุนของเครื่องที่สูงและจำเป็นต้องมีเจ้าหน้าที่เทคนิคที่ผ่านการฝึกอบรมที่สามารถจัดการกับปัญหาเฉพาะหน้าได้^(30,31)



ภาพที่ 2.7 เครื่อง ICP-MS รุ่น NexION 1000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ที่มา: <https://www.perkinelmer.com>

ตารางที่ 2.3 จัดความสามารถของแต่ละเทคนิคในการวิเคราะห์หาธาตุชนิดต่าง ๆ⁽³⁰⁾

ธาตุ	FAAS	GFAAS	HGAAS	ICP-AES	ICP-MS
อะลูมิเนียม (Al)		+++		+	++
สารหนู (As)		+	++		++
โบรอน (B)				++	++
แบเรียม (Ba)				++	++
แคลเซียม (Ca)	+++			++	++
แคดเมียม (Cd)		+++		+	++
โคบอลต์ (Co)		+++		+	++
โครเมียม (Cr)		+++			+
ทองแดง (Cu)	+++	++		+++	++
เหล็ก (Fe)	+++	++		+++	++
ปรอท (Hg)			+++		++
โพแทสเซียม (K)				++	++
แมกนีเซียม (Mg)	+++	++		+++	++
โมลิบดีนัม (Mo)	+				+
แมงกานีส (Mn)		+++		+	++
โซเดียม (Na)				++	++
นิกเกิล (Ni)		+++		+	+++
ตะกั่ว (Pb)	+	+++		+	+++
ซีลีเนียม (Se)		++	++	+	++
ซิลิคอน (Si)	+			+	+
วานาเดียม (V)		++			++
สังกะสี (Zn)	+++	++		+++	++

หมายเหตุ. FAAS = Flame Atomic Absorption Spectrometry, GFAAS = Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry, HGAAS = Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry, ICP-MS = Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-AES = Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, +++ หมายถึง เทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลาย, ++ หมายถึง เทคนิคที่มีการใช้, + หมายถึง เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างบางประเภท

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิค^(24,30)

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
FAAS	<ul style="list-style-type: none"> เครื่องมีราคาไม่สูง ต้นทุนในการติดตั้งห้องปฏิบัติการต่ำ การเตรียมสารตัวอย่างไม่ยุ่งยาก อาศัยทักษะความเชี่ยวชาญน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์ได้ทีละธาตุ ใช้สารตัวอย่างปริมาณมาก วิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำไม่ได้ ใช้ก๊าซไวไฟ
GFAAS	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำได้ เครื่องมีราคาไม่สูง ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย ต้นทุนในการติดตั้งห้องปฏิบัติการต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์ได้ทีละธาตุ ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน การเตรียมสารตัวอย่างยุ่งยาก
HGAAS	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำได้ เครื่องมีราคาไม่สูง ต้นทุนในการติดตั้งห้องปฏิบัติการต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์ธาตุได้เพียงบางชนิด ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ใช้สารตัวอย่างปริมาณมาก การเตรียมสารตัวอย่างยุ่งยาก
ICP-MS	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน วิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำได้ ใช้เวลาในการวิเคราะห์รวดเร็ว ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย การเตรียมสารตัวอย่างไม่ยุ่งยาก 	<ul style="list-style-type: none"> เครื่องมีราคาสูง อาศัยทักษะความเชี่ยวชาญสูง ต้นทุนในการติดตั้งห้องปฏิบัติการสูง
ICP-AES	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน ใช้เวลาในการวิเคราะห์รวดเร็ว ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย การเตรียมสารตัวอย่างไม่ยุ่งยาก 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์หาธาตุที่มีระดับปริมาณต่ำไม่ได้ เครื่องมีราคาสูง อาศัยทักษะความเชี่ยวชาญสูง ต้นทุนในการติดตั้งห้องปฏิบัติการสูง

หมายเหตุ. FAAS = Flame Atomic Absorption Spectrometry, GFAAS = Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry, HGAAS = Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry, ICP-MS = Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-AES = Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry

นอกจากเทคนิคที่กล่าวข้างต้น ยังมีเทคนิคที่มีการใช้ในการวิเคราะห์หาโลหะหนัก แต่อาจไม่แพร่หลายเป็นที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการทางคลินิกปกติ เช่น X-ray Fluorescence (XRF), Anodic Stripping Voltammetry (ASV)

2.6.7 X-ray Fluorescence (XRF)

เทคนิค XRF เป็นการยิงโฟตอนพลังงานสูงเข้าชนกับอะตอม เพื่อให้อิเล็กตรอนวงในหลุดจากวงโคจร อะตอมในสถานะนี้จะไม่เสถียร ช่องว่างที่เกิดขึ้นของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไป จะถูกอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่เพื่อให้อะตอมกลับสู่สถานะพื้น และในขณะที่เข้ามาแทนที่ อิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีเอกซ์ที่ช่วงความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ เนื่องจากระดับชั้นพลังงานของแต่ละธาตุแตกต่างกัน พิกของพลังงานรังสีเอกซ์จึงมีความสัมพันธ์กับธาตุเฉพาะเจาะจง เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ธาตุครอบคลุมตั้งแต่โซเดียมถึงยูเรเนียมและการเตรียมสารตัวอย่างใช้ปริมาณเล็กน้อย⁽³¹⁾



ภาพที่ 2.8 เครื่อง XRF ยี่ห้อ Bruker

ที่มา: <https://www.bruker.com>

2.6.8 Anodic Stripping Voltammetry (ASV)

เป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อย ๆ (Trace Element) โดยจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ (1) ขั้นตอนการเกาะติดของสาร (Deposition or Accumulation Step) โดยการลดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) เป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะทำให้โลหะปริมาณน้อย ๆ ในสารละลายนั้นเกิดการเกาะติดที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ เป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ (2) ขั้นตอนการสตรipping (Stripping Step) ซึ่งขั้นตอนนี้จะมีการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำให้โลหะที่ยึดเกาะที่ผิวหน้า

ของขั้วไฟฟ้าทำงานในขั้นตอนแรกหลุดออกหรือละลายออกสู่สารละลาย ขั้นตอนนี้จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้เป็นสัดส่วนกับปริมาณโลหะที่เกาะติดบนขั้วไฟฟ้า⁽³¹⁾

เครื่อง LeadCare เป็นเครื่องตรวจหาปริมาณตะกั่วในเลือดแบบพกพา โดยหลักการของเครื่องอาศัยเทคนิค ASV ในการตรวจวิเคราะห์ ซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้เฉพาะตะกั่วเท่านั้น ไม่สามารถตรวจหาโลหะหนักชนิดอื่นได้ การตรวจหาตะกั่วด้วยเครื่อง LeadCare นี้มีความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และใช้ปริมาณตัวอย่างในการทดสอบเพียงเล็กน้อย ใช้เลือดที่เจาะจากปลายนิ้ว เพียง 2 หยด และสามารถแสดงผลได้ภายใน 3 นาที ผลที่ได้เป็นหน่วยไมโครกรัมต่อเดซิลิตร หลักการทำงานของเครื่อง LeadCare จะใช้ตัวอย่างเลือดในการทดสอบ เนื่องจากตะกั่วส่วนใหญ่ในร่างกายจะเกาะติดอยู่เซลล์เม็ดเลือดแดง เริ่มต้นจากนำตัวอย่างเลือดมาผสมกับน้ำยา น้ำยาจะทำให้ผนังเซลล์เม็ดเลือดแดงแตก ส่งผลให้ตะกั่วที่อยู่ภายในเซลล์หลุดออกมา จากนั้นเครื่องจะให้ศักย์ไฟฟ้าลบที่ตัววัดทำให้ตะกั่วมารวมตัวและเกาะติดที่แผ่นขั้วไฟฟ้าระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจะให้ศักย์ไฟฟ้าบวกอย่างรวดเร็วทำให้ไอออนของตะกั่วหลุดออก กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากไอออนของตะกั่วจะถูกวัดและประมวลผลเป็นค่าปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบ⁽⁴⁵⁾



