TR2R Trends in Routine to Research
Trends in Routine to Research 2026; 1(2): 27
DJMP Center for Digital Journal Management & Multidisciplinary Academic Platform
https://doi.org/10.48048/tr2r.2026.27
RESEARCH ARTICLE

การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

วรินญา หนูแจ่ม

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

(อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: nnantawa@gmail.com)

Received: 27 December 2025, Revised: 16 February 2026, Accepted: 26 February 2026, Published: 3 March 2026

บทคัดย่อ

ห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 เป็นแหล่งกำเนิดของเสียอันตรายกลุ่มโลหะหนักที่มีความเสี่ยงสูง และมีต้นทุนการกำจัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษานี้จึงมุ่งประยุกต์ใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) ร่วมกับแนวคิด ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อพัฒนาระบบการจัดการของเสียให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยของประเทศไทย (Enhancement of Safety Practice in Research Laboratory in Thailand, ESPReL) การศึกษาดำเนินการ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ระหว่างเดือนมกราคม 2565 ถึงตุลาคม 2567 โดยใช้ ICP-OES เป็นเครื่องมือตรวจคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการของเสียก่อนส่งกำจัด เพื่อจำแนกและประเมินศักยภาพการนำกลับมาใช้ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่า จากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด 1,023 ลิตร กระบวนการคัดกรองด้วย ICP-OES สามารถจำแนกของเสียที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) ได้ถึง 635 ลิตร (ร้อยละ 62.07) แยกของเสียที่มีความเข้มข้นสูงเกินมาตรฐานเพื่อส่งกำจัดอย่างถูกต้องจำนวน 372 ลิตร (ร้อยละ 36.36) และของเสียที่บำบัดเบื้องต้นก่อนลงระบบบำบัด 16 ลิตร กระบวนการนี้ส่งผลให้ลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดได้ 651 ลิตร (ร้อยละ 63.64) ก่อให้เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์รวม 98,229 บาท จากการลดค่ากำจัดของเสีย 27,863 บาท และลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี 70,367 บาท ในด้านคุณภาพพบว่า คะแนนประเมินความปลอดภัยตามมาตรฐาน ESPReL เพิ่มขึ้นร้อยละ15.2 (จากร้อยละ 77.6 เป็น 92.8) และผ่านการประเมิน Peer Evaluation ที่ระดับร้อยละ 100 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการจัดการนี้สามารถยกระดับความปลอดภัย สร้างความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ และส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: ของเสียอันตราย; ESPReL; ตรวจคัดกรองด้วย ICP-OES; การนำกลับมาใช้ซ้ำ; การลดของเสีย; การพัฒนาที่ยั่งยืน

Application of ICP-OES Integrated with the ECRS Principles for the Development of a Heavy Metal Waste Management System in Elemental Analysis Laboratory 2, The Center for Scientific and Technological Equipment, Walailak University

Warinya Nhoocham

The Center for Scientific and Technological Equipment, Walailak University, Thasala, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

(Corresponding author's e-mail: nnantawa@gmail.com)

Abstract

Elemental Analysis Laboratory 2 is a significant source of hazardous heavy metal waste, presenting environmental risks and escalating disposal costs. This study aimed to develop a sustainable waste management system by applying Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) integrated with ECRS principles (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) to optimize operations in compliance with the Enhancement of Safety Practice in Research Laboratory in Thailand (ESPReL) standards. Conducted at the Center for Scientific and Technological Equipment, Walailak University, from January 2022 to October 2024, the research employed ICP-OES as a screening and decision-support tool for waste management prior to disposal, enabling accurate classification and assessment of reuse potential. The findings revealed that out of 1,023 liters of generated waste, the screening process successfully identified 635 liters (62.07%) as reusable. Only 372 liters (36.36%) contained heavy metal concentrations exceeding safety limits and required external disposal, while 16 liters underwent pre-treatment prior to discharge. This segregation strategy reduced the volume of waste requiring disposal by 651 liters (63.64%). Economically, the initiative generated a total benefit of 98,229 THB, comprising 27,863 THB in avoided disposal costs and 70,367 THB in chemical cost savings. Qualitatively, laboratory safety performance improved substantially, with ESPReL compliance scores increasing by 15.2% (from 77.6% to 92.8%) and achieving a perfect score in 100% Peer Evaluation according to ESPReL assessment. These results demonstrate that integrating ICP-OES screening with systematic management protocols is a highly effective model for enhancing safety, improving economic efficiency, and promoting environmental sustainability in laboratory waste management.

Keywords: Hazardous waste; ESPReL; ICP-OES screening; Reuse; Waste reduction; Sustainable development

บทนำ

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เป็นหน่วยงานสนับสนุนและพัฒนาระบบบริการห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ภายใต้การบริหารจัดการแบบบูรณาการ โดยมีฝ่ายบริการและใช้ประโยชน์เครื่องมือเป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบให้ได้การรับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025 อย่างต่อเนื่อง ควบคู่การพัฒนาระบบมาตรฐานความปลอดภัยตามแนวทางโครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย (Enhancement of Safety Practice in Research Laboratory in Thailand, ESPReL) ให้สอดคล้องกับนโยบายมหาวิทยาลัยสีเขียวและแผนยุทธศาสตร์ระยะยาวของมหาวิทยาลัย

ห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 (Elemental Analysis Laboratory 2) สังกัดฝ่ายบริการและใช้ประโยชน์เครื่องมือ มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการการวิจัย การเรียนการสอน และการบริการวิชาการทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ โดยให้บริการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) ซึ่งเป็นเทคนิคมาตรฐานสากลที่วิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน มีความแม่นยำ ความเที่ยง และความไวสูง แม้ในตัวอย่างเมทริกซ์ซับซ้อน (Skoog et al., 2014; Khan et al., 2022; Douvris et al., 2023) จึงถูกใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงเทคนิคหลักทั้งในงานประจำและงานวิจัย

อย่างไรก็ดี การให้บริการดังกล่าวก่อให้เกิดของเสียอันตรายกลุ่มโลหะหนัก (Heavy-metal Hazardous Waste) อย่างต่อเนื่อง มีคุณสมบัติเป็นสารละลายกรดที่ปนเปื้อนด้วยไอออนของโลหะหนักมีพิษรุนแรง เช่น ตะกั่ว (Pb) สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (Cr-VI) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและเป็นพิษต่อระบบประสาท ไต และตับ แม้ได้รับในปริมาณเพียงเล็กน้อย สะสมในสิ่งแวดล้อมและไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม หากขาดระบบจัดการที่เหมาะสม (Rajoria et al., 2023; Xu, Jin & Zeng, 2024; Odumbe et al., 2023)

ด้วยความตระหนักถึงความเสี่ยงอันตรายดังกล่าว ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ธาตุ 2 ได้ดำเนินการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ ผลประเมินความปลอดภัยห้องปฏิบัติการตามกรอบ ESPReL องค์ประกอบที่ 3 พบประเด็นที่ต้องพัฒนา “การลดการเกิดของเสีย” สะท้อนว่าการจัดการเดิมยังเน้นการจัดเก็บและส่งกำจัดที่ปลายทางมากกว่าการควบคุมตั้งแต่ต้นทาง ส่งผลให้ปริมาณและค่ากำจัดของเสียเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังข้อมูลการจัดการของเสีย ศคว.ช่วงปี 2564 - 2567 แสดงปริมาณของเสียเพิ่มจาก 6.5 เป็น 8.0 ตัน และค่ากำจัดเพิ่มจาก 264,325 เป็น 342,400 บาท โดยของเสียโลหะหนักจากฝ่ายบริการฯ คิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 14.61 - 18.49 ในขณะที่พื้นที่จัดเก็บส่วนกลางมีข้อจำกัด ภาพรวมดังกล่าวชี้ว่าขาดมาตรการ “ลดของเสียที่ต้นทาง” จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพัฒนาปรับปรุงการจัดการของเสียให้ได้ผลลัพธ์การลดการเกิดของเสียอย่างเป็นรูปธรรม

งานวิจัยด้านการจัดการของเสียโลหะหนักในระดับสากลส่วนใหญ่ยังคงเน้นการบำบัดแบบปลายทาง โดยใช้วัสดุดูดซับ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ หรือกระบวนการทางเคมีเพื่อลดความเป็นพิษ (Kasalkar et al., 2025; Baharudin et al., 2025; Jasim & Ajjam, 2024; Dhenuka et al., 2025) แม้จะเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แต่ยังสร้างกากตะกอนทุติยภูมิ ใช้ทรัพยากรสูง และไม่เหมาะสมต่อบริบทห้องปฏิบัติการที่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนของระบบ

ขณะเดียวกัน บทบาทของ ICP-OES ในงานวิจัยซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายก็ยังถูกใช้เพียงเพื่อการรายงานผลเชิงวิเคราะห์ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม (Skoog et al., 2014; Khan et al., 2022; Douvris et al., 2023; Odumbe et al., 2023) มากกว่าจะถูกนำมาใช้เป็นกลไกเชิงระบบสำหรับลดการเกิดของเสียที่ต้นทาง (Source Reduction) โดยอาศัยข้อมูลเชิงวิเคราะห์เพื่อการตรวจคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจ

อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยด้านการจัดการของเสียโลหะหนักจะให้ความสำคัญกับการบำบัดหรือกำจัดของเสียที่ปลายทางอย่างกว้างขวาง แต่ยังไม่ปรากฏงานที่บูรณาการข้อมูลเชิงวิเคราะห์จาก ICP-OES เข้ากับกรอบการปรับปรุงกระบวนการเชิงระบบ ECRS เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องมือสำหรับลดการเกิดของเสียโลหะหนักตั้งแต่ต้นทาง ในบริบทห้องปฏิบัติการวิเคราะห์งานประจำภายใต้กรอบมาตรฐานความปลอดภัยการจัดการของเสียระบบ ESPReL

จากที่กล่าวมาสะท้อนความจำเป็นในการพัฒนาแนวทางใหม่ที่มิใช่การพัฒนาเทคนิค ICP-OES แต่เสนอการยกระดับบทบาทเครื่องมือวิเคราะห์พื้นฐานให้ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือตรวจคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจ (Screening and Decision-support Tool) สำหรับการจัดการของเสียเชิงป้องกัน ตามแนวคิดการจัดการของเสียที่ต้นทางของหลักการเคมีสีเขียวซึ่งเน้นการป้องกันการเกิดของเสีย (Anastas & Eghbali, 2010) โดยการบูรณาการประยุกต์ใช้ ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อปรับปรุงขั้นตอน ลดความสูญเปล่า และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงระบบ (Suhardi et al., 2019) ภายใต้กรอบมาตรฐานความปลอดภัยการจัดการของเสียตามระบบ ESPReL ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับห้องวิเคราะห์ที่มีของเสียปริมาณมากและมีความเสี่ยงสูง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS ในการพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนักของห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ โดยมุ่งตรวจคัดกรอง จำแนกของเสีย และประเมินศักยภาพการนำกลับมาใช้ซ้ำอย่างปลอดภัยผ่านเกณฑ์การตัดสินใจตามค่าขีดจำกัด (Threshold-based Rule) ตามมาตรฐานน้ำทิ้งร่วมกับข้อมูลแหล่งกำเนิด เพื่อสร้างระบบการตัดสินใจเชิงป้องกันแทนการพึ่งพาการบำบัดปลายทางเหมือนงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งเป็นการยกระดับ ICP-OES ไปสู่เครื่องมือตรวจคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจอย่างชัดเจน

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือการลดการเกิดของเสียโลหะหนักที่ต้นทาง ลดต้นทุนการส่งกำจัดและสารเคมี เพิ่มประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ ยกระดับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ และสนับสนุนการจัดการของเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสอดคล้องกับ SDGs รวมถึงมีศักยภาพในการขยายผลสู่ห้องปฏิบัติการอื่นที่ใช้ ICP-OES หรือเทคนิควิเคราะห์โลหะหนักที่คล้ายคลึงกัน

