PROCEEDINGS CONFERENCE SISI INDONESIA III
Tut Wuri Handayani: Development of Education, Science and Technology, and Humanity for the Progress of the Indonesian People
https://conference.sinesia.id/ncrcs-sinesia | E-ISSN: 3110-1062 |
https://doi.org/10.69836/ncrcs-sinesia

Pemantauan Logam pada Pupuk dan POME menggunakan AAS untuk Industri Sawit Berkelanjutan di Riau

Monitoring Metals in Fertilizers and POME using AAS for Sustainable Palm Oil Industry in Riau

Meidita Kemala Sari[1*], Sri Hilma Siregar[2], Daviella David[3], Muhammad Wafiq Nugraha[4], Akmilna Aqlina Manurung[5]
meiditakemalasari@umri.ac.id
Universitas Muhammadiyah Riau, Riau, Indonesia

Info Article
Submitted: 2 May 2026 | **Revised**: 13 May 2026 | **Accepted**: 14 May 2026
How to cite: Meidita Kemala Sari, "Pemantauan Logam pada Pupuk dan POME menggunakan AAS untuk Industri Sawit Berkelanjutan di Riau", *Proceedings Conference Sisi Indonesia III*, 2026, P. 299-317.

ABSTRACT

Riau Province is one of Indonesia's major palm oil producers, making a significant contribution to the national economy. Monitoring metal content is essential to sustainable industrial waste management practices. This study aims to analyse the metal content in fertiliser and Palm Oil Mill Effluent (POME) samples in Riau using Atomic Absorbtion Spectroscopy (AAS). The research method involves sample preparation via acid digestion to dissolve metal elements within the sample matrix, followed by quantitative analysis using AAS based on the principle of radiation absorption by free atoms at specific wavelengths. This technique enables selective and sensitive identification and quantification of metal elements. The results indicate the presence of several metals in fertiliser and POME samples, such as potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), and cadmium (Cd), with varying concentrations. These findings are important for evaluating fertiliser quality and assessing the potential environmental impact of industrial waste. Furthermore, this study contributes to environmentally responsible waste management practices aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly 6, 12 and 15.

Keywords: *AAS, metals, fertilizer, POME, SDGs.*

ABSTRAK

Provinsi Riau merupakan salah satu wilayah penghasil utama komoditas kelapa sawit di Indonesia yang berkontribusi besar terhadap perekonomian nasional. Kegiatan pemantauan kandungan logam menjadi penting sebagai bagian dari upaya pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan logam pada sampel pupuk dan limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) di Riau menggunakan teknik *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Metode penelitian meliputi tahap preparasi sampel melalui proses destruksi untuk melarutkan unsur logam dalam matriks sampel, kemudian dilakukan pengukuran konsentrasi logam menggunakan AAS berdasarkan prinsip penyerapan radiasi oleh atom bebas pada panjang gelombang spesifik. Metode ini memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi logam secara selektif dan sensitif. Hasil analisis menunjukkan keberadaan beberapa logam pada sampel pupuk dan limbah POME, seperti kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), tembaga (Cu), seng (Zn), timbal (Pb), dan kadmium (Cd) dengan konsentrasi yang bervariasi. Informasi ini penting untuk mengevaluasi kualitas pupuk serta potensi dampak lingkungan dari limbah industri. Pemantauan kandungan logam menggunakan teknik instrumentasi yang tepat dapat menjadi dasar dalam pengelolaan limbah yang lebih aman dan berkelanjutan. Hasil penelitian ini juga memberikan kontribusi terhadap upaya pengelolaan kualitas air dan limbah industri yang lebih bertanggung jawab, sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya 6, 12 dan 15.

Kata Kunci: *AAS, logam, pupuk, POME, SDGs.*

This work is licensed under CC BY-SA 4.0

Pendahuluan

Provinsi Riau dikenal sebagai salah satu pusat produksi kelapa sawit terbesar di Indonesia, dengan luas perkebunan mencapai lebih dari 2,8 juta hektar dan kontribusi signifikan terhadap ekspor minyak sawit nasional (BPS, 2024). Aktivitas industri pengolahan kelapa sawit menghasilkan limbah cair utama berupa *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan volume yang besar, yaitu sekitar 0,5–0,75 m^3 per ton tandan buah segar (TBS) yang diolah (Mohammad et al., 2021; Veranica et al., 2024). Limbah ini mengandung bahan organik tinggi serta berpotensi mengandung unsur logam yang dapat mencemari lingkungan, khususnya badan air dan tanah, apabila tidak dikelola dengan baik. Beberapa studi menunjukkan bahwa sistem produksi kelapa sawit, termasuk produk seperti *crude palm oil* (CPO), dapat mengandung logam akibat pengaruh bahan baku, proses pengolahan, maupun peralatan industri, sehingga berpotensi menjadi sumber kontaminasi lingkungan apabila tidak dilakukan pengendalian yang tepat (Sisnayati et al., 2022; Veranica et al., 2024).

Secara teoritis, logam dalam limbah industri dapat berasal dari bahan baku, proses produksi, maupun peralatan yang digunakan. Beberapa logam seperti kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) bersifat esensial bagi tanaman, namun keberadaan logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) dalam konsentrasi tertentu dapat bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan serta kesehatan manusia (Hou et al., 2020; Karno et al., 2024; Mititelu et al., 2025; Sisnayati et al., 2022). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah POME sebagai pupuk atau bahan amelioran tanah harus mempertimbangkan kandungan logamnya agar tidak menimbulkan akumulasi logam di lingkungan (Rusdianto et al., 2023). Penelitian sebelumnya juga menegaskan bahwa penggunaan limbah organik dalam pertanian perlu disertai dengan pengujian kualitas, terutama kandungan logam, guna menjamin keberlanjutan kesuburan tanah dan keamanan hasil pertanian (Hou et al., 2020; Mititelu et al., 2025).

Dalam konteks analisis, *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) merupakan metode yang digunakan secara luas dalam penentuan kandungan logam karena memiliki sensitivitas tinggi dan selektivitas yang baik. Prinsip kerja AAS didasarkan pada penyerapan radiasi oleh atom bebas pada panjang gelombang spesifik, sehingga memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi logam hingga tingkat jejak (de A. Costa et al., 2026; Kladsomboon et al., 2020). Studi terbaru menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan hasil analisis dengan ketelitian tinggi pada berbagai matriks kompleks, termasuk produk dan limbah industri kelapa sawit, sehingga menjadikannya sebagai teknik yang relevan dalam pemantauan kualitas lingkungan (David et al., 2025).

Perkembangan penelitian terkini menunjukkan bahwa kajian mengenai kandungan logam dalam sistem industri kelapa sawit telah dilakukan pada

berbagai aspek, seperti analisis logam pada produk akhir, pengembangan metode analisis menggunakan AAS maupun teknik spektroskopi lainnya, serta pengolahan limbah POME untuk menurunkan beban pencemaran. Beberapa studi melaporkan bahwa logam seperti Pb, Cd, Cu, dan Zn masih dapat terdeteksi meskipun telah melalui proses pengolahan, yang menunjukkan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap kualitas limbah dan produk turunannya (Hashiguchi et al., 2020; Hou et al., 2020; Rusdianto et al., 2023; Zakaria et al., 2021). Hal ini menegaskan bahwa isu kontaminasi logam dalam industri kelapa sawit masih menjadi perhatian penting dalam bidang kimia lingkungan dan teknologi pengolahan limbah.