ภาพที่ 2.9 เครื่อง LeadCare

ที่มา: <https://www.meridianbioscience.com/>

2.7 การตรวจหาโลหะหนักแบบคัดกรองเบื้องต้น

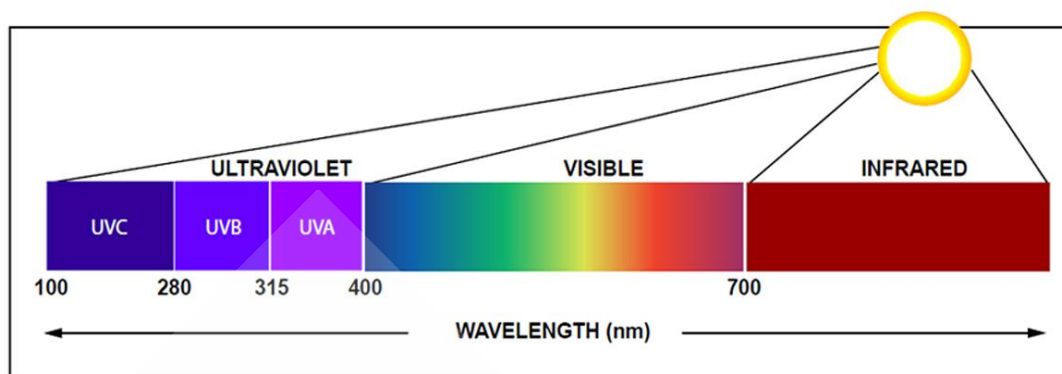
ถึงแม้ว่าเครื่องตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแบบมาตรฐานต่าง ๆ จะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่ตัวเครื่องมักจะมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะแก่การเคลื่อนย้าย ราคาสูง อีกทั้งมีความยุ่งยากซับซ้อนของขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์จนถึงแสดงผลข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือเทคโนโลยีใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่องที่สามารถตรวจวัดได้

รวดเร็วกว่า ประหยัด และพกพาสะดวก วิธีการวัดสีได้กลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งตามหลักของ Spectroscopy เนื่องจากมีความสะดวก มีต้นทุนที่ต่ำ และตรวจวัดง่ายและรวดเร็ว⁽⁴⁷⁾

UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) เป็นเครื่องตรวจโลหะหนักและเกลือแร่ ขนาดพกพาประเภทหนึ่งที่ใช้ในการตรวจคัดกรองเบื้องต้น โดยการตรวจวัดจะเป็นการวัดบนผิวของฝ่ามือโดยตรง ไม่ต้องเจาะเลือด ไม่ต้องเก็บตัวอย่างใด ๆ เพื่อส่งตรวจ ผลที่ได้สะท้อนถึงระดับโลหะหนักและเกลือแร่ในเนื้อเยื่อ ณ ขณะนั้น จุดเด่นที่แตกต่างจากเครื่องตรวจแบบมาตรฐานทั่วไป คือ สามารถแสดงผลตรวจรวดเร็วทันที สะดวก และปราศจากความเจ็บ สามารถตรวจวัดเกลือแร่ที่จำเป็นได้ 20 ชนิดและโลหะหนักที่เป็นอันตรายถึง 14 ชนิด ต่อการตรวจหนึ่งครั้ง ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการตรวจจากเลือดหรือปัสสาวะ UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจวัดความเป็นพิษจากโลหะหนักแบบเฉียบพลัน เช่น ผู้ป่วยที่สัมผัสหรือดูดดมตะกั่วมาโดยตรง เนื่องจากกรณีดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้ในเลือดและปัสสาวะ UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จึงถูกออกแบบมาเพื่อตรวจวัดปริมาณโลหะหนักที่มีการสะสมอยู่เป็นเวลานานที่เนื้อเยื่อผิวหนัง⁽⁴²⁾

กลไกการทำงานของเครื่องใช้หลักการเดียวกับเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ทั่วไปที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในด้านการแพทย์ เกษตศาสตร์ สิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เทคนิค UV-Visible Spectrophotometry เป็นการตรวจวัดความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนจากสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด โดยความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างที่ดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ โดยทั่วไปแล้วตัวเครื่องจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติง (Grating) หรือ โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) และเครื่องตรวจวัดแสง แหล่งกำเนิดแสงในช่วงแสงขาวจะใช้หลอดทังสเตน ที่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2500 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดควิเทอริยมที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 นาโนเมตร^(48,49)

อะตอมโลหะหนักและเกลือแร่จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 190 นาโนเมตร ถึง 860 นาโนเมตร ซึ่งจะอยู่ในช่วงของรังสียูวีและช่วงแสงขาว ยกตัวอย่างเช่น แคลเซียมดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร แมกนีเซียมดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 285.2 นาโนเมตร สังกะสีดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร เหล็กดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร เป็นต้น⁽⁴⁶⁾ ค่าที่วัดได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) แสดงผลเป็นตัวเลข ตัวเลขเหล่านี้สะท้อนถึงระดับเกลือแร่และโลหะหนักในเนื้อเยื่อ แต่จะไม่มี ความสัมพันธ์ใด ๆ กับค่าที่วัดได้ในกระแสเลือด ในปัสสาวะ หรือที่เส้นผม



ภาพที่ 2.10 ช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวีและช่วงแสงขาว

ที่มา: <https://www.rosco.com/spectrum/index.php>

เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer แบบพกพาชนิดอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น

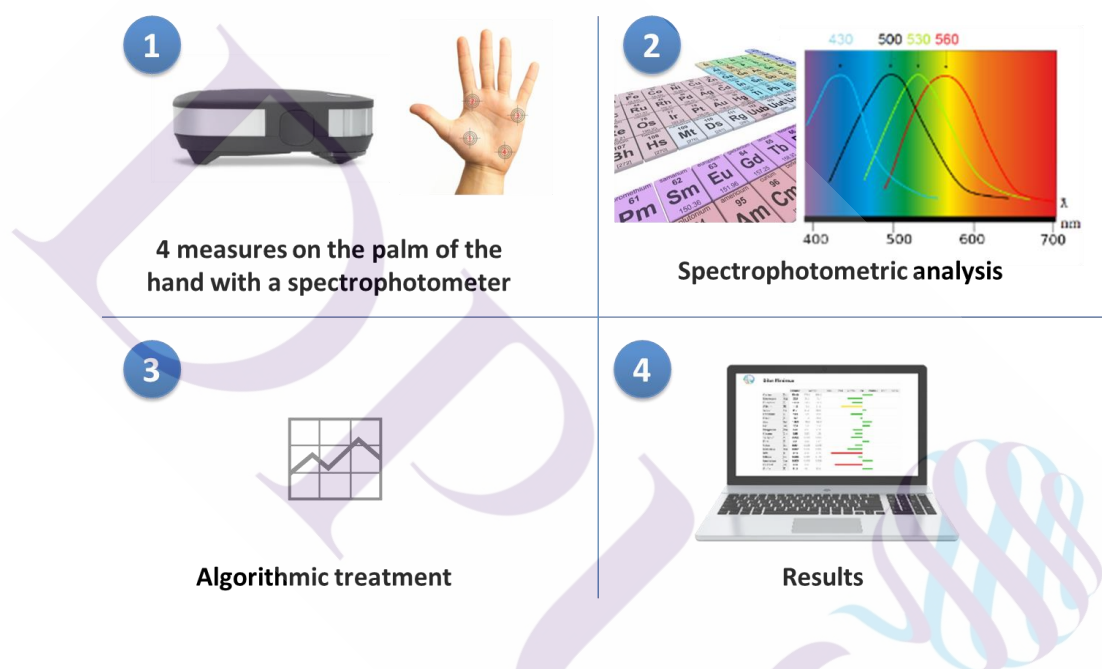
เครื่อง Pharmanex ที่ใช้ในการวัดระดับสารแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ที่ผิวหนัง โดยหลักการการทำงานของเครื่องจะปล่อยแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 478 นาโนเมตร และเมื่อแสงสีน้ำเงินนี้กระทบกับสารแคโรทีนอยด์ ด้วยพลังงานที่มีความยาวคลื่นนี้จะสามารถกระตุ้นสารแคโรทีนอยด์และปลดปล่อยแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 518 นาโนเมตร ออกมา ปริมาณแสงสีเขียวที่วัดได้ด้วยเครื่อง Pharmanex จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารแคโรทีนอยด์ที่ผิวหนัง ทั้งนี้เนื่องจากสารแคโรทีนอยด์ เป็นโมเลกุลหนึ่งเดียวในธรรมชาติ ที่เมื่อดูดกลืนแสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 478 นาโนเมตรแล้ว จะคลายแสงสีเขียวความยาวคลื่น 518 นาโนเมตรออกมาแทน⁽⁴³⁾

เครื่อง PreVu เป็น Spectrophotometer อีกเครื่องที่นำมาใช้วัดคอเลสเตอรอลที่ผิวหนัง โดยก่อนทำการวัดจะต้องหยดน้ำยาบางชนิดเพื่อไปจับตัวกับคอเลสเตอรอลที่บริเวณผิวหนัง จากนั้นสีของน้ำยานี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนสี สีที่เปลี่ยนแปลงนี้จะถูกวัดด้วยเครื่อง PreVu โดยความเข้มสีนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณคอเลสเตอรอลที่มีการจับตัวกันที่ผิวหนัง⁽⁴⁴⁾