วัตถุประสงค์การศึกษา

1) เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

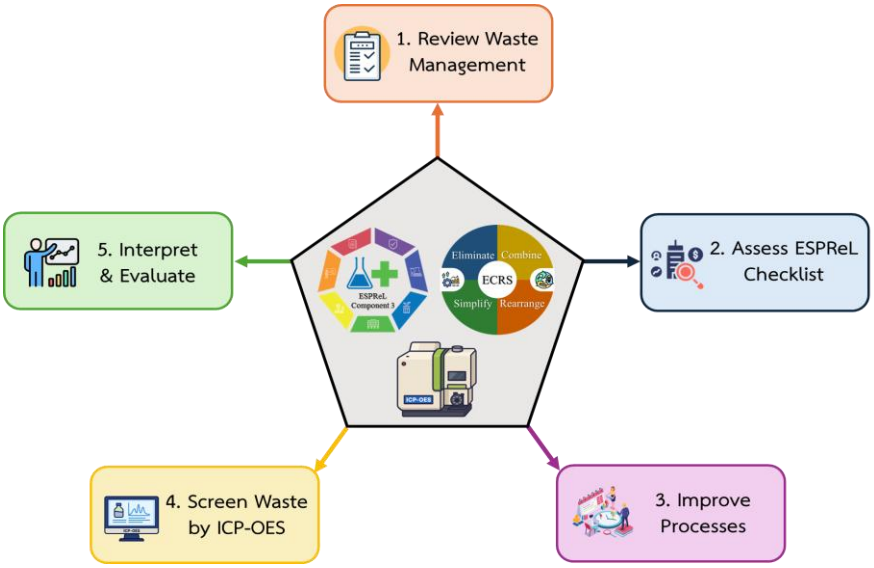
2) เพื่อประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนัก หลังจากการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการจัดการของเสียโลหะหนักหลังจากประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองและพัฒนา (Experimental and Development Research) โดยการประยุกต์ใช้ ICP-OES เป็นเครื่องมือทดลองให้ได้ผลข้อมูลเชิงประจักษ์ในการตัดสินใจสำหรับการพัฒนาปรับปรุงกระบวนงาน (Workflow) ด้วยแนวคิด ECRS แล้วนำไปปฏิบัติและประเมินผลประสิทธิภาพ ภายใต้กรอบมาตรฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL องค์ประกอบที่ 3 การจัดการของเสีย ณ ห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ระหว่างปี พ.ศ. 2565 - 2567

การศึกษานี้จึงมิได้เป็นการพัฒนาเทคนิค ICP-OES ใหม่ หากแต่ปรับบทบาทของเครื่องมือให้เป็นเครื่องมือตรวจคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจในระบบการจัดการของเสียที่ต้นทาง โดยมีกรอบแนวคิดดังภาพที่ 1 และรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการศึกษาการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) ศึกษาข้อมูลการจัดการของเสีย

สำรวจและวิเคราะห์การจัดการของเสียเดิมร่วมกับประเมินสภาพความปลอดภัยตามมาตรฐานระบบ ESPReL Checklist ผ่านเว็บไซต์ของสถาบันวิจัยแห่งชาติ https://esprel.labsafety.nrct.go.th ปีละครั้ง ระหว่างปี พ.ศ. 2564 - 2567 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน (Baseline data) สำหรับการพัฒนา

2) การประยุกต์ใช้ ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS เพื่อการปรับปรุงกระบวนการ

กำหนดบทบาทของ ICP-OES เป็นเครื่องมือคัดกรองเชิงปริมาณเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดของเสีย โดยใช้ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักเป็นข้อมูลขับเคลื่อนในการปรับปรุงกระบวนการภายใต้กรอบมาตฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL ด้วยแนวคิด ECRS ดังนี้

(1) Eliminate วิเคราะห์ขั้นตอนที่ไม่จำเป็นหรือไม่สร้างคุณค่า

(2) Combine ประเมินความเป็นไปได้ในการรวมขั้นตอนการปฏิบัติงาน

(3) Rearrange วิเคราะห์การจัดลำดับกระบวนการทำงานใหม่ให้มีความเหมาะสม

(4) Simplify ปรับขั้นตอนการจัดการของเสียให้มีความชัดเจน เข้าใจง่าย

3) พัฒนาระบบการจัดการของเสีย

พัฒนาแนวทางปฏิบัติสำหรับการตรวจคัดกรอง การจำแนก คัดแยก และการประเมินผลการจัดการของเสีย พร้อมจัดทำผังกระบวนงานและแบบบันทึก นำผลการวิเคราะห์มาพัฒนากระบวนการให้เป็นแนวทางจัดการของเสียแบบเฉพาะสำหรับห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนัก หลังจากการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) ขอบเขตการศึกษา

(1) ศึกษาความเข้มข้นโลหะหนัก 10 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แบเรียม (Ba) สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ซิลีเนียม (Se) โครเมียม (Cr) และนิเกิล (Ni) จากของเสียโลหะหนักที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ธาตุตามแหล่งกำเนิด ได้แก่ Standard

Waste, Rinse Waste, ICP- OES Waste, AAS Waste, Scrubber Waste และ Cleaning Solution (20% Nitric Acid)/Deionized Wash (แบ่งระบบเป็น F1 งานวิเคราะห์ดิน พืช ปุ๋ย และ F2 งานวิเคราะห์น้ำ) ดำเนินการในพื้นที่ห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 และพื้นที่เกี่ยวข้อง

(2) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES (PerkinElmer Avio 200) ตามวิธีปฏิบัติงานมาตรฐาน (Standard Operating Procedure, SOP) การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำและน้ำเสียอ้างอิงตาม Standard Methods 3120 B (APHA, AWWA, & WEF, 2017)

(3) เกณฑ์กำหนดอ้างอิงมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 ร่วมกับหลักเกณฑ์การจัดแยกของเสียห้องปฏิบัติการตามคู่มือการจัดแยกและจัดเก็บของเสียภายในห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (กาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล, 2564)

2) การตรวจคัดกรองโลหะหนักด้วย ICP-OES

(1) วิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนัก 10 ชนิด ตามแหล่งกำเนิดในขอบเขตการศึกษา ภายใต้สภาวะการเตรียมเครื่องมือและการควบคุมคุณภาพตามวิธีปฏิบัติงานมาตรฐานเดียวกันทุกรอบดำเนินการ 5 รอบ

(2) รายงานผลทดสอบเป็นค่าความเข้มข้นหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อใช้เป็นเครื่องมือคัดกรองเบื้องต้น (Primary Screening Tool) ในแบบบันทึก CSE-HZW-10

3) การควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ (Quality Control)

การควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ดำเนินการตามระบบ ISO/IEC 17025 ได้แก่ การสอบเทียบ (Calibration Curve) ด้วยสารมาตรฐานอ้างอิงที่สามารถสอบกลับได้ (Traceability) การตรวจสอบความถูกต้องของการสอบเทียบทั้งก่อนและระหว่างการวิเคราะห์ (Initial & Continuing Calibration Verification) การตรวจสอบ Blank Reagent เพื่อเฝ้าระวังการปนเปื้อน การประเมินความเที่ยงด้วยการวิเคราะห์ซ้ำ (Duplicate) การใช้ Spike Recovery รวมทั้งการวิเคราะห์ตัวอย่างควบคุม (Quality Control Sample) พร้อมกำหนดค่า LOQ ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การศึกษาและสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ใช้เป็นฐานการตัดสินใจในการศึกษาครั้งนี้

4) การประเมินผลโลหะหนัก

การประเมินผลการใช้เกณฑ์การตัดสินใจ (Decision Criteria) โดยอ้างอิงตามค่าขีดจำกัดหรือมาตรฐานที่กำหนด (Threshold-based Rule) ร่วมกับใช้แนวทางตัดสินแบบกรณีเลวร้ายที่สุด (Worst-case Approach) โดยพิจารณาจากผลการตรวจคัดกรองโลหะหนักด้วย ICP-OES ตามลำดับนี้ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตัดสินใจ (Decision Criteria) สำหรับการจัดการของเสียโลหะหนักจากการตรวจคัดกรองด้วย ICP-OES

เกณฑ์การตัดสินใจ (Decision Criteria)			**การจัดการ**	
ผลการตรวจโลหะหนักเทียบมาตรฐานน้ำทิ้ง	**แหล่งกำเนิดของเสีย**	**การประเมินผล**	**การจำแนกของเสีย**	**การจัดประเภทของเสีย**
1. กรณีเกินเกณฑ์มาตรฐาน (อย่างน้อย 1 ชนิด)	ทุกแหล่ง	จัดเป็นของเสียอันตราย	ส่งกำจัด (Disposal)	L10/L07/L11
2. กรณีไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน (ต้องทุกชนิด)	ทุกแหล่ง ยกเว้น Cleaning solution (20% Nitric acid) และ Deionized wash	องค์ประกอบมีตัวอย่างไม่เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ซ้ำ	บำบัดขั้นต้น (Pre-treated)	-
	Cleaning solution (20% Nitric) และ Deionized wash	มีศักยภาพนำกลับมาใช้ซ้ำสำหรับล้างวัสดุอุปกรณ์	นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse)	-

(1) ใช้เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง เป็นเกณฑ์ลำดับแรกหากแหล่งกำเนิดของเสียใดตรวจพบโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่าความเข้มข้นเกินเกณฑ์มาตรฐานมีความเสี่ยงด้านความปลอดภัย จัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องส่งกำจัด (Disposal) แล้วจัดแยกประเภทของเสียตามระดับความความอันตรายโดยเรียงลำดับเป็นอาร์เซนิก (L10) โครเมียม (L07) และโลหะหนักอื่น ๆ (L11)

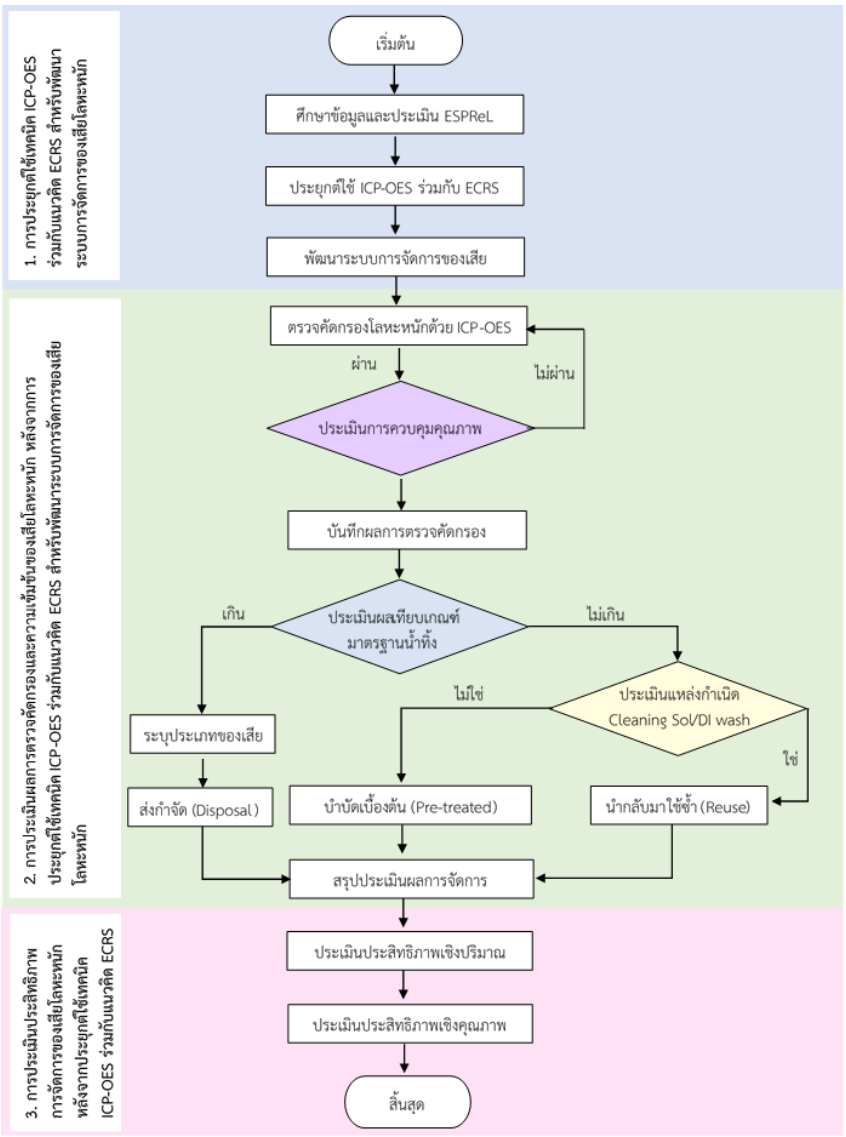
(2) ใช้เกณฑ์แหล่งกำเนิดของเสีย หากของเสียมีค่าความเข้มข้นไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานทุกชนิด จะประเมินแหล่งกำเนิดเป็นลำดับถัดไป หากของเสียมาจากแหล่ง Cleaning Solution และ Deionized Wash ไม่มีองค์ประกอบของเมทริกซ์ตัวอย่างจัดเป็นแหล่งมีศักยภาพสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) อย่างปลอดภัย แต่หากเป็นแหล่งอื่นๆที่มีองค์ประกอบของเมทริกซ์ตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treated) ก่อนระบายลงระบบบำบัด

การประเมินประสิทธิภาพการจัดการของเสียโลหะหนักหลังจากประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) การประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณ ใช้ร้อยละการลดลงของปริมาณของเสียที่ไม่ต้องส่งกำจัด และประเมินมูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากการลดค่าส่งกำจัดและค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

2) การประเมินประสิทธิภาพเชิงคุณภาพ ใช้ผลการประเมินสภาพความปลอดภัยห้องปฏิบัติการจากคะแนน ESPReL Checklist ด้วยตนเอง รวมถึงผลการตรวจประเมิน Peer Evaluation จากสถาบันวิจัยแห่งชาติ (วช.)