Namun demikian, penelitian yang ada masih memiliki beberapa keterbatasan. Sebagian besar studi cenderung berfokus pada satu jenis matriks saja, seperti limbah POME atau produk minyak sawit, tanpa mengkaji keterkaitan antara limbah dan produk turunannya seperti pupuk. Selain itu, kajian yang secara spesifik dilakukan di wilayah strategis seperti Riau masih relatif terbatas, padahal karakteristik limbah sangat dipengaruhi oleh kondisi lokal dan intensitas industri. Di sisi lain, integrasi hasil analisis kimia dengan kerangka keberlanjutan global, seperti *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*) dan SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), juga masih jarang dilakukan dalam penelitian sejenis. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengkaji kandungan logam pada sistem industri kelapa sawit (David et al., 2025; Hou et al., 2020; UN, 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada pengkajian kandungan logam pada pupuk dan limbah POME di Riau serta implikasinya terhadap kualitas lingkungan, khususnya dalam konteks pengelolaan limbah industri. Analisis dilakukan menggunakan metode AAS untuk memperoleh data kuantitatif yang akurat sebagai dasar evaluasi keamanan dan keberlanjutan pemanfaatan limbah. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam menilai kualitas pupuk berbasis limbah serta potensi risiko pencemaran yang ditimbulkan, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengelolaan limbah yang lebih aman dan bertanggung jawab.

Selain itu, penelitian ini memiliki unsur kebaruan pada integrasi analisis logam pada dua matriks sekaligus, yaitu pupuk dan POME dari wilayah Riau, dengan pendekatan instrumentasi yang dikaitkan secara langsung dengan kerangka SDGs, khususnya aspek pengelolaan kualitas air dan praktik produksi berkelanjutan. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan perspektif yang lebih komprehensif dalam menghubungkan data analitik laboratorium dengan isu lingkungan global serta kebijakan keberlanjutan.

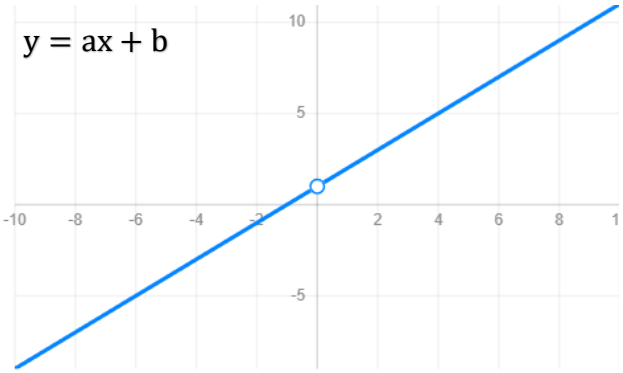
Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk menentukan kandungan logam pada pupuk dolomit, pupuk organik padat dan limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Sumber data yang digunakan adalah data primer yang diperoleh melalui hasil analisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan menentukan konsentrasi logam berdasarkan kurva kalibrasi dan persamaan regresi linier (de A. Costa et al., 2026; Harvey, 2000; Riyanto, 2014).

Tahap awal penelitian dilakukan melalui preparasi sampel menggunakan metode destruksi, baik secara kering maupun basah, untuk melarutkan unsur logam dalam matriks sampel. Pada sampel pupuk dolomit dan pupuk organik padat, proses destruksi dilakukan secara basah menggunakan campuran asam kuat. Sebanyak 2 g sampel ditimbang secara teliti ke dalam erlenmeyer 125 mL, kemudian ditambahkan 50 mL akuades dan dipanaskan hingga mendidih selama 5–10 menit. Setelah itu ditambahkan masing-masing 4 mL HCl pekat dan HNO_3 pekat, lalu dipanaskan kembali hingga volume larutan berkurang sekitar setengahnya. Larutan didinginkan, disaring, dan dimasukkan ke dalam labu takar 100 mL, kemudian ditambahkan air destilasi hingga tanda tera dan dihomogenkan (Agustiyar et al., 2022; Ali et al., 2024).

Pada sampel limbah cair POME, preparasi dilakukan dengan metode destruksi basah. Sampel dihomogenkan, kemudian sebanyak 100 mL dimasukkan ke dalam gelas piala dan ditambahkan 5 mL HNO_3 pekat. Larutan dipanaskan perlahan hingga volumenya berkurang menjadi sekitar 10–20 mL, kemudian disaring dan dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL. Volume larutan ditambah air bebas mineral hingga tanda tera dan dihomogenkan sehingga siap untuk analisis (Rusdianto et al., 2023).

Tahap analisis logam dilakukan menggunakan metode AAS yang diawali dengan pembuatan larutan standar secara umum dari larutan induk masing-masing logam yang akan dianalisis, dalam hal ini logam kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), tembaga (Cu), seng (Zn), timbal (Pb), dan kadmium (Cd). Larutan induk diencerkan secara bertingkat untuk memperoleh beberapa variasi konsentrasi standar dalam rentang tertentu sesuai kebutuhan analisis. Deret larutan standar ini digunakan untuk menyusun kurva kalibrasi. Penentuan konsentrasi logam dalam sampel dilakukan berdasarkan persamaan regresi linier dari kurva kalibrasi antara konsentrasi standar dan nilai absorbansi. Hubungan tersebut dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 1. Kurva kalibrasi dan persamaan regresi

di mana y adalah absorbansi, x adalah konsentrasi logam (mg/L), a adalah kemiringan (slope), dan b adalah intersep. Nilai konsentrasi logam dalam sampel diperoleh dengan mensubstitusikan nilai absorbansi sampel ke dalam persamaan regresi tersebut (Riyanto, 2014; Rusdianto et al., 2023; Sugito et al., 2022). Untuk sampel padatan seperti pupuk, hasil analisis yang diperoleh dalam satuan mg/L selanjutnya dikonversi menjadi mg/kg menggunakan persamaan:

$$C_{(mg/kg)} = \frac{C_{(mg/L)} \times V}{m}$$

di mana C (mg/L) adalah konsentrasi hasil pembacaan AAS, *V* adalah volume akhir larutan (L), dan m adalah massa sampel (kg) (Harvey, 2000; Riyanto, 2014; Sugito et al., 2022). Persamaan ini digunakan untuk memperoleh kadar logam aktual dalam sampel padat.

Selain itu, untuk menjamin keakuratan dan keandalan metode analisis, dilakukan uji validasi metode yang meliputi parameter batas deteksi (*Limit of Detection*/LOD), batas kuantifikasi (*Limit of Quantification*/LOQ), serta uji perolehan kembali (*recovery*) (Agustiyar et al., 2022; Asmorowati et al., 2025; Hadianto et al., 2026; Riyanto, 2014; Tangketasik et al., 2024). Nilai LOD dan LOQ dihitung berdasarkan simpangan baku (SD) dari pengukuran blanko dan kemiringan kurva kalibrasi (slope), dengan persamaan sebagai berikut:

$$LOD = \frac{3 \times SD}{a}$$

$$LOQ = \frac{10 \times SD}{a}$$

di mana SD adalah simpangan baku dari pengukuran blanko dan a adalah slope dari kurva kalibrasi (Sugito et al., 2022).