2.7.1 ขั้นตอนการตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

เริ่มจากการวัด 4 ตำแหน่งบนฝ่ามือของมือข้างที่ไม่ถนัด ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนและสะท้อนโดยโลหะหนักและเกลือแร่จะถูกตรวจจับ จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ แล้วส่งกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อ

แสดงผลการตรวจในทันที ในการคำนวณวิเคราะห์ ข้อมูลทางสรีรวิทยา เช่น วันเดือนปีเกิด เพศ ส่วนสูง น้ำหนัก และหมู่เลือด จะถูกนำไปเป็นตัวแปรในการประมวลผลควบคู่กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) ด้วยเหตุผลนี้ทำให้เด็กอายุต่ำกว่า 12 ปี และมีน้ำหนักต่ำกว่า 40 กิโลกรัม จะไม่สามารถทำการตรวจได้ เนื่องจากค่าอ้างอิงมาตรฐานจะมีความแตกต่างจากเด็กที่กำลังเติบโต เนื่องจากการตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) เป็นการตรวจคัดกรองเบื้องต้น ผลตรวจที่ได้มักจะนำไปใช้วินิจฉัยควบคู่กับอาการของผู้รับการตรวจ⁽⁴²⁾



ภาพที่ 2.11 ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

เนื่องจากการวัดเป็นการวัดที่ฝ่ามือ ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของร่างกายทั้งหมด และการวัดเกลือแร่และ โลหะหนักในเนื้อเยื่อผิวหนังเป็นวิธีการใหม่ที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายทางคลินิก ซึ่งส่วนใหญ่ทางคลินิกจะทำการวัดจากเลือดหรือปัสสาวะ ข้อมูลทางสรีรวิทยาของผู้รับการตรวจ เช่น อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง หมู่เลือด จึงถูกนำมาประมวลผลร่วมกับข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) และมีการปรับเปลี่ยนค่าบางส่วนด้วยอัลกอริทึมและวิธีทางสถิติ เหนือสิ่งอื่นใดเนื่องจากการวัดด้วยวิธีนี้ยังไม่ได้ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการวัดเกลือแร่และ โลหะหนักในร่างกาย ผลที่ได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จึงเหมาะเป็นการตรวจคัดกรองเบื้องต้นเพื่อนำไปใช้ในการแนะนำผู้ป่วยในการดูแลและให้ความรู้

ด้านสุขภาพ ค่าตัวเลขที่แสดงในผลรายงานจึงไม่มีหน่วยวัด ผลตรวจที่ได้เป็นเพียงการบ่งชี้ถึงภาวะการขาดเกินแร่ธาตุ การสะสมของโลหะหนักที่เป็นพิษ การตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จึงเป็นการตรวจในเชิงป้องกัน เพื่อเป็นแนวทางในการวินิจฉัยหรือให้การแนะนำดูแลผู้ป่วย เช่น การตรวจเพิ่มเติม การปรับเปลี่ยนวิถีชีวิต อาหารการกิน ให้ความรู้ถึงแหล่งโลหะหนักอันตรายที่ควรหลีกเลี่ยง⁽⁴²⁾

ผลตรวจที่ได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการแสดงผลของเกลือแร่ที่จำเป็นทั้งหมด 20 ชนิด ค่าเกลือแร่ที่ได้จะแสดงผลในรูปตัวเลขและในรูปกราฟแท่งสี โดยแสดงเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ซึ่งค่าอ้างอิงนี้ผู้ผลิตเครื่องเป็นผู้ กำหนดขึ้นจากการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลทางสถิติของกลุ่มประชากรชาวยุโรปที่มีสุขภาพดี รวมถึงข้อมูลทางสรีรวิทยา อายุ เพศ ส่วนสูง น้ำหนัก และหมู่เลือด ค่าอ้างอิงของแต่ละเกลือแร่จะมีค่าน้อยแตกต่างกันไป แปรผันตามสัดส่วนปริมาณเกลือแร่ที่อยู่ในร่างกาย ผลที่ได้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จะสะท้อนให้เห็นถึงภาวะการขาดหรือเกินเกลือแร่เหล่านี้ ด้านล่างของผลในส่วนของเกลือแร่มีการแสดงระดับความสมดุลของเกลือแร่เป็นค่าร้อยละ⁽⁴²⁾

Mineral Test Report

	Result	Normal	Low-	Low	Normal	OK	Normal+	High	High+
Calcium (Ca)	510.0	279.0	598.0						
Magnesium (Mg)	39.5	30.5	75.7						
Phosphorus (P)	154.1	144.0	199.0						
Silicon (Si)	10.8	15.0	31.0						
Sodium (Na)	62.6	21.0	89.0						
Potassium (K)	16.8	9.0	39.0						
Copper (Cu)	9.3	11.0	28.0						
Zinc (Zn)	99.6	125.0	155.0						
Iron (Fe)	3.9	5.0	15.0						
Manganese (Mn)	0.32	0.31	0.75						
Chromium (Cr)	0.68	0.82	1.25						
Vanadium (V)	0.022	0.009	0.083						
Boron (B)	2.08	0.84	2.87						
Cobalt (Co)	0.021	0.025	0.045						
Molybdenum (Mo)	0.032	0.035	0.085						
Iodine (I)	0.49	0.32	0.59						
Lithium (Li)	0.061	0.052	0.120						
Germanium (Ge)	0.020	0.003	0.028						
Selenium (Se)	1.86	0.95	1.77						
Sulphur (S)	51.8	48.1	52.0						

Mineral Balance



ภาพที่ 2.12 ผลการตรวจเกลือแร่จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

ผลเกลือแร่ที่ได้จากการตรวจ จะแสดงผลทั้งตัวเลขและกราฟแท่งสีเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง สีของกราฟแสดงถึงระดับภาวะขาดหรือเกินเกลือแร่ ช่วงอ้างอิงที่ผู้ผลิตกำหนดขึ้นมีรายละเอียดดังนี้⁽⁴²⁾

ช่วงอ้างอิง	สีกราฟ	ระดับเกณฑ์
Normal และ Normal+	เขียว	ปกติ
Low และ High	เหลือง	ค่อนข้างต่ำ หรือ ค่อนข้างสูง
Low- และ High+	แดง	ต่ำเกินไป หรือ สูงเกินไป

ค่าอ้างอิงของแต่ละเกลือแร่จะมีค่าที่แตกต่างกันตามสัดส่วนปริมาณเกลือแร่ภายในร่างกาย โดยค่าอ้างอิงแต่ละค่าสามารถคำนวณได้ดังนี้⁽⁴²⁾

OK = ค่าเฉลี่ย (\bar{X})

Normal+ = ค่าเฉลี่ยบวกกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} + SD$)

Normal = ค่าเฉลี่ยลบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} - SD$)

High = ค่าเฉลี่ยบวกกับ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} + 2SD$)

Low = ค่าเฉลี่ยลบกับ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} - 2SD$)

High+ = ค่าเฉลี่ยบวกกับ 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} + 3SD$)

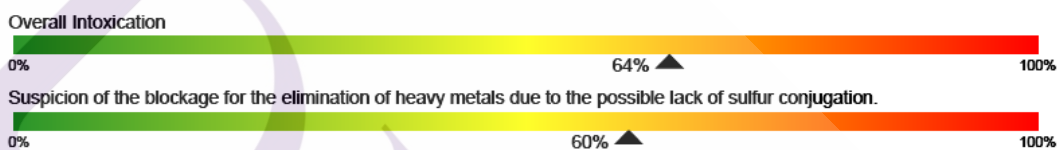
Low- = ค่าเฉลี่ยลบกับ 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{X} - 3SD$)

ส่วนที่สองเป็นการแสดงผลของการตรวจโลหะหนักทั้งหมด 14 ชนิด ค่าที่ได้จากการวัดจะแสดงผลในรูปตัวเลขและในรูปกราฟแท่งสีเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเช่นกัน แต่ค่าอ้างอิงของโลหะหนักทุกชนิดจะใช้ค่าอ้างอิงเดียวกันหมด เป็นค่าคงที่ตายตัวกำหนดโดยผู้ผลิตเครื่อง ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักถือเป็นสิ่งแปลกปลอมที่เป็นพิษต่อร่างกายและร่างกายพยายามจะขับออก ผลที่ได้จากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าผู้รับการตรวจมีโลหะหนักสะสมในร่างกาย รวมถึงความสามารถในการขับสารพิษโลหะหนักได้มากน้อยเพียงใด