สรุปการศึกษานี้ใช้ ICP-OES เป็นเครื่องมือคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจปรับปรุงกระบวนการตามแนวคิด ECRS ภายใต้กรอบมาตรฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL เพื่อพัฒนาระบบจัดการของเสียโลหะหนักให้มีหลักฐานเชิงประจักษ์ (Evidence-based Improvement) และสามารถประเมินผลได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการศึกษาโดยย่อแบบเข้าใจภาพรวมได้ดังภาพที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย (Methodological Flow Diagram)



ภาพที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย (Methodological Flow Diagram)

ผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES เป็นเครื่องมือคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียร่วมกับแนวคิด ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน สามารถดำเนินการตามกรอบมาตรฐาน ESPReL ได้ครบถ้วน โดยมีผลลัพธ์ดังนี้

1) ผลลัพธ์การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับหลักแนวคิด ECRS ดังนี้

(1) Eliminate ปรับลดรอบการจัดเก็บและตรวจสภาพภาชนะบรรจุของเสียเหลือ 2 ครั้งต่อปี ลดเอกสารบันทึกการจัดการข้อมูลเหลือ 1 ฉบับ ยกเลิกการส่งกำจัดแบบเหมารวม โดยใช้ผลการตรวจคัดกรองด้วย ICP-OES เพื่อจำแนกของเสียก่อนตัดสินใจจัดการได้อย่างปลอดภัยและลดของเสียได้รวม 651 ลิตรจากการ Reuse และ Pre-treated

(2) Combine รวมขั้นตอนการวิเคราะห์และการจัดการของเสียไว้ในกระบวนการเดียว โดยเชื่อมโยงผลการตรวจคัดกรองกับเกณฑ์การตัดสินใจในเอกสารบันทึกผลแบบ One Page Management รวมการตรวจคัดกรองของเสียเข้ากับงานตรวจวิเคราะห์ประจำของห้องปฏิบัติการ

(3) Rearrange ปรับลำดับกระบวนการทำงานใหม่ เริ่มจากการตรวจคัดกรองด้วย ICP-OES ก่อนการจำแนกและตัดสินใจด้านการจัดการของเสีย และตัดขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นเป็นส่งกำจัดสำหรับแหล่งที่มีตัวอย่างเป็นองค์ประกอบในเมทริกซ์

(4) Simplify จัดทำแนวปฏิบัติการตรวจคัดกรองของเสียด้วย ICP-OES โดยรวบรวมเกณฑ์การตัดสินใจและแบบบันทึก CSE-HZW-10 ไว้ในเอกสารเดียวกัน พร้อมทั้งจัดทำผังกระบวนงานใหม่และกำหนดแนวทางการจัดการของเสียสำหรับห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

2) ผลลัพธ์ตามกรอบมาตรฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL ดังนี้

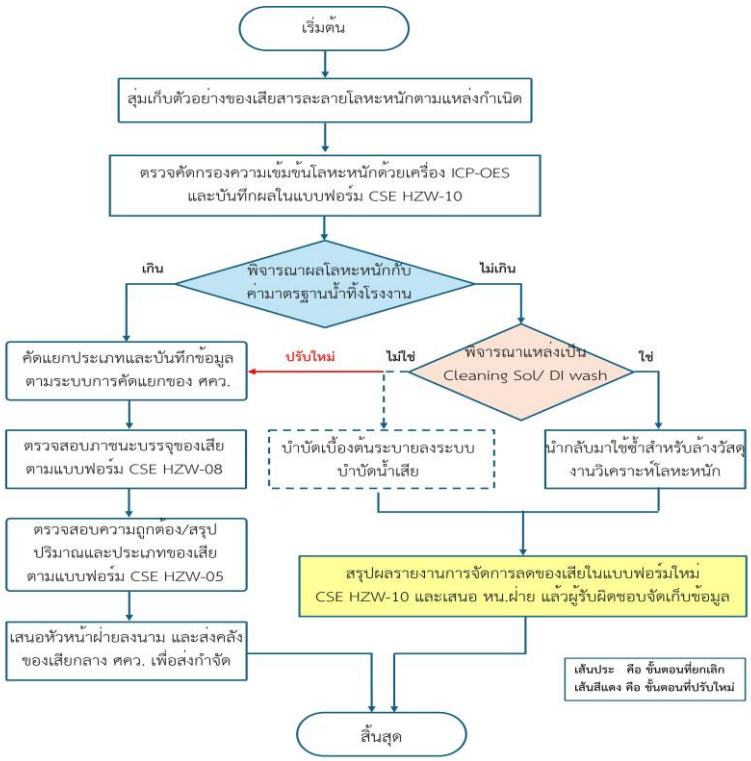
(1) การจัดการข้อมูลของเสีย ดำเนินงานตามข้อกำหนดทั้ง 7 ข้อ โดยใช้เอกสาร CSE-HZW-05 ฉบับเดียวในการรวบรวมและติดตามปริมาณของเสีย

(2) การจัดเก็บของเสีย ดำเนินการครบตามข้อกำหนด 15 ข้อ มีการแยกประเภทของเสียตามระดับความเป็นอันตราย (L10, L07 และ L11) ใช้ภาชนะชนิด Polypropylene หรือ Polyethylene ควบคุมปริมาตรไม่เกินร้อยละ 80 ของความจุ กำหนดปริมาณจัดเก็บไม่เกิน 100 ลิตรต่อรอบต่อห้อง และปรับรอบการจัดเก็บเหลือ 2 รอบต่อปี

(3) การลดการเกิดของเสีย จัดทำแนวปฏิบัติในการลดการเกิดของเสียในห้องปฏิบัติการที่ชัดเจนโดยการตรวจคัดกรองของเสียด้วยเครื่อง ICP-OES สามารถจำแนกของเสียนำกลับมาใช้ซ้ำ เป็นการลดของเสียก่อนส่งกำจัด

(4) การบำบัดและกำจัดของเสีย รวบรวมและส่งกำจัดโดยบริษัทที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงานประเภท 106 และได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 9001 และ ISO 14001

โดยสรุป การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS ทำให้กระบวนการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 มีโครงสร้างและขั้นตอนการดำเนินงานที่ชัดเจนเป็นระบบ ลดความซ้ำซ้อนของงาน การใช้สารเคมี ของเสีย และพลังงาน มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน สามารถพัฒนากระบวนการให้สอดคล้องตามกรอบมาตรฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 ผังกระบวนงานพัฒนาปรับปรุงการจัดของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

ภาพที่ 4 การดำเนินงานพัฒนาการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนัก หลังจากการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนัก

การประเมินผลการตรวจคัดกรองโลหะหนักด้วย ICP-OES ทั้ง 5 รอบดำเนินการ ใช้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเทียบผลตามหลักการ Threshold-based Rule ร่วมกับ Worst-case Approach ในแบบบันทึก CSE-HZW-10 ตามเกณฑ์การตัดสินใจดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเป็นการรวมผลการตรวจและการจัดการไว้ที่เดียวแบบ One Page Management ได้ผลดังตารางที่ 2 - 6 ชี้ให้เห็นว่า ของเสียจากแหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มีความเข้มข้นของโลหะหนักเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอย่างมีนัยสำคัญในรายการ Pb มีค่า 0.24 - 3.17 มิลลิกรัมต่อลิตร Cd มีค่า 0.04 - 1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร As มีค่า 0.29 - 3.91 มิลลิกรัมต่อลิตร Se มีค่า 0.18 - 0.88 มิลลิกรัมต่อลิตร Cr มีค่า 0.27 - 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร Ba มีค่า 3.83 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Cu มีค่า 2.01 - 4.11 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่า แหล่งกำเนิด Standard Waste มีความเข้มข้นโลหะหนักที่เกินมาตรฐานสูงที่สุดในแทบทุกธาตุและทุกรอบ โดยเฉพาะ As, Cd, Cr, Ba และ Cu ส่วนแหล่งอื่นๆ ล้วนมีความเสี่ยงที่โลหะหนักเกินมาตรฐานทั้งสิ้น และมีเพียงแหล่ง Deionized Wash และ Cleaning Solution ที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำ รายละเอียดผลการศึกษาแต่ละรอบแสดงดังนี้

ตารางที่ 2 การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 รอบที่ 1 (เมษายน 2565)

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
Cleaning Solution	<0.01	<0.01	0.64	0.03	<0.01	<0.02	<0.02	0.59	0.03	0.08	20	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 1	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	< 0.01	0.14	30	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	< 0.01	<0.02	30	ไม่เกิน	Reuse	-
AAS Waste	<0.01	<0.01	0.28	0.05	0.27	<0.02	0.39	0.37	0.02	0.21	18	เกิน	Disposal	L11
ICP-OES Waste	0.04	0.18	1.42	0.87	0.04	0.05	0.13	4.59	0.05	0.22	18	เกิน	Disposal	L11
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง	**≤0.25**	**≤0.02**	**≤5.0**	**≤0.2**	**≤0.03**	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤5.0**	**≤0.25**	**≤2.0**	**-**	**-**	**-**	**-**

จากตารางที่ 2 พบว่า มีของเสียที่ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่ง Cleaning Solution และ Deionized Wash 1&2 จำนวน 80 ลิตร สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในการล้างวัสดุอุปกรณ์ได้ ส่วนของเสียจากแหล่ง AAS และ ICP-OES Waste มีค่าเกินมาตรฐานในรายการ Cd และ Pb จำนวน 36 ลิตร ต้องส่งกำจัดเป็นประเภท L11 ของเสียโลหะหนักอื่นๆ รวมปริมาณของเสียเกิดขึ้นในระบบจำนวน 116 ลิตร

ตารางที่ 3 การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 รอบที่ 2 (พฤศจิกายน 2565)

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
Cleaning Solution F1-O	<0.01	<0.01	1.05	3.06	0.14	<0.02	0.08	0.15	0.03	0.11	25	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F1-O	<0.01	<0.01	0.08	0.05	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	35	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F1-O	<0.01	<0.01	<0.02	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	35	ไม่เกิน	Reuse	-
Cleaning Solution F1-N	<0.01	<0.01	0.18	0.99	0.05	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	25	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F1-N	<0.01	<0.01	0.08	0.02	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	35	ไม่เกิน	Reuse	-
Cleaning Solution F2	<0.01	<0.01	0.51	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	0.07	25	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 1 F2	<0.01	<0.01	0.26	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	30	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash F2	<0.01	<0.01	0.09	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	30	ไม่เกิน	Reuse	-
AAS Waste	0.22	<0.01	1.98	0.24	0.16	0.05	0.10	1.80	0.12	0.13	18	เกิน	Disposal	L11
ICP-OES Waste	0.30	<0.01	0.47	0.30	0.27	<0.02	0.11	0.62	0.27	0.24	18	เกิน	Disposal	L10
Standard Waste	1.35	<0.01	1.34	1.40	1.22	0.07	0.19	3.04	0.98	0.12	3	เกิน	Disposal	L10
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง	**≤0.25**	**≤0.02**	**≤5.0**	**≤0.2**	**≤0.03**	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤5.0**	**≤0.25**	**≤2.0**	**-**	**-**	**-**	**-**