Presisi metode dievaluasi menggunakan parameter *Relative Percent Difference* (%RPD) serta dibandingkan dengan koefisien variasi teoritis berdasarkan persamaan Horwitz (*CV Horwitz*). Nilai %RPD dihitung dari hasil pengukuran duplo menggunakan persamaan:

$$\%\mathrm{RPD} = \frac{|X_1 - X_2|}{(X_1 + X_2)/2} \times 100\%$$

di mana X_1 dan X_2 adalah hasil pengukuran ulangan. Selanjutnya, nilai presisi dibandingkan dengan *CV Horwitz* yang dihitung menggunakan persamaan:

$$\mathrm{CV_{Horwitz}}(\%) = 2^{(1-0{,}5 \log C)}$$

dengan C merupakan konsentrasi analit dalam bentuk fraksi massa. Untuk memperkuat evaluasi, digunakan parameter *Horwitz Ratio* (HorRat) yang dinyatakan sebagai perbandingan antara presisi hasil pengukuran terhadap presisi teoritis, yaitu:

$$\mathrm{HorRat} = \frac{\%\mathrm{RSD}}{\mathrm{CV_{Horwitz}}}$$

di mana %RSD dapat diasumsikan setara dengan %RPD untuk pengukuran duplo. Nilai HorRat yang berada pada rentang 0,5–2 menunjukkan bahwa metode memiliki presisi yang dapat diterima, sedangkan nilai yang lebih kecil dari 0,5 mengindikasikan presisi yang sangat baik (Agustiyar et al., 2022; Hadianto et al., 2026; Rahmadhani & Utami, 2023; Riyanto, 2014; Tangketasik et al., 2024; Zain & Malik, 2024).

Uji *recovery* dilakukan dengan menambahkan larutan standar logam ke dalam sampel (*spiking*), kemudian dianalisis kembali menggunakan metode yang sama. Persentase *recovery* dihitung menggunakan persamaan:

$$\%\mathrm{Recovery} = \frac{C_{\mathrm{temuan}} - C_{\mathrm{awal}}}{C_{\mathrm{tambahan}}} \times 100\%$$

di mana C_{temuan} adalah konsentrasi setelah penambahan standar, C_{awal} adalah konsentrasi sebelum penambahan, dan $C_{tambahan}$ adalah konsentrasi standar yang ditambahkan. Nilai *recovery* yang baik umumnya berada pada rentang 80–120%, yang menunjukkan bahwa metode memiliki akurasi yang memadai (Agustiyar et al., 2022; Rahmadhani & Utami, 2023; Riyanto, 2014; Tangketasik et al., 2024; Zain & Malik, 2024).

Dengan adanya parameter validasi ini, metode AAS yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan memiliki tingkat ketelitian, akurasi, dan sensitivitas yang baik (de A. Costa et al., 2026; Hadianto et al., 2026; Zain & Malik, 2024) sehingga hasil analisis kandungan logam pada pupuk dan POME dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Hasil dan Pembahasan

1.1 Atomic Absorption Spectrophotometry

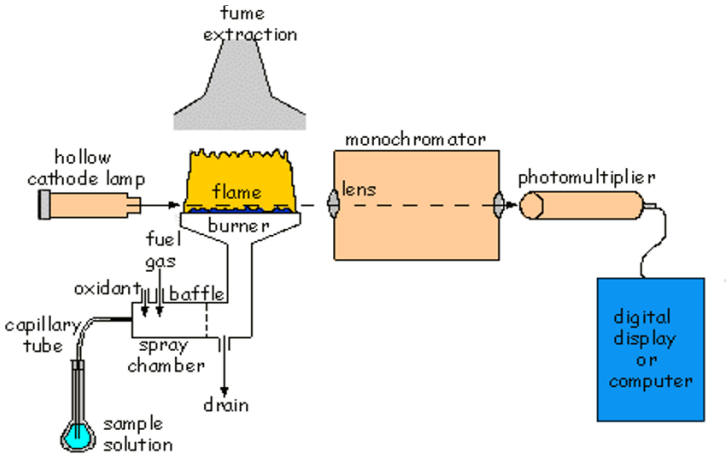
Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) merupakan teknik analitik kuantitatif maupun kualitatif yang digunakan untuk menentukan kadar logam berdasarkan pengukuran penyerapan cahaya oleh atom bebas dalam fase gas. Metode ini sangat penting dalam analisis unsur logam karena memiliki selektivitas

tinggi, sensitivitas baik, serta mampu mengukur logam pada konsentrasi rendah hingga jejak. Dalam bidang lingkungan dan pertanian, AAS banyak dimanfaatkan untuk menganalisis kandungan Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd, Cr, dan Ni pada tanah, air, pupuk, maupun limbah industri. Keunggulan tersebut menjadikan AAS sebagai salah satu metode standar dalam laboratorium pengujian mutu dan pemantauan pencemaran logam berat (de A. Costa et al., 2026; Hadianto et al., 2026; Souto et al., 2025; Tangketasik et al., 2024).

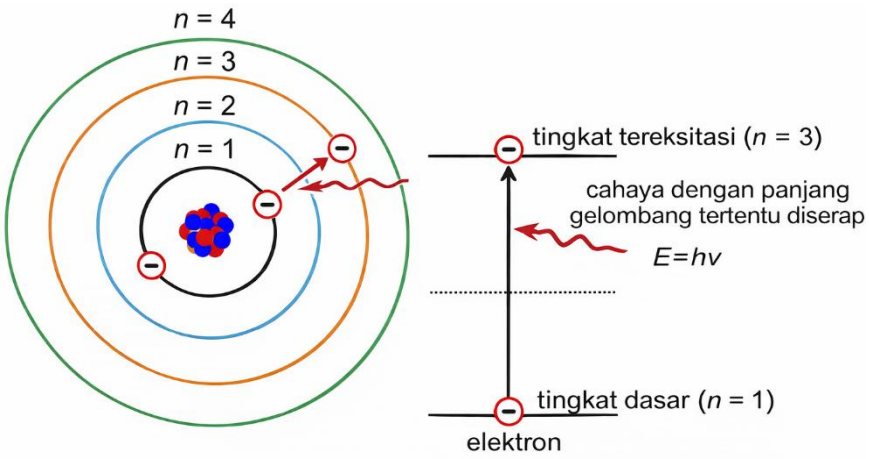
Prinsip dasar AAS adalah interaksi antara radiasi gelombang elektromagnetik pada panjang gelombang spesifik (sekitar 190–900 nm) dengan atom unsur yang dianalisis (Asmorowati et al., 2025; Harvey, 2000; Maharani et al., 2024; Punia et al., 2022; Tomas et al., 2025). Ketika atom menyerap energi cahaya yang sesuai, elektron pada kulit terluar mengalami eksitasi dari keadaan dasar menuju tingkat energi lebih tinggi. Setiap unsur memiliki konfigurasi elektron yang berbeda, sehingga energi eksitasi dan panjang gelombang serapannya bersifat khas. Oleh karena itu, Fe, Zn, Cu, dan unsur lainnya dapat dianalisis secara selektif tanpa banyak gangguan dari unsur lain. Besarnya energi radiasi yang diserap sebanding dengan jumlah atom bebas yang berada pada jalur optik, sehingga konsentrasi unsur dapat dihitung secara akurat menggunakan prinsip Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa absorbansi (A) berbanding lurus dengan konsentrasi analit (c) dan panjang lintasan cahaya, dirumuskan sebagai:

$$A = \varepsilon bc$$

Dalam AAS, peningkatan konsentrasi logam akan meningkatkan jumlah radiasi yang diserap, sehingga kadar logam dapat dihitung melalui kurva kalibrasi (de A. Costa et al., 2026; Harvey, 2000; Tomas et al., 2025).