Heavy Metal Test Report

	Result	Normal	High -	High +	Excess
Aluminium (Al)	0.01194				
Antimony (Sb)	0.00198				
Silver (Ag)	0.00867				
Arsenic (As)	0.00811				
Barium (Ba)	0.00816				
Beryllium (Be)	0.00460				
Bismuth (Bi)	0.00798				
Cadmium (Cd)	0.00908				
Mercury (Hg)	0.00517				
Nickel (Ni)	0.00263				
Platinum (Pt)	0.00197				
Lead (Pb)	0.00627				
Thallium (Tl)	0.00165				
Thorium (Th)	0.00102				

Heavy Metals Intoxication



ภาพที่ 2.13 ผลการตรวจโลหะหนักจากเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

ผลโลหะหนักที่ได้จากการตรวจ จะแสดงผลทั้งตัวเลขและกราฟแท่ง สีของกราฟแสดงถึงระดับเกณฑ์ของโลหะหนักที่พบ โดย ค่าโลหะหนัก สี และระดับเกณฑ์ เทียบได้ดังนี้⁽⁴²⁾

ค่าโลหะหนัก	สีกราฟ	ระดับเกณฑ์
< 0.00500	เขียว	ปกติ (Normal)
0.00501 – 0.00999	เหลือง	ค่อนข้างสูง (High -)
0.01000 – 0.01499	เหลือง	สูง (High +)
> 0.01500	แดง	สูงเกินไป (Excess)

2.7.2 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

จากการรวบรวมผลการตรวจโลหะหนักด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) ของผู้ที่เข้ารับการตรวจที่ บริษัท เซลแทค จำกัด จำนวน 597 คน โดยทั้งหมดเป็น ชาวเอเชีย เป็นผู้หญิง ถึงร้อยละ 76 โดยมีหมู่เลือดเป็น กรุ๊ป O มากที่สุด (ร้อยละ 36) รองลงมาคือ กรุ๊ป B (ร้อยละ 29) และ A (ร้อยละ 23) ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 31-50 ปี ถึง ร้อยละ 66 ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.5 จำนวนและร้อยละของตัวอย่าง จำแนกตามเพศ หมู่เลือด และอายุ

ข้อมูลส่วนบุคคล	จำนวน (คน)	ร้อยละ
1. เพศ		
ชาย	140	23.50
หญิง	457	76.50
รวม	597	100.00
2. หมู่เลือด		
A	138	23.10
B	175	29.30
O	213	35.70
AB	49	8.20
ไม่ทราบ	22	3.70
รวม	597	100.00
3. อายุ (ปี)		
< 20	4	0.67
21-30	82	13.74
31-40	183	30.65
41-50	211	35.34
51-60	90	15.08
> 60	27	4.52
รวม	597	100.00

2.7.3 ผลการตรวจเกลือแร่ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

จากผู้ที่เข้ารับการตรวจจำนวน 597 คน พบว่า เกลือแร่ที่พบมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ

อันดับที่ 1 แคลเซียม (Ca) ($\bar{X} = 460.0$, SD 88.8)

อันดับที่ 2 ฟอสฟอรัส (P) ($\bar{X} = 156.0$, SD 25.7)

อันดับที่ 3 สังกะสี (Zn) ($\bar{X} = 128.2$, SD 19.5)

ตารางที่ 2.6 ระดับค่าเกลือแร่ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เกลือแร่	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
แคลเซียม (Ca)	142.2	728.7	460.0	88.8
แมกนีเซียม (Mg)	15.8	60.9	31.6	6.9
ฟอสฟอรัส (P)	95.6	248.7	156.0	25.7
ซิลิคอน (Si)	8.4	27.9	12.0	2.0
โซเดียม (Na)	40.2	88.6	62.0	8.0
โพแทสเซียม (K)	7.5	48.6	19.5	8.1
ทองแดง (Cu)	6.5	36.7	15.8	5.3
สังกะสี (Zn)	76.7	196.4	128.2	19.5
เหล็ก (Fe)	2.4	17.4	8.9	2.4
แมงกานีส (Mn)	0.19	0.63	0.39	0.07
โครเมียม (Cr)	0.27	1.36	0.83	0.14
วานาเดียม (V)	0.006	0.032	0.023	0.003
โบรอน (B)	1.36	4.33	2.09	0.34
โคบอลต์ (Co)	0.018	0.048	0.030	0.004
โมลิบดีนัม (Mo)	0.03	0.05	0.038	0.000
ไอโอดีน (I)	0.07	0.89	0.37	0.10
ลิเทียม (Li)	0.040	0.208	0.069	0.019
เจอร์มาเนียม (Ge)	0.014	0.042	0.021	0.004
ซีลีเนียม (Se)	0.62	2.28	1.69	0.22
กำมะถัน (S)	46.2	51.8	50.0	1.3

จากข้อมูลตารางที่ 6 นี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าอ้างอิงปกติที่เป็นของชาวเอเชีย เปรียบเทียบกับค่าของชาวยุโรปที่ผู้ผลิตเครื่องได้กำหนดไว้ พบว่า ช่วงอ้างอิงปกติของแต่ละเกลือแร่ของชาวยุโรปมีช่วงที่สูงกว่าชาวเอเชียเกือบทุกชนิด ยกเว้นซีลีเนียมที่ชาวเอเชียมีช่วงอ้างอิงปกติที่สูงกว่าชาวยุโรป (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 2.7 ตารางเปรียบเทียบช่วงอ้างอิงปกติแต่ละเกลือแร่ระหว่างของคนยุโรปและคนเอเชีย

เกลือแร่	คนยุโรป		คนเอเชีย	
	Normal (\bar{X} -SD)	Normal+ (\bar{X} +SD)	Normal (\bar{X} -SD)	Normal+ (\bar{X} +SD)
แคลเซียม (Ca)	279.0	598.0	371.2	548.8
แมกนีเซียม (Mg)	30.5	75.7	24.7	38.5
ฟอสฟอรัส (P)	144.0	199.0	130.3	181.7
ซิลิคอน (Si)	15.0	31.0	10.0	14.0
โซเดียม (Na)	21.0	89.0	54.0	70.0
โพแทสเซียม (K)	9.0	39.0	11.4	27.6
ทองแดง (Cu)	11.0	28.0	10.5	21.1
สังกะสี (Zn)	125.0	155.0	108.7	147.7
เหล็ก (Fe)	5.0	15.0	6.5	11.3
แมงกานีส (Mn)	0.31	0.75	0.32	0.46
โครเมียม (Cr)	0.82	1.25	0.69	0.97
วานาเดียม (V)	0.009	0.083	0.020	0.026
โบรอน (B)	0.84	2.87	1.75	2.43
โคบอลต์ (Co)	0.025	0.045	0.026	0.034
โมลิบดีนัม (Mo)	0.035	0.085	0.038	0.038
ไอโอดีน (I)	0.32	0.59	0.27	0.47
ลิเทียม (Li)	0.052	0.120	0.050	0.088
เจอร์มาเนียม (Ge)	0.003	0.028	0.017	0.025
ซีลีเนียม (Se)	0.95	1.77	1.47	1.91
กำมะถัน (S)	48.1	52.0	48.7	51.3

2.7.4 ผลการตรวจโลหะหนักด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan)

ค่าโลหะหนักที่วัดได้ของผู้เข้ารับการตรวจจำนวน 597 คน สามารถจำแนกข้อมูลค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของข้อมูลได้ดังนี้

ตารางที่ 2.8 ระดับค่าโลหะหนักค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โลหะหนัก	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
อะลูมิเนียม (Al)	0.00824	0.01786	0.01239	0.00164
พลวง (Sb)	0.00157	0.01794	0.00221	0.00072
เงิน (Ag)	0.00678	0.01667	0.00998	0.00131
สารหนู (As)	0.00313	0.01313	0.00620	0.00294
แบเรียม (Ba)	0.00257	0.01598	0.00686	0.00288
เบริลเลียม (Be)	0.00332	0.00817	0.00493	0.00078
บิสมัท (Bi)	0.00445	0.01369	0.00775	0.00189
แคดเมียม (Cd)	0.00700	0.02631	0.01079	0.00265
ปรอท (Hg)	0.00147	0.02403	0.00785	0.00296
นิกเกิล (Ni)	0.00203	0.01428	0.00393	0.00149
แพลทินัม (Pt)	0.00153	0.00299	0.00225	0.00028
ตะกั่ว (Pb)	0.00467	0.01696	0.00739	0.00144
เทลลูเรียม (Tl)	0.00062	0.00325	0.00153	0.00055
ทอเรียียม (Th)	0.00038	0.00201	0.00095	0.00034

จากตารางที่ 2.8 พบว่า โลหะหนักที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก คือ

อันดับที่ 1 อะลูมิเนียม (Al) ($\bar{X} = 0.01239$, SD 0.00164)

อันดับที่ 2 แคดเมียม (Cd) ($\bar{X} = 0.01079$, SD 0.00265)