จากตารางที่ 3 พบว่า มีของเสียจากแหล่งจาก Cleaning solution F1-O, F1-N และ AAS waste เกินมาตรฐานในรายการ Pb จำแนกเป็น L11 ของเสียโลหะหนักอื่นๆ ส่วนของเสียจากแหล่ง ICP-OES waste และ Standard waste มีค่า As, Pb, Cd และ Cr เกินมาตรฐานจำแนกเป็น L10 ของเสียอาร์เซนิก รวมของเสียต้องส่งกำจัดทั้งสิ้น 64 ลิตร ส่วนของเสีย Deionized Wash 1&2 F1-O, Cleaning Solution F2 และ Deionized Wash 1&2 F2 ไม่เกินมาตรฐานสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ 190 ลิตร รวมปริมาณของเสียโลหะหนักเกิดขึ้นในระบบ 254 ลิตร

ตารางที่ 4 การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 รอบที่ 3 (มิถุนายน 2566)

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
Cleaning Solution F1	<0.01	<0.01	0.62	1.80	0.09	<0.0	<0.0	<0.0	0.03	0.10	32	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F1	<0.01	<0.01	0.25	0.12	<0.01	<0.0	<0.0	<0.0	<0.01	<0.02	32	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F1	<0.01	<0.01	0.1	0.02	<0.01	<0.0	<0.0	<0.0	<0.01	<0.02	32	ไม่เกิน	Reuse	-
Cleaning Solution F2	<0.01	<0.01	0.88	0.03	<0.01	<0.0	<0.0	<0.0	0.02	0.06	32	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 1 F2	<0.01	<0.01	0.13	<0.01	<0.01	<0.0	<0.0	<0.0	<0.01	<0.02	32	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F2	< 0.01	<0.01	<0.0	<0.01	<0.01	<0.0	<0.0	<0.0	<0.01	<0.02	32	ไม่เกิน	Reuse	-

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
ICP-OES Waste	<0.01	<0.01	0.840	0.14	0.02	0.10	0.63	0.66	0.11	0.29	16	ไม่เกิน	Pre-treated	-
Scrubber Waste 1	<0.01	<0.01	1.8	0.69	<0.01	0.15	0.29	0.40	0.04	0.10	16	เกิน	Disposal	L11
Scrubber Waste 2	<0.01	<0.01	1.87	0.67	<0.01	0.15	0.29	0.40	0.04	0.10	16	เกิน	Disposal	L11
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง	**≤0.25**	**≤0.02**	**≤5.0**	**≤0.2**	**≤0.03**	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤5.0**	**≤0.25**	**≤2.0**	**-**	**-**	**-**	**-**

จากตารางที่ 4 พบว่า ของเสียที่ไม่เกินมาตรฐานมาจากแหล่ง Deionized Wash 1&2 F1, Cleaning Solution F2 และ Deionized Wash 1&2 F2 จำนวนรวม 160 ลิตร สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ ส่วนของเสียจากแหล่ง Cleaning Solution F1 และ Scrubber Waste 1&2 มีค่า Pb เกินเกณฑ์มาตรฐานจำแนกเป็น L11 ของเสียโลหะหนักอื่นๆ ต้องส่งกำจัดรวม 64 ลิตร ส่วนของเสียจากแหล่ง ICP-OES Waste จำนวน 16 ลิตร มีความเข้มข้นไม่เกินมาตรฐาน ทำการบำบัดเบื้องต้นแล้วระบายลงระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นรวมของเสียที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น 240 ลิตร

ตารางที่ 5 การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ครั้งที่ 4 (ธันวาคม 2566)

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
Cleaning Solution F1	<0.01	<0.01	1.19	3.74	0.19	0.04	0.06	0.04	0.07	0.13	25	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F1	<0.01	<0.01	0.24	0.24	0.01	<0.02	<0.02	<0.02	0.01	<0.02	25	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 2 F1	<0.01	<0.01	0.04	0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	25	ไม่เกิน	Reuse	-
Cleaning Solution F2	<0.01	<0.01	1.42	0.11	0.02	<0.02	0.07	0.06	0.04	0.12	25	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 1 F2	<0.01	<0.01	0.11	0.10	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	25	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F2	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	25	ไม่เกิน	Reuse	-
AAS Waste	<0.01	<0.01	0.35	0.07	0.02	2.10	0.08	0.10	0.04	2.01	10	เกิน	Disposal	L11
ICP-OES Waste	<0.01	<0.01	1.11	0.40	0.05	0.42	0.09	0.53	0.39	0.53	17	เกิน	Disposal	L07
Rinse Waste	0.05	0.88	0.46	0.55	0.03	<0.01	0.11	0.14	0.04	0.07	17	เกิน	Disposal	L11
Standard Waste	0.61	0.31	0.83	0.74	0.88	2.11	0.45	0.64	0.58	0.68	17	เกิน	Disposal	L10
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง	**≤0.25**	**≤0.02**	**≤5.0**	**≤0.2**	**≤0.03**	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤5.0**	**≤0.25**	**≤2.0**	**-**	**-**	**-**	**-**

จากตารางที่ 5 พบว่า ของเสียจากแหล่ง Cleaning Solution F1, Deionized Wash 1 F1, AAS Waste และ Rinse Waste มี Pb, Ni และ Se เกินมาตรฐานจำแนกเป็น L11 ของเสียโลหะหนักอื่นๆ ส่วนของเสียจากแหล่ง ICP-OES Waste มี Cr เกินมาตรฐานจำแนกเป็น L07 ของเสียโครเมียม ส่วน Standard Waste มี As และ Cr เกินมาตรฐานจำแนกเป็น L10 ของเสียอาร์เซนิก รวมของเสียที่ต้องส่งกำจัดทั้งสิ้น 111 ลิตร สำหรับของเสียจากแหล่ง Deionized Wash 2 F1, Cleaning Solution F2 และ Deionized Wash 1&2 F2 ไม่เกินมาตรฐานสามารถนำมาใช้ซ้ำได้รวมทั้งสิ้น 100 ลิตร ดังนั้นมีปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในระบบ 211 ลิตร

ตารางที่ 6 การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ครั้งที่ 5 (ตุลาคม 2567)

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
leaning Solution F1	<0.01	<0.01	0.59	2.58	0.14	0.06	0.04	0.03	0.02	0.03	30.0	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F1	<0.01	<0.01	<0.02	0.03	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	30.0	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F1	<0.01	<0.01	<0.02	0.03	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.02	25.0	ไม่เกิน	Reuse	-
Cleaning Solution F2	<0.01	<0.01	2.44	0.71	0.15	0.05	0.14	0.21	0.08	0.05	30.0	เกิน	Disposal	L11
Deionized Wash 1 F2	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	0.01	<0.02	25.0	ไม่เกิน	Reuse	-
Deionized Wash 2 F2	<0.01	<0.01	<0.02	<0.01	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	0.01	<0.02	25.0	ไม่เกิน	Reuse	-
AAS Waste	0.13	<0.01	0.35	0.07	0.02	2.10	0.21	0.32	0.14	0.20	5.0	เกิน	Disposal	L11
ICP-OES waste	0.29	0.15	3.91	0.17	0.20	0.32	0.19	0.56	0.17	0.57	13.0	เกิน	Disposal	L10

ของเสียโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)										ปริมาตร	ประเมินการจัดการ		
	As	Se	Zn	Pb	Cd	Ni	Ba	Mn	Cr	Cu	(ลิตร)	มาตรฐาน	จำแนก	ประเภท
Rinse Waste	<0.01	0.04	0.43	0.04	0.04	<0.02	0.05	0.03	0.01	0.02	12.0	เกิน	Disposal	L11
Standard Waste	3.91	3.12	4.22	3.17	3.76	3.83	3.25	4.14	3.20	4.11	7.0	เกิน	Disposal	L10
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง	**≤0.25**	**≤0.02**	**≤5.0**	**≤0.2**	**≤0.03**	**≤1.0**	**≤1.0**	**≤5.0**	**≤0.25**	**≤2.0**	**-**	**-**	**-**	**-**

จากตารางที่ 6 พบว่า ของเสียจากแหล่ง Cleaning Solution F1&2, AAS waste และ Rinse waste มี Pb Cd Ni และ Se เกินมาตรฐานจำแนกเป็น L11 โลหะหนักอื่นๆ ปริมาณรวม 77 ลิตร ในขณะที่แหล่ง ICP-OES Waste มี As เกินมาตรฐาน และ Standard Waste พบเกินมาตรฐานทุกธาตุ ยกเว้น Zn จัดเป็น L10 รวม 20 ลิตร รวมเป็นปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัด 97 ลิตร สำหรับของเสียที่ไม่เกินมาตรฐานมาจากแหล่ง Deionized Wash 1&2 F1 และ Deionized Wash 1&2 F2 สามารถนำมากลับมาใช้ซ้ำได้รวมปริมาณ 105 ลิตร สรุปมีปริมาณของเสียเกิดขึ้นในระบบ 202 ลิตร

ผลการตรวจคัดกรองของเสียโลหะหนักทั้ง 5 รอบภายใต้สภาวะการวิเคราะห์และเกณฑ์การตัดสินใจเดียวกัน พบว่าความแตกต่างของผลลัพธ์เกิดจากความแปรผันขององค์ประกอบทางเคมีของของเสียตั้งต้นจากแหล่งกำเนิดและภาระงานวิเคราะห์ในแต่ละรอบการดำเนินงานมากกว่าปัจจัยด้านเครื่องมือหรือระบบวิเคราะห์ ทั้งนี้ ระบบล้างวัสดุอุปกรณ์เป็นตัวแปรหลักของประสิทธิภาพการจัดการ โดยพบว่าระบบวิเคราะห์ดิน พืช ปุ๋ย มีแนวโน้มเกินเกณฑ์มากกว่าระบบวิเคราะห์น้ำ ส่งผลต่อการนำกลับมาใช้ซ้ำในแต่ละรอบดำเนินการ

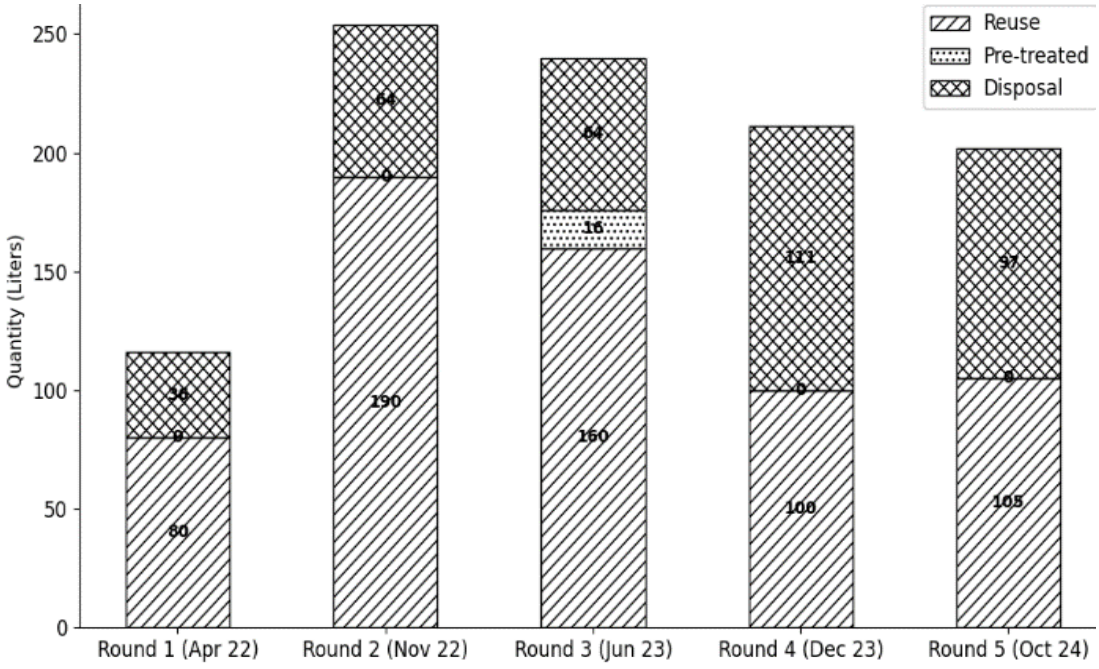
2) การประเมินผลปริมาณของเสียในระบบ

ผลจากการประเมินการตรวจคัดกรองโลหะหนักด้วย ICP-OES ในฐานะเครื่องมือคัดกรองและตัดสินใจด้านการจัดการสามารถจำแนกข้อมูลของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 และฝ่ายบริการได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สรุปผลการจัดการจำแนกของเสียโลหะหนักรายรอบดำเนินการ ฝ่ายบริการและใช้ประโยชน์เครื่องมือ ช่วงปี 2565 - 2567