Gambar 2. Bagian-bagian umum pada AAS (sumber: envelife.co.id)



Gambar 3. Ilustrasi radiasi elektromagnetik pada kulit atom logam

Secara teoritis, dasar serapan atom dijelaskan melalui konsep kuantisasi energi. Energi atom dinyatakan dalam paket diskrit (kuanta) menurut persamaan Planck, yaitu $E = h\nu$, sedangkan perubahan energi transisi elektron dirumuskan sebagai $\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Pada saat atom logam menyerap foton dengan energi yang tepat, elektron berpindah dari tingkat energi dasar (E_0) ke tingkat tereksitasi (E_1). Perbedaan tingkat energi tiap unsur yang tidak sama (Gambar 3), maka panjang gelombang serapan masing-masing unsur juga berbeda atau melalui persamaan berikut $M + h\nu \rightarrow M^*$ (de A. Costa et al., 2026; Harvey, 2000). Fenomena inilah yang menjadi dasar kemampuan AAS dalam identifikasi dan penentuan kadar logam secara spesifik serta presisi tinggi.

Prinsip kerja AAS diawali dengan proses atomisasi sampel cair menjadi atom bebas dalam fase gas pada suhu tinggi. Tahapan atomisasi meliputi nebulisasi (sampel diubah menjadi aerosol halus), desolvasi (pelarut menguap), volatilisasi (partikel menjadi molekul gas), dan disosiasi (molekul terpecah menjadi atom bebas keadaan dasar) (Gambar 2). Awan atom bebas kemudian ditembus cahaya dari *Hollow Cathode Lamp* (HCL) yang memancarkan garis spektrum spesifik unsur

target. Cahaya yang telah melewati sampel diteruskan ke monokromator dan detektor untuk mengukur penurunan intensitas radiasi. Berdasarkan jenis atomisasinya, AAS dibedakan menjadi Flame AAS (FAAS), Graphite Furnace AAS (GFAAS), dan Cold Vapor/Vapor Generation AAS untuk unsur tertentu seperti Hg dan As. FAAS lebih cepat dan sederhana, sedangkan GFAAS lebih sensitif untuk konsentrasi sangat rendah (Asmorowati et al., 2025; de A. Costa et al., 2026; Maharani et al., 2024).

Dalam konteks perkebunan kelapa sawit di Riau, AAS sangat berguna sebagai metode pemantauan kandungan logam pada pupuk dan limbah POME. Pada pupuk, AAS digunakan untuk mengukur unsur hara mikro seperti Fe, Zn, Cu, dan Mn yang dibutuhkan tanaman sawit, sekaligus mendeteksi logam berat seperti Pb atau Cd yang berpotensi mencemari tanah (Hou et al., 2020; Mititelu et al., 2025; Punia et al., 2022). Pada POME, analisis berkala diperlukan untuk mengetahui keberadaan logam hasil korosi peralatan atau kontaminasi proses industri sebelum limbah diaplikasikan ke lahan atau dibuang ke lingkungan (Mohammad et al., 2021; Veranica et al., 2024). Pemantauan ini mendukung pengelolaan perkebunan berkelanjutan dan sejalan dengan SDGs, khususnya 6 (*Clean Water and Sanitation*), 12 (*Responsible Consumption and Production*), dan 15 (*Life on Land*) (UN, 2025).

1.2 Preparasi sampel

Preparasi sampel merupakan tahap penting dalam analisis logam menggunakan AAS, karena prinsip dasar metode ini mensyaratkan bahwa sampel harus berada dalam bentuk larutan homogen agar atom logam dapat teratomisasi secara optimal. Oleh karena itu, dilakukan proses destruksi untuk melarutkan matriks sampel dan melepaskan unsur logam yang terikat di dalamnya. Secara umum, destruksi sampel dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu destruksi kering (*dry ashing*) dan destruksi basah (*wet digestion*) (Andriani et al., 2022; Asmorowati et al., 2020; I. S. Putri et al., 2025).

Pada penelitian ini, sampel pupuk organik padat dan pupuk dolomit dipreparasi menggunakan kombinasi destruksi kering dan destruksi basah. Destruksi kering dilakukan melalui proses pengabuan pada suhu tinggi (±400–500°C) menggunakan furnace, yang bertujuan untuk menghilangkan komponen organik dan menyisakan residu anorganik berupa oksida logam. Proses ini dapat digambarkan secara umum sebagai berikut:

$$\text{Matriks organik} + O_2 \xrightarrow{\Delta^\circ C} CO_2 + H_2O + \text{abu (oksida logam)}$$

Selanjutnya, residu hasil destruksi kering dilanjutkan dengan destruksi basah menggunakan campuran asam kuat seperti HNO_3 dan HCl, reaksinya melibatkan pemanasan hingga campuran asam tersebut berkurang. Asam nitrat berperan sebagai oksidator kuat yang melarutkan logam menjadi bentuk ionik, sedangkan

HCl membantu pembentukan kompleks klorida yang stabil (Asmorowati et al., 2020; Faqihuddin & Ubaydillah, 2021; Harvey, 2000; Jijingi et al., 2025). Reaksi umum yang terjadi dapat dituliskan sebagai:

$$M_{(s)} + HNO_{3(l)} \rightarrow M^{n+} + NO_2 + H_2O$$
$$M^{n+} + HCl_{(l)} \rightarrow MCl_{n(aq)} + H^+$$

Dimana M merujuk pada logam yang ada pada matriks organik, dan n adalah bilangan muatan elektron/jumlah atom pada logam. Pada penelitian ini M dapat berupa logam K, Mg, Ca, Cu, Zn, Pb dan Cd sesuai kandungan logam pada sampel. Metode destruksi basah dikenal efektif dalam melarutkan logam dari matriks kompleks karena penggunaan asam kuat yang mampu mendekomposisi bahan organik dan anorganik secara simultan. Kombinasi destruksi kering dan basah ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pelarutan logam serta meminimalkan kehilangan unsur volatil selama proses preparasi (Jijingi et al., 2025; I. S. Putri et al., 2025).