อันดับที่ 3 เงิน (Ag) ($\bar{X} = 0.00998$, SD 0.00131)

อันดับที่ 4 ปรอท (Hg) ($\bar{X} = 0.00785$, SD 0.00296)

อันดับที่ 5 บิสมัท (Bi) ($\bar{X} = 0.00775$, SD 0.00189)

ทั้งนี้ อะลูมิเนียมและแคดเมียม เป็นโลหะหนัก 2 ชนิดที่พบในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกลางที่ผู้ผลิตเครื่องได้กำหนดค่าไว้ที่ 0.01000 ในทางกลับกัน โลหะหนักที่พบน้อยที่สุดคือ ทอเรียม (Th) ($\bar{X} = 0.00095$, SD 0.00034)

2.7.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและเกลือแร่

ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและเกลือแร่ นั้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) จะถูกนำมาคำนวณและค่าที่ได้จะนำมาใช้ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณจะมีพิสัยอยู่ระหว่าง +1.0 ถึง -1.0 เครื่องหมายบวก (+) หรือลบ (-) จะแสดงทิศทางของความสัมพันธ์ ค่าที่ได้จะแสดงถึงขนาดของความสัมพันธ์ของตัวแปร ค่า +1.0 แสดงถึงความสัมพันธ์กันอย่างมากในทิศทางเดียวกัน ค่า 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน และค่า -1.0 แสดงถึงความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม

สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้หาขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณ 2 ตัว ที่มีการวัดแบบภาคชั้น (Interval Scale) หรือ อัตราส่วน (Ratio Scale) เนื่องจากผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (OligoScan) เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ที่มีระดับการวัดแบบอัตราส่วน สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันจึงถูกเลือกมาใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและเกลือแร่ การแปลความหมายว่าตัวแปรทั้งสองสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด จะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไปเทียบกับเกณฑ์ดังนี้⁽⁴¹⁾

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ขนาดความสัมพันธ์
0.81 – 1.00	มีความสัมพันธ์กันมาก
0.51 – 0.80	มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
0.21 – 0.50	มีความสัมพันธ์กันน้อยหรือต่ำ
0.01 – 0.20	มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก
0.00	ไม่มีความสัมพันธ์กัน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและเกลือแร่ในงานทบทวนวรรณกรรมนี้จะมุ่งเน้นและให้ความสำคัญไปที่โลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ 5 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม สารหนู แคดเมียม ปรอท และตะกั่ว และเกลือแร่ที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย 6 ชนิด ได้แก่ ซีลีเนียม ทองแดง สังกะสี เหล็ก ไอโอดีน และซีลีเนียม

2.7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอะลูมิเนียม (Al) และเกลือแร่

จากผลการตรวจของผู้เข้ารับบริการทั้งหมด 597 คน สามารถจำแนกจำนวนคน ร้อยละ ตามระดับเกณฑ์ค่าอะลูมิเนียม ได้ดังนี้

ระดับเกณฑ์	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ปกติ (Normal)	0	0.00
ค่อนข้างสูง (High -)	31	5.19
สูง (High +)	527	88.27
สูงเกินไป (Excess)	39	6.53
รวม	597	100.00

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ไม่มีผู้เข้ารับการตรวจคนใดเลยที่มีค่าอะลูมิเนียมอยู่ในเกณฑ์ปกติ ร้อยละ 88.27 มีค่าอยู่ในเกณฑ์สูง และร้อยละ 6.53 อยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป

ตารางที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอะลูมิเนียม (Al) และเกลือแร่

เกลือแร่	All Case	Al > 0.01000
ซีลีเนียม (Se)	0.213(**)	0.191(**)
ไอโอดีน (I)	-0.067	-0.095(*)
สังกะสี (Zn)	0.294(**)	0.295(**)
ทองแดง (Cu)	0.300(**)	0.287(**)
เหล็ก (Fe)	0.272(**)	0.280(**)
ซิลิคอน (Si)	-0.642(**)	-0.646(**)
N	597	566

** มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 2.9 พบว่า อะลูมิเนียมมีความสัมพันธ์กับซิลิคอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.642 มีขนาดความสัมพันธ์กันปานกลางในทิศทางตรงกันข้าม และเมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มผู้ที่มีค่าอะลูมิเนียมในเกณฑ์สูงถึงสูงเกินไป

(AI > 0.01000) พบว่า อะลูมิเนียมยังคงมีความสัมพันธ์กับซัลฟอนในทิศทางตรงกันข้ามและมีขนาดความสัมพันธ์กันปานกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.646 แสดงว่า คนที่มีอะลูมิเนียมสะสมในร่างกายมาก จะมีปริมาณซัลฟอนในร่างกายน้อย

จากผลความสัมพันธ์ระหว่างอะลูมิเนียมกับซัลฟอนที่ได้ มีความสอดคล้องกับหลายการศึกษาที่ระบุว่าซัลฟอนอาจมีบทบาทที่สำคัญในการป้องกันพิษที่เกิดจากอะลูมิเนียม บางการศึกษาพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างอะลูมิเนียมและซัลฟอน ที่ว่าซัลฟอนสามารถกำจัดอะลูมิเนียมในน้ำได้และมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดลักษณะเช่นเดียวกันในร่างกาย⁽³⁵⁾ มีการศึกษาหนึ่งพบว่าการดื่มน้ำแร่ที่อุดมไปด้วยซัลฟอนมากกว่า 1 ลิตรต่อวัน ติดต่อกันเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ในผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์ พบว่าสามารถขับอะลูมิเนียมออกทางปัสสาวะได้ดีและไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของไตที่จำเป็นอื่น ๆ ออกทางปัสสาวะไปด้วย เช่น เหล็กและทองแดง⁽³³⁾ อีกหนึ่งการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการรับประทานซัลฟอนเสริมอาจมีประโยชน์ในการรักษาและป้องกันการสะสมอะลูมิเนียมในสมองได้⁽³⁴⁾

2.7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียม (Cd) และเกลือแร่

จากผลการตรวจของผู้เข้ารับบริการทั้งหมด 597 คน สามารถจำแนกจำนวนคน ร้อยละตามระดับเกณฑ์ค่าแคดเมียม ได้ดังนี้

ระดับเกณฑ์	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ปกติ (Normal)	0	0.00
ค่อนข้างสูง (High -)	252	42.21
สูง (High +)	320	53.60
สูงเกินไป (Excess)	25	4.19
รวม	597	100.00

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ไม่มีผู้เข้ารับการตรวจคนใดเลยที่มีค่าแคดเมียมอยู่ในเกณฑ์ปกติ ร้อยละ 42.21 และ 53.60 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูงและสูง ตามลำดับ และร้อยละ 4.19 อยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป

ตารางที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียม (Cd) และเกลือแร่

เกลือแร่	All Case	Cd > 0.01000	Cd > 0.01500
ซีลีเนียม (Se)	-0.263(**)	-0.340(**)	0.058
ไอโอดีน (I)	-0.012	-0.096	0.289
สังกะสี (Zn)	-0.252(**)	0.005	-0.526(**)
ทองแดง (Cu)	-0.256(**)	0.002	-0.365
เหล็ก (Fe)	-0.169(**)	0.083	-0.342
ซิลิคอน (Si)	0.282(**)	0.128(*)	-0.161
N	597	345	25

** มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 2.10 พบว่า แคดเมียมมีความสัมพันธ์กับซีลีเนียม ทองแดง และสังกะสี ในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีขนาดความสัมพันธ์กันน้อย มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.263, -0.256 และ -0.252 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในกลุ่มคนที่มีค่าแคดเมียมอยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป (Cd > 0.01500) พบว่า แคดเมียมจะมีความสัมพันธ์เฉพาะกับสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ในทิศทางตรงกันข้าม และมีขนาดความสัมพันธ์กันปานกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.526 แสดงว่า คนที่มีแคดเมียมสะสมในร่างกายสูง จะมีปริมาณสังกะสีในร่างกายต่ำ

จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้ มีความสอดคล้องกับการศึกษาหนึ่งในบัลแกเรีย ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับแคดเมียมในเลือดและระดับสังกะสีในเลือด ในประชากรผู้สูงอายุที่ไม่สูบบุหรี่ อาศัยในหมู่บ้าน 3 แห่ง ที่เต็มไปด้วยมลพิษทางอากาศ พบว่า ผู้สูงอายุเกินกว่าครึ่งมีระดับแคดเมียมในเลือดสูงกว่าเกณฑ์ (มากกว่า 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) และมีระดับสังกะสีในเลือดต่ำกว่าเกณฑ์ (น้อยกว่า 440 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร) และเมื่อนำผลการตรวจมาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ได้ค่าเท่ากับ -0.44 ซึ่งมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01⁽³⁶⁾