การจำแนกของเสียโลหะหนัก	หน่วย	รอบดำเนินการ					ผลรวม	ผลเฉลี่ย (รายรอบ)
		รอบที่ 1 เม.ย.65	รอบที่ 2 พ.ย.65	รอบที่ 3 มิ.ย.66	รอบที่ 4 ธ.ค. 65	รอบที่ 5 ต.ค.67		
1. ของเสียห้องวิเคราะห์ธาตุ 2								
1.1 ของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด	ลิตร	116	254	240	211	202	1,023	204.6
1.2 ของเสียที่นำกลับมาใช้ซ้ำ	ลิตร	80	190	160	100	105	635	127
ของเสียแหล่ง Cleaning solution	ลิตร	20	25	32	25	0	102	20.4
ของเสียแหล่ง Deionized wash	ลิตร	60	165	128	75	105	533	106.6
1.3 ของเสียที่บำบัดเบื้องต้น	ลิตร	0	0	16	0	0	16	3.2
1.4 ของเสียที่ไม่ต้องส่งกำจัด	ลิตร	80	190	176	100	105	651	130.2
1.5 ของเสียที่ต้องส่งกำจัด	ลิตร	36	64	64	111	97	372	74.4
2. ของเสียฝ่ายบริการและใช้ประโยชน์เครื่องมือ								
2.1 ของเสียห้องวิเคราะห์ธาตุ 2	ลิตร	116	254	240	211	202	1,023	204.6
2.2 ของเสียงานบริการอื่นๆ	ลิตร	198	157	264	273	214	1,106	221.2
2.3 ของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด	ลิตร	314	411	504	484	416	2,129	425.8
2.4 ของเสียที่ต้องส่งกำจัดรวม	ลิตร	234	221	328	384	311	1,478	295.6

จากตารางที่ 7 พบว่า ห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 สามารถคัดแยกของเสียเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้รวมทั้งสิ้น 635 ลิตร จากของเสียที่เกิดขึ้น 1,023 ลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 62.07 โดยแหล่งของเสียที่มีศักยภาพสูงสุดในการนำกลับมาใช้ซ้ำคือ Deionized wash สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ทุกรอบ รวมปริมาณทั้งสิ้น 533 ลิตร รองลงมาคือของเสียจาก Cleaning Solution ปริมาณ 102 ลิตร ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการลดต้นทุนการส่งกำจัดของเสีย ส่งผลให้ปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดเหลือเพียง 372 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 36.36 โดยพบว่า รอบการดำเนินงานที่ต้องรับภาระการส่งกำจัดมากที่สุดคือรอบที่ 4 มีปริมาณของเสีย 111 ลิตร ทั้งนี้มีเพียงรอบที่ 3 เท่านั้นที่ต้องบำบัดเบื้องต้นก่อนระบายสู่ระบบบำบัดจำนวน 16 ลิตร ส่งผลให้ปริมาณของเสียที่ไม่ต้องส่งกำจัดรวมทั้งสิ้น 651 ลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 63.64 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ในแต่ละรอบสามารถแสดงได้ดังกราฟภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ข้อมูลปริมาณของเสียจากการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2

ในภาพรวมของฝ่ายบริการฯ มีของเสียโลหะหนักเกิดขึ้นทั้งสิ้น 2,129 ลิตร เป็นของเสียงานบริการอื่น ๆ จำนวน 1,106 ลิตร เมื่อรวมกับของเสียห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ทำให้มีของเสียที่ต้องส่งกำจัดทั้งหมด 1,478 ลิตร ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การตรวจคัดกรองของเสียด้วยเทคนิค ICP-OES เป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของเสีย และสามารถลดปริมาณการเกิดของเสียที่ต้องส่งกำจัดในระบบได้อย่างเป็นรูปธรรม

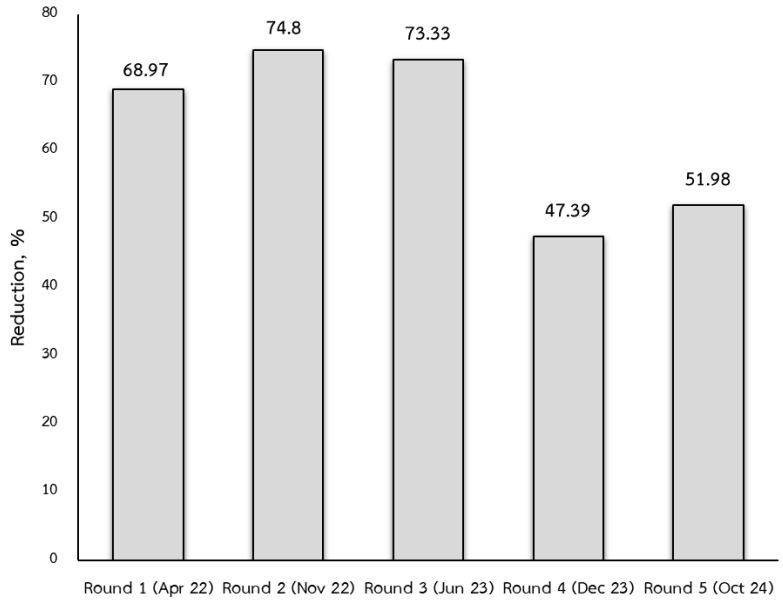
การประเมินประสิทธิภาพการจัดการของเสียโลหะหนักหลังจากประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) การประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณ

(1) ปริมาณของเสียที่ลดลง ปริมาณของเสียที่ลดลงจากการนำกลับมาใช้ซ้ำ 635 ลิตร และการบำบัดเบื้องต้น 16 ลิตร ส่งผลให้ลดปริมาณของเสียได้ทั้งสิ้น 651 ลิตร คิดเป็นการลดลงของเสียและค่ากำจัดได้ร้อยละ 47.39 - 74.80 เฉลี่ยร้อยละ 63.64 สำหรับงานวิเคราะห์ธาตุ และร้อยละ 30.59 สำหรับฝ่ายบริการฯ ผลเปรียบเทียบร้อยละการลดลงของปริมาณและค่ากำจัดของเสียห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ในแต่ละรอบแสดงดังตารางที่ 8 และภาพที่ 6

ตารางที่ 8 ผลประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณจากการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ปี 2565 - 2567

การประเมินของเสีย	หน่วย	รอบการดำเนินการ					ผลรวม	ผลเฉลี่ย (รายรอบ)
		รอบที่ 1 เม.ย. 65	รอบที่ 2 พ.ย. 65	รอบที่ 3 มิ.ย.66	รอบที่ 4 ธ.ค. 65	รอบที่ 5 ต.ค. 67		
1. ของเสียที่นำกลับมาใช้ซ้ำ	ลิตร	80	190	160	100	105	635	127
2. ชองเสียที่บำบัดเบื้องต้น	ลิตร	0	0	16	0	0	16	3.2
3. ของเสียที่ไม่ต้องส่งกำจัด (ของเสียที่ลดลง)	ลิตร	80	190	176	100	105	651	130.2
4. ร้อยละของเสียที่ลดลงห้องวิเคราะห์ธาตุ 2	ร้อยละ	68.97	71.80	73.33	47.39	51.98	-	63.64
5. ร้อยละของเสียที่ลดลงฝ่ายบริการฯ	ร้อยละ	25.48	46.23	34.92	20.66	25.24	-	30.58



ภาพที่ 6 ร้อยละของปริมาณและค่ากำจัดของเสียที่ลดลงจากการจัดการของเสีย

(2) มูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ ประเมินผลจากการลดค่าใช้จ่ายงบประมาณ 2 ส่วน คือ การลดค่ากำจัดของเสียจำนวน 651 ลิตร และการลดค่าใช้จ่ายสารเคมีจากการนำของเสียกลับมาใช้ซ้ำ 635 ลิตร ซึ่งประเมินผลบนฐานข้อมูลค่าอัตรากำจัดของเสีย ราคาสารละลาย Nitric Acid และราคา Deionized Water ในปี 2567 สามารถสรุปผลได้ตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลประเมินประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดการของเสียโลหะหนัก ปี 2565 - 2567

รายการประเมินทางเศรษฐศาสตร์	หน่วย	รอบการดำเนินงาน					ผลรวม	ผลเฉลี่ย (รายรอบ)
		รอบที่ 1 เม.ย.65	รอบที่ 2 พ.ย.65	รอบที่ 3 มิ.ย.66	รอบที่ 4 ธ.ค. 65	รอบที่ 5 ต.ค.67		
1. งบประมาณกำจัดของเสียห้องวิเคราะห์ธาตุ 2								
1.1 งบประมาณกรณีไม่ทำวิจัย[1]	บาท	4,965	10,871	10,272	9,031	8,646	43,784	8,757

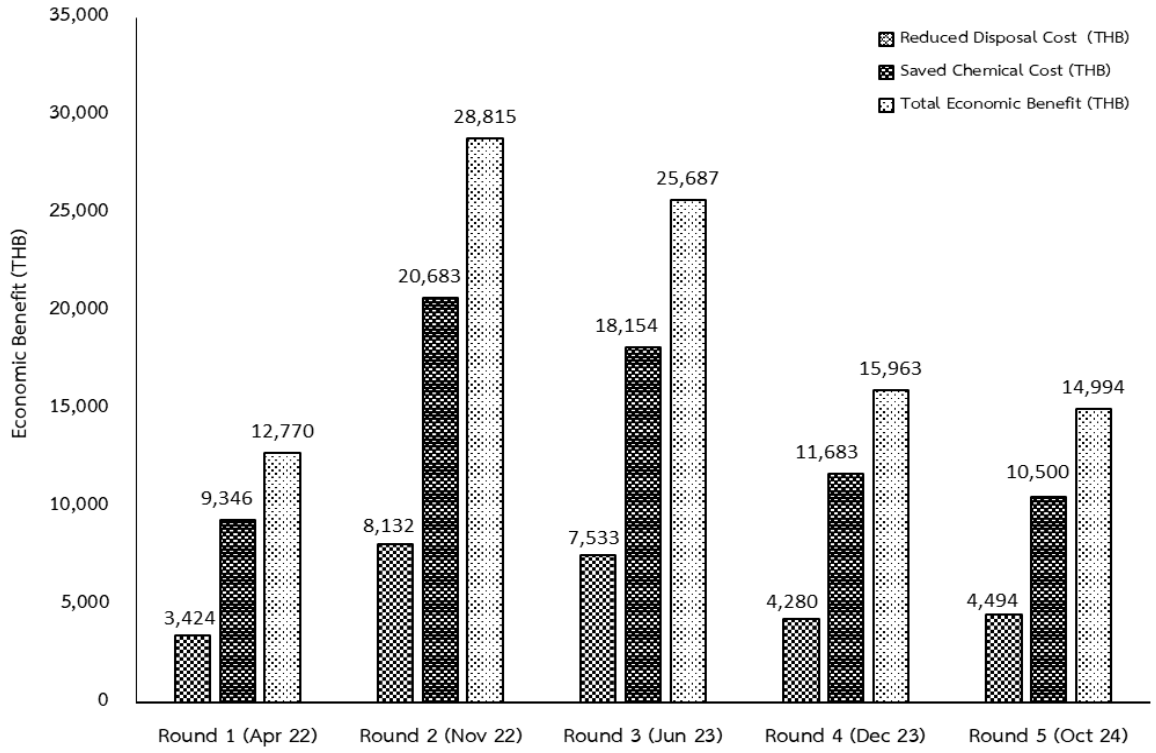
รายการประเมินทางเศรษฐศาสตร์	หน่วย	รอบการดำเนินงาน					ผลรวม	ผลเฉลี่ย (รายรอบ)
		รอบที่ 1 เม.ย.65	รอบที่ 2 พ.ย.65	รอบที่ 3 มิ.ย.66	รอบที่ 4 ธ.ค. 65	รอบที่ 5 ต.ค.67		
1.2 งบประมาณกรณีทำวิจัย	บาท	1,541	2,739	2,739	4,751	4,152	15,922	3,184
1.3 งบประมาณที่ลดลง	บาท	3,424	8,132	7,533	4,280	4,494	27,863	5,573
1.4 ร้อยละงบประมาณที่ลดลง	ร้อยละ	68.97	74.80	73.33	47.39	51.98	-	63.64
2. งบประมาณกำจัดของเสียฝ่ายบริการและใช้ประโยชน์เครื่องมือ								
2.1 งบประมาณกรณีไม่ทำวิจัย	บาท	13,439	17,591	21,571	20,715	17,805	91,121	18,224
2.2 งบประมาณกรณีทำวิจัย	บาท	10,015	9,459	14,038	16,435	13,311	63,258	12,652
2.3 งบประมาณที่ลดลง	บาท	3,424	8,132	7,533	4,280	4,494	27,863	5,573
2.4 ร้อยละงบประมาณที่ลดลง	ร้อยละ	25.48	46.23	34.92	20.66	25.24	-	30.58
3. มูลค่าการนำของเสียมาใช้ซ้ำ	บาท	9,346	20,683	18,154	11,683	10,500	70,367	14,073
3.1 มูลค่า Cleaning Solution (20% Nitric Acid)	บาท	3,346	4,183	5,354	4,183	0	17,067	3,413
มูลค่าสารละลาย Nitric Acid[2]	บาท	1,746	2,183	2,794	2,183	0	8,907	1,781
มูลค่า Deionized Water[3]	บาท	1,600	2,000	2,560	2,000	0	8,160	1,632
3.2 มูลค่า Deionized Wash	บาท	6,000	16,500	12,800	7,500	10,500	53,300	10,660
4. มูลค่ารวมผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์	บาท	12,770	28,815	25,687	15,963	14,994	98,229	19,646