Berbeda dengan sampel padatan, sampel limbah cair POME dipreparasi menggunakan metode destruksi basah secara langsung. Hal ini dikarenakan sampel sudah berada dalam fase cair sehingga tidak memerlukan tahap pengabuan. Proses destruksi dilakukan dengan penambahan asam nitrat pekat (HNO_3) dan pemanasan untuk mengoksidasi senyawa organik serta melarutkan logam ke dalam larutan. Reaksi oksidasi yang terjadi secara umum dapat dituliskan sebagai:

$$\text{Senyawa organik} + HNO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O + NO_x$$

Penggunaan HNO_3 sebagai agen oksidator utama dalam destruksi basah telah banyak digunakan karena kemampuannya dalam melarutkan logam dan mengoksidasi bahan organik secara efisien, serta menghasilkan larutan yang kompatibel dengan analisis AAS (Asmorowati et al., 2020; Faqihuddin & Ubaydillah, 2021; I. S. Putri et al., 2025).

Setelah destruksi basah, larutan didinginkan, disaring, kemudian diencerkan dengan air destilasi hingga volume tertentu dalam labu takar dan dihomogenkan sebelum dianalisis menggunakan AAS. Pengenceran ini bertujuan menyesuaikan konsentrasi agar berada dalam rentang linier serta mengurangi efek matriks. Faktor pengenceran (FP) dihitung sebagai:

$$FP = \frac{V_{akhir}}{V_{sampel}}$$

di mana V_{akhir} adalah volume akhir dan V_{sampel} adalah volume aliquot. Konsentrasi logam aktual diperoleh dari hasil pembacaan AAS yang dikalikan dengan faktor pengenceran tersebut (Agustiyar et al., 2022; Harvey, 2000; I. S. Putri et al., 2025).

Dengan demikian, pemilihan metode destruksi pada penelitian ini disesuaikan dengan karakteristik sampel, di mana sampel padat memerlukan kombinasi destruksi kering dan basah untuk memastikan pelarutan optimal, sedangkan sampel cair cukup menggunakan destruksi basah. Tahap preparasi ini

sangat menentukan kualitas hasil analisis karena berpengaruh langsung terhadap akurasi dan ketelitian pengukuran logam menggunakan AAS (I. S. Putri et al., 2025).

1.3 Validasi metode uji dan Hasil analisis pada sampel

Hasil validasi metode menunjukkan bahwa kurva kalibrasi untuk seluruh logam yang dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) memiliki linearitas yang sangat baik, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) berada pada kisaran 0,9832–0,9999 (Tabel 1). Nilai ini mengindikasikan hubungan linier yang kuat antara konsentrasi dan absorbansi, sehingga metode yang digunakan dapat dikategorikan akurat dan reliabel untuk analisis logam dalam matriks pupuk maupun limbah.

Sensitivitas metode juga tergolong baik, yang ditunjukkan oleh nilai batas deteksi (LOD) dan batas kuantifikasi (LOQ) yang relatif rendah. Logam Zn pada limbah POME memiliki LOD terendah (0,0005 mg/L), sedangkan logam Pb menunjukkan LOD yang lebih tinggi (0,0960 mg/L), sehingga sensitivitas terhadap Pb relatif lebih rendah dibandingkan logam lainnya (Tabel 1). Nilai LOD Pb yang lebih tinggi disebabkan oleh karakteristik garis serapan Pb yang kurang sensitif, sehingga perubahan absorbansi terhadap konsentrasi relatif kecil dibandingkan logam seperti Zn dan Cu. Selain itu, efisiensi atomisasi Pb dalam AAS lebih rendah karena cenderung membentuk senyawa stabil di dalam nyala, sehingga jumlah atom bebas yang terdeteksi berkurang. Faktor lain seperti interferensi matriks dan rasio sinyal terhadap noise yang rendah juga menyebabkan sensitivitas deteksi Pb menjadi lebih rendah. Meskipun demikian, seluruh parameter masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk analisis lingkungan (Grebneva-balyuk, 2022; Hadianto et al., 2026; Jijingi et al., 2025; Riyanto, 2014; Shrivastava & Gupta, 2011; Tangketasik et al., 2024).

Tabel 1. Parameter Validasi Metode Analisis Logam Menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS)

Sampel	Logam	Persamaan Regresi	R^2	LOD (mg/L)	LOQ (mg/L)	%RPD	CV Horwitz (%)	HorRat	%Recovery
Pupuk Organik Padat	K dalam K_2O	$y = 0{,}2418x - 0{,}0006$	0,9999	0,0042	0,0140	1,59	2,80	0,57	112,51
	Zn	$y = 0{,}0665x - 0{,}1549$	0,9930	0,0065	0,0217	0,08	3,69	0,02	112,51
Pupuk Dolomite	Mg dalam MgO	$y = 0{,}4899x + 0{,}0445$	0,9832	0,0031	0,0102	0,20	2,15	0,09	98,64
	Ca dalam CaO	$y = 0{,}0486x + 0{,}0005$	0,9997	0,0185	0,0617	1,04	2,96	0,35	101,22
Limbah POME	Cu	$y = 0{,}1234x + 0{,}0020$	0,9997	0,0068	0,0227	0,37	3,11	0,12	97,85
	Zn	$y = 0{,}4451x + 0{,}0112$	0,9996	0,0005	0,0002	0,18	3,45	0,05	99,74
	Pb	$y = 0{,}0178x + 0{,}0053$	0,9990	0,0960	0,3200	1,96	4,22	0,46	95,18
	Cd	$y = 0{,}4244x + 0{,}0075$	0,9993	0,0025	0,0082	1,90	3,88	0,49	96,47

Tabel 2. Hasil Analisis Kadar Logam pada Sampel Pupuk Organik, Dolomit, dan Limbah POME serta Evaluasi terhadap Standar Mutu

Sampel	Logam	Konsentrasi/Kadar Sampel				Keterangan
		(mg/L)	FP	(mg/g)	Setara (%)	
Pupuk Organik Padat A	K dalam K_2O	241,80	10	241,80	24,18	Memenuhi mutu pupuk organik; unsur hara makro utama (SNI 7763:2018)
	Zn	0,6650	100	0,6650	0,0665	Unsur mikro esensial; masih dalam batas aman (SNI 7763:2018)
Pupuk Organik Padat B	K dalam K_2O	242,00	10	100,70	24,20	Memenuhi mutu pupuk organik; unsur hara makro utama (SNI 7763:2018)
	Zn	0,6700	100	1,0020	0,0670	Unsur mikro esensial; masih dalam batas aman (SNI 7763:2018)
Dolomite A	Mg dalam MgO	0,9570	1000	95,70	9,57	Memenuhi kisaran MgO dolomit pertanian (SNI 02-2804-2005)
	Ca dalam CaO	1,7610	1000	176,10	17,61	Memenuhi kisaran CaO dolomit pertanian (SNI 02-2804-2005)
Dolomite B	Mg dalam MgO	0,9550	1000	95,50	9,55	Memenuhi kisaran MgO dolomit pertanian (SNI 02-2804-2005)
	Ca dalam CaO	1,7430	1000	174,30	17,43	Memenuhi kisaran CaO dolomit pertanian (SNI 02-2804-2005)
Limbah POME X	Cu	0,7779	1	-	-	Di bawah baku mutu limbah cair industri sawit (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Zn	0,8993	1	-	-	Konsentrasi rendah; aman lingkungan (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Pb	< LOD	1	-	-	Tidak terdeteksi signifikan (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Cd	< LOD	1	-	-	Tidak terdeteksi signifikan (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
Limbah POME Y	Cu	0,6102	1	-	-	Di bawah baku mutu limbah cair industri sawit (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Zn	1,7445	1	-	-	Konsentrasi rendah; masih aman (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Pb	< LOD	1	-	-	Tidak terdeteksi signifikan (Permen LN No. 5 Tahun 2004)
	Cd	0,0048	1	-	-	Sangat rendah; di bawah ambang batas (Permen LN No. 5 Tahun 2004)