นอกจากนี้ มีหลายการศึกษาที่ระบุว่า การได้รับหรือสัมผัสกับแคดเมียมส่งผลให้เกิดการรบกวนสังกะสีในร่างกาย ในขณะที่การบริโภคอาหารที่มีสังกะสีก็มีผลสำคัญต่อการดูดซึมการสะสม และความเป็นพิษของแคดเมียมเช่นกัน มีข้อมูลมากมายแสดงให้เห็นว่าการทานสังกะสีเสริมสามารถลดการดูดซึม การสะสม ป้องกันหรือลดอาการไม่พึงประสงค์จากพิษของแคดเมียมได้ และภาวะขาดสังกะสีสามารถทำให้การสะสมและความเป็นพิษของแคดเมียมรุนแรงยิ่งขึ้น⁽³⁷⁾

2.7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปรอท (Hg) และเกลือแร่

จากผลการตรวจของผู้เข้ารับบริการทั้งหมด 597 คน สามารถจำแนกจำนวนคน ร้อยละ ตามระดับเกณฑ์ค่าปรอท ได้ดังนี้

ระดับเกณฑ์	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ปกติ (Normal)	93	15.58
ค่อนข้างสูง (High -)	388	64.99
สูง (High +)	104	17.42
สูงเกินไป (Excess)	12	2.01
รวม	597	100.00

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ร้อยละ 15.58 ของผู้รับการตรวจที่มีค่าปรอทอยู่ในเกณฑ์ปกติ ร้อยละ 64.99 และ 17.42 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูงและสูง ตามลำดับ และเพียงร้อยละ 2.01 อยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปรอท (Hg) และเกลือแร่

เกลือแร่	All Case	Hg > 0.01000
ซีลีเนียม (Se)	-0.523(**)	-0.724(**)
ไอโอดีน (I)	-0.187(**)	-0.294(**)
สังกะสี (Zn)	0.281(**)	0.155
ทองแดง (Cu)	0.285(**)	0.066
เหล็ก (Fe)	0.228(**)	0.083
ซิลิคอน (Si)	0.091(*)	0.096
N	597	116

** มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 11 พบว่า ปรอทมีความสัมพันธ์กับซีลีเนียมในทิศทางตรงกันข้าม ที่ขนาดความสัมพันธ์กันปานกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.523 และเมื่อพิจารณาในกลุ่มผู้ที่

มีค่าปรอทในเกณฑ์สูงถึงสูงเกินไป ($Hg > 0.01000$) พบว่า ปรอทยังคงมีความสัมพันธ์กับซีลีเนียม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์กันปานกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.724 แสดงว่า คนที่มีปรอทสะสมในร่างกายมาก จะมีปริมาณซีลีเนียมในร่างกายน้อย

จากผลความสัมพันธ์ระหว่างปรอทกับซีลีเนียมที่ได้ มีความสอดคล้องการศึกษาของ Parizek & Ostadalova ในปี 1967 ซึ่งเป็นการศึกษาแรกที่แสดงให้เห็นว่าซีลีเนียมมีความสามารถในการป้องกันพิษเฉียบพลันของปรอทได้ โดยการไปยับยั้งและกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดจากปรอท พิษของปรอทสามารถก่อให้เกิดภาวะขาดซีลีเนียม โดยการไปขัดขวางบทบาทหน้าที่ของซีลีเนียมในการควบคุมปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในเซลล์ การให้ซีลีเนียมเสริมในปริมาณที่เหมาะสมสามารถฟื้นฟูการทำงานของซีลีเนียมในการป้องกันพิษจากปรอทได้⁽⁴⁰⁾ มีการศึกษาหนึ่งที่ประเทศจีนในประชากรที่มีการสัมผัสสารปรอทเป็นเวลานานในพื้นที่ที่เคยเป็นเหมืองแร่ปรอทมาก่อน โดยการให้ซีลีเนียมเสริม 100 ไมโครกรัมต่อวัน เป็นเวลา 3 เดือน พบว่า สามารถขับปรอทออกทางปัสสาวะได้ดีและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 90⁽³⁸⁾

มีรายงานผู้ป่วยรายหนึ่งในสหรัฐอเมริกา มีภาวะพิษจากการสัมผัสไอปรอทแบบเฉียบพลัน ผู้ป่วยได้รับการคีเลชันบำบัดด้วยสาร DMSA ไป 21 วัน ปรากฏว่าอาการเป็นพิษรุนแรงไม่ดีขึ้น แต่เมื่อให้ซีลีเนียมเสริม 500 ไมโครกรัมต่อวัน ควบคู่กับ N-acetylcysteine (NAC) 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน ติดต่อกันเป็นเวลา 8 เดือน พบว่า สามารถขับปรอทออกทางปัสสาวะได้เพิ่มมากขึ้นและผู้ป่วยมีอาการดีขึ้นตามลำดับ⁽³⁹⁾

2.7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสารหนู (As) และเกลือแร่

จากผลการตรวจของผู้เข้ารับบริการทั้งหมด 597 คน สามารถจำแนกจำนวนคน ร้อยละ ตามระดับเกณฑ์ค่าสารหนู ได้ดังนี้

ระดับเกณฑ์	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ปกติ (Normal)	356	59.63
ค่อนข้างสูง (High -)	129	21.61
สูง (High +)	112	18.76
สูงเกินไป (Excess)	0	0.00
รวม	597	100.00

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ผู้เข้ารับการตรวจเกินกว่าครึ่ง หรือร้อยละ 59.63 มีปริมาณสารหนูอยู่ในเกณฑ์ปกติ ร้อยละ 18.76 ที่มีค่าสารหนูในเกณฑ์สูง และไม่มีผู้เข้ารับการตรวจคนใดเลยมีค่าสารหนูอยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป

ตารางที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนู (As) และเกลือแร่

เกลือแร่	All Case	As > 0.01000
ซีลีเนียม (Se)	0.002	-0.331(**)
ไอโอดีน (I)	0.044	0.073
สังกะสี (Zn)	-0.376(**)	0.502(**)
ทองแดง (Cu)	-0.369(**)	0.509(**)
เหล็ก (Fe)	-0.443(**)	0.041
ซิลิคอน (Si)	0.256(**)	-0.059
N	597	112

** มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 2.12 พบว่า สารหนูมีความสัมพันธ์กับเหล็ก สังกะสี และทองแดง ในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีขนาดความสัมพันธ์กันน้อย มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.443,

-0.376 และ -0.369 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในกลุ่มผู้ที่มีค่าสารหนูในเกณฑ์สูงถึงสูงเกินไป ($A_s > 0.01000$) พบว่า สารหนูมีความสัมพันธ์เฉพาะกับซีลีเนียมเท่านั้น ในทิศทางตรงกันข้ามและมีขนาดความสัมพันธ์กันน้อย มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.331

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทั้งหมดที่ได้ สรุปได้ว่า ยังไม่พบความสัมพันธ์ใด ๆ อย่างชัดเจนระหว่างสารหนูกับเกลือแร่ทั้ง 6 ชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผู้เข้ารับการตรวจส่วนใหญ่มีค่าสารหนูอยู่เกณฑ์ปกติ และไม่มีผู้เข้ารับการตรวจคนใดเลยที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป

2.7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตะกั่ว (Pb) และเกลือแร่

จากผลการตรวจของผู้เข้ารับบริการทั้งหมด 597 คน สามารถจำแนกจำนวนคน ร้อยละ ตามระดับเกณฑ์ค่าตะกั่ว ได้ดังนี้

ระดับเกณฑ์	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ปกติ (Normal)	8	1.34
ค่อนข้างสูง (High -)	586	98.16
สูง (High +)	2	0.34
สูงเกินไป (Excess)	1	0.17
รวม	597	100.00

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า ส่วนใหญ่ ร้อยละ 98.16 ของผู้เข้ารับการตรวจมีค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง โดยมีเพียงร้อยละ 0.17 หรือ 1 คน ที่มีค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์สูงเกินไป และร้อยละ 0.34 หรือ 2 คน ที่มีค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์สูง

ตารางที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตะกั่ว (Pb) และเกลือแร่

เกลือแร่	All Case	Pb > 0.01000
ซีลีเนียม (Se)	-0.044	-0.003
ไอโอดีน (I)	-0.069	-0.976
สังกะสี (Zn)	-0.009	0.836
ทองแดง (Cu)	0.024	-0.384
เหล็ก (Fe)	0.008	-0.593
ซิลิคอน (Si)	-0.007	0.782
N	597	3

** มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 2.13 สรุปได้ว่า ไม่พบความสัมพันธ์ใด ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง ตะกั่วและเกลือแร่ที่จำเป็นทั้ง 6 ชนิด และเมื่อพิจารณาในกลุ่มคนที่มีค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูง เกินไป (Pb > 0.01000) ซึ่งมีอยู่เพียง 3 รายนั้น ก็ไม่พบความสัมพันธ์ใด ๆ เลยเช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็น เพราะผู้เข้ารับการตรวจเกือบทั้งหมดหรือร้อยละ 99 มีค่าตะกั่วอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ามาตรฐานกลาง ของเครื่องที่กำหนดไว้ที่ค่า 0.01000

บทที่ 3

สรุป (Conclusion)

ในปัจจุบันที่การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ ในดิน และในน้ำ การใช้ชีวิตประจำวันในยุคนี้จึงมีความเสี่ยงที่จะรับเอาโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายได้ตลอดเวลา ทั้งจากสถานที่ทำงานหรือแม้แต่ภายในบ้าน พิษจากโลหะหนักเป็นอันตรายต่อสุขภาพแม้จะสัมผัสในปริมาณเพียงเล็กน้อย การป้องกันไม่ให้โลหะหนักเข้าสู่ร่างกายจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก การตรวจโลหะหนักจึงมีความจำเป็นทั้งในแง่เพื่อประเมินความเสี่ยงในกรณีของคนทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม และในแง่เพื่อดูแลสุขภาพในเชิงป้องกัน

การตรวจโลหะหนักแบบมาตรฐาน จะใช้วิธีการตรวจจากเลือด ปัสสาวะ และเส้นผม โดยเทคนิคที่เป็นที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุด เรียกว่า ICP-MS สามารถตรวจวัดปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้พร้อมกันภายใน 1 ครั้ง ช่วยประหยัดระยะเวลาในการตรวจ มีความไวและขีดความสามารถในการตรวจจับสูง และใช้ปริมาณสารตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย ด้วยประสิทธิภาพที่สูงของเทคนิคนี้จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการตรวจที่ค่อนข้างสูง ราคาตามจำนวนชนิดโลหะหนักที่ต้องการตรวจ ถึงแม้การตรวจแบบมาตรฐานจะมีเทคนิคอื่นที่มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงกว่า แต่ด้วยข้อจำกัดที่วิเคราะห์ได้ที่ละชนิด จึงเหมาะสำหรับคนที่ทราบชนิดโลหะหนักที่ตนมีความเสี่ยง^(24,30) นอกจากนี้การตรวจโลหะหนักจากเลือด อาจไม่เหมาะกับการตรวจหาโลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู เนื่องจากสารหนูจะอยู่ในกระแสเลือดไม่กี่ชั่วโมง และไม่เหมาะสำหรับผู้ที่มีการสัมผัสโลหะแบบเรื้อรัง การตรวจจากปัสสาวะ ไม่เหมาะสำหรับคนที่มีปัญหาเกี่ยวกับไต ส่วนการตรวจจากเส้นผม อาจไม่เหมาะสำหรับคนที่มีการข้อมสีผม เพราะสารเคมีที่ย้อมทำให้ผลตรวจคาดเคลื่อนได้⁽⁶⁾ อย่างไรก็ตามการตรวจแบบมาตรฐาน เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการผลที่แม่นยำและน่าเชื่อถือสูง เพื่อเป็นการยืนยันผลแบบทางการสำหรับนำไปสู่กระบวนการรักษาต่อไปหรือใช้ในทางกฎหมาย

การตรวจแบบคัดกรองเบื้องต้นด้วยเครื่อง OligoScan จึงเป็นอีกทางเลือกที่ตอบโจทย์ในการตรวจครั้งเดียว ทราบผลเร็ว ประหยัดเวลา ราคาคุ้มค่า ไม่ต้องเก็บตัวอย่าง ไม่ต้องเจ็บตัวเหมาะสำหรับคนที่กลัวเข็ม ทราบผลโลหะหนักถึง 14 ชนิด และเกลือแร่อีก 20 ชนิด ได้อย่างครบถ้วน เหมาะในการนำไปใช้วางแผนการดูแลสุขภาพในเชิงป้องกัน หรือใช้ในการรักษาได้อย่างตรงจุด เช่น ทำคีเลชั่นกรณีที่มีโลหะหนักเกินเกณฑ์ หรือให้เกลือแร่เสริมในกรณีที่พบภาวะพร่อง นอกจากนี้ เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อโลหะหนักเข้าสู่ร่างกาย จะไหลเวียนในกระแสเลือดอยู่ระยะเวลา

หนึ่ง จากนั้นจะเกิดการสะสมตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย⁽⁶⁾ การตรวจโลหะหนักที่ฝ่ามือจึงอาจเป็นการตรวจที่เหมาะสมสำหรับคนที่มีการสัมผัสโลหะหนักแบบเรื้อรังเป็นเวลานาน ดังนั้นการพิจารณาเลือกการตรวจโลหะหนักแบบมาตรฐานหรือแบบคัดกรองเบื้องต้นนั้น ควรจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการตรวจ ระยะเวลาที่ใช้ตรวจ รวมถึงค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการตรวจ

ในการศึกษาครั้งต่อไป อาจมีการเก็บข้อมูลอาชีพ วิถีชีวิตประจำวันของผู้ที่เข้ารับการตรวจ เช่น การสูบบุหรี่ การดื่มแอลกอฮอล์ การดื่มชา กาแฟหรือนมวัว การบริโภควิตามินอาหารเสริม การทานยาลดกรด จำนวนชั่วโมงการนอนต่อวัน รวมถึงเก็บบันทึกข้อมูลอาการที่ไม่เฉพาะเจาะจงไม่ทราบสาเหตุ เช่น เหนื่อยอ่อนเพลียง่าย นอนไม่ค่อยหลับ เป็นภูมิแพ้หรือลมพิษง่าย ปวดศีรษะบ่อย เป็นต้น และนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ร่วมกับผลตรวจโลหะหนักและเกลือแร่ที่ได้จากเครื่อง OligoScan เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมช่วยในการแปลผลการตรวจต่อไป



ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติแต่ละเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์หาโลหะหนัก^(24,30,31)

	FAAS	GFAAS	HGAAS	ICP-MS	ICP-AES	XRF	ASV	UV/Visible Spectrophotometry
หลักการในการตรวจจับ	ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ	ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ	ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ	สัดส่วนมวลต่อประจุ	ปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ	เรืองแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ	กระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า	ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ
ประเภทของการวิเคราะห์	มาตรฐาน	มาตรฐาน	มาตรฐาน	มาตรฐาน	มาตรฐาน	มาตรฐาน	มาตรฐาน และ คัดกรอง	มาตรฐาน และ คัดกรอง
ความไวในการตรวจจับ	10^{-7}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-9}	-	10^{-8}	-
ความสามารถในการวิเคราะห์	ได้ทีละธาตุ	ได้ทีละธาตุ	ได้ทีละธาตุ	ได้ทีละหลายธาตุ	ได้ทีละหลายธาตุ	ได้ทีละหลายธาตุ	ได้ทีละธาตุ	ได้ทีละธาตุ / ได้ทีละหลายธาตุ
อาศัยทักษะความชำนาญ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความเร็วในการวิเคราะห์	10-15 วินาทีต่อธาตุ	5-6 นาทีต่อธาตุ	30-50 วินาทีต่อธาตุ	ทุกธาตุใน 1 นาที	60 ธาตุใน 1 นาที	5-15 นาที ต่อตัวอย่าง	3 นาทีต่อธาตุ	ทุกธาตุใน 3 นาที
ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้	มาก	น้อย	มาก	น้อย	ปานกลาง	น้อย	น้อย	ไม่ต้องการ
แบบชนิดพกพา	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	มี	มี	มี
ชื่อตัวอย่างยี่ห้อเครื่อง	Perkin Elmer	Perkin Elmer	Varian	Perkin Elmer	Perkin Elmer	Bruker	LeadCare	OligoScan

หมายเหตุ. FAAS = Flame Atomic Absorption Spectrometry; GFAAS = Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry; HGAAS = Hydride

Generation Atomic Absorption Spectrometry; ICP-MS = Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; ICP-AES = Inductively Coupled Plasma Atomic

Emission Spectrometry; XRF = X-ray Fluorescence; ASV = Anodic Stripping Voltammetry