ที่มา 1) อัตราการกำจัดของเสียเฉลี่ย 42.80 บาทต่อลิตร ข้อมูลการส่งกำจัดของเสียโดยบริษัทรีไซเคิลเอ็นจิเนียริ่งกำจัดปี 2567
2) สารละลาย Nitric Acid ยี่ห้อ Merck ราคา 436.6 บาทต่อลิตร ข้อมูลสารเคมีคลังพัสดุ ศควว. เดือนตุลาคม 2567
3) Deionized Water ราคา 100 บาทต่อลิตร ข้อมูลจากศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยทักษิณ เดือนตุลาคม 2567

จากตารางที่ 9 ผลการประเมินประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า หากไม่ได้ดำเนินการวิจัยนี้ ฝ่ายบริการฯ จะต้องใช้งบประมาณสำหรับการกำจัดของเสียโลหะหนักรวมทั้งสิ้น 91,121 บาท หรือเฉลี่ย 18,224 บาทต่อรอบ โดยในส่วนของห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 มีค่าใช้จ่าย 43,784 บาท อย่างไรก็ตามภายหลังการดำเนินการวิจัย งบประมาณค่ากำจัดของเสียลดลงเหลือเพียง 63,258 บาท หรือเฉลี่ย 12,652 บาทต่อรอบ โดยเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนของห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 เพียง 15,922 บาท หรือเฉลี่ย 3,184 บาทต่อรอบ

เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังดำเนินการ พบว่าสามารถลดงบประมาณค่ากำจัดของเสียรวมได้ 27,863 บาท หรือเฉลี่ย 5,573 บาทต่อรอบ คิดเป็นอัตราการลดลงร้อยละ 63.64 สำหรับห้องวิเคราะห์ธาตุ และร้อยละ 30.59 สำหรับฝ่ายบริการฯ นอกจากนี้การนำของเสียกลับมาใช้ซ้ำยังช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีได้เพิ่มอีก 70,367 บาท หรือเฉลี่ย 14,073 บาทต่อรอบ โดยสรุปงานวิจัยนี้สามารถสร้างมูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์รวมทั้งสิ้น 98,229 บาท หรือเฉลี่ย 19,646 บาทต่อรอบ สัดส่วนผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ในแต่ละรอบแสดงในภาพที่ 7

ผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS เป็นเครื่องมือในการจัดการ สามารถลดทั้งปริมาณของเสียและต้นทุนการจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ที่ชัดเจน



ภาพที่ 7 การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดการของเสียรายรอบดำเนินงาน

2) การประเมินประสิทธิภาพเชิงคุณภาพ

ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงคุณภาพ (ตารางที่ 10) พบว่า ในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของโครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย ห้องปฏิบัติการมีคะแนนประเมินสภาพความปลอดภัยด้วยตนเองเฉลี่ยร้อยละ 77.6 สำหรับองค์ประกอบที่ 3 ด้านระบบการจัดการของเสียมีค่าเฉลี่ย 91.2 อย่างไรก็ตาม หัวข้อย่อย “การลดการเกิดของเสีย” มีค่าเพียงร้อยละ 66.7 ซึ่งเป็นระดับต่ำที่สุดและเป็นประเด็นที่ต้องพัฒนาปรับปรุง

ภายหลังการดำเนินโครงการ ESPReL ควบคู่กับการวิจัยด้านการจัดการของเสีย คะแนนประเมินเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2565 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 95.0 ระบบการจัดการของเสียมีค่าเฉลี่ย 91.62 และหัวข้อ “การลดการเกิดของเสีย” เพิ่มเป็นร้อยละ 75.0 เทียบกับปีเริ่มต้นพบว่า คะแนนเฉลี่ยภาพรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.0 และเมื่อสิ้นสุดงานวิจัยเพิ่มเป็นร้อยละ 15.2 ขณะที่คะแนนด้านการจัดการของเสียเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.8 และหัวข้อ “การลดการเกิดของเสีย” เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.3

ในปี พ.ศ. 2566 ห้องปฏิบัติการผ่านการประเมิน Peer Evaluation ซึ่งเป็นระบบการรับรองห้องปฏิบัติการในรูปแบบยอมรับร่วมบนพื้นฐานของ ESPReL checklist (ศูนย์บริหารความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน มหาวิทยาลัยมหิดล, 2564) โดยได้รับคะแนนร้อยละ 100 จากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า กระบวนการที่พัฒนาขึ้นสามารถยกระดับประสิทธิภาพการจัดการของเสีย โดยเฉพาะด้าน “การลดการเกิดของเสีย” ได้อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการได้อย่างเป็นรูปธรรมเช่นกัน

ตารางที่ 10 ผลการประเมินความปลอดภัยด้วยตนเองและการยอมรับร่วมห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ช่วงปี 2564 - 2567

องค์ประกอบ	ESPReL Checklist				Peer Evaluation
	พ.ย. 64	เม.ย. 65	ต.ค. 66	ต.ค. 67	เม.ย. 66
1. การบริหารระบบการจัดการด้านควาปลอดภัย	93.3	100	100	100	100
2. ระบบการจัดการสารเคมี	75.2	92.1	94.5	94.5	100
3. ระบบการจัดการของเสีย	91.2	95	95	95	100
3.1 การจัดการข้อมูลของเสีย	91.7	91.7	91.7	91.7	-
3.2 การจัดเก็บของเสีย	92.9	100	100	100	-
3.3 การลดการเกิดของเสีย	66.7	75	75	75	-
3.4 การบำบัดและกำจัดของเสีย	100	100	100	100	-
4. ลักษณะทางกายภาพของห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์และเครื่องมือ	66.7	94.2	94.2	94.2	100
5. ระบบการป้องกันและแก้ไขภัยอันตราย	70.8	81.5	86.2	86.2	100
6. การให้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความปลอดภัย**ใน**ห้องปฏิบัติการ	96.3	96.3	96.3	96.3	100
7. การจัดการข้อมูลและเอกสาร	71.4	92.9	92.9	92.9	100
เฉลี่ย	77.6	91.1	92.8	92.8	100

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับหลักแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้ ICP-OES ไปสู่บทบาทเครื่องมือคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสีย ด้วยเทคนิคนี้มีความไว (Sensitivity) และความแม่นยำ (Accuracy) สูงตามหลักการทางเคมีวิเคราะห์ (Skoog et al., 2014; Khan et al., 2022) ทำให้สามารถตรวจวัดและจำแนกของเสียได้อย่างถูกต้อง ลดการส่งกำจัดแบบเหมารวม สามารถลดของเสียต้นทาง สอดคล้องกับหลักการลดและป้องกันการเกิดของเสียที่ต้นทางตามหลักการจัดการของเสียสากล (UNEP, 2013; Anastas & Eghbali, 2010) จึงทำให้ ICP-OES ทำหน้าที่เป็นฐานความถูกต้องเชิงวิทยาศาสตร์ของระบบการจัดการทั้งหมด มากกว่าการเป็นเพียงเครื่องมือรายงานค่าความเข้มข้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาทั่วไป ICP-OES มักถูกประยุกต์ใช้ในบทบาทเชิงสมรรถนะและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำ ดิน พืช หรือชีววัตถุ ให้ถูกต้องและแม่นยำในฐานะเครื่องมือวิเคราะห์เชิงเทคนิค เพื่อประเมินผลความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ (Skoog et al., 2014; Khan et al., 2022; Douvris et al., 2023; Odumbe et al., 2023) จึงทำหน้าที่เป็นเพียงเครื่องมือวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ

2) การประยุกต์ใช้แนวคิด ECRS เพื่อปรับปรุงกระบวนงาน

(1) Eliminate สามารถลดขั้นตอนที่ไม่สร้างคุณค่า เปลี่ยนการเหมารวมส่งกำจัดเป็นการตรวจคัดกรองก่อน ลดภาระการเกิดของเสียได้ 651 ลิตร และค่าใช้จ่ายรวม 98,229 บาท ส่วนการปรับลดรอบการจัดเก็บยังมีความปลอดภัย สอดคล้องตามกฎหมายการจัดการของเสียอันตรายสำหรับแหล่งกำเนิดขนาดกลาง (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2555)

(2) Combine สร้างการบูรณาการข้อมูลกับการตัดสินใจ การรวมผลการวิเคราะห์/เกณฑ์การตัดสินใจ/การจัดการแบบ One page management ทำให้มีประสิทธิภาพในการจัดการจำแนกของเสียเป็น Reuse/ Pre-treated/Disposal และคัดแยกประเภทตามความเป็นอันตรายเป็น L10, L07 และ L11 ก่อนส่งกำจัดได้ทันที

(3) Rearrange การจัดลำดับใหม่บนฐานข้อมูลและออกแบบกระบวนการใหม่ให้มีความกระชับและตรวจสอบได้

(4) Simplify การใช้ขั้นตอนและแบบฟอร์มมาตรฐานเดียวช่วยลดความสับสนของผู้ปฏิบัติงาน ทำให้การปฏิบัติงานสม่ำเสมอ สอบกลับได้ และสอดคล้องกับมาตรฐาน ESPReL อย่างชัดเจน

การประยุกต์ใช้ ECRS ในการวิจัยนี้สอดคล้องกับหลัก Lean Management ซึ่งมุ่งเพิ่มประสิทธิภาพ และลดความสูญเปล่าของกระบวนการที่ในงานบริการและงานอุตสาหกรรมการผลิต (ตุลาพล นิติเดชา, 2564; Suhardi et al., 2019)

นอกจากนี้ การใช้กรอบมาตรฐาน ESPReL เป็นแนวทางกำกับในการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงวิเคราะห์เข้ากับหลักเกณฑ์ด้านความปลอดภัยอย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับการยกระดับมาตรฐานห้องปฏิบัติการปลอดภัยของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (กาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล, 2565; ชุมพล คงนคร, 2567; วาสนา สงวนศิลป์ และตวงพร เผือกหอม, 2568) แม้จะแตกต่างในวิธีการดำเนินการ