Uji presisi yang ditunjukkan oleh nilai %RPD berada pada kisaran 0,08–1,96%, yang seluruhnya berada di bawah 5%, serta nilai HorRat <2, menandakan bahwa metode memiliki presisi yang sangat baik dan konsistensi hasil yang tinggi. Parameter akurasi yang dinyatakan sebagai %recovery menunjukkan bahwa metode AAS memiliki tingkat ketepatan yang baik, dengan nilai recovery berada dalam rentang yang dapat diterima sekitar 80–120% (Tabel 1). Nilai yang mendekati 100% mengindikasikan bahwa proses preparasi dan analisis tidak menyebabkan kehilangan analit yang signifikan serta minim gangguan matriks (Agustiyar et al., 2022; Grebneva-balyuk, 2022; Riyanto, 2014; Shrivastava & Gupta, 2011). Konsistensi nilai %recovery antar pengulangan juga memperkuat keandalan metode, sehingga bersama dengan hasil uji linearitas dan presisi, metode ini dapat dinyatakan valid dan layak digunakan untuk analisis kandungan logam pada sampel pupuk dan limbah POME.

Analisis kandungan logam pada pupuk organik padat menunjukkan bahwa unsur kalium (K) dalam bentuk K_2O berada pada kisaran 241,80–242,00 mg/L dengan kadar setara sekitar 24,18–24,20%. Nilai ini mengindikasikan bahwa pupuk organik yang dianalisis memenuhi standar mutu sebagai sumber unsur hara makro utama sesuai SNI 7763:2018. Kalium memiliki peran penting dalam proses fisiologis tanaman, seperti regulasi tekanan osmotik, aktivasi enzim, serta pembentukan hasil panen. Sementara itu, logam Zn sebagai unsur mikro esensial terdeteksi dalam konsentrasi rendah, yaitu 0,6650–0,6700 mg/L atau setara 0,0665–0,0670%, yang masih berada dalam batas aman (Tabel 2). Keberadaan Zn dalam jumlah kecil tetap diperlukan dalam mendukung aktivitas enzimatik dan metabolisme tanaman. Rendahnya variasi antar sampel menunjukkan tingkat homogenitas yang baik serta mengindikasikan keandalan metode analisis yang digunakan (David et al., 2025; Hou et al., 2020; Munadi et al., 2024).

Pada sampel pupuk dolomit (Tabel 2), kandungan magnesium (Mg) dalam bentuk MgO berada pada kisaran 0,9550–0,9570 mg/L (setara 9,55–9,57%), sedangkan kalsium (Ca) dalam bentuk CaO berkisar antara 1,7430–1,7610 mg/L (setara 17,43–17,61%). Nilai tersebut sesuai dengan standar mutu dolomit pertanian berdasarkan SNI 02-2804-2005, sehingga menunjukkan bahwa bahan tersebut memiliki kualitas yang baik sebagai sumber unsur hara sekunder. Secara agronomis, keberadaan Ca dan Mg sangat berperan dalam memperbaiki sifat kimia tanah, terutama dalam meningkatkan pH tanah masam, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara lainnya bagi tanaman (Firlana et al., 2025; Munadi et al., 2024; Tanprasertsuk et al., 2022).

Hasil analisis limbah POME menunjukkan bahwa logam tembaga (Cu) dan seng (Zn) terdeteksi masing-masing pada kisaran 0,6102–0,7779 mg/L dan 0,8993–1,7445 mg/L (Tabel 2). Konsentrasi ini masih berada di bawah ambang batas baku mutu limbah cair industri kelapa sawit berdasarkan Permen Lingkungan Hidup

No. 5 Tahun 2014, sehingga dapat dikategorikan aman terhadap lingkungan. Logam berat timbal (Pb) tidak terdeteksi secara signifikan (<LOD) pada kedua sampel, yang menunjukkan bahwa kontribusi logam ini terhadap potensi pencemaran sangat rendah. Sementara itu, logam kadmium (Cd) hanya terdeteksi pada salah satu sampel dengan konsentrasi yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,0048 mg/L, jauh di bawah batas ambang yang diperbolehkan. Temuan ini mengindikasikan bahwa limbah POME yang dianalisis memiliki tingkat pencemaran logam berat yang rendah dan relatif aman, terutama apabila dikelola dan dimanfaatkan dengan prinsip pengelolaan limbah yang tepat (Hashiguchi et al., 2020; Karamina et al., 2021; Mohammad et al., 2021; R. D. Putri et al., 2024).

Hasil penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan temuan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa pupuk organik dan dolomit umumnya mengandung unsur hara makro dan sekunder dalam jumlah signifikan, khususnya K, Ca, dan Mg, yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Kandungan Zn sebagai unsur mikro juga terdeteksi dalam konsentrasi rendah dan masih berada dalam kisaran aman bagi tanaman (Munadi et al., 2024). Pada limbah POME, logam seperti Cu dan Zn umumnya ditemukan dalam konsentrasi rendah hingga sedang, sedangkan logam berat seperti Pb dan Cd cenderung tidak terdeteksi atau berada pada konsentrasi sangat rendah, bergantung pada kondisi proses industri dan sumber bahan baku (Rusdianto et al., 2023; Veranica et al., 2024).

Pendekatan penelitian ini mencakup analisis kandungan logam pada tiga jenis sampel yang saling terkait dalam sistem industri kelapa sawit, yaitu pupuk organik padat, dolomit, dan limbah POME, melalui metode analisis yang terintegrasi. Selain menyajikan data kadar logam, hasil penelitian juga dikaji berdasarkan kesesuaiannya terhadap standar mutu nasional serta implikasinya terhadap aspek lingkungan. Secara keseluruhan, distribusi logam yang diperoleh menunjukkan bahwa unsur-unsur yang terdeteksi masih berada dalam kisaran yang mendukung fungsi agronomis sekaligus memenuhi aspek keamanan lingkungan (Rusdianto et al., 2023; Sihotang et al., 2022; Veranica et al., 2024). Hal ini mengindikasikan bahwa sampel yang dianalisis memiliki potensi untuk dimanfaatkan secara berkelanjutan dengan tetap memperhatikan pengendalian kualitas guna mencegah akumulasi logam dalam jangka panjang.