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Masindi V, Muedi KL. Environmental contamination by heavy metals. In: Heavy Metals. InTech; 2018.
2. Cimboláková I, Uher I, Veszelits Laktičová K, Vargová M, Kimáková T, Papajová I. Heavy metals and the environment. In: Environmental Factors Affecting Human Health. IntechOpen; 2020.
3. Balali-Mood M, Naseri K, Tahergorabi Z, Khazdair MR, Sadeghi M. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. Vol. 12, *Frontiers in Pharmacology*. Frontiers Media S.A.; 2021.
4. Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. Vol. 6, *Heliyon*. Elsevier Ltd; 2020.
5. Järup L. Hazards of heavy metal contamination. Vol. 68, *British Medical Bulletin*. 2003. p. 167–82.
6. Keil DE, Berger-Ritchie J, McMillin GA. Testing for toxic elements: A focus on arsenic, cadmium, lead, and mercury. *Laboratory Medicine*. 2011 Dec;42(12):735–42.
7. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. Vol. 7, *Interdisciplinary Toxicology*. Slovak Toxicology Society; 2014. p. 60–72.
8. Bernhoft RA. Mercury toxicity and treatment: A review of the literature. Vol. 2012, *Journal of Environmental and Public Health*. Hindawi Publishing Corporation; 2012.
9. Hachiya N. The history and the present of Minamata disease. Vol. 49, *JMAJ*. 2006.
10. Fatima G, Raza AM, Hadi N, Nigam N, Mahdi AA. Cadmium in human diseases: It's More than Just a Mere Metal. Vol. 34, *Indian Journal of Clinical Biochemistry*. Springer; 2019. p. 371–8.
11. Bernhoft RA. Cadmium toxicity and treatment. Vol. 2013, *The Scientific World Journal*. 2013.
12. Papanikolaou NC, Hatzidaki EG, Belivanis S, Tzanakakis GN, Tsatsakis AM. Lead toxicity update. A brief review. *Med Sci Monit*. 2005;11(10):RA329–36. 16192916.

13. Crisponi G, Fanni D, Gerosa C, Nemolato S, Nurchi VM, Crespo-Alonso M, et al. The meaning of aluminium exposure on human health and aluminium-related diseases. Vol. 4, *Biomolecular Concepts*. 2013. p. 77–87.
14. Igbokwe IO, Igwenagu E, Igbokwe NA. Aluminium toxicosis: A review of toxic actions and effects. *Interdisciplinary Toxicology*. 2020;12(2):45–70.
15. Azeh Engwa G, Udoka Ferdinand P, Nweke Nwalo F, N. Unachukwu M. Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans. In: *Poisoning in the Modern World - New Tricks for an Old Dog?* IntechOpen; 2019.
16. Jan AT, Azam M, Siddiqui K, Ali A, Choi I, Haq QMR. Heavy metals and human health: Mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. Vol. 16, *International Journal of Molecular Sciences*. MDPI AG; 2015. p. 29592–630.
17. Phenrat T, Otwong A, Chantharit A, Lowry G v. Ten-year monitored natural recovery of lead-contaminated mine tailing in Klity Creek, Kanchanaburi Province, Thailand. Vol. 124, *Environmental Health Perspectives*. Public Health Services, US Dept of Health and Human Services; 2016. p. 1511–20.
18. Williams M, Fordyce F, Pajitprapapon A, Charoenchaisri P. Arsenic contamination in surface drainage and groundwater in part of the southeast Asian tin belt, Nakhon Si Thammarat Province, southern Thailand. Vol. 27, *Environmental Geology*. Springer-Verlag; 1996.
19. ATSDR. Toxicological profile for mercury. 1999.
20. ATSDR. Toxicological profile for arsenic. 2007.
21. ATSDR. Toxicological profile for aluminum. 2008.
22. ATSDR. Toxicological profile for cadmium. 2012.
23. ATSDR. Toxicological profile for lead. 2020.
24. Wilschefski SC, Baxter MR. Inductively coupled plasma mass spectrometry: Introduction to analytical aspects. *Clinical Biochemist Reviews*. 2019;40(3):115–33.
25. Chitturi R, Baddam VR, Prasad L, Prashanth L, Kattapagari K. A review on role of essential trace elements in health and disease. *Journal of Dr NTR University of Health Sciences*. 2015;4(2):75.

26. Mehri A. Trace elements in human nutrition (II) - An update. Vol. 11, International Journal of Preventive Medicine. Wolters Kluwer Medknow Publications; 2020.
27. Bhattacharya PT, Misra SR, Hussain M. Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: an extensive review. Vol. 2016, Scientifica. Hindawi Limited; 2016.
28. Sahin D. Atomic spectroscopy. In: Modern Spectroscopic Techniques and Applications. IntechOpen; 2020.
29. Sanz-Medel A, Costa JM, Pereiro R. Atomic spectrometry. In: Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Elsevier; 2013.
30. Bolann BJ, Rahil-Khazen R, Henriksen H, Isrenn R, Ulvik RJ. Evaluation of methods for trace-element determination with emphasis on their usability in the clinical routine laboratory. Vol. 67, Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation. 2007. p. 353–66.
31. Helaluddin ABM, Khalid RS, Alaama M, Abbas SA. Main analytical techniques used for elemental analysis in various matrices. Vol. 15, Tropical Journal of Pharmaceutical Research. University of Benin; 2016. p. 427–34.
32. Majewska U, Banas D, Braziewicz J, Kubala-Kukus A, Pajeka M, Sychowska I, et al. X-Ray fluorescence techniques in medical applications: Reference values of elements in human serum, urine and hair. *Acta Physica Polonica A*. 2014;125(4):864–8.
33. Davenward S, Bentham P, Wright J, Crome P, Job D, Polwart A, et al. Silicon-rich mineral water as a non-invasive test of the “aluminum hypothesis” in Alzheimer’s disease. *Journal of Alzheimer’s Disease*. 2013;33(2):423–30.
34. Domingo JL, Gómez M, Colomina MT. Oral silicon supplementation: An effective therapy for preventing oral aluminum absorption and retention in mammals. *Nutrition Reviews*. 2011 Jan;69(1):41–51.
35. Pourgheysari H, Hajizadeh Y, Tarrahi MJ, Ebrahimi A. Association between aluminum and silicon concentrations in isfahan drinking water and their health risk assessments. *International Journal of Preventive Medicine*. 2015 Nov 12;2015-NOVEMBER.
36. Gidikova PL. Blood Lead, Cadmium and zinc correlations in elderly rural residents. *Folia medica*. 2019 Mar 1;61(1):113–9.

37. Brzo'skabrze'ska MM, Moniuszko-Jakoniuk J. Interactions between cadmium and zinc in the organism. *Food and Chemical Toxicology* 39. 2001. p. 967-980.
38. Li YF, Dong Z, Chen C, Li B, Gao Y, Qu L, et al. Organic selenium supplementation increases mercury excretion and decreases oxidative damage in long-term mercury-exposed residents from Wanshan, China. *Environmental Science and Technology*. 2012 Oct 16;46(20):11313–8.
39. Spiller HA, Hays HL, Burns G, Casavant MJ. Severe elemental mercury poisoning managed with selenium and N-acetylcysteine administration. *Toxicology Communications*. 2017 Jan;1(1):24–8.
40. Spiller HA. Rethinking mercury: the role of selenium in the pathophysiology of mercury toxicity. Vol. 56, *Clinical Toxicology*. Taylor and Francis Ltd; 2018. p. 313–26.
41. Best JW. *Research in education*. 3rd ed. New York: Prentice-Hall Inc.; 1977.
42. OligoScan [Internet]. 2016 [cited 2021 Jun 21]. Available from: <http://oligoscan.fr/lg/en/index.html>
43. Nuskin pharmanex s3 scanner [Internet]. 2021 [cited 2021 Aug 3]. Available from: https://www.nuskin.com/en_US/products/pharmanex/scanner/s3_what.html
44. Prevu skin cholesterol test [Internet]. 2021 [cited 2021 Aug 3]. Available from: <https://skincholesterol.weebly.com/skin-cholesterol.html>
45. Leadcare [Internet]. 2021 [cited 2021 Aug 3]. Available from: <https://www.magellandx.com/>
46. The Perkin-Elmer Corporation. *Analytical methods for atomic absorption spectroscopy*. United States of America; 1996
47. Chen L, Tian X, Xia D, Nie Y, Lu L, Yang C, et al. Novel colorimetric method for simultaneous detection and identification of multimetal Ions in water: sensitivity, selectivity, and recognition mechanism. *ACS Omega*. 2019 Mar 27;4(3):5915–22.
48. Upstone SL. Ultraviolet/visible light absorption spectrophotometry in clinical chemistry. In: *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd; 2006.
49. Dileep D. Spectrophotometry and spectrometry – concept and applications [Internet]. Vol. 2. Available from: www.ijariie.com

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ประวัติการศึกษา

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

กฤษฎดา ติยะมณี โรจน์

พ.ศ. 2543 วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาฟิสิกส์)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2546 Master of Computer Engineering

RMIT University, Melbourne, Australia

ผู้จัดการทั่วไปบริษัท รีเสิร์ช อินเทลลิเจนซ์ จำกัด