ผลการวิจัยนี้สะท้อนการเปลี่ยนผ่านจากการจัดการของเสียเชิงปฏิบัติการ (Operational Waste Handling) ไปสู่การจัดการเชิงระบบบนฐานข้อมูล (Data-driven Systemic Management) ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนักเกิดจากการบูรณาการความถูกต้องเชิงวิเคราะห์จาก ICP-OES ประสิทธิภาพเชิงกระบวนการของ ECRS และความสอดคล้องตามกรอบมาตรฐานความปลอดภัยระบบ ESPReL ที่เชื่อมโยงกันเป็นระบบอย่างเป็นรูปธรรม

การประเมินผลการตรวจคัดกรองและความเข้มข้นของเสียโลหะหนัก หลังจากการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES

1) บริบทการประเมินผลการจัดการ

การวิจัยครั้งนี้ผลลัพธ์สำคัญคือข้อมูลการตรวจคัดกรองของเสียโลหะหนักที่เป็น Data-driven Waste Management ของระบบการจัดการ นำมาใช้เป็นฐานการตัดสินใจจัดการความเสี่ยงเพื่อกำหนดแนวทางการจัดการและปรับปรุงกระบวนการให้ปลอดภัยและเหมาะสม

ผลการศึกษาปริมาณของเสียรวม 1,023 ลิตร จำแนกของเสียเป็น 3 กลุ่ม คือ ของเสียนำกลับมาใช้ซ้ำ 635 ลิตร ของเสียบำบัดเบื้องต้น 16 ลิตร และของเสียส่งกำจัด 372 ลิตร อัตราการเกิด 127, 3.2 และ 74.4 ลิตรต่อรอบตามลำดับ ส่งผลให้สามารถลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดได้รวม 651 ลิตร แนวทางดังกล่าวสะท้อนการลดของเสียตั้งแต่ต้นทางก่อนการกำจัดขั้นสุดท้าย ซึ่งสอดคล้องกับหลักการป้องกันและลดการเกิดของเสียตามแนวทางการจัดการของเสียสากลและแนวคิด Green Analytical Chemistry (UNEP, 2013; Anastas & Eghbali, 2010)

แม้แหล่งกำเนิดของเสียส่วนใหญ่มีความเข้มข้นของโลหะหนักเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอย่างมีนัยสำคัญ แต่ห้องปฏิบัติการพิจารณาไม่ดำเนินการบำบัดที่ปลายทาง และเลือกส่งกำจัดโดยตรงภายนอก ขณะที่ของเสียประเภท Pre-treated พบเพียงครั้งเดียวและมีปริมาณเพียง 16 ลิตร สะท้อนแนวโน้มว่าของเสียจากกระบวนการวิเคราะห์ส่วนใหญ่มีค่าโลหะหนักเกินมาตรฐาน ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงกระบวนงานโดยตัดขั้นตอนการจัดการของเสียแบบ Pre-treated และกำหนดให้ส่งเข้าสู่กระบวนการ Disposal โดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 3 ตามหลัก ECRS เพื่อลดขั้นตอนที่ไม่คุ้มค่าในการปฏิบัติงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตามของเสีย Pre-treated ที่ระบายลงระบบบำบัดไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำทิ้ง น้ำผิวดิน และน้ำประปามหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ยังเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2560; ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537; การประปาส่วนภูมิภาค, 2565) ในขณะที่การจัดการของเสียประเภท Reuse สำหรับล้างวัสดุอุปกรณ์ยังไม่พบผลกระทบการปนเปื้อนในระบบการวิเคราะห์ด้านนี้ ยืนยันได้จากผลการควบคุมคุณภาพภายใน เช่น การวิเคราะห์ตัวอย่างควบคุม (Quality Control Sample) ตัวอย่าง Blank Reagent หรือ Blank Method ยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม

จึงเห็นได้ว่ากระบวนการนี้ไม่เพียงลดภาระสิ่งแวดล้อม แต่ยังช่วยลดการใช้สารเคมีใหม่ และลดการปล่อยมลพิษ ซึ่งเป็นการสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals,SDGs) ข้อที่ 12 การผลิตและการบริโภคที่รับผิดชอบ และข้อที่ 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้การบำบัดและส่งกำจัดของเสียและการปรับปรุงกระบวนงานข้างต้นเป็นการปกป้องแหล่งน้ำดิบและสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ จึงสนับสนุนเป้าหมาย

ข้อที่ 6 น้ำสะอาดและการสุขาภิบาล รวมทั้งข้อที่ 14 ชีวิตใต้น้ำอีกด้วย (United Nations, 2015)

2) เปรียบเทียบแนวทางการลดของเสียที่ต้นทาง

เมื่อเทียบกับการศึกษาของ Yusof et al. (2025) ซึ่งลดของเสียที่ต้นทางด้วยการปรับเทคนิคการสกัดใช้ตัวทำละลายอินทรีย์น้อยลงในระดับมิลลิลิตรตามแนวคิด Green Analytical Chemistry แนวทางดังกล่าวเป็นการปรับปรุงเชิงเทคนิคเฉพาะขั้นตอนและลดได้ในระดับจำกัด ขณะที่การศึกษานี้เป็นการพัฒนาระบบเชิงบูรณาการ ครอบคลุมทั้งกระบวนงาน จึงลดของเสียได้ในระดับที่สูงกว่าและเป็นการพัฒนาเชิงระบบ

การศึกษาแนวการจัดการของเสียระดับห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานระบบ ESPReL ที่มีกรอบการลดการเกิดของเสียของวาสนา สงวนศิลป์ และตวงพร เผือกหอม (2568) ที่ทดแทนเอธิเดียมโบรไมด์ด้วยสารที่มีความเป็นพิษต่ำกว่า และงานของชุมพล คงนคร (2567) ใช้ 70% แอลกอฮอล์แทน 10% ฟอร์มาลดีไฮด์ ทั้งสองการศึกษาเป็นแนวทาง Toxicity Reduction ภายใต้กรอบ ESPReL มุ่งลดความเสี่ยงอันตรายของของเสียตั้งแต่ต้นทางผ่านการ Replace มากกว่าการลดปริมาณเชิงปริมาตร ในขณะที่การศึกษาของกาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล (2565) เป็นการการนำสารจากการทดลองโครมาโตกราฟฟี่มาใช้ซ้ำแบบ Reuse เพื่อลดปริมาณของเสียในระดับหนึ่ง

การศึกษาข้างต้นแม้สอดคล้องกับหลักการป้องกันที่ต้นทาง แต่ยังเป็นการปรับปรุงเฉพาะประเด็น ดังนั้นจุดแตกต่างที่ชัดเจนของการศึกษานี้คือการบูรณาการเทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS เพื่อจัดการของเสียบนฐานข้อมูลเชิงระบบ ทำให้ลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดจากของเสีย Reuse และ Pre-treated ในระดับโครงสร้างระบบ ลดภาระการจัดการของเสียอันตรายอย่างเป็นรูปธรรม ตรวจสอบได้ และเหมาะสมกับบริบทการปฏิบัติงานได้จริง

3) เปรียบเทียบแนวทางการบำบัดที่ปลายทาง

แนวทางจัดการของเสียโลหะหนักส่วนใหญ่ในระดับสากลมุ่งเน้นการบำบัดแบบปลายทาง (End-of-pipe treatment) โดยใช้เทคโนโลยีวัสดุดูดซับทางชีวภาพ การแลกเปลี่ยนประจุ หรือกระบวนการทางเคมี (Kasalkar et al., 2025; Baharudin et al., 2025; Jasim & Ajjam, 2024; Dhenuka et al.,2025) แนวทางดังกล่าวเป็นการใช้สารเคมีหรือวัสดุในการลดความเป็นพิษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดปลายทาง แต่ยังคงสร้างกากตะกอนทุติยภูมิและต้นทุนการจัดการต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีความซับซ้อน ใช้ทรัพยากรสูง และไม่สอดคล้องกับข้อจำกัดของห้องปฏิบัติการ

ในขณะที่การศึกษานี้เป็นการลดของเสียที่ต้นทางโดยบูรณาการ ICP-OES กับแนวคิด ECRS เพื่อจำแนกและนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นการลดปริมาณของเสียที่ต้องเข้าสู่กระบวนการกำจัดตั้งแต่แรก สามารถปฏิบัติงานได้สอดคล้องกับงานประจำโดยไม่เพิ่มภาระและต้นทุนการจัดการ รวมทั้งไม่ต้องมีภาระในการกำจัดของเสียทุติยภูมิ ลดความเสี่ยงสัมผัสสารเคมี

โดยสรุป การประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ทำให้การจำแนกและประเมินความเข้มข้นของเสียโลหะหนักมีความแม่นยำ นำไปสู่การตัดสินใจเชิงข้อมูลในการจัดการอย่างเหมาะสมและปลอดภัย ผลลัพธ์สะท้อนการลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดได้อย่างมีนัยสำคัญผ่านแนวทางการลดของเสียที่ต้นทางก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดปลายทางจึงยืนยันได้ว่าการใช้ ICP-OES ร่วมกับการปรับกระบวนงานตามแนวคิด ECRS เป็นกลไกการจัดการของเสียโลหะหนักเชิงระบบที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และยั่งยืนในบริบทห้องปฏิบัติการ.

การประเมินประสิทธิภาพการจัดการของเสียโลหะหนักหลังจากประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS สำหรับพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนัก

1) ประสิทธิภาพผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษานี้ใช้หลักการคัดแยกของเสียที่มีศักยภาพนำกลับมาใช้ซ้ำซึ่งเป็นแนวทางลดของเสียที่ต้นทางในลำดับขั้นสูงสุดของการจัดการของเสีย (UNEP, 2013) ส่งผลให้สามารถลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งกำจัดได้ร้อยละ 47.39-74.80 เฉลี่ยร้อยละ 63.64 คิดเป็นปริมาณรวม 651 ลิตร และสร้างผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์รวม 98,229 บาท แบ่งเป็นการลดค่ากำจัดของเสีย 27,863 บาท และลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี 70,367 บาท เมื่อเทียบกับต้นทุนการวิเคราะห์เฉลี่ยเพียง 200 บาทต่อรอบ (รวม 1,000 บาทตลอดการศึกษา) สะท้อนให้เห็นถึงความคุ้มค่าเชิงต้นทุนและผลตอบแทนอย่างชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Jawjit, Kaewchutima และ Bumyut (2025) ที่ดำเนินการจัดการ

ขยะเทศบาลด้วยแนวทางรีไซเคิล (Recycle) สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกและขยะอินทรีย์ได้ร้อยละ 4.18-11.29 และสร้างรายได้ประมาณ 19,537 บาทต่อปี แม้งานทั้งสองมีเป้าหมายร่วมกันในการลดปริมาณของเสียและสร้างผลลัพธ์ทางเศรษฐศาสตร์ แต่แตกต่างกันในระดับของการจัดการ กล่าวคือ งานวิจัยนี้เน้นการลดที่ต้นทางผ่านการนำกลับมาใช้ซ้ำ ขณะที่ Jawjit et al., 2025 ใช้กระบวนการรีไซเคิลซึ่งเป็นขั้นตอนปลายทางของลำดับการจัดการของเสีย ดังนั้นผลลัพธ์ของการศึกษานี้จึงสะท้อนประสิทธิภาพเชิงระบบที่สูงกว่าในมิติการป้องกันการเกิดของเสียตั้งแต่ต้นทาง

2) ประสิทธิภาพด้านคุณภาพ

ผลการประเมินตามเกณฑ์ ESPReL แสดงให้เห็นพัฒนาการอย่างต่อเนื่องของระบบจัดการของเสียและความปลอดภัย โดยจากระดับห้องปฏิบัติการพื้นฐานในปี 2564 ซึ่งหัวข้อ “การลดการเกิดของเสีย” เป็นประเด็นที่ต้องพัฒนา ห้องปฏิบัติการได้ยกระดับเป็นห้องปฏิบัติการต้นแบบด้านความปลอดภัยในปี 2565 และผ่านการรับรองแบบ Peer Evaluation เลขที่ 36 2023/00001 ในปี 2566 จากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สะท้อนถึงความน่าเชื่อถือและความมีประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนา

อย่างไรก็ตาม คะแนนด้านการลดการเกิดของเสียยังคงอยู่ที่ร้อยละ 75 เนื่องจากยังไม่สามารถดำเนินการได้ครบถ้วนตามหลัก 3R (Reuse, Reduce, Recycle) ตามแนวทางของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและงานศึกษาที่เกี่ยวข้อง เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ ชุมพล คงนคร (2567) ที่ใช้หลัก Reduce ด้วยการใช้สารทดแทน ได้คะแนนร้อยละ 80 และ กาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล (2565) ที่ดำเนินการครบทั้ง 3R และได้คะแนนร้อยละ 100 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ยังคงใช้แนวทางตามการศึกษานี้เช่นเดิม

การพัฒนาความปลอดภัยห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ดำเนินการต่อเนื่องจนได้รับการรับรองระดับชาติในรูปแบบ Peer Evaluation เช่นเดียวกันกับการศึกษาของกาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล (2565) แสดงให้เห็นถึงความเข้มแข็งของระบบจัดการของเสียของห้องปฏิบัติการ และยืนยันศักยภาพของแนวทางนี้ในการพัฒนาเป็นต้นแบบ (Good practice)

โดยสรุปการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES สามารถพัฒนาระบบการจัดการของเสียโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านกระบวนการปรับปรุงให้สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยได้แนวทางการจัดการของเสียเฉพาะของห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ที่มีแนวปฏิบัติในการลดของเสียที่ชัดเจนด้วยการตรวจคัดกรองและจำแนกของเสียอย่างแม่นยำ เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำอย่างเป็นระบบ เหมาะสม ส่งผลให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของการจัดการด้านปริมาณและคุณภาพเป็นรูปธรรม ซึ่งสะท้อนผลลัพธ์ที่ชัดเจนในมิติ 3E คือ สิ่งแวดล้อม (Environmental) เศรษฐศาสตร์ (Economic) และยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ (ESPReL) แสดงผลสัมฤทธิ์ดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 ผลสัมฤทธิ์ประสิทธิภาพการจัดการของเสียโลหะหนักห้องวิเคราะห์ธาตุ 2 ในมิติ 3E

ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้เทคนิค ICP-OES ร่วมกับแนวคิด ECRS ในการลดปริมาณของเสียโลหะหนักและยกระดับระบบการจัดการของเสียอย่างเป็นรูปธรรม แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาคือ

1) ระบบคัดกรองที่พัฒนาขึ้นอาศัยเกณฑ์การตัดสินใจแบบ Threshold-based rule ของมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานหากเปลี่ยนมาตรฐานอาจให้ผลที่แตกต่างกัน

2) การศึกษาใช้ ICP-OES เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ตามงานประจำสมรรถนะของเครื่องไม่สามารถวิเคราะห์โครเมียมรูป Cr^{6+}และ Cr^{3+}ได้ จึงรายงานรูป Total Cr ตามขอบเขตการศึกษา แต่ใช้เกณฑ์ประเมินแบบหลักการ Worst-case Approach ตามเกณฑ์ค่ามาตรฐาน Cr^{6+} เพื่อเพิ่มระดับความปลอดภัยของระบบ

3) องค์ความรู้สำหรับประเมินผลการลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการจัดการเพื่อยกระดับคุณค่าการศึกษาสู่เป้าหมาย SDGs อย่างเป็นรูปธรรม

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นการบูรณาการเชิงระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นต้นแบบ Data-driven Waste Management Model สำหรับห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัย โดยใช้ข้อมูลวิเคราะห์เชิงปริมาณเป็นฐานในการตัดสินใจการจัดการ สามารถประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการที่ใช้ ICP-OES หรือเทคนิควิเคราะห์โลหะหนักอื่น ๆ ที่มีลักษณะของเสียใกล้เคียงกัน เช่น ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม อาหาร วัสดุศาสตร์ และเคมีวิเคราะห์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณกาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล เป็นอย่างสูง สำหรับการวางแนวทางการปฏิบัติงานด้านระบบการจัดการของเสียห้องปฏิบัติการของหน่วยงาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศิริอุมา เจาะจิตต์ เป็นอย่างยิ่ง สำหรับการให้แนวคิดด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและรูปแบบในการนำเสนอข้อมูลอันช่วยให้ผลงานมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภูวดล บางรักษ์ และ ผศ.ดร.พิจักษณ์ สัมพันธ์ ผู้บริหารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการพัฒนาปรับปรุงการปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องจนก่อให้เกิดการศึกษาวิจัยนี้ รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Generative AI) ในงานเขียนเชิงวิชาการ

ในงานเขียนเชิงวิชาการส่วนหนึ่งของบทความนี้ได้รับการสนับสนุนโดยเครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (เช่น ChatGPT and Microsoft 365 Copilot) ในการช่วยปรับปรุงภาษา และจัดระเบียบเนื้อหา ผู้เขียนได้ตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องทางวิชาการ ความสมบูรณ์ และความครบถ้วนของเนื้อหาทุกส่วนแล้ว

คำชี้แจงบทบาทผู้เขียน (CRediT Author Statement)

วรินญา หนูแจ่ม: การวางแนวคิด; ระเบียบวิธีวิจัย; การดำเนินการวิจัย; การจัดการข้อมูล; การสร้างภาพประกอบ; การเขียนร่างต้นฉบับ; การตรวจสอบความถูกต้อง; การทบทวนและแก้ไขต้นฉบับ

เอกสารอ้างอิง

การประปาส่วนส่วนภูมิภาค. (2565). *คำสั่งการประปาส่วนภูมิภาค ที่ 197.02/2565 เรื่อง ปรับปรุงมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค*. สืบค้นจาก https://www.mwa.co.th/wp-content/uploads/2022/12/มาตรฐานน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค.pdf

กาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล. (2564). *คู่มือการปฏิบัติงาน การจัดแยกประเภทและจัดเก็บของเสียภายในห้องปฏิบัติการ* ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.

กาญจุรีย์ ว่องไวรัตนกุล. (2565). การพัฒนาห้องปฏิบัติการเคมี 1 ตามมาตรฐานการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัย ห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย (ESPReL). *วารสารวิชาการ ปขมท.*, *11*(2), 110-123.

ชุมพล คงนคร. (2567). *การพัฒนาความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ESPReL: กรณีศึกษาห้องปฏิบัติการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย*

วลัยลักษณ์ (น. 787-797). ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 7. สถาบันวิจัยและพัฒนา: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560. (7 มิถุนายน 2560). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153 ง, หน้า 11-15.

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (24 กุมภาพันธ์ 2537). *ราชกิจจานุเบกษา* , เล่ม 111 ตอนพิเศษ 16 ง, หน้า 234-240.

ธีรยุทธ วิไลวัลย์, สุชาดา ชินะจิตร, และ จุฑามาศ ทรัพย์ประดิษฐ์. (2560). ของเสียจากห้องปฏิบัติการที่นักเคมี (มัก) มองข้าม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ตุลาพล นิติเดชา. (2564). *การประยุกต์ใช้แนวคิดลีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพงานสนับสนุนวิชาการในสถาบันการศึกษา กรณีศึกษาคณะโลจิสติกส์* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.

บริษัท รีไซเคิลเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. (2567). *รายงานการกำจัดสารเคมีและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์*.(เลขที่ MK1-24/523).

วาสนา สงวนศิลป์ และ ตวงพร เผือกหอม. (2568). การทดสอบประสิทธิภาพสารเคมีทางเลือกสำหรับการย้อมแถบดีเอ็นเอทดแทน เอธิเดียมโบรไมด์ เพื่อยกระดับความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการชีววิทยา. *วารสารวิชาการ ปขมท., 14*(3), e2468.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (2555). *แนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ (Safety Guideline for Laboratory)*. โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย (ESPReL), ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (2558). *คู่มือการประเมินความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ (ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม ครั้งที่ 2) สิงหาคม 2558 โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย (Enhancement of Safety Practice of Research Laboratory in Thailand “ESPReL”* สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์บริหารความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน มหาวิทยาลัยมหิดล. (2564). *คู่มือขอรับการตรวจประเมินและรับรองห้องปฏิบัติการในรูปแบบ Peer Evaluation*. มหาวิทยาลัยมหิดล.

Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and practice. *Chemical Society Reviews*, *39*(1), 301-312.

Association of Public Health Administrators [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Environment Federation [WEF]. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed). APHA Press.

Baharudin, F., Najman, M. A., Mohamad, I. N., Zaki, Z. Z. M., Muhd Sidek, N., & Ghazali, S. (2025). Removal of chromium (Cr) and copper (Cu) from domestic wastewater using chitosan flakes from seafood waste. *EnvironmentAsia, 18*(2), 16-26.

Dhenkula, S. P., Shende, A. D., Deshpande, L., & Pophali, G. R. (2025). Removal of heavy metals from laboratory waste liquid (LWL) generated from water and wastewater analytical laboratories. *Process Safety and Environmental Protection, 200*, 107336.

Douvris, C., Vaughan, T., Bussan, D., Bartzas, G., & Thomas, R. (2023). How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape.

Science of the Total Environment, *905*, 167242.

Jasim, A. Q., & Ajjam, S. K. (2024). Removal of heavy metal ions from wastewater using ion exchange resin in a batch process with kinetic isotherm. *South African Journal of Chemical Engineering, 49*, 43-54.

Jawjit, S., Kaewchutima, N., & Bumyut, A. (2025). Waste management and greenhouse gas emission reduction in Nakhon Si Thammarat municipality through a circular economy municipal solid waste management *model*. *Cleaner Environmental Stems*, *18*, 100313

Kasalkar, H., Kislay, N., Jadhav, A., Wagh, N., & Malbhage, G. (2025). Biosorption potential of modified guava (Psidium guajava) Leaf adsorbent for sustainable adsorption of heavy metals. *EnvironmentAsia, 18*(2), 1-15.

Khalef, R. N., Hassan, A. I., & Saleh, H. M. (2022). Heavy metal's environmental impact. *In* Saleh, H. M., & Hassan, A. I. (Eds). *Environmental impact and remediation of heavy metals*. London: IntechOpen.

Khan, S. R., Sharma, B., Chawla, P. A., & Bhatia, R. (2022). Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES): A powerful analytical technique for elemental analysis. *Food Analytical Methods*, *15*, 666-688.

Odumbe, E. O., Murunga, S. I., & Ndiiri, J. G. (2023). Heavy metal pollution and health risk assessment of wastewater-irrigated soil and vegetables in Nairobi, Kenya. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(1), 102.

Phaenark, C., Jantrasakul, T., Paejaroen, P., Chunchob, S., & Sawangproh, W. (2023). Sugarcane bagasse and corn stalk biomass as a potential sorbent for the removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solutions. *Trends in Sciences*, *20*(2), 6221.

Rajoria, S., Vashishtha, M., & Sangal, V. K. (2023). Heavy metal ions in wastewater: A review on detection and toxicity. *Chemical Engineering and Process Techniques*, *8*(3), 1-6.

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentals of analytical chemistry* (9th ed.). Belmont, CA: Brooks/Cole Cengage Learning.

Suhardi, B., Anisa, N., & Laksono, P. W. (2019). Minimizing waste using lean manufacturing and ECRS principle in Indonesian furniture industry. *Production & Manufacturing Research Journal, 6*(1), 1567019.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York, NY: United Nations. Retrieved from https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld

United Nations Environment Programme. (2013). *Guidelines for national waste management strategies: Moving from challenges to Opportunities* Retrieved from https://cwm.unitar.org/national-profiles/publications/cw/wm/UNEP_UNITAR_NWMS_English.pdf

Xu, W., Jin, Y., & Zeng, G. (2024). Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: A review on source, toxicity and remediation methods. *Green Chemistry Letters and Reviews, 17*(1), 2404235.

Yusof, R. M., Othman, N. Z., Hanapi, N. S. M., Kamaruzaman, S., Mahmood, W. A. W., & Anis, A. L. (2025). Recent advances in ionic

liquid-modified graphene oxide as a QuEChERS compatible sorbent for pharmaceutical analysis of water samples. *Trends in Sciences, 22*(10), 10675.