Temuan ini memberikan implikasi dalam mendukung *Sustainable Development Goals*, khususnya;

- SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*) melalui pemantauan kualitas limbah cair industri untuk mencegah pencemaran sumber daya air
- SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) melalui pengelolaan limbah industri yang lebih bertanggung jawab
- SDG 15 (*Life on Land*) melalui penggunaan pupuk yang aman dalam menjaga kesuburan tanah.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kandungan logam pada pupuk dan limbah POME serta dapat menjadi dasar dalam pengelolaan limbah dan perumusan kebijakan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

Penutup

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam pada pupuk dan limbah POME di wilayah Riau masih memenuhi standar yang berlaku. Pupuk organik dan dolomit mengandung unsur hara esensial (K, Ca, Mg) yang mendukung fungsi agronomis, sedangkan logam pada limbah POME (Cu dan Zn) berada di bawah baku mutu, dengan Pb tidak terdeteksi dan Cd sangat rendah. Hal ini menunjukkan potensi dampak lingkungan yang rendah serta peluang pengelolaan limbah secara berkelanjutan. Temuan ini mendukung pencapaian SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*), SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), dan SDG 15 (*Life on Land*).

Saran

Disarankan kepada industri kelapa sawit untuk melakukan pemantauan kandungan logam pada pupuk dan limbah POME secara berkala serta mengoptimalkan proses pengolahan limbah guna menjaga kualitas lingkungan. Pemanfaatan limbah POME sebagai pupuk perlu dilakukan secara terkontrol untuk mencegah akumulasi logam dalam jangka panjang. Selain itu, pemerintah diharapkan memperkuat pengawasan dan implementasi regulasi terkait pengelolaan limbah industri, sementara penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji dampak jangka panjang terhadap tanah dan tanaman.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada mitra Program Studi Kimia UMRI, yaitu Lab pengujian Central Plantation, Lab pengujian PSMB Pekanbaru, dan Laboratorium Konstruksi PUPR atas dukungan fasilitas serta kerja sama dalam pelaksanaan analisis. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil kegiatan kuliah lapangan yang melibatkan mahasiswa Program Studi Kimia UMRI, sehingga kontribusi seluruh pihak sangat berarti dalam mendukung terselenggaranya penelitian ini.

Daftar Pustaka

Agustiyar, F., Umar, W. K., & Guritno, A. (2022). Validation of calcium (Ca) analysis in dolomite fertilizer using atomic absorption spectrophotometer (AAS). *Anjoro: International Journal of Agriculture and Business*, *3*(1), 7–18. https://doi.org/10.31605/anjoro.v3i1.1417

Ali, F. F., Al-Rawi, A. S., Aljumialy, A. M., & Ezzat, M. O. (2024). Dolomite utilization for removal of Zn^{2+} and Cu^{2+} ions from wastewater before determination by flame atomic absorption spectroscopy. *Anal. Methods Environ. Chem. J.*, *7*(2), 74–88.

Andriani, T., Agustin, F., Chadijah, S., Adawiah, S. R., & Nur, A. (2022). Analisa Logam Berat Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Kerang Hijau (Perna viridis) yang Beredar di Pelelangan Ikan Paotere Kota Makasar. *Chimica et Natura Acta*, *10*(3), 112–116.

Asmorowati, D. S., Azmi, K. U., & Sumarti, S. (2025). Optimization of the AAS Method with Variations in Air Speed, Wavelength, and Light Current. *Indo. J. Chem. Sci.*, *14*(2), 57–65.

Asmorowati, D. S., Sumarti, S. S., & Kristanti, I. (2020). Perbandingan Metode Destruksi Basah dan Destruksi Kering untuk Analisis Timbal dalam Tanah di Sekitar Laboratorium Kimia FMIPA UNNES. *Indo. J. Chem. Sci.*, *9*(3), 169–173.

Badan Standardisasi Nasional. (2005). *Dolomit untuk pertanian* (SNI 02-2804-2005). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2018). *Pupuk organik padat* (SNI 7763:2018). Badan Standardisasi Nasional.

BPS. (2024). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023*. https://www.bps.go.id/id/publication/2024/11/29/d5dcb42ab730df1be4339c34/statistik-kelapa-sawit-indonesia-2023.html

David, D., Sari, M. K., & Siregar, S. H. (2025). Analysis of Phosphorus And Potassium As Macronutrients And Zinc As A Micronutrient In Solid Organic Fertilizer Derived From Biowaste As An Applied Science Innovation Supporting SDG 2, 9, And 12. *Urecol Journal. Part D: Applied Sciences*, *3*(1), 1–15.

de A. Costa, E. C. T., Santana, J. de J., Campos, V. de O., Barbosa, F. F., & Patience, G. S. (2026). Experimental methods in chemical engineering : Atomic absorption spectrometry — AAS. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *January*, 1–19. https://doi.org/10.1002/cjce.70314

Faqihuddin, F., & Ubaydillah, M. I. (2021). PERBANDINGAN METODE DESTRUKSI KERING DAN DESTRUKSI BASAH INSTRUMEN SPEKTROFOTOMETRI SERAPAN ATOM (SSA) UNTUK ANALISIS LOGAM. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Riset Dan Pengabdian*, *86*, 121–127.

Firlana, F., Nelvia, N., Zul, D., & Kumbara, K. (2025). Kadar Hara Kelapa Sawit pada Lahan Gambut yang Diaplikasi Mikoriza. *Jurnal Agrotek Tropika*, *13*(4), 1153–1162.

Grebneva-balyuk, O. N. (2022). A New Method for Finding the Limits of Quantification of Elements, Estimating Dynamic Range, and Detecting Matrix and Interelement Interferences in Spectral Analysis (Atomic Absorption Spectrometry and ICP Analysis Methods). *Journal of Analytical Chemistry*, *77*(1),

66–80. https://doi.org/10.1134/S106193482201004X

Hadianto, I., K, S. D., Latifah, N., & Rafif, M. R. (2026). Validasi Metode Analisis Kalsium Pada Bungkil Kedelai Dengan Metode Atomic Absorption Specthophotometry (AAS). *Indonesian Journal of Laboratory*, *9*(1), 28–35.

Harvey, D. (2000). *Modern analytical chemistry* (1st ed.). McGraw-Hill.

Hashiguchi, Y., Zakaria, M. R., Maeda, T., Yusoff, M. Z. M., Hassan, M. A., & Shirai, Y. (2020). Toxicity identification and evaluation of palm oil mill effluent and its effects on the planktonic crustacean Daphnia magna. *Science of the Total Environment*, *710*, 136277. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136277

Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. ., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Earth & Environment*, 1–16. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y

Jijingi, H. E., Yazdi, S. K., & Abakr, Y. A. (2025). Bioremediation of heavy metals in palm oil mill effluent (POME) using Chlorella vulgaris : A biological approach. *Cleaner Water*, *4*(April), 100094. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100094

Karamina, H., Murti, A. T., & Mujoko, T. (2021). Kandungan Logam Berat Fe, Cu, Zn, Pb, Co Br pada Air Lindi di Tiga Lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Dadaprejo, Kota Batu, Dau dan Supit Urang, Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmiah Hijau Cendekia*, *6*(September), 51–57.

Karno, R., Arisoesilaningsih, E., Mustafa, I., & Siswanto, D. (2024). Physicochemical Properties of Wastewater from Palm Oil Mill Secondary Effluent (POMSE) for Water Evaluation Quality. *BIO Web of Conferences*, *117*(01039), 1–9.

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang baku mutu air limbah*. KLHK.

Kladsomboon, S., Jaiyen, C., Choprathumma, C., Tusai, T., & Apilux, A. (2020). Heavy metals contamination in soil, surface water, crops, and resident blood in Uthai District, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. *Environmental Geochemistry and Health*, *42*(2), 545–561. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00388-2

Maharani, E. P., Briliana, H., Putri, E. H., Faraditta, F. S., & Az-zhaffirah, A. R. (2024). A Comprehensive Review on Atomic Absorption Spectroscopy: Principles, Techniques and Applications. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, *10*(15), 20–29.

Mititelu, M., Neacsu, S. M., Busnatu, S. S., Udriste, A. S., Andronic, O., Lacraru, A. E., Ionita-Mindrican, C.-B., Lupuliasa, D., Negrei, C., & Olteanu, G. (2025). Assessing Heavy Metal Contamination in Food: Implications for Human Health and Environmental Safety. *Toxicology Reports*, *13*(333), 1–49.

Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. *Processes*, *9*, 1–27392.

Munadi, R., Nurdin, N., & Nurjanna, N. (2024). UJI KANDUNGAN UNSUR HARA Ca, Mg DAN Fe PUPUK ORGANIK CAIR (POC) DARI LIMBAH BATANG PISANG KEPOK (*Musa acuminata balbisiana C.*). *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, *6*(1), 10–13.

Punia, P., Bharti, M. K., Dhar, R., Thakur, P., & Thakur, A. (2022). Recent Advances in Detection and Removal of Heavy Metals from Contaminated Water. *ChemiBioEng Reviews*, *9*(4), 351–369. https://doi.org/10.1002/cben.202100053

Putri, I. S., Damara, D. S., Akifah, M. N., & Utami, M. R. (2025). Article Review: Evaluation of the Effectiveness of Sample Preparation Comparison in Atomic Absorption Spectrophotometry (SSA) Instrument for Analyzing Lead Metal. *Journal of Pharmaceutical and Sciences*, *8*(3), 1961–1969.

Putri, R. D., Rofilah, S., Susetyo, E. K., & Arifi, N. (2024). Analisis Kandungan Logam Berat Fe, Ni, Pb, dan Cr di Kawasan Muara, Mangrove, dan Green Canyon Sungai Cijulang di Pangandaran. *Jurnal Kartika Kimia*, *7*(1), 1–10.

Rahmadhani, L. S., & Utami, M. (2023). Determination of Nickel (Ni) Metal Levels in Drinking Water at the Laboratory of Health and Medical Divices Testing in Central Java Province. *IJCR-Indonesian Journal of Chemical Research*, *8*(2), 35–42.

Riyanto, (UII). (2014). *VALIDASI & VERIFIKASI METODE UJI*.

Rusdianto, R., Ivandi, S., Kusmita, T., & Apriliazmil, I. (2023). Pengukuran Kualitas Air Limbah Sawit berdasarkan Baku Mutu Air Limbah menggunakan AAS. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, *4*(1), 1–8. https://doi.org/https://doi.org/10.33019/jrfi.v4i1.3554

Shrivastava, A., & Gupta, V. B. (2011). Methods for the determination of limit of detection and limit of quantitation of the analytical methods. *Chronicles of Young Scientists*, *2*(1), 21–25. https://doi.org/10.4103/2229-5186.79345

Sihotang, J. M., Marbun, P., & Sembiring, M. (2022). Pengaruh pemberian pupuk N , P , K , Mg dan Jarak Tanam terhadap Sifat Kimia Tanah dan Produksi Kacang Panjang (*Vigna sinensis L .*). *Jurnal Agroteknologi*, *10*(02), 17–23.

Sisnayati, S., Dewi, D. S., Komala, R., Meilianti, M., & Faizal, M. (2022). Pengolahan limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) menggunakan proses aerasi dalam kolom aerator plat berlubang. *Jurnal Tenik Kimia*, *28*(3), 7–15.

Souto, M. R. S., Pimenta, A. M., Catarino, R. I. L., Leal, M. F. C., & Sim, E. T. R. (2025). Heavy Metals in Milk and Dairy Products : Safety and Analysis. *Pollutants*, *5*(29), 1–25.

Sugito, S., Marliyan, S. D., & Apriana, H. D. (2022). Uji Kinerja Instrumen Spektrofotometer Serapan Atom (AAS) Shimadzu 6650 F terhadap Logam Fe, Zn pada Kegiatan Praktikum Kimia Anorganik di UPT Laboratorium Terpadu UNS. *Indonesian Journal of Labor*, *5*(2), 83–89.

Tangketasik, A., Yoga, I. K. W., Suarta, I. W., & Supadma, A. A. N. (2024). Validasi Metode Uji Kalium pada Analisis Tanah menggunakan Atomic Absorption

Spectrophotometer (AAS) AA-7000 Shimadzu. *Indonesian Journal of Laboratory*, *7*(2), 66–72.

Tanprasertsuk, J., Tate, D. E., & Shmalberg, J. (2022). Roles of plant-based ingredients and phytonutrients in canine nutrition and health. *J Anim Physiol Anim Nutr*, *106*, 586–613. https://doi.org/10.1111/jpn.13626

Tomas, J., Sari, M., Junialdi, R., & Edinov, S. (2025). Recycling of Kepok Banana Peel Waste (*Musa acuminata Var*. balbisiana.) and Compost Quality Analysis by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). *TOFEDU : The Future of Education Journal*, *4*(7), 3727–3735.

UN. (2025). *The Sustainable Development Goals Report 2025*.

Veranica, V., Rahayu, A., Maryudi, M., Lim, L. W., & Anggresani, L. (2024). A Review : Analysis Atomic Absorption Spectrometry (AAS) of Heavy Metal Content in Crude Palm Oil. *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, *2*(1), 29–34.

Zain, A. A., & Malik, Y. (2024). Verifikasi metode menggunakan atomic absorbtion spectrophotometer (AAS) analisis kadar Natirum (Na) dalam bijih nikel. *Jurnal Penelitian Sains*, *26*(3), 284–289.

Zakaria, A., Aynuddin, A., & Djasmasari, W. (2021). Analisis Pengukuran Logam Cu , Fe , Mn , dan Pb pada Variasi Preparasi pH dan Suhu Larutan. *JURNAL WARTA AKAB*, *45*(2), 38–42. https://doi.org/10.55075/wa.v45i2.31

Biografi Singkat Penulis



Meidita Kemala Sari adalah akademisi di bidang kimia yang berfokus pada pendidikan dan penelitian lingkungan. Minat penelitiannya meliputi adsorpsi limbah dan material berbasis karbon dari biomassa. Ia juga terlibat dalam publikasi ilmiah dan pembelajaran berbasis isu global seperti SDGs. Melalui pendekatan aplikatif, ia berupaya mengintegrasikan ilmu kimia dengan kebutuhan industri dan tantangan era Industri 5.0.